http://cnum.cnam.fr
Conservatoire numérique des Arts & Métiers

Auteur ou collectivité : Pacoret, Etienne
Auteur : Pacoret, Etienne
Titre : La technique de la houille blanche. Usines hydroélectriques. Transport de l'énergie électrique. Electrométallurgie - Electrochimie.

Auteur : Pacoret, Etienne
Titre du volume : La technique de la houille blanche. Usines hydroélectriques. Transport de l'énergie électr...

Adresse : Paris : H. Dunod et E. Pinat, 1919
Collation : XXXVI-1197 p. : pl. et fig. ; 24 cm
Cote : CNAM-BIB 8 Di 68 II (1)
Sujet(s) : Centrales hydroélectriques
Note : Il y a un saut de page de 460 à 465 dans l'ouvrage papier.

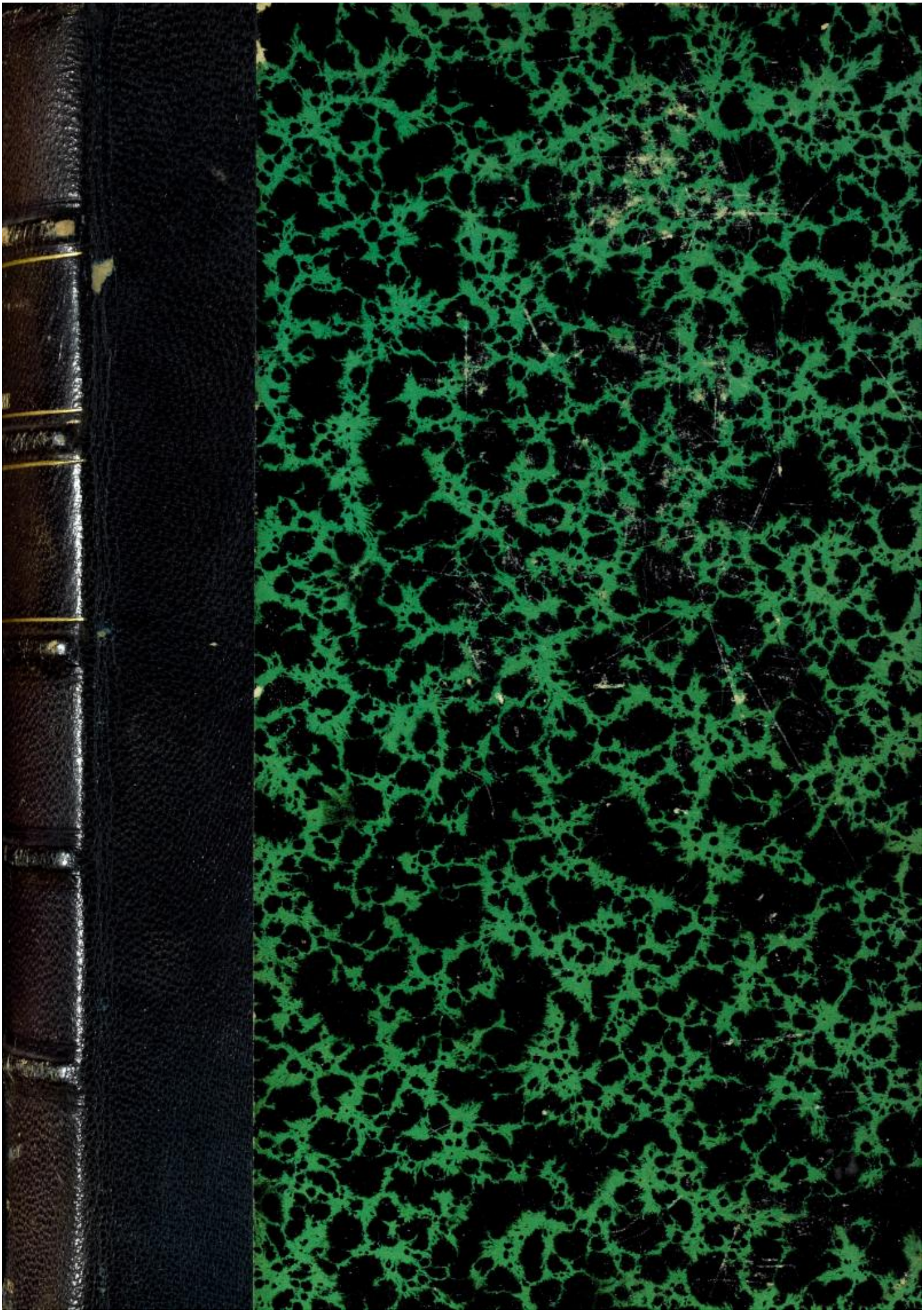
Date de mise en ligne : 08/11/2016
Langue : Français

URL permanente : http://cnum.cnam.fr/redir?8DI68II.1

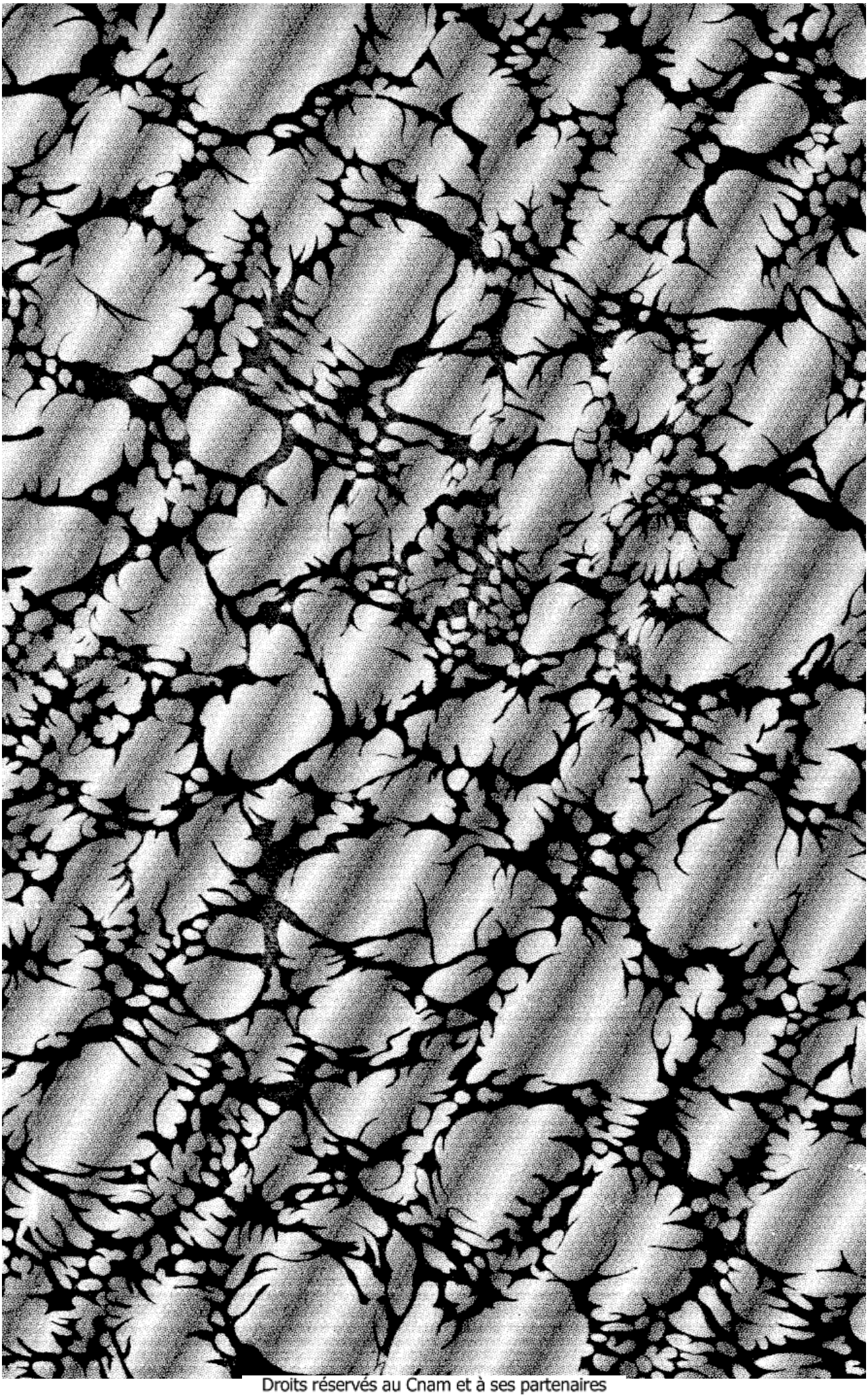
La reproduction de tout ou partie des documents pour un usage personnel ou d'enseignement est autorisée, à condition que la mention complète de la source (*Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*) soit indiquée clairement. Toutes les utilisations à d'autres fins, notamment commerciales, sont soumises à autorisation, et/ou au règlement d'un droit de reproduction.

You may make digital or hard copies of this document for personal or classroom use, as long as the copies indicate *Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*. You may assemble and distribute links that point to other *CNUM* documents. Please do not republish these PDFs, or post them on other servers, or redistribute them to lists, without first getting explicit permission from *CNUM*.

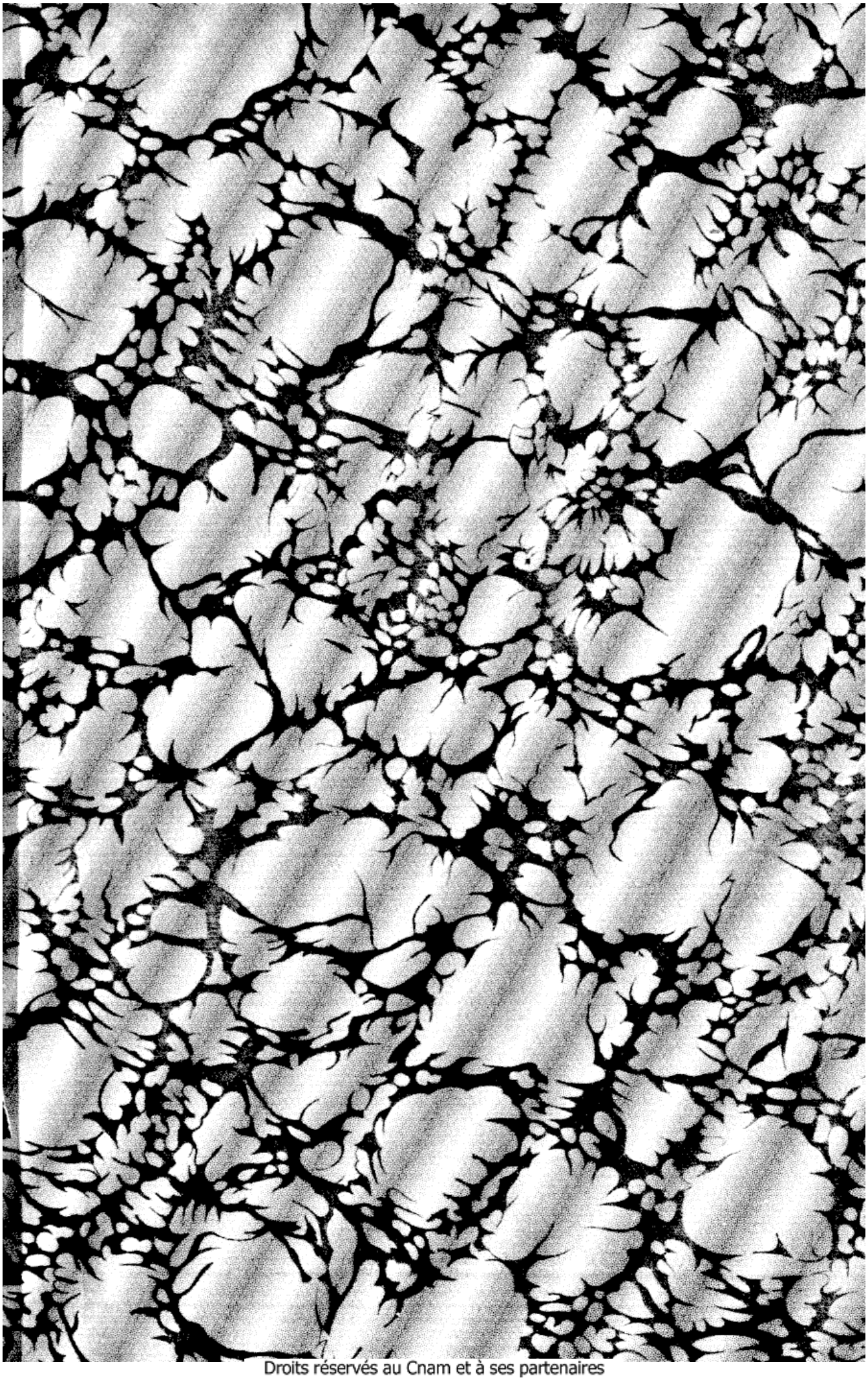
PDF créé le 7/11/2016



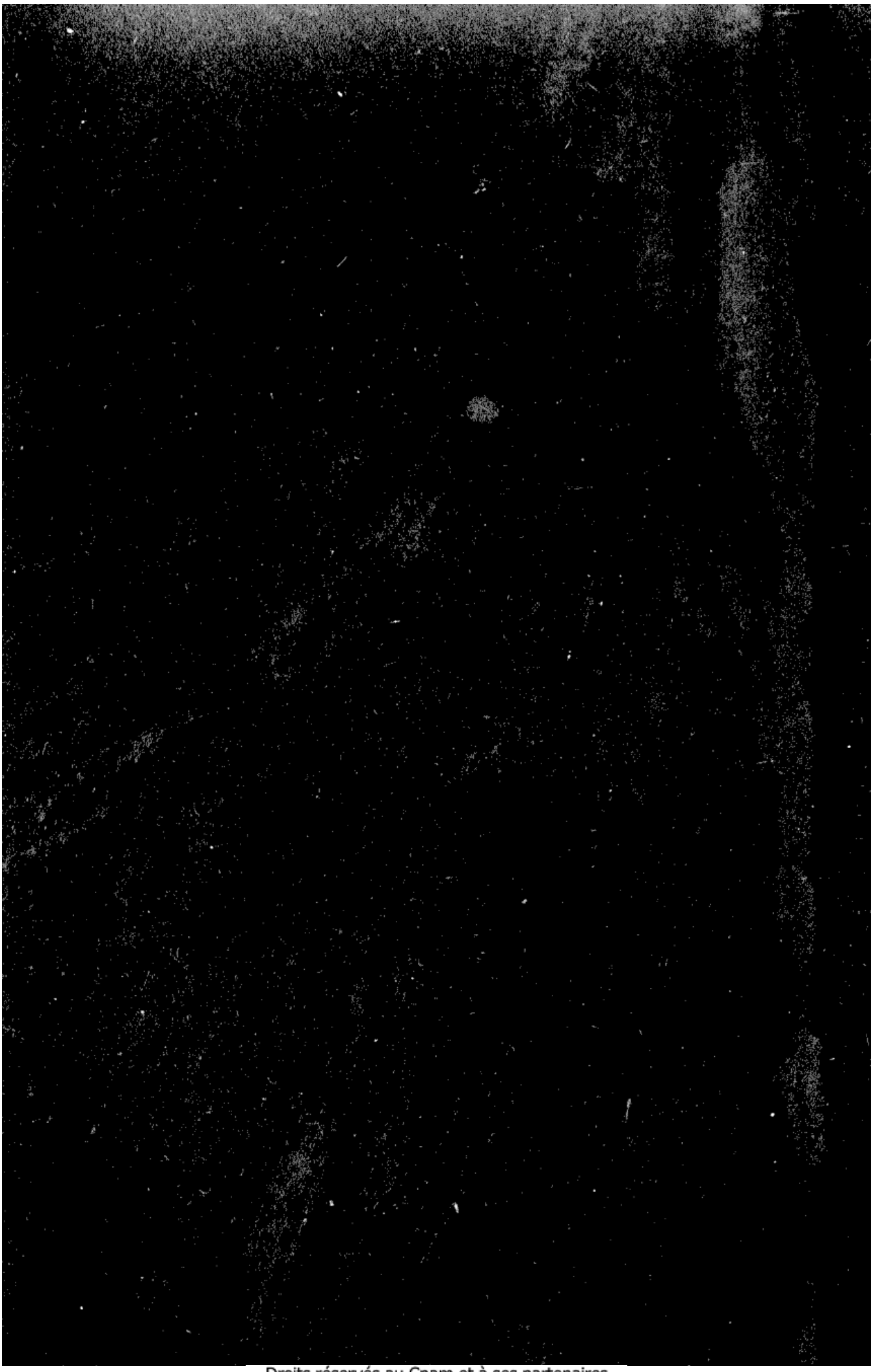
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



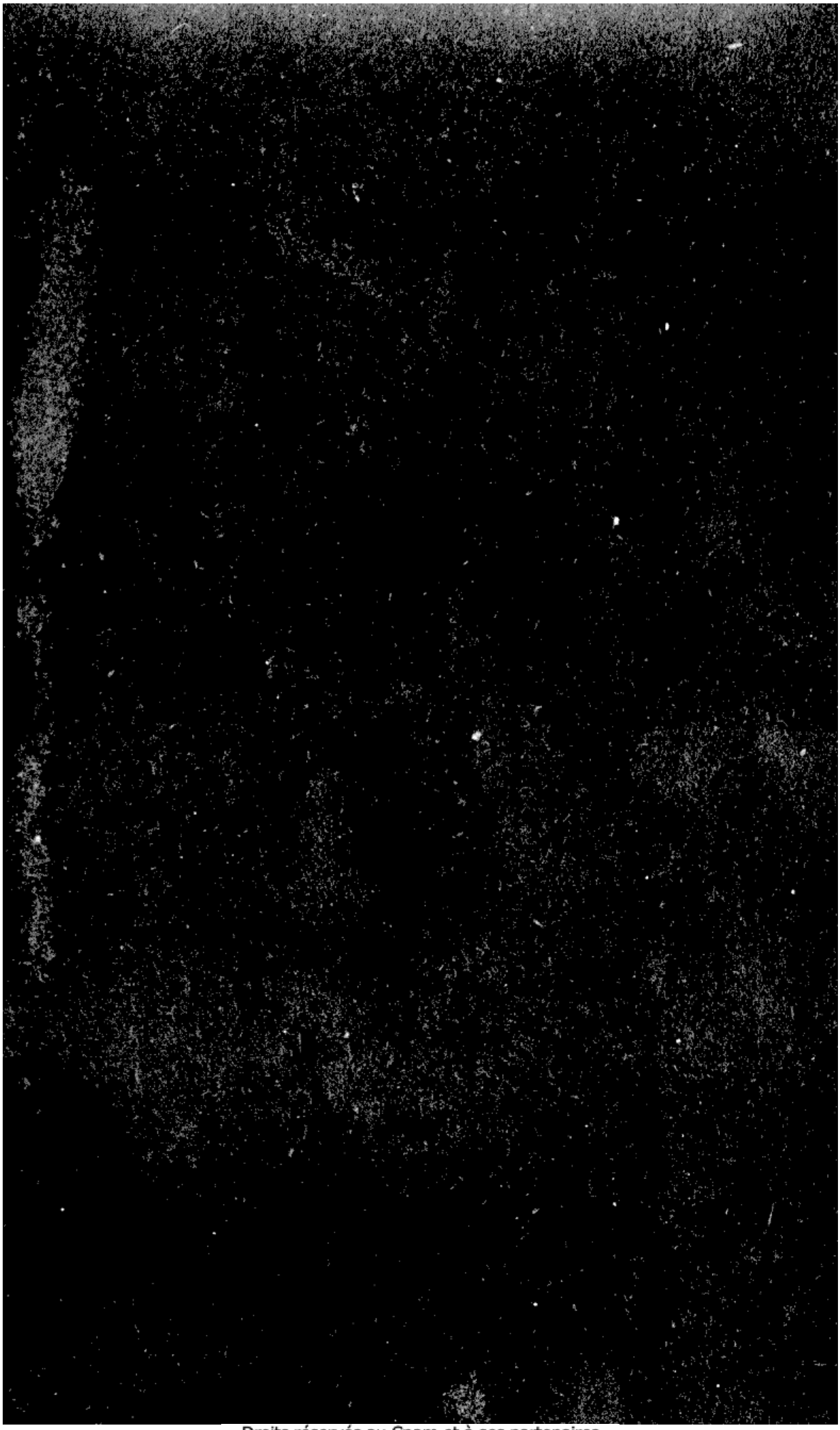
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

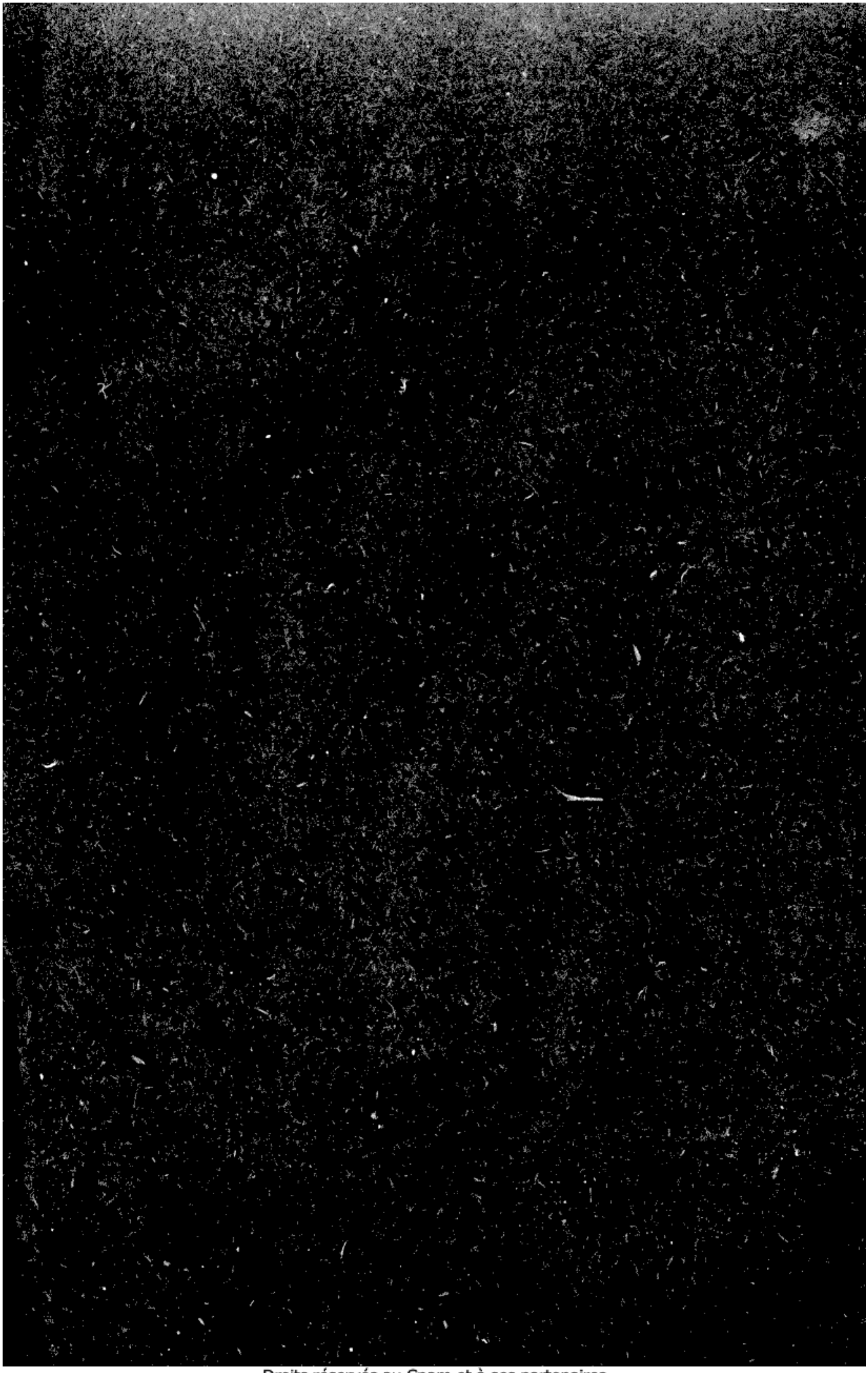
LA TECHNIQUE

DE LA

HOUILLE BLANCHE

TOME I

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8° Di. 68 #
8° Di 68 (2)

LA TECHNIQUE

DE LA

HOUILLE BLANCHE

USINES HYDROÉLECTRIQUES
TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
ÉLECTROMÉTALLURGIE — ÉLECTROCHIMIE

TOME I

CRÉATION ET AMÉNAGEMENT DES CHUTES D'EAU
ET DES USINES HYDROÉLECTRIQUES

HISTORIQUE — HYDROLOGIE — HYDRAULIQUE
RÉGIMES DES COURS D'EAU — BASSINS — CANAUX
LACS — RÉSERVOIRS ARTIFICIELS
JAUGEAGES — BARRAGES — CONDUITES FORCÉES — TURBINES
AMÉNAGEMENTS DES CHUTES D'EAU
USINES HYDROÉLECTRIQUES — USINES CENTRALES
PROJETS DE CHUTES D'EAU ET D'USINES HYDROÉLECTRIQUES
LÉGISLATION ET RÉGLEMENTATION DES COURS D'EAU
EN FRANCE ET A L'ÉTRANGER

OUVRAGE COURONNÉ PAR LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE
PAR LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE D'AMIENS ET PAR LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DE ROUEN

BIBLIOTHÈQUE DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
8° Di. 68 # (2)
Février 1924

PAR

ÉTIENNE PACORET
INGÉNIEUR CIVIL

PRÉFACE DE M. **A. BLONDEL**
INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
PROFESSEUR A L'ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES
MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

BIBLIOTHÈQUE CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS

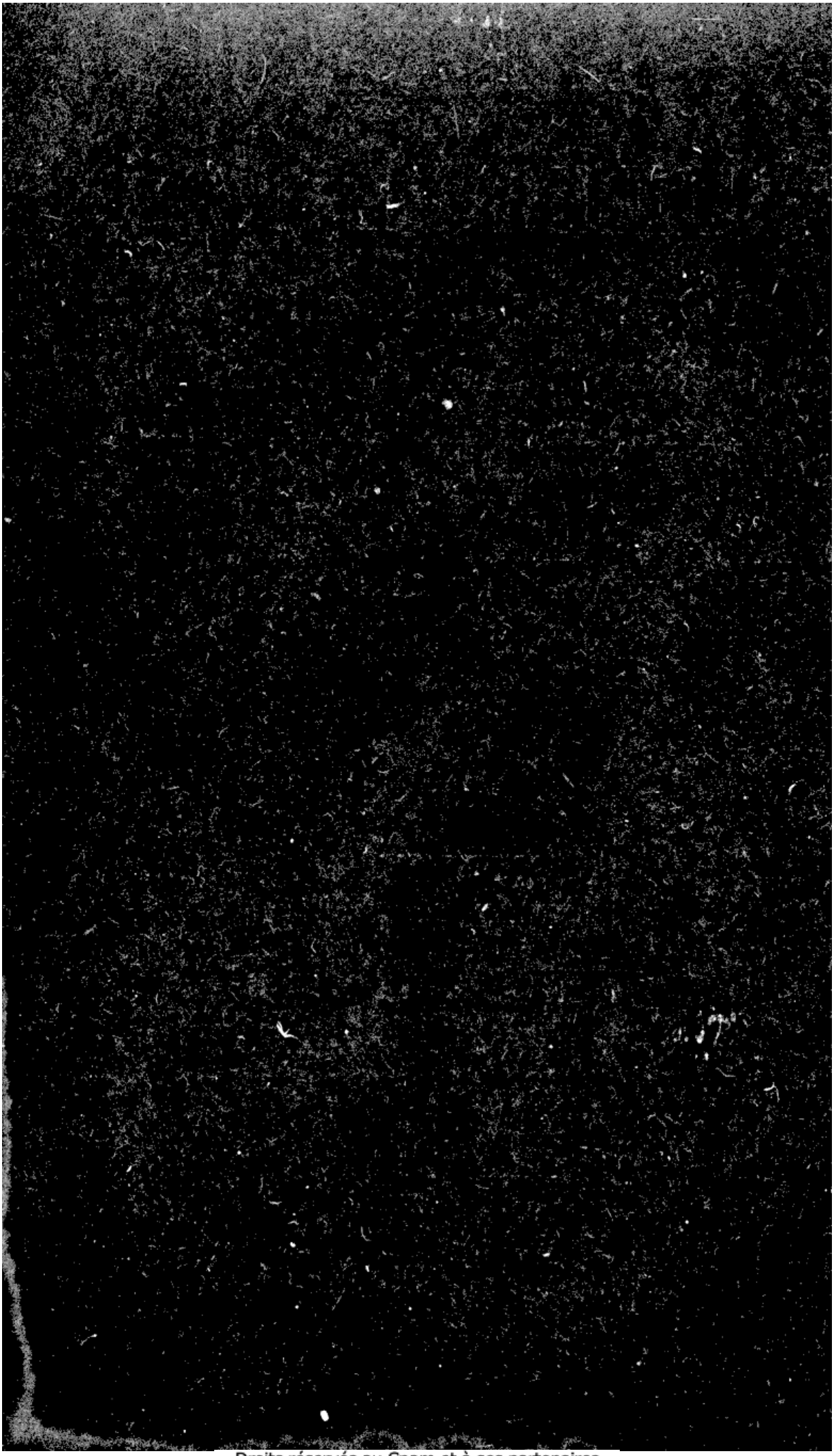
TROISIÈME ÉDITION COMPLÈTEMENT REFONDUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

PARIS (VI^e^)
H. DUNOD ET E. PINAT, ÉDITEURS
47 et 49, Quai des Grands-Augustins

1919

Tous droits de reproduction, de traduction et adaptation réservés pour tous pays.
Copr. by Dunod et Pinat 1919.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PRÉFACE

Onze ans se sont écoulés depuis l'époque où je présentais aux lecteurs la première édition du grand ouvrage de M. Pacoret. A ce moment se terminait la période des découvertes et des grands progrès techniques qui avait créé et développé l'industrie de la houille blanche ; ma préface de 1907 leur était naturellement consacrée. Je ne reproduirai pas aujourd'hui ces considérations, qui ont d'ailleurs trouvé place en grande partie dans l'historique écrit par M. Pacoret. Mais j'exposerai quelques remarques sur un sujet de plus grande actualité : l'influence de la guerre sur le développement présent et futur de la houille blanche et de ses applications.

La guerre a donné, comme chacun le sait, une forte impulsion au développement de la houille blanche ; l'Histoire dira un jour plus en détail quelle importance capitale a eue pour les industries de guerre l'appoint de nos réserves de houille blanche ; cet appoint a procuré d'autre part, au point de vue financier, une économie d'environ 2 milliards de francs sur nos importations. Des publications faites par des personnalités officielles fort autorisées, M. le Colonel de la Brosse, MM. René Tavernier, Paul Lévy-Salvador, le Commandant H. Cahen, et par des auteurs très documentés, MM. Pawlowski, Soubrier, etc., ont dressé déjà un bilan provisoire du développement de nos entreprises hydro-électriques assez détaillé pour qu'il me suffise d'y renvoyer le lecteur et de rappeler ici les caractéristiques principales de ces initiatives. Elles ont montré, contrairement à l'opinion de certains esprits chagrins, qu'il existe en France une vitalité industrielle.

Dès août 1915, avec un remarquable esprit d'initiative, nos ingé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nieurs ont entrepris, sans attendre le résultat de nouvelles études, l'exploitation plus intensive de nos installations hydro-électriques. Il fallait, en effet, dans un temps relativement court, récupérer d'une autre façon le combustible que ne pouvaient plus nous fournir les mines des régions envahies et celles inexploitables de la zone des armées(1). On reprit alors d'anciens projets et on songea à en établir de nouveaux. Il y eut là, comme l'a signalé M. de la Brosse, qui a donné de précieuses directions à ces efforts, un fait d'autant plus remarquable que les circonstances étaient par beaucoup de côtés défavorables : « la main-d'œuvre était pour ainsi dire introuvable, les transports difficiles, les bois de construction avaient doublé de prix, les fers plus que triplé, le crédit s'était énormément resserré et malgré ces obstacles, on a assisté à ce spectacle imprévu mais réconfortant de voir des sociétés réputées pour leur prudence engager d'énormes capitaux, de grands chantiers s'ouvrir, se peupler d'ouvriers recrutés dans les milieux les plus variés et recevoir peu à peu tous les matériaux nécessaires. »

C'est ainsi que des usines dont on ne prévoyait l'aménagement que dans un temps relativement éloigné, sont actuellement en activité. D'autres stations, et elles sont en grand nombre, ont complété ou renforcent leurs installations ; de sorte que la puissance aménagée dans notre pays peut atteindre 1.650.000 chevaux d'étiage à la fin de 1918, contre 650.000 chevaux générés dans les usines thermiques (dont plus de 300.000 dans la région parisienne).

Pendant toute la durée de la guerre, la puissance de ces chutes fut au service de la France. L'électro-chimie a développé le matériel chimique de guerre, produits nitrés, chlorés, phosphorés, etc. L'électrométallurgie a forgé des armes. Les transports électriques d'énergie ont alimenté les moteurs des usines de guerre ; les conduites sous haute pression d'A. Bergès ont servi à emboutir des obus.

Il est juste d'ajouter que les pouvoirs publics, auxquels avant la guerre on reprochait justement une inertie qui a retardé de plus de dix ans certaines entreprises, ont aidé de leur mieux dans cette période critique les initiatives industrielles ; non seulement les

(1) Après la Marne, notre bassin houiller exploitable était, en effet, ramené à 26 0 / 0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

délais nécessaires pour les décrets des concessions ont été réduits, mais l'État a même favorisé les entreprises importantes par des avances opportunes. De même les bénéfices de guerre faits par les grandes entreprises et qui ont été critiqués par ailleurs, ont joué un rôle utile en permettant à certaines Sociétés d'engager d'importants capitaux nouveaux dans les entreprises de houille blanche auxquelles elles répugnaient à s'intéresser en temps normal.

Ces conditions favorables ne se continueront évidemment pas après la guerre ; mais il y aura pendant longtemps une abondance de capitaux flottants et il est à souhaiter qu'ils s'emploient de la façon la plus avantageuse pour notre économie nationale.

Autrefois, quand nous possédions à l'étranger d'importants placements qui nous rendaient créditeurs de notre balance commerciale, malgré notre faible exportation, il n'y avait pas d'inconvénient à admettre en France l'introduction des charbons étrangers, vendus à un prix peu élevé, et le développement des chutes d'eau était ainsi limité par leur prix de revient, comparé à celui des usines à vapeur ; les progrès considérables réalisés dans la production de l'électricité par l'installation des turbines à vapeur réduisaient progressivement la consommation de charbon par KWH sortant des usines thermiques. Le prix d'installation du cheval thermique s'était abaissé considérablement par la concurrence ; l'automaticité introduite de plus en plus dans la conduite des machines et des chaudières réduisait d'autre part la main-d'œuvre nécessaire à la conduite de ces usines. C'est pourquoi j'appelais alors l'attention des hydro-électriciens sur les dangers de cette concurrence pour la vitalité des entreprises hydro-électriques.

Mais la guerre a changé complètement notre situation économique ; nos placements à l'étranger se sont considérablement réduits, nos houillères ont été dévastées, le prix de revient des machines thermiques a considérablement augmenté et le prix de la houille, qui a atteint pendant la guerre un niveau insensé, ne reviendra jamais au taux très bas qu'il avait avant la guerre. Ces conditions ont fait admettre par beaucoup que la comparaison s'était définitivement modifiée en faveur des chutes d'eau, et que des usines hydro-électriques médiocrement situées réaliseront des prix de revient de l'énergie inférieurs à ceux des centrales à vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais les frais d'installation des usines hydro-électriques ont augmenté parallèlement. Bien que les prix actuels du matériel et de la main-d'œuvre doivent certainement s'abaisser beaucoup dans un avenir plus ou moins rapproché, il semble que les frais de captation et d'équipement des chutes resteront après la conclusion de la paix à peu près doubles de ce qu'ils étaient il y a dix ans ; si l'on tient compte, d'autre part, du fait que le taux de l'intérêt de l'argent a augmenté de 50 0/0, on voit que dans les usines hydro-électriques à créer, le kilowatt installé entraînera des frais d'intérêt et d'amortissement annuels environ triples par rapport à leurs valeurs antérieures. Quand donc la houille reviendra, par la reprise des transports maritimes, par la livraison de houilles allemandes à nos Sociétés houillères dont les installations ont été endommagées et par le jeu de la concurrence inévitable des charbonnages étrangers sur le marché mondial, à un prix nouveau qui ne dépassera pas le double de ce qu'il était autrefois, la comparaison ne sera sans doute pas plus à l'avantage de la houille blanche qu'avant la guerre. Mais il ne suffit plus désormais de considérer les prix de revient du kilowatt, il faut veiller à améliorer constamment notre balance commerciale en réduisant les exportations de numéraires à l'étranger pour l'acquisition des matières premières ; parmi ces matières, le charbon joue un rôle éminent, même quand le prix en est faussé par la surélévation des prix du frêt.

Dans la période qui a précédé la guerre, nos mines ne produisaient pas beaucoup plus des deux tiers du tonnage de charbon nécessaire à notre industrie (environ 60 millions de tonnes sur 80 millions que nous consommons). Le complément devait être emprunté soit aux autres combustibles, lignite, huile, pétrole, etc., soit aux charbons importés. Nous avons dû aussi acheter plus de 20 millions de tonnes de charbon en 1912, ce qui représentait au cours d'alors une somme dépassant légèrement 400 millions de francs. Pendant la guerre, la même importation occasionnait une dépense annuelle voisine de 5 milliards (1), correspondant à l'intérêt d'un capital de 100 milliards.

(1) D'après M. Paul Lévy-Salvador, chef du service technique de l'hydraulique agricole au Ministère de l'Agriculture.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est ainsi que nous avons pu calculer que l'usine de Génissiat sur le Haut-Rhône si elle avait été construite avant 1914, ainsi que les lignes de transport de l'énergie sur Paris, aurait permis non seulement d'amortir toutes les installations de cette entreprise par le bénéfice de 150 à 200 millions qu'elle aurait réalisé pendant les trois ou quatre premières années de la guerre, par la vente d'environ un milliard de kilowatt-heures, chaque année, mais encore d'éviter une sortie de numéraire d'environ 800 millions qu'a exigé l'achat du charbon nécessaire à produire la même énergie dans les usines à vapeur.

On pourra donc être amené par cette considération à installer en France — en vue de l'intérêt *national* et non pas des intérêts privés — des usines hydro-électriques, même si le prix de revient en est peu avantageux. Mais il va sans dire que dans ce cas, la communauté, profitant du résultat obtenu, devrait être appelée à subventionner les entreprises insuffisamment rémunératrices pour leur permettre de soutenir la concurrence contre le prix de l'énergie provenant des usines à vapeur brûlant des charbons importés. C'est seulement sous cet aspect qu'on devrait considérer la possibilité de l'intervention de l'État, ou d'autres communautés administratives dans la construction et l'exploitation des chutes d'eau.

* * *

Est-ce à dire que l'on doive entreprendre immédiatement, comme le propose la presse quotidienne, la mise en valeur de toutes nos richesses de houille blanche et la substitution générale de la houille blanche à la houille noire dans toutes les régions de la France où peut régner la houille blanche, c'est-à-dire au sud d'une ligne allant de La Rochelle à Belfort? Il faut être très réservé dans la réponse à cette question.

D'abord, il faudrait déterminer d'une manière définitive quelle est l'importance de la puissance brute disponible de nos chutes d'eau utilisables. Sans être trop optimiste, on peut l'évaluer à environ 10 millions de chevaux moyens, c'est-à-dire utilisables pendant plus de cent quatre-vingt jours par an. D'ailleurs, comme l'a jus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tement fait remarquer M. le Commandant H. Cahen, dans une communication au Congrès Général du Génie Civil (1917), les inventaires sont très variables ; et en principe, ils ne peuvent être exacts, car ils varient et progressent à mesure que se perfectionnent les méthodes d'exploitation, si bien qu'on arrive à l'heure actuelle à considérer des débits de trois mois.

Mais les statistiques ont cependant une valeur comparative. D'autre part, elles nous montrent que nous pourrions prétendre à la première place en Europe pour les forces hydrauliques ; et d'autre part, elles nous enseignent que, tandis que nous n'avions aménagé qu'à peine le 1 /10 environ de la puissance totale utilisable sur notre territoire, l'Allemagne, bien moins favorisée que nous au point de vue des ressources en houille blanche (un million et demi environ), utilisait avant la guerre environ le tiers de la puissance maximum que sont capables de lui fournir ses chutes.

Quand on se propose de remplacer le charbon par l'énergie électrique, on n'a pas à considérer l'économie d'énergie potentielle, mais l'économie en argent qu'on peut espérer réaliser par l'emploi de l'énergie hydroélectrique ; or elle n'est pas la même dans tous les cas ; en effet, 1 kilowatt-heure électrique produit *grosso modo* la même quantité de chaleur que 100 grammes de charbon environ, mais la même puissance mécanique en chevaux que 1 kilogramme au moins de charbon brûlé en marche industrielle (c'est-à-dire y compris les mises en feu), dans une machine fixe. L'énergie électrique permet donc une économie de charbon dix fois plus grande dans les applications mécaniques et électro-chimiques du courant électrique que dans les applications thermiques ; sous réserve cependant pour ces dernières que la concentration plus grande de chaleur obtenue peut donner à l'énergie électrique une supériorité marquée.

En fait, les industries électro-chimiques et électro-thermiques spéciales (aciers fins, ferros, etc.) peuvent utiliser avantageusement l'énergie électrique à bon marché (ne coûtant pas plus de 1 centime le kilowatt-heure) dans les limites où la surproduction ne gênera pas l'écoulement de leurs produits. Avant la guerre, ces industries exportaient les deux tiers de leur production ; elles avaient traversé plusieurs crises, notamment celle du carbure de calcium. Pendant la guerre, les industries des nitrates, de la cyanamide, des chlo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rates, ont été favorisées par les besoins de la Défense nationale ; de même l'électrométallurgie, que les mêmes causes ont rendue prospère : de 21.000 tonnes en 1913, la fabrication des aciers électriques de premier choix s'est élevée à plus de 60.000. Les ferros ont vu également la demande s'augmenter dans de grandes proportions. Mais il en a été de même dans d'autres pays, et la concurrence des usines très économiques de Scandinavie, de Finlande, du Canada, etc., rendra désormais la lutte plus difficile sur les marchés extérieurs. Il en est de même *a fortiori* pour nos productions d'aluminium, de carbure, de chlore, de sodium, etc., auxquelles la guerre avait donné un grand essor. Il faudra une grande habileté commerciale pour maintenir la prospérité de ces fabrications.

Plus complètement assuré est l'avenir des distributions d'énergie pour la force motrice.

Cependant, parmi les prévisions faites au début de l'exploitation de la houille blanche, il en est une que les événements paraissent vouloir démentir : c'est le développement (ou seulement le maintien) du travail à domicile dans les grandes villes et les campagnes par le petit moteur électrique. Malgré les avantages facilement apportés par la distribution de la petite force motrice dans les ateliers familiaux, les nécessités de la concentration industrielle font disparaître le travail à domicile, qui n'a pu concurrencer le travail à l'usine ; ce dernier réalise un prix de revient plus économique par suite de la réduction des frais généraux ; seule la main-d'œuvre des femmes et des enfants peut lutter avantageusement dans l'atelier à domicile, tandis que les hommes le désertent de plus en plus, aussi bien dans le Rhône, la Loire, le Puy-de-Dôme ou l'Eure qu'en Suisse. Le développement toujours attendu des applications de l'électricité dans l'agriculture reste également dans des limites encore bien modestes, soit au point de vue du nombre d'applications, soit surtout au point de vue de la consommation d'énergie ; les frais d'établissement sont encore trop élevés et seuls des Sociétés ou des Syndicats pourront supporter ces frais, surtout lorsqu'il s'agit d'outillage électrique pour le labourage. La seule utilisation agricole vraiment répandue jusqu'ici, celle du pompage, continuera à se développer dans toutes les régions où la clientèle sera suffisamment dense ; mais en général, pour toutes les applications agricoles,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on se plaint de la mauvaise utilisation et du coût élevé des réseaux qu'il faut construire.

La véritable utilisation de la force motrice est celle qui résultera de son emploi dans toutes les usines pour les manœuvres mécaniques y compris le levage et le transport des matières, dans les manufactures pour toutes les fabrications et dans les villes pour tous les services municipaux, pour la petite force motrice dans les ateliers, magasins et chez les particuliers (chez lesquels une publicité bien faite comme elle l'est dans les villes américaines finirait par produire une augmentation analogue de la clientèle), et d'autre part dans toutes les entreprises de transports publics sur voies ferrées et sur voies navigables.

Si l'on se préoccupe seulement de réduire l'importation de houille on ne fera pas de différence entre ces diverses utilisations ; si on se propose de favoriser l'exportation, on devra se préoccuper non seulement de réduire les frais de transport des matières, mais plus encore d'abaisser par la force motrice à bon marché le prix de toutes les transformations de ces matières dans les usines et ateliers, surtout lorsque la main-d'œuvre joue le rôle principal dans le prix de revient.

Dès qu'il s'agit de créer des débouchés à grande distance des chutes d'eau pour l'énergie électrique qu'elles produisent, apparaît le rôle capital de la technique mécanique et électrique dans le développement de la houille blanche, et la relation étroite qu'il y a entre les deux choses. On ne peut comprendre les progrès de l'industrie hydro-électrique que si l'on suit parallèlement les progrès de la science.

Lors de la dernière édition de l'ouvrage de M. Pacoret (1910), se terminait une période remarquable de découvertes et de progrès scientifiques et techniques qui avait créé l'industrie de la houille blanche. Ces découvertes étaient caractérisées d'une part, au point de vue hydraulique, par le progrès de la construction des turbines hydrauliques, l'utilisation des hautes chutes, dont les promoteurs furent deux habitants de l'Isère : Fredet à Brignoud en 1867 (hauteur de conduite 160 mètres) et Bergès à Lancey en 1868 (hauteur 500 mètres), la régularisation des chutes par des lacs naturels ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

artificiels, et d'autre part, au point de vue électrique, par le transport de l'énergie à haute tension, découverte de Marcel Deprez, puis par le développement du transformateur à courant alternatif et l'invention du moteur à champ tournant par Tesla.

Entre 1900 et 1907 était survenue une série d'importants progrès techniques qui ont révolutionné les conditions plus profondément qu'on ne s'en est aperçu, la production de l'énergie électrique et son utilisation ; d'une part, le perfectionnement et l'augmentation de puissance et de rendement des turbines centripètes, l'amélioration de leurs procédés de régulation ; d'autre part, au point de vue électrique, l'apparition des isolateurs suspendus créés par Hewlett et l'emploi de conducteurs aériens en aluminium, l'amélioration des procédés d'isolation des transformateurs et l'augmentation de capacité de rupture des isolateurs à haute tension ; ces actions ont été très nettes pour ceux qui suivaient de près les problèmes du transport de l'énergie. C'est ainsi que quand il s'est agi de transmettre l'énergie du Haut-Rhône à Paris, on a pu substituer, en 1906, à un projet de transport à courant continu haute tension à 450 kilomètres, qui d'ailleurs n'était devenu possible que depuis peu (1900) par suite des perfectionnements des machines génératrices par M. Thury, un projet de transport triphasé à 120.000 volts avec une usine génératrice située dans les gorges étroites du Rhône et des lignes aériennes triphasées d'une capacité de 20.000 kilowatts chacune (1).

Le transport d'énergie hydro-électrique passait à cette époque par un tournant important de son histoire, et il faudrait une nouvelle évolution aussi importante de nos méthodes techniques pour modifier d'une manière sensible les méthodes actuellement utilisées.

---

(1) Qu'on me permette à cette occasion de signaler combien le monde industriel français était à cette époque peu au courant des progrès réalisés aux Etats-Unis. Notre projet fut considéré par la plupart d'entre eux comme chimérique parce qu'ils ne connaissaient ni l'installation de transport d'énergie 110.000 volts de Muskegon-Grand-Rapids, qui fonctionne avec un plein succès depuis 1905, mais sans interrupteur, ni les expériences parfaitemsnt probantes qui venaient d'être faites sur l'interrupteur triphasé de 25.000 kilowatts 110.000 volts de la Cie Westinghouse. A ce moment nous avions en mains tous les éléments pour être parfaitement sûrs du succès du projet que nous présentions et que M. Harlé a adopté en demandant la concession de l'entreprise. Aussi est-ce avec quelque surprise que j'ai vu dans un récent article nécrologique sur cet excellent ami, trop tôt enlevé à la grande industrie française, un ingénieur-électricien exprimer l'avis que M. Harlé s'était, en cette circonstance, lancé trop à la légère ; M. Harlé était simplement mieux renseigné que celui qui le critique aujourd'hui.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tant que celles-ci subsisteront, nous ne pourrons constater qu'un développement progressif de l'utilisation des chutes d'eau par transports d'énergie.

Ce développement peut être influencé au point de vue économique non seulement par l'augmentation de la tension (qui atteint déjà 150.000 volts à l'installation du Big Creek de la Pacific Light and Power Co.), mais encore par la simplification de l'appareillage et des sous-stations. On ne peut que se féliciter à ce point de vue de voir les installations à haute tension renoncer à l'emploi des interrupteurs automatiques à huile ou à cornes sur la haute tension; un progrès remarquable réalisé aux États-Unis dans ces derniers temps consiste dans la création de sous-stations de haute tension à l'air libre sans aucun abri; l'expérience a été jusqu'ici favorable à cette organisation un peu paradoxale aux États-Unis; le sera-t-elle aussi en Europe? Il est à souhaiter qu'un essai en grand permette bientôt d'en juger.

La technique de la houille blanche a continué à provoquer en France d'importants travaux; le Congrès de la Houille Blanche de 1914, que la guerre a malheureusement interrompu, mais dont les organisateurs ont publié les travaux, offre à ce point de vue un remarquable ensemble de recherches; au moment où la France vient de perdre dans la personne de Bazin l'un des plus illustres créateurs de l'hydraulique, on est heureux de pouvoir applaudir aux travaux de la nouvelle école française d'hydraulique qui, avec MM. de Sparre, Rateau, Camichel, Eydoux, etc., continue à développer la théorie des coups de bélier entamée par les travaux initiateurs de Joukowsky, le calcul et l'expérimentation des conduites forcées, des réservoirs accumulateurs, etc. Pendant le même temps, l'étude des régulateurs hydrauliques, commencée par M. Léauté, a été encore poursuivie dans notre pays par de remarquables études et expérimentations, telles que celles de Chipart, Barbillion, etc.

Tout perfectionnement apporté dans les appareils automatiques entraîne une réduction correspondante de la main-d'œuvre nécessaire dans les usines génératrices, et par suite une réduction du prix de revient de l'énergie d'autant plus importante que le prix de la main-d'œuvre tend à s'accroître et qu'il jouera toujours un rôle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

considérable dans l'augmentation du prix du charbon. On peut espérer se rapprocher de plus en plus de l'idéal qu'est l'usine hydro-électrique complètement automatique. Un exemple de ce genre est déjà fourni par la récente usine hydro-électrique américaine de la Iowa Railway and Light Company à Cedar Rapids. L'exemple en sera suivi, et le jour n'est peut-être pas éloigné où il suffira d'un ou deux ingénieurs ou contremaîtres pour conduire une usine génératrice plus puissante ; la main-d'œuvre manuelle n'aura à intervenir que pour les réparations de machines, assez rares, et pourra être fournie pour des équipes volantes envoyées par les constructeurs ou par des entreprises d'entretien.

* * *

Il me paraît d'autant plus opportun aujourd'hui (comme d'ailleurs dans ma préface précédente), de rappeler cette sujétion absolue de l'accroissement des transports d'énergie aux progrès de la science électrique, que les esprits superficiels en France sont portés à attribuer le retard du développement de la houille blanche à un défaut d'initiative de nos industriels (1).

Nulle part cependant l'industrie n'a développé avec plus de hardiesse les usines hydro-électriques qu'en France, au risque de ne pas retirer de ces capitaux un revenu très rémunérateur.

Le désappointement qui se fait jour quelquefois dans la presse

(1) C'est le même état d'esprit qui faisait attribuer naïvement, avant la guerre, le déclin de notre marine marchande au défaut d'initiative des armateurs ou le déclin de notre commerce d'exportation à l'inertie de nos commerçants et de nos commis voyageurs. En réalité, étant donné l'interdépendance moderne des marchés et des entreprises du monde entier, le développement de telle ou telle industrie ou de tel ou tel commerce est fonction beaucoup moins des initiatives individuelles, qui finissent toujours par se produire, au besoin de la part d'étrangers venant en France, que des conditions générales de la production, c'est-à-dire de l'abondance et du prix plus ou moins bas des matières premières et de la main-d'œuvre. Si nos armateurs avaient pu faire construire en France les navires et les machines aux mêmes prix que leurs concurrents étrangers, obtenir la main-d'œuvre dans les mêmes conditions et disposer comme eux d'un frêt de sortie abondant, ils auraient engagé de très grands capitaux dans les entreprises maritimes et avec le même succès que leurs concurrents. De même notre commerce d'exportation est limité par notre prix de revient trop élevé. De même, le développement de la houille dépend à la fois du prix d'établissement des usines et du rayon d'action dans lequel on peut transporter l'énergie économiquement, c'est-à-dire, en dernière analyse, des tensions électriques plus ou moins élevées qu'on peut pratiquement réaliser dans les appareils et les lignes sans dépenses excessives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quotidienne, à propos de la lenteur de la mise en œuvre de nos forces hydrauliques, paraît dû à la confusion que fait trop facilement le grand public entre les prophéties d'avenir et les réalisations. Depuis la célèbre expérience de Lauffen-Francfort (1891), des possibilités presque indéfinies s'ouvrent à l'esprit des faiseurs de projets, tant pour l'augmentation des puissances captées que pour l'accroissement des voltages des transmissions et des distances de transmission. Mais ces possibilités ne sont que rêves tant qu'elles ne sont pas appuyées sur des réalités d'exécution et ces dernières dépendent uniquement des constructeurs de matériel mécanique et électrique et des progrès qu'ils font dans l'exécution de ces appareils. Ces progrès, à moins de grandes inventions nouvelles, de plus en plus difficiles, sont forcément lents et progressifs et il ne sert à rien de vouloir les devancer par des prophéties ; on est d'ailleurs prophète à bon compte en matière de houille blanche et de transports d'énergie, si on laisse aux constructeurs la tâche de réaliser ces affirmations audacieuses par des recherches opiniâtres, mais encore faut-il leur en laisser le mérite exclusif. Alors qu'en 1891 une tension de 40.000 volts et une distance de 100 kilomètres étaient des limites difficilement réalisables, nous sommes arrivés aujourd'hui à constater le bon fonctionnement de plusieurs installations dépassant des portées de 400 kilomètres, aux États-Unis, et la tension de 110.000 volts est devenue courante, tout cela grâce aux progrès réalisés dans la construction des isolateurs et à la précision plus grande apportée dans l'isolement des machines à haute tension.

Nous pouvons avancer sans risques qu'avant 50 ans des tensions de 200.000 volts seront réalisées toutes les fois que la puissance à transporter sera suffisante pour permettre l'emploi de conducteurs suffisamment gros pour réduire la perte par effluves ; que des distances de transport de 1.000 kilomètres seront atteintes ; et que l'usine génératrice pourra être installée avec une puissance considérable et un prix de revient très bas ; les chutes du Zambèze seront sans doute un jour utilisées de cette manière. Nous pouvons prophétiser également que les mines de charbon de Westphalie seront un jour couvertes d'usines génératrices puissantes qui déverseront l'énergie sur de très grandes éten-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dues de l'Allemagne du nord, de la Hollande, de la Belgique, peut-être même de l'est de la France ; sans attendre jusqu'à cette date, nous pouvons prévoir que bientôt l'Angleterre sera pourvue d'un réseau à haute tension répartissant l'énergie provenant d'un petit nombre de super-centrales installées sur les houillères et que ce réseau sera unifié ; un jour viendra de même où les différents réseaux français des Alpes, du Plateau Central, des Pyrénées, pourront être reliés entre eux directement ou par l'intermédiaire de réseaux alimentés par usines à vapeur et où tout l'ensemble sera connecté par un super-réseau.

Ce rêve d'avenir se réalisera, non pas par l'effet d'articles ou de brochures, mais par la simple force des choses lorsque le matériel convenable aura été conçu par les constructeurs et qu'il aura suffisamment la sanction de l'expérience pour permettre aux Sociétés exploitantes d'envisager comme pratiques et avantageux ces groupements.

La plus grande difficulté à résoudre pour arriver à réaliser l'interconnexion des réseaux électriques c'est d'établir des règles d'unification entre les tensions et les fréquences des différents réseaux ; les efforts que l'on vient de faire pendant la guerre dans ce sens ont montré la difficulté qu'il y a de fixer des tensions normales en France ; encore sommes-nous plus heureux, au point de vue des fréquences, que nos amis des États-Unis qui n'ont pu se mettre d'accord encore pour choisir entre les fréquences 50 et 60, et qui ont en outre des distributions nombreuses à 25 périodes et même à d'autres fréquences. L'accord qui s'est fait en France entre les exploitants pour la fréquence normale de 50 (et n'admettant 25 que comme fréquence exceptionnelle), constitue un progrès des plus heureux.

On ne pensait pas, il y a quelques années, que la fréquence 50 pût convenir à des transports atteignant jusqu'à près de 500 kilomètres comme on en voit des exemples avec cette fréquence aux États-Unis. Les effets d'inductance et de capacité deviennent en effet importants à cette fréquence, et c'est ce qui a paru justifier jusqu'à présent en France l'adoption de la fréquence 25 pour les grands réseaux du sud-est et du sud-ouest, qui sont aujourd'hui le seul obstacle à l'uniformisation complète; car, grâce aux progrès

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la construction des commutatrices, la transformation du triphasé 50 périodes en courant continu ne présente plus aujourd'hui de difficulté pratique. Il en est *a fortiori* de même de la transformation de ce courant par moteurs générateurs.

Ce sont ces progrès, ainsi que ceux de la construction des génératrices à courant continu à haute tension qui ont permis de développer aux États-Unis les grands réseaux de traction électrique employant sur la locomotive un courant continu haute tension et dont l'exemple le plus satisfaisant est actuellement le « Chicago-Milwaukee and St-Paul Railway ». Les comparaisons d'exploitation entre ces chemins de fer à courant continu alimentés par réseaux triphasés haute tension avec les entreprises de traction à courant monophasé, utilisé directement ou transformé en triphasé sur la locomotive, font ressortir actuellement une telle économie d'entretien et d'exploitation en faveur du courant continu haute tension que la traction monophasée aux fréquences 15 ou 16,2/3 auxquelles l'expérience avait forcé de descendre, ne paraît plus avoir devant elle l'avenir qu'on se plaisait à lui prédire il y a quelques années. C'étaient d'ailleurs les Allemands qui, par le désir de s'attribuer une supériorité en traction électrique et de vendre dans le monde entier un matériel monophasé qu'ils avaient spécialement étudié, avaient habilement répandu dans la presse technique et même essayé d'imposer aux Congrès internationaux de chemins de fer l'idée d'une supériorité définitive de la solution monophasée. C'est grâce au sang-froid et à l'impartialité des ingénieurs des compagnies françaises de chemins de fer que cette manœuvre a échoué, et on doit s'applaudir aujourd'hui de ne pas s'être laissé trop entraîner par la mode, car il est établi maintenant qu'une locomotive à courant monophasé entraîne des dépenses annuelles de 10.000 francs environ supérieures à celles d'une locomotive à courant continu haute tension, et quels que soient les frais d'établissement et d'entretien des sous-stations transformatrices nécessaires, ils restent faibles en comparaison de ces dépenses supplémentaires entraînées par le matériel roulant. On peut donc prévoir à bref délai la disparition complète du courant monophasé à 15 ou 16 périodes qui menaçait gravement de compromettre l'unification des réseaux de distribution ; il est à espérer que d'ici

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peu les Compagnies de chemins de fer français emploieront un système uniforme de traction électrique à courant continu et de distribution triphasée pouvant, grâce aux sous-stations transformatrices qui réduisent les variations de tension au primaire, servir en même temps à la distribution de l'énergie pour la force et la lumière dans une quinzaine de départements des régions des Alpes, du Plateau Central et des Pyrénées, dans la mesure où cette exploitation sera justifiée par des conditions économiques.

* * *

Une véritable révolution dans les conditions du transport de l'énergie se produirait le jour où un nouveau progrès du matériel électrique permettrait de remplacer, pour les transports à très haute tension, les canalisations aériennes, encombrantes et exposées aux risques des dégâts mécaniques et électriques causés par le vent et les orages, par des canalisations souterraines. L'époque où cette transformation sera possible n'est peut-être pas aussi éloignée qu'on le croyait jusqu'à présent, car dans le cas de l'emploi des courants alternatifs, la compensation des courants de charge dus à la grande capacité des câbles est possible par l'emploi d'« auto-inductions réparties » dont la dépense seule est encore exagérée, et on pourra éviter les oscillations locales par des procédés d'amortissement convenables ; et d'autre part, les procédés d'isolement des conducteurs font constamment de nouveaux progrès.

Et d'autre part, l'emploi du courant continu série à haute tension pour les transports spéciaux d'un point à un autre, aura devant lui un nouveau champ d'application si, comme on l'espère en ce moment, la puissance unitaire des dynamos génératrices ou leur tension unitaire peut être augmentée.

C'est également de l'isolement des câbles électriques à très haute tension que dépend la réalisation des transports d'énergie à travers des détroits ou bras de mer. Un transport d'énergie produite par la houille blanche à travers un détroit existe déjà depuis quelques années entre Malmoë et Copenhague pour l'alimentation en énergie électrique de cette dernière ville, au moyen d'une chute d'eau ins-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tallée en Suède ; les câbles électriques sous-marins transmettent du courant alternatif à 20.000 volts, tension encore insuffisante pour une traversée comme celle du Pas-de-Calais ; des câbles sous-marins transportant des courants triphasés à 50.000 ou 60.000 volts permettraient de franchir ce détroit, avec double transformation sur les rives, et si le reste du parcours était réalisé par des lignes aériennes à 120.000 volts, l'énergie provenant du charbon brûlé sur le carreau des mines galloises pourrait être vendue en France à un prix suffisamment bas pour éviter le transport du charbon par mer. Un projet de ce genre avait été envisagé en 1917, mais les conditions techniques et économiques ne sont pas encore suffisamment favorables ; elles le deviendront rapidement par l'élévation possible du voltage, ou mieux encore par la prochaine construction du tunnel sous la Manche. Peut-être verra-t-on un jour cette énergie d'importation concurrencer aux portes de Paris la houille blanche de Bellegarde, et sans que les entreprises de production puissent se nuire, grâce à l'augmentation toujours rapidement croissante des besoins.

* * *

La mise en œuvre rapide de nos disponibilités en houille blanche exigera de toute manière d'importants capitaux; heureusement, une grande partie pourra être fournie par les grandes sociétés industrielles et financières françaises, une autre par l'État, qui est directement intéressé au développement de cette richesse nationale et qui peut y aider considérablement par le moyen fort simple indiqué plus haut ; s'il faut faire appel en outre à l'étranger, la France est assurée maintenant de trouver le plus cordial concours des cercles financiers et industriels américains, ainsi que l'exposait encore récemment un grand ami de la France, le Dr C.-O. Mailloux, ancien Président de l'Institut américain des Ingénieurs électriciens (1). Ce dernier reproche à notre pays un conservatisme exa-

(1) America's part in the electrical development of France. An interview with C. O. Mailloux, F. F., M. S., D. SC. « The New France », octobre 1918.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

géré qui, dit-il, a retardé nos progrès dans l'utilisation de la houille blanche et a permis à d'autres nations de nous distancer, tout en nous forçant à recourir aux constructeurs étrangers pour la fabrication d'une grande partie de notre matériel ; il reproche à nos financiers de n'avoir pas suffisamment aidé par des placements d'argent nos entreprises de chutes d'eau.

Ces critiques, qu'il est bon que nous connaissions, peuvent être exactes en partie ; elles ne rendent cependant pas complètement justice aux efforts de certains groupements financiers, qui ont fait de réels efforts pour la constitution de nombreuses sociétés hydro-électriques et qui ont eu la patience d'attendre pendant de longues années une rémunération des capitaux investis. Il faut bien reconnaître que les financiers français désirent, autant que ceux des autres pays, tirer une rémunération convenable des capitaux et qu'ils auraient favorisé davantage les entreprises françaises si ces dernières avaient donné des revenus plus élevés ; les conditions ne sont pas les mêmes aux États-Unis, où, grâce à la grande puissance de certaines chutes, aux grandes distances qui les séparent des mines de charbon, au développement toujours croissant et rapide de la population et des entreprises industrielles, les usines hydro-électriques trouvent facilement un emploi rémunérateur de l'énergie qu'elles produisent.

Rien ne serait plus intéressant que de voir nos amis d'Amérique procéder à une vérification expérimentale de leurs idées et à la justification de leurs critiques pour l'investissement de plusieurs centaines de millions dans quelques-unes de nos grandes entreprises projetées, et en particulier dans l'aménagement hydraulique et électrique du Rhône ; les financiers et les industriels américains trouveraient là la plus belle occasion de montrer la supériorité de leurs méthodes sur les nôtres et en même temps de réaliser une excellente affaire si, comme ils l'estiment, notre routine est la seule cause de notre retard dans la mise en œuvre de nos ressources hydrauliques [1].

---

[1] Si, dit le docteur Mailloux, on pouvait effectuer en France, sous les auspices américains, avec le capital américain, la mise en œuvre d'une puissance de 2 millions de chevaux électriques pendant que l'influence américaine se fait sentir dans ce pays, le problème entier de l'appui américain en France serait résolu. Cette démonstration

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En tout cas, ces interventions auraient sans doute l'avantage de mettre fin aux hésitations et aux atermoiements administratifs qui finissent par décourager dans notre pays toutes les initiatives et qui, comme le disait récemment le Professeur Houser à son retour d'un voyage en Suisse, empêchent nos voisins de croire à nos facultés de réalisation et les rendent sceptiques sur l'intérêt de nos projets de travaux.

* * *

Depuis trente ans, nous avons manqué de politique économique et de prévoyance pour tout ce qui concerne le développement matériel de notre pays. Non seulement on avait renoncé à développer les grandes entreprises de travaux publics (1), l'enseignement technique et l'enseignement supérieur, dont les dépenses sont cependant des dépenses largement productrices à la longue pour la communauté, mais encore nous n'avions ni politique financière ni politique de repopulation. Nous laissions drainer les capitaux de notre marché par des entreprises étrangères, non seulement par les entreprises sérieuses de travaux publics en pays neufs, qui pouvaient faire naître des occasions de vendre notre matériel, mais encore par toute espèce d'entreprises véreuses, dont les titres n'auraient jamais été admis en Allemagne (2).

D'autre part, nous n'avons rien fait pour favoriser les placements de l'épargne française dans les entreprises d'intérêt public : les conditions imposées aux concessionnaires ont été souvent abusives (par exemple les tarifs ridiculement bas imposés pour les concessions de tramways électriques) ; les pouvoirs publics ont refusé de

---

pratique et gratuite pour la France amènerait une adoption enthousiaste des méthodes américaines nouvelles et une acceptation des conditions qui seraient du plus grand profit pour le monde industriel en France. Le coût d'exécution d'un tel projet, même s'il était supporté par les Américains, serait rapidement amorti par les revenus.

(1) Un terme devrait être mis à cet abus par la création près la Bourse d'un bureau de contrôle préventif et répressif dirigé par des inspecteurs des finances.

(2) Bien plus, un des meilleurs rapporteurs du budget des Travaux Publics (que je ne nommerai pas parce qu'il est mort), se plaisait à féliciter le Ministère des Travaux Publics de ne pas accroître ses dépenses comme les autres Ministères. Il aurait fallu au contraire que 500 millions par an fussent dépensés pour l'amélioration de nos ports et de nos voies navigables.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

faire droit à leurs légitimes revendications quand elles ont été lésées par les faits de guerre que n'avaient pas prévus les cahiers des charges ; on a imposé aux Caisses d'épargne le placement obligatoire de leurs fonds en rente française pour soutenir les cours de la rente, tandis qu'en Allemagne les mêmes caisses d'épargne tiraient un meilleur revenu des fonds déposés en les plaçant dans les entreprises de travaux publics régionaux : tramways, usines hydro-électriques, transports d'énergie, dessèchement de marais, etc., dont le développement est beaucoup plus utile à la communauté. C'est là peut-être la cause profonde qui a incité nos grands établissements financiers à rechercher des placements exotiques ; les banques allemandes, qui pouvaient offrir à leurs clients des affaires nationales donnant des revenus de 6 à 7 0/0, n'étaient pas tentées d'exporter des capitaux, sauf pour favoriser l'exécution d'entreprises allemandes, telles que la Société des entreprises électriques d'Outremer. Les attaques de certains partis contre le capital, la menace de socialiser certaines entreprises, étaient d'autres motifs qui poussaient à l'exode de nos capitaux. Pour les maintenir en France, il faut désormais leur donner le maximum de sécurité et de garanties, accorder au besoin une garantie d'intérêt pendant les premières années aux entreprises d'intérêt public, autoriser les placements des caisses d'épargne, des biens dotaux et des biens des mineurs, etc., en bonnes obligations de ces entreprises et notamment d'usines hydro-électriques et entreprises de distribution électrique ; favoriser enfin l'exécution des travaux par l'introduction d'une suffisante main-d'œuvre.

Car le capital-argent n'est pas tout ; depuis longtemps le capital humain est insuffisant en France pour la mise en œuvre et l'utilisation des richesses naturelles de notre pays ; nos mines de charbon étaient obligées de faire appel à la main-d'œuvre kabyle, nos mines de fer à la main-d'œuvre italienne, belge, etc... ; et pendant ce temps les dirigeants des classes ouvrières prônaient le « malthusianisme » sans comprendre qu'au lieu d'enrichir leurs adhérents par une hausse considérable des salaires comme ils le croyaient naïvement, ils ne faisaient qu'empêcher le développement des richesses nationales de la France. L'enrichissement d'une classe de citoyens n'est durable que si tout l'ensemble de la nation s'enrichit ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tandis qu'ils ne songeaient qu'à réduire la production et à réclamer pour eux la plus grande part de la fortune antérieurement acquise ; les ouvriers allemands plus instruits des biens économiques ne songeaient qu'à augmenter le plus vite possible la richesse publique pour accroître leur part proportionnelle.

Loin de vouloir nous opposer à l'établissement en France de la main-d'œuvre étrangère, il nous faut reconnaître que notre sol l'appelle pour le développement de son agriculture, de ses forces naturelles, de ses mines de fer, etc. ; dès que ces industries de base posséderont les moyens de développement suffisants, les industries qui en dépendent au point de vue économique, telles que l'industrie mécanique, prendront à leur tour leur essor ; suivant un mot très juste du député Engerand, « la main-d'œuvre appelle la main-d'œuvre ».

D'ailleurs seuls les esprits chimériques peuvent continuer à espérer que la France se peuplera suffisamment par la seule reprise de notre natalité pour prévenir une nouvelle invasion allemande. Les esprits réalistes doivent envisager un moyen plus énergique et plus prompt : une immigration rationnelle et provoquée par un organisme d'État spécial, semblable aux Services officiels d'immigration d'État qui fonctionnent depuis longtemps aux États-Unis d'Amérique et dans les États de l'Amérique du Sud (1).

La condition principale pour le développement de nos forces hydrauliques, c'est, en définitive, d'avoir beaucoup d'argent à un taux modéré, et beaucoup de main-d'œuvre à un prix abordable. A cela, il faut ajouter l'aide de la puissance de coordination des pouvoirs publics.

---

(1) Ce service s'occuperait aussi d'éviter à la France les dangers résultant de la colonisation sournoise de nos départements frontières par les peuples voisins en vertu du principe des vases communiquants et de l'introduction d'éléments indésirables provenant généralement de tous les éléments ethniques trop différents du nôtre.

Notre race résulte de la fusion d'un grand nombre d'éléments ethniques, mais qui se ramènent à cinq principaux : Ligures, Ibères, Celtes, Francs et Scandinaves (ces derniers plus apparentés entre eux qu'on ne le croyait autrefois). Il convient donc de faire appel pour nous reconstituer à des représentants de mêmes éléments, c'est-à-dire les Italiens du nord ; les Heriques du nord (pyrénéens, basques, galliciens et portugais du nord) ; les belges, gallois, irlandais et écossais, les anglo-saxons et scandinaves. Tous ces éléments ethniques sont actuellement parmi les plus prolifiques et leurs régions constituent des sources importantes d'immigration vers les deux Amériques. La tâche de notre service d'immigration serait donc de détourner vers la France les courants d'immigration de ces nationalités par une publicité bien faite et par l'offre de certains avantages, notamment l'achat des terres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Depuis bientôt un quart de siècle, on réclame une législation des chutes d'eau qui mette d'accord les deux ministères intéressés de l'Agriculture et des Travaux publics et qui assure aux entreprises hydro-électriques un statut légal bien clair des garanties et des moyens d'action contre les barreurs de chutes ou les barreurs de lignes. Malheureusement, les pouvoirs publics ont montré par leur lenteur dans l'examen des différents projets de loi qui se sont succédé, combien il est difficile de faire aboutir en France une législation nouvelle, même dans les questions d'intérêt national ; cette ataxie bizarre paraît résulter de la mentalité de vaincus que nous avait laissée la défaite de 1870. La Victoire de 1918 va nous changer ; l'esprit des poilus nous rendra la clarté et la rapidité de jugement et de décision qui caractérisaient nos pères au début du XIX^e^ siècle lorsqu'ils ont élaboré les grands codes français.

Les principes posés dans les derniers projets de loi à l'étude paraissent d'ailleurs satisfaisants : sans vouloir gêner par des formalités compliquées l'établissement des usines de petite puissance (au-dessous de 500 kw.), le projet de loi gouvernemental prévoit pour les autres la nécessité d'une concession par décret et même exceptionnellement par une loi lorsqu'il s'agit des puissances supérieures à 20.000 kilowatts. La loi favorisera l'utilisation totale de la dénivellation d'un cours d'eau et accordera aux concessionnaires les droits d'expropriation suffisants. La centralisation des études a déjà fait un grand pas par la création au Ministère des Travaux publics entre des mains particulièrement capables d'une inspection générale des forces hydrauliques et par la fusion de la direction des forces hydrauliques sur les rivières navigables avec la direction des distributions d'électricité ; un nouveau pas serait à faire en confiant à la même direction les études de concessions de toutes les forces hydrauliques, même sur les cours d'eau non navigables, dès qu'il s'agira de puissances supérieures à 500 kilowatts. Car, quel que soit le classement légal d'un cours d'eau, sa puissance hydraulique est d'intérêt national, et quelle que soit la nature du cours d'eau, les travaux à exécuter sont du même ordre. Le ministère de l'Agriculture devrait intervenir bien entendu par des avis et des réserves destinés à satisfaire les besoins de l'irrigation. Point n'est besoin pour réaliser cette centralisation de créer un sous-secrétariat

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'État ; il suffit d'instituer, comme l'ont proposé judicieusement MM. Margaine, Bedouce, Deléglise et Mistral (1) auprès du Ministère des travaux publics un Comité des forces hydrauliques composé au moins pour moitié de représentants français des grandes industries électriques, électro-métallurgiques et électro-chimiques.

Assistée de ce Comité et du Comité d'Électricité, la Direction des forces hydrauliques et des distributions d'électricité, qui centraliserait toute l'organisation des usines hydro-électriques, pourrait non seulement traiter avec rapidité les enquêtes et les concessions, mais encore introduire par les clauses des cahiers des charges eux-mêmes, l'homogénéité technique répondant aux desiderata exposés plus haut et l'unité de vues nécessaire pour tirer le parti le plus rationnel de nos chutes suivant leur prix d'établissement.

Le but de la législation ne doit pas être, croyons-nous, une étatisation de l'industrie hydro-électrique contre laquelle j'ai exprimé en 1907 et 1910 les plus expresses réserves, à moins que l'État ne transforme radicalement ses procédés de gestion pour adopter des méthodes rigoureusement commerciales, choisissant ses ingénieurs dans l'industrie par des engagements de durée limitée et leur attribuant des participations importantes dans les bénéfices ; mais ce serait une véritable révolution, qu'on ne peut entrevoir dans les méthodes administratives. Il apparaît donc que l'intervention de l'État doive avoir surtout pour but d'aplanir les difficultés de l'industrie hydro-électrique et de lui permettre d'obtenir le maximum de rendement et le minimum de risques.

D'ailleurs les desiderata en matière de législation des chutes d'eau sont eux-mêmes forcément fonction des progrès techniques, tant en hydraulique qu'en électricité.

Autrefois, on n'était pas fixé sur la fréquence la plus avantageuse des courants alternatifs et la distance de transport économique de l'énergie étant très limitée, les combinaisons de plusieurs usines pour la même fourniture d'énergie étaient difficiles, et les conceptions des juristes se rétrécissaient naturellement à la concession d'usines isolées. Aujourd'hui que l'on envisage comme possibles,

(1) Proposition de loi relative aux usines hydrauliques. Chambre des Députés, Séance du 11 juillet 1916.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grâce à l'élévation des voltages, des distances de transport à 500 kilomètres et que l'unification de la fréquence et la normalisation des tensions facilitent les interconnexions, la législation doit tendre à constituer non plus une poussière d'usines de force motrice, mais des ensembles rationnels de chutes d'eau, favorisant l'utilisation maximum de la dénivellation d'une vallée, permettant la régularisation, non seulement journalière, mais saisonnière, par de grands réservoirs convenablement placés ; favorisant de même la combinaison de chutes appartenant à des vallées différentes ou présentant des régimes différents (régime glaciaire et régime pluvial) pour que les étiages se produisent à des époques différentes. En fusionnant plusieurs entreprises sur des réseaux communs, on peut grouper avantageusement des usines utilisant les eaux courantes et fournissant une puissance à peu près constante, les autres établies sur des réservoirs pour venir en aide aux précédentes, soit pour fournir les pointes, soit pour compenser les périodes de basses eaux des premières. Cet ensemble peut être complété par des usines thermiques bien situées jouant le même rôle double, car, ainsi que je l'exposais dans ma précédente préface, la houille blanche et la houille noire ont tout avantage à se combiner rationnellement (1).

Ces combinaisons d'usines par régions, dont les réseaux de la Compagnie du Midi, de la Société Pyrénéenne d'Énergie électrique, etc., sont des exemples frappants, peuvent être réalisées également par la simple vente de l'énergie d'un certain nombre d'usines à des réseaux de distribution plus ou moins éloignés. C'est ainsi qu'un certain nombre d'usines de la région grenobloise versent leurs disponibilités à un poste central d'où elles sont transmises au centre industriel de la Loire.

Il y aurait avantage à ce point de vue à favoriser par la loi le groupement des concessions entre les mains de Sociétés puissantes étendant leur activité à toute une région, comme on a unifié les lignes de chemins de fer entre les mains de grandes Compagnies (2).

---

(1) Des études fort intéressantes sur ces combinaisons hydrauliques ont été faites dans ces dernières années en France, notamment par M. Lévy-Salvador, par M. Eydoux, dont les recherches ont été utilisées pour les installations des usines hydro-électriques du midi.

(2) Une idée de ce genre a déjà fait l'objet d'un projet de M. de Castelnau, mais il n'envisage que le groupement des usines par bassin fluvial.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais dans ce groupement, il faudra tenir compte des conditions techniques énoncées plus haut, c'est-à-dire combiner ensemble non pas des chutes présentant toutes le même caractère, mais bien des chutes à étiages discordants : c'est ainsi que l'on concevrait, par exemple, une combinaison des chutes de l'Ain avec celles du Haut-Rhône ; des chutes des Alpes Moyennes avec celles à établir sur le cours du Rhône à la même latitude ; des chutes pyrénéennes avec celles des rivières des plaines voisines, etc. Des groupements de chutes de ce genre ont été déjà réalisés par différentes grandes sociétés, et à la suite des compagnies du Midi, les grandes compagnies de chemins de fer paraissent désireuses de devenir de grandes sociétés d'entreprises hydro-électriques utilisant pour leurs services de traction et autres l'ensemble des chutes encore disponibles dans les Pyrénées, le Plateau Central, les Alpes, et vendant le surplus de leur production à des entreprises locales d'éclairage, force motrice, électro-chimie, etc...

On peut se demander s'il y a lieu de généraliser cette réunion entre les mêmes mains d'entreprises aussi différentes que le transport des voyageurs et marchandises et la distribution d'énergie. Il est à craindre que pour réduire leurs frais d'exploitation, les chemins de fer soient amenés à utiliser l'énergie des chutes d'eau les plus économiques, celles qui peuvent produire le kilowatt-heure à 1 centime, tandis qu'il suffirait pour substituer l'électricité au charbon dans la traction d'avoir un prix de revient de 4 ou 5 centimes. La législation devrait, croyons-nous, sauvegarder les intérêts de l'électro-chimie et plus généralement de toute l'industrie française de « manufacture » appelée à vivre de l'exportation, en établissant une hiérarchie des utilisations des chutes d'eau d'après leur prix de revient : les chutes très économiques devraient être réservées à l'électro-chimie et à la métallurgie ; les chutes ayant un prix de revient trop élevé pour ces applications seraient réservées par priorité aux fabrications exportatrices, puis le surplus à la traction ; et ensuite aux autres distributions de force motrice ; l'éclairage et la petite force motrice dans les grandes villes pourraient encore utiliser des chutes plus onéreuses.

Ces entreprises réunissant en une même concession régionale tout un ensemble de chutes d'eau, devraient être des organismes auto-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nomes dans lesquels les compagnies de chemins de fer et toutes autres grandes industries pourraient prendre des intérêts en souscrivant une partie du capital, et le cahier des charges devrait imposer à ces grandes concessions des fournitures d'énergie à des prix variés suivant la nature des chutes et suivant les catégories des utilisations. On réaliserait ainsi pour le mieux la combinaison des chutes et des clientèles, y compris celle des Compagnies de chemins de fer (1).

Dans ce qui précède, je n'ai considéré la législation à intervenir qu'au point de vue de l'aide qu'elle peut apporter aux industries hydro-électriques et des directives qu'elle peut imposer à l'activité industrielle en vue de la meilleure répartition de la force motrice pour la lutte économique. Malheureusement, ces points de vue ne sont pas toujours ceux qui prédominent dans le grand public. Au point de vue fiscal, certaines personnes, frappées surtout du fait, d'ailleurs indéniable, que les chutes d'eau sont une richesse nationale appartenant à la communauté et se préoccupant d'éviter que ces richesses prétendues « gratuites », servent à enrichir les capitalistes, voudraient voir imposer dans ce but de courtes durées des concessions et une participation de l'État aux bénéfices soit par des actions d'apport, soit par des parts bénéficiaires faisant reverser à l'État une part plus ou moins grande des dividendes au delà d'un certain minimum de 5 0/0 ou de 6 0/0. Ces personnes sont victimes d'une illusion quand elles croient que la mise en œuvre des chutes d'eau est une entreprise très lucrative ; l'étude des statistiques suffirait à leur démontrer que bien peu nombreuses sont les entreprises qui ont pu réaliser des bénéfices dès leur installation et qui peuvent, après plus de dix ans d'exercice, donner plus de 5 0/0 de dividendes à leurs actionnaires et réaliser ensuite des plus-values de capital. Dans l'ensemble, le capital d'environ 800.000.000 actuel-

(1) On peut objecter, il est vrai, que les Compagnies de chemins de fer, par leur puissante organisation, sont plus aptes qu'aucun organisme à entreprendre de grandes mises en œuvre de chutes d'eau nouvelles et que l'Etat pourrait même leur imposer, par le cahier des charges et leurs concessions renouvelées après la guerre, la création de chutes pour l'utilisation de la houille blanche ; mais on peut peut-être obtenir les mêmes avantages avec plus d'indépendance pour la houille blanche en constituant des sociétés de distribution d'énergie filiales, si l'on veut, des sociétés de chemins de fer et ayant des Administrateurs communs, mais soumises à un cahier des charges différent et à un contrôle complètement distinct.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lement investi dans les entreprises hydro-électriques françaises ne rapporte pas 5 0/0, soit 40 millions ; en admettant que l'État prélève sur les super-bénéfices de quelques-unes de ces entreprises une participation représentant par exemple 5 à 10 0 /0 du revenu total, on n'obtiendrait pour le budget national qu'un encaissement de 2 à 4 millions. Cette somme n'est pas suffisante pour rendre souhaitable une intervention trop exigeante de l'État ; au contraire, l'annonce d'une participation dans les bénéfices qui, en enlevant aux actionnaires l'espoir ou plus souvent l'illusion d'une plus-value importante, peut détourner le public de cette catégorie de placement. On peut tuer la poule aux œufs d'or en voulant simplement gratter un peu de son or. D'ailleurs, même si, pour satisfaire les instincts égalitaires de notre démocratie, on veut courir ce risque, encore faudrait-il tirer de ce petit nombre de millions récupérables un meilleur parti qu'en les versant à la masse du budget des recettes. En Suède et en Norvège, où la fabrication et la vente des alcools sont concédées à des sociétés à monopole, le super-bénéfice (lorsque le revenu dépasse 5 à 6 0 /0 du capital de ces sociétés) n'est pas versé au budget général, mais bien au budget spécial des routes ou aux travaux publics régionaux. Il conviendrait de même que le super-bénéfice des entreprises hydro-électriques prospères servît à gager les emprunts nécessaires pour la mise en valeur des chutes d'eau les moins favorisées et en particulier des basses chutes situées sur des rivières des mêmes régions. Cette affectation pourrait affaiblir la critique que je fais plus haut.

D'autres personnes, se préoccupant d'un point de vue différent, voudraient que ces entreprises échappassent à la direction des industriels et fussent gérées par des syndicats des communes sur les territoires desquelles se trouvent soit les chutes, soit les distributions d'énergie alimentées par elles. Mais il est évident qu'une pareille organisation sacrifierait à d'étroits intérêts de clochers l'intérêt national et serait l'obstacle le plus sérieux à cette organisation rationnelle d'ensemble de nos forces hydrauliques que je préconise plus haut.

D'autres enfin voudraient voir les entreprises hydro-électriques gérées par des syndicats mixtes comprenant les représentants des capitalistes qui ont construit les usines et les ouvriers qui en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

assurent l'exploitation ; mais cette proposition repose sur l'ignorance de la part de mérite qui revient à chacun dans le résultat d'une entreprise hydro-électrique : dans les usines de ce genre, en attendant qu'elles soient bientôt complètement automatiques comme on l'a dit plus haut, le rôle de l'ouvrier d'exploitation est réduit au minimum ; il n'a qu'à ouvrir ou fermer des vannes, régler l'excitation des génératrices, faire quelques réparations au matériel générateur ou de distribution. L'homme dont dépend la bonne marche de l'entreprise, c'est l'ingénieur. D'ailleurs, ceux qui ont assuré le succès, ce ne sont pas les exploitants, mais les constructeurs, c'est-à-dire avant tout les ingénieurs qui ont conçu les travaux et accessoirement les ouvriers qui les ont exécutés ; ce sont eux qui en toute justice devraient être représentés dans le Conseil d'Administration.

* * *

Un autre exemple des contresens économiques auxquels peuvent se trouver conduits les auteurs de projets législatifs par des idées préconçues nous a été fourni récemment par la question du remploi des indemnités accordées aux industriels dont les usines ont été détruites dans les pays envahis et particulièrement dans la région du Nord. En subordonnant l'indemnité pour réparation de dommages de guerre à la reconstitution des usines sur leur emplacement ancien, on s'oppose à l'un des plus grands projets qui pourrait être réalisé en France à cette occasion, c'est-à-dire au transport de certaines grandes industries telles que la filature et le tissage au voisinage des chutes d'eau.

Comme l'a dit il y a déjà plusieurs années le grand économiste Paul Leroy-Beaulieu, « de même que le XIX^e^ siècle a vu la création « d'une grande industrie le long des terrains houillers, et notam- « ment sur la grande bande qui s'étend du Pas-de-Calais français « par la Belgique jusqu'en Westphalie, de même le XX^e^ siècle « verra sans doute une autre grande industrie s'établir au pied « des Alpes, en France, en Suisse, en Italie et en Autriche. Ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« phénomène se produit déjà de nos jours aux États-Unis autour « des chutes du Niagara et en Californie au pied des Montagnes « Rocheuses ».

Une des leçons de la guerre actuelle, déjà signalée par M. le Colonel de la Brosse, est la constatation du danger de la centralisation excessive de nos industries dans le Nord. « La soie », dit-il, « qui a « enrichi la métropole lyonnaise, utilise bien l'énergie de nos chutes « d'eau, pourquoi la laine, le coton et les autres textiles ne sui- « vraient-ils pas son exemple? Ces industries ont-elles eu lieu de « beaucoup se féliciter de n'avoir pas voulu s'éloigner du charbon « placé dans notre pays sur la route séculaire des invasions? Qui « les empêche de prendre pied au pays de la houille blanche? Il y a « là une mine durable et féconde capable de satisfaire tous les « besoins. C'est une des richesses de la France. Qu'elle sache y pui- « ser largement pour remplacer le charbon qui lui manque jusqu'au « jour prochain où la victoire lui aura rendu non seulement la « houille et le fer, mais toutes les ressources de ses anciennes pro- « vinces reconquises. »

Je vais plus loin et je crois que même après la guerre il y aurait intérêt à transporter une partie de nos centres industriels à proximité des grandes forces hydrauliques ; comme je l'écrivais déjà en 1907, « la vallée du Rhône réalise les conditions les plus favorables « par sa proximité des réservoirs énormes de houille blanche des « Alpes, par son beau climat et par son voisinage du grand fleuve. « Une partie de l'énergie considérable dépensée dans le cours de « celui-ci pourrait être captée par dérivation et barrage ; de nom- « breuses lignes électriques transversales permettraient d'apporter « en abondance la puissance motrice des grandes chutes des Alpes. « Une partie de cette puissance pourrait être employée au pom- « page pour l'irrigation, et favoriser ainsi le développement agri- « cole. »

Loin d'obliger toutes les industries dévastées au remploi sur place, il serait donc de bonne politique économique de décongestionner la région du Nord en favorisant la reconstitution de ces industries dans la vallée du Rhône. ce qui contribuerait à hâter la mise en état de navigabilité de ce grand fleuve.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Par la revue rapide qui précède, on peut apprécier combien sont nombreuses et complexes les questions que soulève à l'heure actuelle en France l'industrie de la houille blanche, et comment le développement de cette industrie dépend essentiellement des progrès des techniques hydraulique et électrique. Ces techniques, de plus en plus complexes, sont exposées avec toute l'ampleur qu'elles comportent dans le superbe ouvrage dont l'auteur m'a demandé de présenter aujourd'hui la troisième édition, complètement refondue, transformée et augmentée.

M. Pacoret, ingénieur aussi érudit et capable que modeste et dont je n'ai plus à faire l'éloge, car il a acquis maintenant une légitime renommée dans la littérature technique, a pu, grâce au grand succès de son œuvre et aux nombreuses sympathies qu'elle lui a values auprès des spécialistes, obtenir des principaux constructeurs et ingénieurs hydro-électriciens de France et de l'étranger, de précieux et complets renseignements sur toutes les grandes installations modernes et sur les appareils les plus perfectionnés ; ses lecteurs profiteront aujourd'hui de cette collaboration étendue, qui lui a permis de tripler l'ampleur primitive de son ouvrage par des additions dont il exposera lui-même l'économie et le but.

« Ce livre », comme je le disais déjà de l'édition de 1910, est une « véritable encyclopédie dont le plan est admirablement adapté à « l'objet qu'il avait en vue, c'est-à-dire un exposé didactique et « condensé de toutes les questions qui se rattachent, directement « ou indirectement, à la transformation de l'énergie des chutes « d'eau en énergie électrique, et à l'utilisation de celle-ci, soit sur « les lieux d'emploi, soit à distance. »

Malgré toutes les difficultés qu'un auteur doit rencontrer pour embrasser en un seul ouvrage tous les points de vue d'un aussi vaste sujet, malgré aussi les graves obstacles apportés par la terrible guerre que nous venons de traverser, il offre aujourd'hui au public, qui lui en sera reconnaissant, une édition vraiment « up to date ». Ce travail, vrai monument de la littérature technique fran-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

çaise qui fait honneur à son infatigable auteur, constitue par sa documentation renouvelée, par son exposition parfaitement didactique, une mine précieuse de renseignements sur tous les points utiles à l'ingénieur et à tout lecteur qui s'intéresse aux usines hydro-électriques et aux transports d'énergie. Il est exécuté avec un soin qui fait d'autant plus l'éloge des éditeurs qu'ils ont dû poursuivre l'impression au milieu des difficultés matérielles créées par l'état de guerre. A ces deux points de vue, il est un témoignage de l'énergie dont la France tout entière a fait preuve au cours de cette période glorieuse de son Histoire.

A. BLONDEL.

Membre de l'Académie des Sciences.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INTRODUCTION

L'industrie hydro-électrique, née en France, mais à laquelle on n'avait pas donné l'essor dont elle était susceptible, a reçu au cours de la Guerre un développement inespéré, et tel qu'il a puissamment contribué au succès de nos armes. Aujourd'hui l'importance de cette industrie est devenue une vérité classique et ses horizons vont aider à une conquête non moins impérieuse pour la prospérité de la France : la victoire économique.

Sollicité de toutes parts de donner au plus vite une nouvelle édition de mon ouvrage, j'ai dû l'élaborer dans des temps particulièrement difficiles ; néanmoins j'ai été facilité, pour mener à bien une tâche aussi considérable, par le concours des maisons de constructions de matériel hydraulique et électrique, par les exploitants d'usines hydroélectriques, qui ont répondu avec empressement à mon appel pour la documentation qui m'était nécessaire. Je me fais un plaisir et un devoir de leur adresser ici mes plus vifs remerciements ; et il m'est particulièrement agréable de témoigner ma grande gratitude et ma profonde admiration à M. A. Blondel pour la précieuse et magistrale préface dont il a bien voulu honorer mon ouvrage.

En raison des vastes et nombreux sujets que j'ai dû envisager et eu égard aux progrès de toutes sortes survenus dans la construction des machines et des appareils, dans l'art de l'aménagement des chutes d'eau, dans la conception et l'exploitation des usines centrales, dans l'électrométallurgie et l'électrochimie et enfin dans les multiples utilisations de l'énergie électrique, tributaires des forces hydrauliques, j'ai été conduit à refondre complètement mon ouvrage, qui maintenant se divise en trois tomes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tome I traite spécialement des matières concernant la création et l'aménagement des chutes d'eau : hydrologie ; régimes des cours d'eau, des canaux, des lacs, des bassins et des réservoirs artificiels ; jaugeages ; barrages ; conduites forcées ; construction, utilisation et installation des turbines hydrauliques ; aménagement et captation des cours d'eau ; établissement des usines hydro-électriques et exploitation des usines centrales ; projets d'usines à titre d'applications; législation et réglementation des cours d'eau.

Le tome II est consacré exclusivement à la description de cent trente usines hydro-électriques en fonctionnement ou projetées, réparties dans toutes les parties du monde, et dont les caractéristiques offrent un grand intérêt d'étude pour les ingénieurs, les constructeurs et les exploitants d'usines hydro-électriques.

Enfin le tome III englobe les matières se rapportant à l'étude de la génération et de la transformation du courant électrique et du transport à haute tension de l'énergie électrique. La construction et l'exploitation des réseaux à haute tension et des usines génératrices, y compris l'étude des turbines à vapeur, ont reçu le développement qu'un tel sujet comportait. J'ai apporté le même soin à l'exposé des grandes applications industrielles de l'énergie électrique : la traction électrique, l'électrométallurgie et l'électrochimie.

J'ai essayé par un effort continu et appliqué de me rendre digne des encouragements incessants qui m'ont été prodigués tant par la voie de la presse technique que par celle de mes lecteurs de toutes les nationalités.

E. PACORET.

Paris, le 1er Juin 1919.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

HISTORIQUE DE LA HOUILLE BLANCHE

ET DES

TRANSPORTS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CONSIDÉRATIONS TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES

La production annuelle de la France en houille noire n'atteint pas 40 millions de tonnes, alors que les États-Unis tirent de leurs mines plus de 250 millions de tonnes, l'Angleterre 220 millions et l'Allemagne 160 millions. Cette pauvreté du sous-sol français en charbon de houille explique la faiblesse de notre développement économique, eu égard à celui des nations riches en charbon de terre (1). Par contre, notre pays est un des plus privilégiés de houille blanche, et la puissance dynamique renfermée dans les cours d'eau de nos régions montagneuses est non seulement considérable, mais encore elle est partout accessible, à cause des chemins de fer et des ports d'embarquement qui permettent aux usines hydrauliques de s'approvisionner de matières premières les plus diverses et aussi d'expédier facilement leurs produits.

Ainsi, grâce aux progrès de la science, l'énergie de la houille des glaciers, utilisée et transformée par des procédés nouveaux, est à même de faire cesser notre infériorité industrielle ; grâce au génie humain, à la puissante initiative, au talent et à l'esprit fécond de nos ingénieurs et de nos constructeurs, les rivières à forte pente, naguère encore sans utilisation industrielle, sont devenues un facteur important de l'activité humaine.

Les créateurs de la turbine : Euler, Fontaine, Fourneyron, Girard (2) ;

(1) Bien que pendant la guerre nous ayons été à un moment privés des trois quarts des ressources du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, cette production a pu atteindre la moitié du chiffre moyen observé ces dernières années, soit 20 millions de tonnes, grâce au développement de l'extraction dans les bassins du Centre et du Sud. La consommation de charbon en France, qui était de 60 millions par an, s'est trouvée réduite d'un tiers, en sorte que l'importation des charbons étrangers est restée au même taux qu'auparavant, soit environ 20 millions de tonnes qui ont été fournies par l'Angleterre. L'extraction pour l'année 1917 a dépassé 26 millions de tonnes.

(2) Ce n'est que vers 1850 que presque simultanément, en France, Fourneyron, Fontaine Jonval, Girard ; en Angleterre, Thompson ; en Amérique, Mac-Cormick, Francis et Pelton créèrent des moteurs hydrauliques et que le rouet primitif devint la turbine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ceux de la dynamo : Paccinoti, Gramme, Siemens ; les inventeurs du transport de l'énergie par l'électricité et de ses transformations successives : Marcel Déprez, H. Fontaine, Gaulard, Zipernowski, Dolivo-Dobrolsky, Ferraris, Tesla, Brown, Thury, A. Blondel, et enfin le promoteur de la houille blanche Aristide Bergès (1), ont doté le monde d'une industrie nouvelle qui règne sur d'immenses surfaces, et dont les transformations et les conséquences ont été des plus heureuses pour l'amélioration de notre état social. « La *houille blanche*, a dit l'excellent économiste M. Pierre Leroy-Beaulieu, a enlevé aux contrées riches en charbon le monopole industriel que leur avait donné la vapeur et, comme la puissance politique est souvent la conséquence de la puissance économique, il en

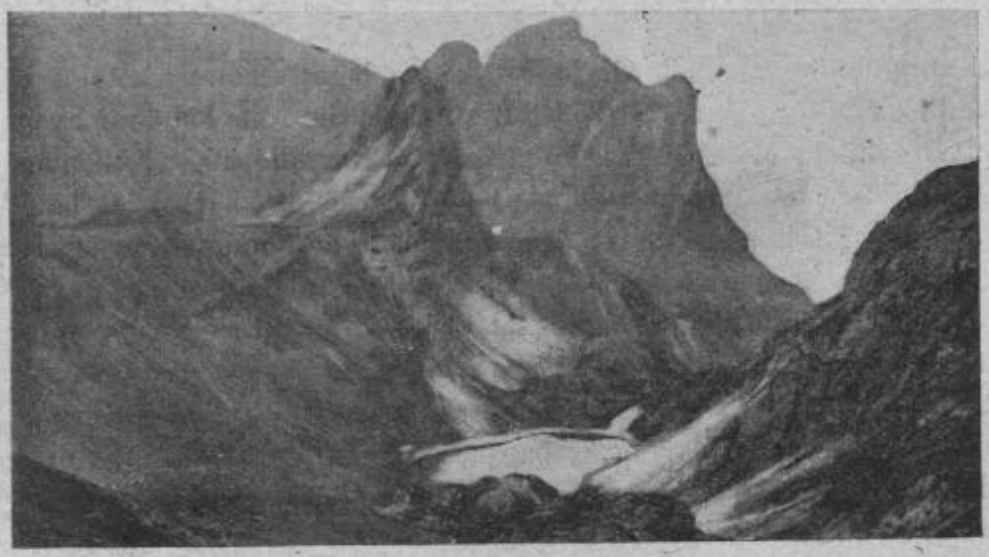


FIG. 1. — Lac alpestre.

est résulté des changements dans l'équilibre même du monde. Une ère nouvelle va s'ouvrir devant nous, ère de grande prospérité si nous savons mettre énergiquement nos forces hydrauliques en valeur. »

En effet, le développement des forces hydrauliques dont la conséquence est la production de l'énergie à bon marché constitue un problème social de la plus haute importance, et dans l'avenir ce seront les pays qui produiront le plus de force, qui dépasseront ceux moins avantageusement privilégiés. Les gouvernements, ayant intérêt à protéger les forces hydrauliques de leur pays et à conserver les forêts qui permettent de régler les

(1) C'est à Fourneyron qu'est due la première conception de l'application des conduites forcées à l'utilisation des chutes d'eau, car en 1837 il installa lui-même à Saint-Blaise (grand-duché de Bade) une conduite créant une chute de 112 mètres de hauteur. En 1850, Girard fit aussi une application du même genre en faisant mouvoir des turbines sur une canalisation de 150 mètres de pression, conduisant les eaux depuis les Apennins jusqu'à Saint-Pierre d'Arena et Gênes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cours d'eau, ont fait voter des lois et créer des services spéciaux en vue de la meilleure utilisation des richesses naturelles.

En France, les études entreprises par le Service d'études des Grandes

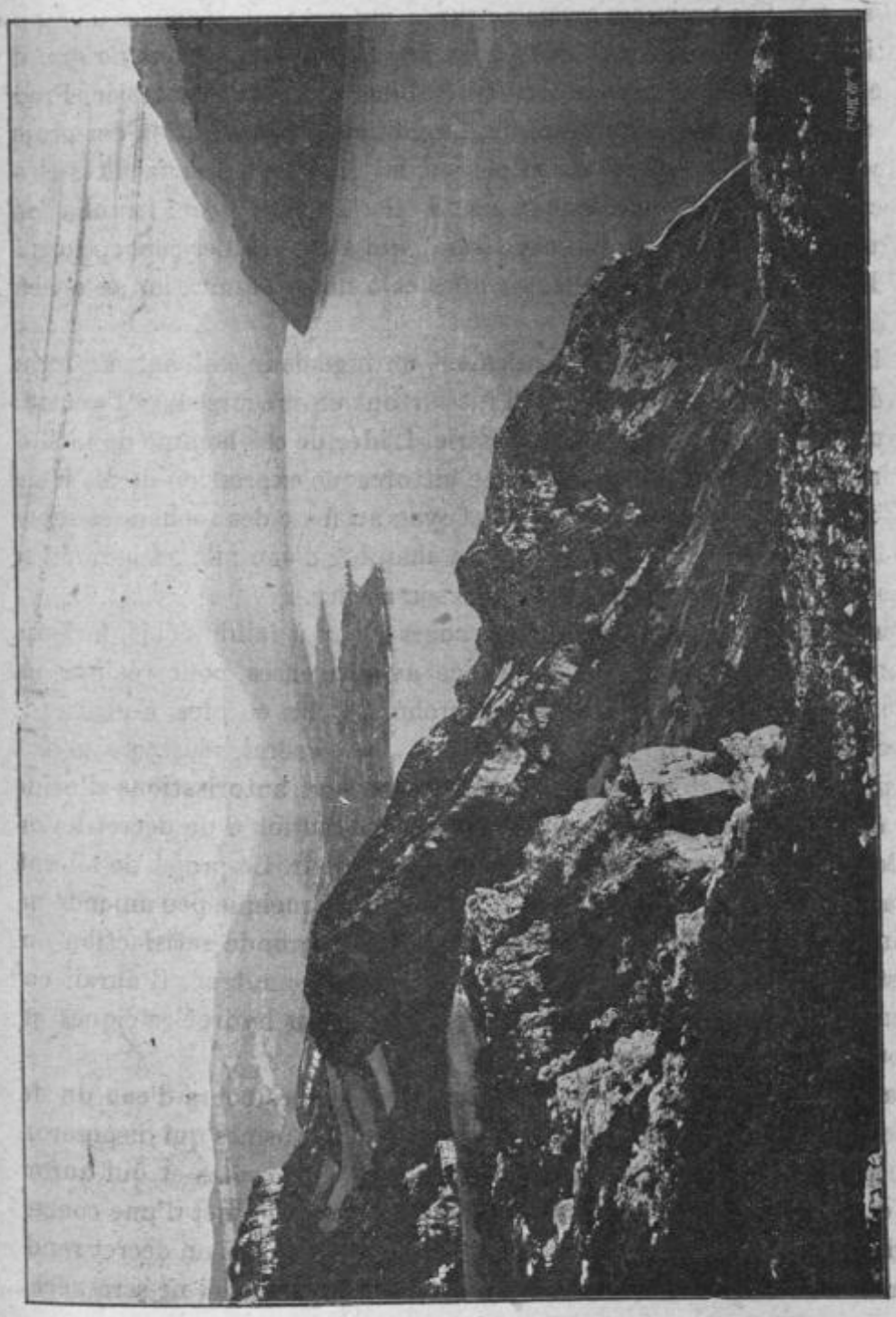


Fig. 2. — Lac alpestre.

Forces hydrauliques ont permis d'avoir des éléments utiles pour la mise en valeur des nombreux cours d'eau susceptibles d'être aménagés industriellement. Il y a eu de ce fait un progrès énorme accompli, car aupara-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vant les usiniers étaient à peu près privés de toutes indications relatives à la valeur réelle de leurs chutes d'eau.

On peut utiliser comme énergie hydraulique les eaux tranquilles des lacs, des réservoirs, ou les eaux courantes des ruisseaux, torrents, rivières, fleuves, etc. Les premiers essais de captation des hautes chutes d'eau par Aristide Bergès datent de 1868 et les premières installations de grandes chutes en conduites forcées ont été établies par MM. Matussier, Fredet et Bergès. Ce dernier a opiniâtrement appliqué, à la réalisation des projets que concevait la hardiesse de sa pensée, les plus brillantes facultés et ses capacités spéciales d'ingénieur de grand talent. Entre autres installations, il a mis en œuvre celle de Lancey (Isère), qui a été une des conceptions les plus hardies et les plus précieuses offertes à notre admiration et à notre méditation.

Aristide Bergès ne fut pas seulement un ingénieur éminent, un industriel éclairé, avisé et audacieux, il fut surtout un précurseur et l'apôtre le plus convaincu de la nouvelle industrie. L'idée de cet homme de bien est admirablement synthétisée par cette pittoresque expression de M. Hanotaux : « Aristide Bergès enferme son tuyau au flanc des rochers et monte jusqu'au glacier, qu'il enferme dans sa chambre d'eau ; il met la main sur la cascade et la conduit, apaisée, dans son atelier. »

Après s'être attaqué d'abord aux cours d'eau à faible débit, à régime torrentiel, présentant des dispositions avantageuses pour réaliser une chute sur un faible parcours, on a cherché, de plus en plus, à utiliser les fleuves à grands débits dont le régime est, en général, plus constant.

Mais ici le caractère de précarité attaché aux autorisations d'usines hydrauliques et les formalités inhérentes à l'obtention d'un décret-loi ont empêché de nombreuses entreprises de voir le jour. Le projet de loi voté par la Chambre des députés, le 16 juillet 1909, et quelque peu amendé par le Sénat (20 novembre 1913) aurait donné une grande satisfaction aux industriels de houille blanche s'il avait pu être promulgué. Il aurait certainement beaucoup aidé à l'essor des installations hydroélectriques sur les cours d'eau du domaine public.

D'après le projet de loi du 16 juillet 1909, sur les cours d'eau du domaine public voté par la Chambre des députés, les usines qui disposeront d'une puissance brute en étiage de plus de 200 kilowatts et qui auront pour objet principal le commerce de l'énergie feront l'objet d'une concession de durée déterminée, accordée au nom de l'État par un décret rendu en forme de règlement d'administration publique. Une loi ne sera nécessaire que lorsque les travaux d'appropriation de la force comporteront le détournement des eaux de leur lit sur une longueur de 10 kilomètres, mesurée sur ce lit ou que la puissance brute de l'usine à l'étiage dépassera 5.000 kilowatts. La concession investit le titulaire pour l'exécution des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

travaux définis au cahier des charges joint à l'autorisation de tous les droits que les lois et règlements confèrent à l'Administration en matière de travaux publics ; en particulier les usines concédées ont le droit d'occuper les propriétés privées nécessaires à l'appui des ouvrages de retenue ainsi qu'à l'établissement des canaux souterrains d'adduction et de fuite, conformément aux dispositions des projets régulièrement approuvés par l'Administration. S'il y a lieu à expropriation, il y sera procédé conformément à la loi du 3 mai 1841, au nom de l'État et aux frais du concessionnaire.

Enfin toutes les usines actuellement existantes, qui ont été autorisées à titre précaire et révocable, et qui disposent d'une puissance brute en étiage supérieure à 200 kilowatts ou qui ont pour objet principal le commerce d'énergie, seront, dans un délai de cinq ans, à partir de la promulgation de la présente loi, placées sous le régime des usines concédées.

La voie ouverte par la conquête de Bergès devait être rapidement et brillamment parcourue, car, en moins de vingt ans, des centaines de puissantes usines hydroélectriques (1) vinrent demander leur force aux gaves tumultueux et aux cascades bondissantes. Des capitaux considérables, qui dépassent de nos jours plus de 800 millions pour la France seulement, ont été absorbés pour l'édification des importants travaux, parfois gigantesques, auxquels les installations de houille blanche ont donné lieu, apportant dans des régions jadis désertes la vie, le bien-être et la prospérité. « Rarement, dit M. F. Côte, le savant rédacteur en chef de *la Houille blanche*, on vit un pareil essor, qui donne bien la mesure de ce que l'on peut espérer de la science dont les progrès se jouent de toutes les difficultés. » Quel tribut d'admiration et de reconnaissance ne devons-nous pas aux ouvriers de la première heure de l'industrie moderne, à ces ingénieurs et à ces industriels dont le labeur et la pensée ont assuré le développement régulier de l'industrie des chutes d'eau de montagne, qui ont su asservir l'énergie dévastatrice des torrents pour en faire l'auxiliaire le plus puissant de l'énergie humaine !...

L'industrie de la houille blanche avait pour réussir deux éléments de succès incomparables : son organe moteur, absorbant la puissance dynamique de l'eau, et la richesse inépuisable de cette dernière. En effet, la turbine moderne, au dire de nos ingénieurs les plus compétents, pourrait être considérée comme le roi des moteurs ; à nous, elle nous apparaît auréolée de simplicité, de robustesse, de facile installation à côté de la lourde et encombrante machine à vapeur, aux organes toujours compliqués, quoique des plus ingénieux.

---

(1) Cette expression est la plus généralement usitée, malgré qu'elle ait une signification moins exacte que celle « hydraulico-électrique » préconisée par quelques auteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les nouvelles exigences de l'industrie des usines hydroélectriques demandant des récepteurs hydrauliques à nombre de tours très élevés, de grande puissance et parfaitement réglables, les constructeurs ont été amenés à substituer à la fabrication des anciennes turbines Jonval et Girard, la turbine Francis pour les cas de basses et moyennes chutes avec forts débits, et la turbine genre Pelton pour les cas de hautes chutes avec faibles débits. Les turbines tangentielles ou Pelton sont employées maintenant dans la plupart des cas où l'on utilisait précédemment les turbines centrifuges à libre déviation, c'est-à-dire pour les chutes de moyenne hauteur avec débit relativement faible et pour les chutes de grande hauteur. Les turbines tangentielles présentent des qualités tout à fait remarquables sous les rapports suivants : simplicité de construction, facilité d'entretien, haut rendement à toutes charges, sécurité dans les dispositifs de réglage de la vitesse. Les rendements des turbines tangentielles de bonne construction varient de 82 0/0, pour les faibles puissances, à 85 0/0 et plus pour les turbines de grande puissance. Suivant la façon dont est calculée et tracée la machine, ces rendements maxima peuvent être obtenus soit à pleine charge, soit à trois quarts de charge et même à demi-charge. En plaçant le maximum de rendement à trois quarts de charge, ce qui est le cas le plus fréquent, on peut dans des conditions normales conserver un rendement de 75 0/0, pour toutes les puissances comprises entre celle totale et celle de la moitié de la charge. D'autre part le rendement ne baisse que d'une quantité assez faible avec l'usure, ce qui assure une supériorité incontestable à la turbine tangentielle avec injecteur à aiguille sur les types de turbines centrifuges à libre déviation. Il n'est pas rare en effet de constater sur des turbines usées, des rendements de 50 à 60 0/0 et l'on conçoit dans ces conditions quel gain de puissance on peut obtenir dans certaines installations, en remplaçant des turbines Girard par des turbines tangentielles. Cependant, pour rester dans l'exacte vérité, il y a lieu de constater que certains constructeurs préconisent la turbine Francis pour les chutes d'une certaine hauteur, concurremment à l'emploi des roues Pelton. Les turbines Francis verticales centripètes utilisées à cet effet permettent de fonctionner sous une chute et un débit très variables et avec un haut rendement et enfin avec des vitesses très élevées favorisant l'attaque directe des alternateurs. En résumé la quasi invariabilité du rendement des turbines modernes dans la zone d'utilisation pratique leur donne une souplesse remarquable et précieuse que l'on était loin de soupçonner dans les types originels.

Les turbines Francis ont de nos jours leur vannage fonctionnant par directrices mobiles, constituant une des améliorations les plus importantes apportées aux turbines centripètes. D'autre part ces directrices font corps avec leurs axes de rotation et, dans la commande de leur mou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vement, sont intercalés des ressorts qui fléchissent lorsque la résistance est trop grande, ce qui a pour effet, surtout lorsque la turbine est sous la dépendance d'un régulateur automatique, d'éviter le bris des aubes de la roue mobile au passage de corps durs entraînés par les eaux. En résumé les caractéristiques de la construction des turbines centripètes modernes sont les suivants : bache en forme de spirale, distributeurs à directrices mobiles à commande élastique, roue mobile rationnellement tracée, tuyau d'aspiration conique évasé, maximum de rendement correspondant aux trois quarts environ du débit total.

Les caractéristiques des turbines Pelton se résument ainsi : roue mobile très robuste, garnie d'augets échancrés à l'avant et buse d'injection conique fortement convergente, avec aiguille centrale périforme pour le réglage du débit. Le maximum de rendement correspond à 2/3 et même à la moitié du débit.

Les unités que l'on emploie de nos jours atteignent des forces considérables ; il nous suffira de citer comme exemple les turbines Francis verticales de l'usine hydroélectrique de Tallassee Poney et Cie sur le Yadkin Rivver (E. U.), dont la puissance unitaire est de 31.000 HP. Le rotor a $8^m,75$ de diamètre, la couronne fixe, $3^m,65$ et le rendement dépasse 0,90.

La question de réglage automatique des turbines à des écarts de vitesse à quelques pour 100 seulement, pour leurs plus fortes variations de charge brusques, a été résolue par l'application du principe du servo-moteur hydraulique ou à pression d'huile. L'asservissement d'un régulateur indirect conduit à admettre une certaine différence de vitesse entre la marche à vide et la marche en charge. Le plus généralement on est conduit, pour la stabilité, à avoir un asservissement tel que cet écart de vitesse est trop considérable étant donnés les besoins actuels de la pratique ; afin d'éviter cet inconvénient, on munit le régulateur d'un dispositif appelé compensateur qui détruit lentement l'effet de l'asservissement et ramène par conséquent la vitesse à sa valeur normale par une série de petits mouvements correctifs. La marche avec compensateur n'est cependant pas indiquée lorsque plusieurs régulateurs commandent des turbines actionnant des alternateurs accouplés en parallèle. Dans ce cas il y a lieu d'admettre une certaine différence de vitesse de quelques centièmes entre la marche à vide et la marche en charge, en empêchant la compensation d'être totale. C'est donc un dispositif de décompensation qu'on introduit dans le jeu du régulateur. Pour que l'ensemble, turbine-régulateur, soit stable, c'est-à-dire non sujet aux oscillations à longue période, il convient de donner à la rampe d'asservissement un profil approprié et que le décrément du régulateur soit assez considérable, mais en remédiant à un trop grand écart entre les vitesses de régime à vide et à pleine charge par l'emploi d'un compensateur comme nous venons de l'indiquer ci-avant. La cons-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

truction des turbines hydrauliques a ainsi pris une extension considérable due aux progrès rapides de l'industrie électrique et aussi à ce que l'exploitation d'une usine hydraulique est relativement peu coûteuse, à ce que son entretien est d'ordre peu élevé et qu'elle offre une très grande sûreté de marche.

D'autre part, il est incontestable que, dans l'état actuel de la science, on ne peut assigner un terme à la durée de nos richesses hydrauliques, et que pratiquement on peut les regarder comme intarissables. Alors que la houille des profondeurs, au contraire, non seulement ne se renouvelle pas, mais son extraction devient d'autant plus malaisée que l'on s'enfonce plus avant dans les entrailles de la terre (1).

Nous exprimions dans la partie introductive de la deuxième édition de cet ouvrage l'idée que notre prévoyance dût s'attacher à formuler les mesures nécessaires pour éviter l'épuisement de nos mines noires en n'usant du précieux combustible qu'avec la plus stricte parcimonie. L'intérêt bien entendu des besoins de l'humanité disions-nous n'exigera-t-il pas, un jour ou l'autre, que l'on limite l'emploi du charbon de houille aux industries autres que celle de la production de force motrice, comme le chauffage, la fabrication du gaz de houille, la métallurgie ?

Nous ne pensions pas être si bon prophète, car la cruelle crise de charbon que nous avons éprouvée à partir de la deuxième année de la guerre s'est malheureusement chargée de donner une sanction expérimentale à notre prévision.

Ainsi, l'appareil hydraulique s'il avait été plus développé serait intervenu comme régulateur de la mine noire, dont la pénurie a failli nous amener une calamité et presque un danger national. Donc, nous devons comprendre que l'intérêt général, l'avenir du pays demandent l'union sacrée de toutes les bonnes volontés, de toutes les initiatives sous l'égide des pouvoirs publics, pour mettre l'industrie des forces hydrauliques à la hauteur des besoins, c'est-à-dire en mesure de suppléer ou même de remplacer le charbon, en tant qu'agent de force motrice. En attendant la venue de ce temps, que nous devons souhaiter être le plus prochain possible, l'activité humaine a l'impérieux besoin d'user des deux grandes sources d'énergie qu'une nature prévoyante a mise à sa disposition et dans les limites de leur zone d'action économique.

La distance pratique à laquelle on peut effectuer le transport de l'énergie par l'électricité relève plutôt de considérations d'ordre économique que de la technique des hautes tensions électriques dont chaque jour marque

(1) Les réserves mondiales de charbon sont évaluées à 7.400 milliards de tonnes. Pour l'Europe, en 1913, on estimait à 785.000 millions de tonnes, le combustible gisant dans le sol, et pour la France seule, les ressources étaient de 17.584 millions de tonnes, soit environ pour deux cents ans de provision.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les progrès et voit s'agrandir le précieux domaine. La facilité du transport de la houille blanche a permis à l'industrie de résister au besoin de se

FIG. 3. — Cascade des Alpes.

déplacer. Certains esprits considèrent que c'est là un bien pour les populations de nos montagnes, qui y gagneraient en se contentant du produit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la vente seule de la force, alors qu'une immigration industrielle importante pourrait diminuer l'aisance de chacun en apportant dans le pays un renchérissement de la vie, l'agriculture y constituant une faible ressource. Quoi qu'il en soit, il est certain que de nombreuses industries se déplaceront pour s'installer au pied des mines blanches et y former des lieux de production de puissance, lorsque les prix de revient de la force motrice le permettront.

La guerre a favorisé cette exode par la création d'usines nouvelles travaillant pour la défense nationale mais qui à la fin des hostilités trouveront un emploi rémunérateur de leur énergie. En raison du prix élevé du charbon, on a établi beaucoup d'usines sur le débit sur lequel on peut compter pendant trois mois de l'année au lieu de cent quatre-vingt jours comme auparavant (débit semi-permanent), ceci s'entend pour des usines qui peuvent supporter d'importantes variations de charge dans le courant de l'année (usines électrochimiques et électrométallurgiques). D'ailleurs pour ces usines où la question du bas prix de revient de l'énergie prédomine, il n'est pas indispensable de faire des réserves hydrauliques. Nombreuses sont d'ailleurs les industries qui peuvent se dispenser de combustible dans leur fabrication ; industries textiles, industries extractives, fabriques de pâtes alimentaires, minoteries, industries du bois, papeteries, scieries, carrières, mines. D'après M. Loucheur on pourrait par l'utilisation de la houille blanche économiser la moitié du charbon consommée par les mines.

Les forces hydrauliques, bien que désignées sous le nom de forces naturelles, ne sont pas utilisables d'emblée : leur aménagement, parfois, conduit au contraire à des travaux de très grande importance. « Aujourd'hui, dit M. F. Côte, ces méthodes d'aménagement sont trouvées, infiniment variées dans leurs formules d'exécution, mais fixées et vérifiées par une pratique des plus probantes. »

L'adduction de l'eau motrice, depuis son lieu de captation jusqu'à l'usine, est un problème important, qui comporte des solutions délicates dont nous avons cherché à coordonner les règles principales au cours de cet ouvrage. Dans tous les cas, il est essentiel que l'énergie provenant des chutes d'eau soit produite en quantité et à bon marché, considération qui détermine la valeur et les conditions d'installation des centrales modernes qui doivent desservir des réseaux très étendus, mais souvent peu homogènes et très variés comme utilisation.

La question se présente sous une forme particulièrement simple, si on désire s'en tenir à l'utilisation du débit minimum de la chute, auquel cas les travaux sont réduits au minimum de dépense. Mais si, acceptant le bénéfice des eaux moyennes, voire même des hautes eaux et qu'en même temps on veuille que toute la puissance disponible soit uniforme et cons-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tante, alors l'installation comporte l'aménagement de bassins de réserve d'eau naturels ou artificiels et l'établissement d'appareils de réglage et de contrôle.

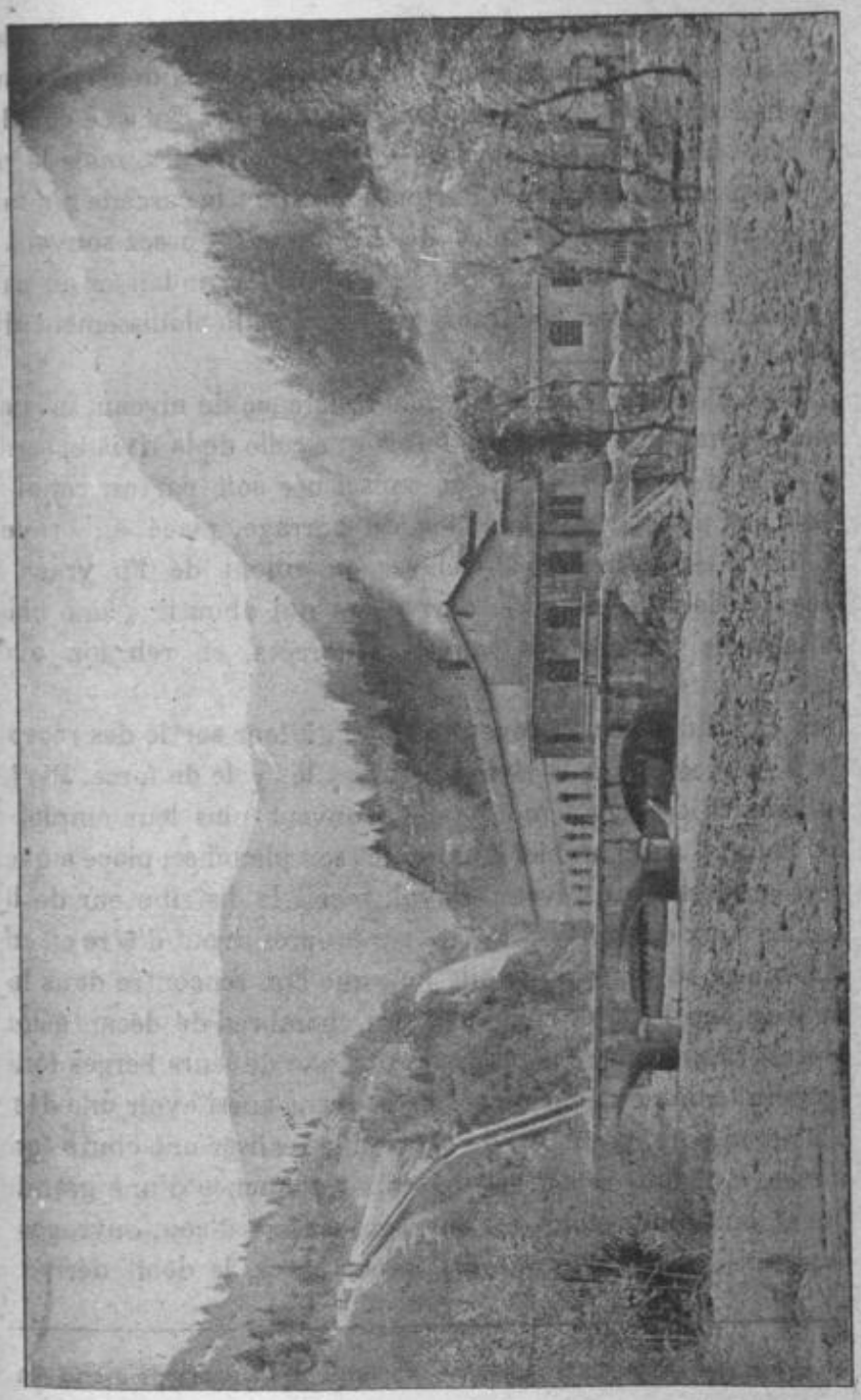


Fig. 4. — Usine hydroélectrique dans les Alpes françaises.

Il arrive parfois que la chute est toute créée, en raison de l'existence d'une cascade par exemple, mais le plus souvent, même sur les rivières torrentielles, la chute est produite par une dérivation artificielle de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rivière où l'eau s'engouffre en y acquérant à fin de course la force due à la dénivellée opérée sur le torrent.

Si l'on se trouve en présence d'une cascade de hauteur et de débit justifiant l'établissement d'une usine hydraulique, il suffit d'établir un barrage en tête de la cascade et d'amener l'eau à l'usine au moyen de conduites métalliques qui emprisonnent l'eau à force et la déversent sur des récepteurs hydrauliques qui en captent l'énergie (1). Dans ce cas, la cascade fait place au tuyau : le paysage y perd en attraits, mais le pays y gagne en utilité et en prospérité. Parfois cependant la cascade n'a fait que se déplacer, car le canal de fuite de l'usine prend assez souvent cette disposition, qui a l'avantage d'être peu coûteuse et de laisser au paysage un de ses grands charmes : le fracas des eaux et l'éblouissement de leur blanche écume (2).

Quand il s'agit de racheter une faible différence de niveau, un barrage et un canal d'amenée, à pente plus faible que celle de la rivière, sont tout indiqués, et la dérivation peut être constituée soit par un canal à ciel ouvert, soit par un tunnel. Par le jeu du barrage, placé en travers de la rivière, l'eau est astreinte à s'élever en amont de l'ouvrage pour, de là, s'écouler dans le canal de dérivation qui aboutit à une chambre d'eau de laquelle partent les conduites forcées, en relation avec les turbines.

Enfin un canal de fuite, recevant les eaux à leur sortie des récepteurs, les rejette à nouveau dans la rivière fermant le cycle de force. Parfois les tuyaux d'amenée d'eau au moteur ne trouvent plus leur emploi : une chambre d'eau fait suite au bief d'amont et son plancher, placé à quelques centimètres au-dessus du niveau d'aval, reçoit le distributeur de la turbine. Mais, les eaux demandant à être très propres avant d'être en contact avec les turbines, ce genre d'installation, que l'on rencontre dans les vallées à thalweg peu incliné, comporte des chambres de décantation très volumineuses. Ces canaux modérateurs ont une de leurs berges fonctionnant en général comme déversoir, et ils peuvent aussi avoir une décharge de fond. D'autre part, pour peu qu'on veuille réaliser une chute tant soit peu importante, il faut recourir à un canal d'amenée d'une grande longueur. Quant aux dimensions des ouvrages (pièces d'eau, ouvrages régulateurs, canaux), elles sont toujours importantes, le débit dérivé étant

---

(1) Aujourd'hui nos constructeurs savent fabriquer des tuyaux de grand diamètre, de forte épaisseur, travaillant à 9 kilogrammes et supportant des pressions de 100 atmosphères et plus [Usines hydroélectriques de Vouvry (950 mètres), d'Orlu (940 mètres)]. M. Boucher, l'éminent hydraulicien, à qui l'on doit la conception de ces deux chutes, a depuis réalisé l'aménagement de la chute de Fully (Suisse) de 1.660 mètres.

(2) Les *chutes naturelles* les plus importantes, sous le rapport du débit, sont celles du Zambèze (Afrique méridionale), du Niagara, de Schaffhouse (Suisse) ; les plus élevées se trouvent à Doegerfas (Norvège), 450 mètres, et à Gavarni, 422 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

généralement considérable. Assez souvent, l'usine est établie sur l'ouvrage même ou dans son voisinage immédiat.

L'idéal, en fait de chute d'eau, est un gros débit, roulant sur des pentes roides, prolongées, et ne tarissant jamais, ou autrement dit : beaucoup d'eau, beaucoup de pente et une grande longueur du cours d'eau. Ces sortes d'installations, qui constituent les vraies chutes de montagne, se rencontrent dans les vallées hautes à thalweg rapide ; elles nécessitent pour leur organisation des prises d'eau et barrages parfois assez économiquement établis, des chambres de décantation et de prise en charge assez réduites, et enfin des canaux et des conduites sous pression de faible section relativement à la grande différence de niveaux rachetée.

Les barrages de retenue jouent assez souvent le rôle de déversoirs laissant déborder par-dessus leur crête les eaux des crues. On arrive au même résultat en pratiquant dans les corps de ces ouvrages, dans leur partie inférieure, des aqueducs qui permettent en outre, par le jeu de vannes spéciales, d'évacuer les apports charriés par les eaux.

Ainsi déversoirs et vannes de décharge offrent, en temps de crues, le moyen de rejeter à la rivière les masses d'eau qui encombrent la dérivation et auxquelles d'ailleurs les moteurs ne sauraient livrer un passage suffisant pour leur écoulement.

Le barrage constitue souvent une des parties les plus importantes d'une installation hydraulique ; il doit être particulièrement bien étudié et soigneusement construit, puisque toute défectuosité d'établissement ou de fonctionnement exposerait à des arrêts de service. Pour les rivières torrentielles, le barrage est la plupart du temps un ouvrage fixe, mais les barrages mobiles sont nécessaires dans un grand nombre de fleuves pour les rendre navigables, en relevant leur niveau pendant l'étiage. Mais là aussi il est nécessaire de supprimer l'obstacle au moment des crues.

En tant que construction les barrages fixes se font soit en maçonnerie, soit en ciment armé, quand il s'agit d'ouvrages importants et de grande hauteur. Nous croyons savoir que l'Administration conseillerait de ne pas dépasser 12 mètres pour la hauteur à donner aux barrages en ciment armé, en raison de graves accidents survenus dans ces dernières années à des ouvrages de ce dernier genre.

Le puissant mouvement industriel auquel a donné lieu la domestication des forces naturelles n'est pas allé, dès ses débuts, sans entraves, gênant et parfois faussant son allure. Cependant la science de nos ingénieurs et de nos constructeurs triompha assez facilement des difficultés d'ordre technique soulevées par l'abord de problèmes nouveaux. On sait que l'âpreté du climat, les difficultés de communications, la venue d'avalanches subites et meurtrières, les violentes tourmentes déchaînées dans ces régions arides et escarpées y rendent les travaux d'une exécution par-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ticulièrement pénible, et qu'il faut une grande dose d'énergie et de bravoure de la part des ouvriers et de leurs chefs pour surmonter de tels obstacles.

Mais, si la lutte contre les éléments naturels fut partout victorieuse, il n'en fut pas de même de celle que les pionniers de la jeune industrie eurent à soutenir contre les préjugés et les abus entretenus par l'égoïsme, l'ignorance entêtée des propriétaires riverains des cours d'eau et surtout contre les embûches accumulées par des spéculateurs d'un nouveau genre, qui s'étaient abattus comme des oiseaux de proie sur ces contrées, vierges de tels exploits.

En effet, l'insuffisance de dispositions légales, le morcellement des terrains bordant les rivières non navigables ni flottables, l'accaparement des droits de riveraineté (1) avaient lassé à un tel point les initiatives et les volontés les plus tenaces, les mieux trempées, ainsi que les capitaux les mieux disposés, que l'on en vint à se demander s'il n'était pas préférable de faire appel à l'initiative collective, au lieu de lutter individuellement, voire même à l'intervention de l'État, à l'effet de tirer des forces hydrauliques tout le parti industriel qu'exige l'intérêt général du pays.

Sous l'empire de ces idées, les propriétaires et les exploitants d'usines hydroélectriques se constituèrent en syndicat pour la défense de leurs intérêts professionnels et pour étudier en commun les moyens de trancher les difficultés présentes et d'aplanir les obstacles qui gênaient la marche de la nouvelle industrie, en vue de la plus grande extension de son domaine. C'est ainsi que le Syndicat des Forces hydrauliques (2) pensa frapper un grand coup en décidant cet inoubliable *Premier Congrès de la Houille blanche*, dont les assises se tinrent dans le Dauphiné et la Savoie au cours du mois de septembre 1902.

Cette Assemblée eut un succès prodigieux : membres de l'Institut ; sénateurs, députés ; inspecteurs généraux, ingénieurs en chef et ordinaires des

---

(1) Tout le monde a entendu parler de ces spéculateurs d'un nouveau genre appelés « pisteurs » et « barreurs » de chutes, dont le métier consiste à se faire céder au plus bas prix, par les propriétaires riverains du cours d'eau torrentueux, leurs droits de riveraineté qu'ils cherchent ensuite à revendre, excessivement majorés, aux industriels exploitant des chutes d'eau.

(2) Le 15 janvier 1901 ont été jetées les bases de la Chambre syndicale des forces hydrauliques, laquelle fut réellement constituée le 21 février 1903 sous la désignation de Chambre syndicale de l'Électro-métallurgie, de l'Électro-chimie et des Industries qui s'y rattachent, avec Siège social à Paris. En 1917, cette association comptait 108 adhérents dont 54 au groupe du Transport de la Distribution de l'énergie électrique, 24 au groupe de l'Électro-métallurgie et de l'Électro-chimie, 30 au groupe des Usines non aménagées. La puissance globale des usines atteignaient 600.000 HP et le montant des capitaux engagés dans ces affaires était évalué à 600 millions de francs. Les lignes de distributions d'énergie électrique exploitées par les adhérents constituaient un réseau de 16.200 kilomètres desservant près de 5 millions d'habitants. A côté de la Chambre syndicale a été créée la Société hydrotechnique de France, en 1912, qui réserve son activité aux recherches d'ordre purement scientifique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ponts et chaussées et des mines ; délégués des ministères spéciaux, de villes, de chambres de commerce, d'institutions scientifiques ou syndicales ; professeurs des Facultés et de nos grandes Écoles, ingénieurs, industriels et constructeurs les plus qualifiés de notre industrie nationale ; représentants de la presse scientifique et de nos grands quotidiens, en un mot l'élite de notre pays se rendit à l'appel du Syndicat des Forces hydrauliques pour en suivre les travaux et acclamer les succès de la nouvelle industrie.

Nombre de questions d'ordre juridique, technique et économique furent étudiées dans les diverses réunions des congressistes, avec cette science et cette autorité que l'on attendait d'hommes dont le talent faisait sensation dans le Parlement, la science, la magistrature, l'administration, l'industrie. Ces débats eurent d'ailleurs un retentissement universel.

Le très regretté M. Pinat, maître de forges à Allevard, président du Congrès, saluait la présence du brillant aréopage par ces belles paroles : « Cette assemblée, aussi considérable par le nombre qu'éminente par la « qualité, est à elle seule un sujet de fierté pour nous ; elle restera la plus « belle étape dans la marche de notre action syndicale, et c'est bien ici « qu'il vous fallait vous réunir : aux beautés naturelles des Alpes est « venue s'ajouter la beauté d'une *industrie jeune et hardie dans les procé-* « *dés, merveilleuse dans ses résultats*, qui ouvre des horizons fleuris de pro- « messes à cette énergie française dont M. Hanotaux s'est fait l'historien « en des pages inoubliables. Grenoble, capitale incontestée de la houille « blanche *devenue une de nos industries nationales*, est fière des places « d'honneur que ses enfants d'aujourd'hui occupent dans l'armée qui « marche à la *conquête de l'énergie de nos montagnes.* »

Le 13 septembre 1902, en séance de clôture du Congrès, de nombreux vœux présentés par la Section économique, qui avait eu à examiner divers projets de loi émanant d'initiatives parlementaires, particulières et gouvernementales, furent votés d'acclamation par les congressistes, vœux dont les pouvoirs publics se sont inspirés pour l'élaboration du projet ministériel déposé le 15 janvier 1904 (pour la réglementation des cours d'eau non navigables), sur le bureau de la Chambre des députés, projet de loi qui a été repris à nouveau le 12 juin 1906 par le ministre de l'Agriculture et renvoyé à une Commission spéciale. Le texte élaboré par cette Commission n'a apporté au projet primitif que des modifications de détail qui ont fait l'objet d'un rapport déposé à la Chambre le 18 avril 1908. Le texte en a été voté par cette dernière le 16 juillet 1909, mais est resté pendant devant le Sénat. Ce projet de loi n'a pas été promulgué. Il en est de même pour le projet de loi sur la dérivation de l'énergie électrique à l'étranger. Ce fut donc grâce aux efforts du Syndicat des Forces hydrauliques que le pays tout entier put se rendre compte que la législation avait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

eu besoin d'être modifiée pour assurer l'utilisation des chutes d'eau dans de bonnes conditions.

Depuis, des assemblées identiques ont eu lieu à Marseille, à Grenoble et

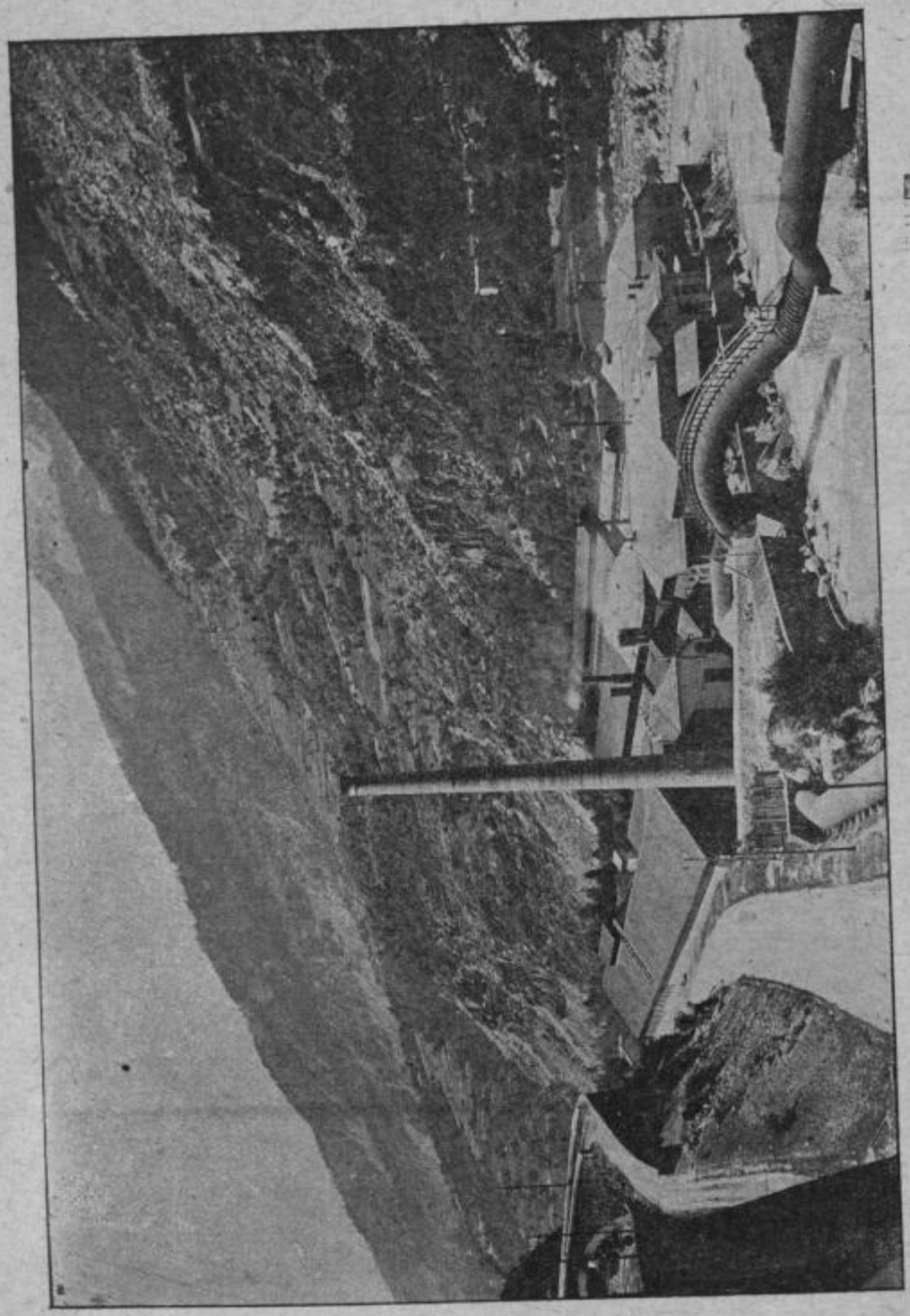


FIG. 5. — Usine hydroélectrique dans les Alpes françaises.

en dernier lieu, à la veille de la guerre, à Lyon, cette ville, qui a su si merveilleusement adapter ses ressources au développement des industries de la Défense nationale, ainsi que les régions stéphanoises et dauphinoises.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces Congrès, comme leur aîné, ont été l'occasion d'un puissant travail d'élaboration dans toutes les branches de l'industrie des chutes d'eau tant au point de vue technique qu'au point de vue économique.

L'État, d'après le projet de loi précité, aurait droit, pour assurer l'organisation de ses services publics, à une partie de nos richesses naturelles. Or de bons esprits estiment que l'État devrait se confiner dans son rôle de gardien régulateur de la richesse publique, ne reconnaissant pas aux pouvoirs publics les qualités d'initiative nécessaires pour tirer des usines hydroélectriques tout le parti que réclame la prospérité de notre pays. En effet, la meilleure utilisation d'une centrale hydroélectrique exige qu'une partie de l'énergie (en supposant que la chute débite un volume constant),

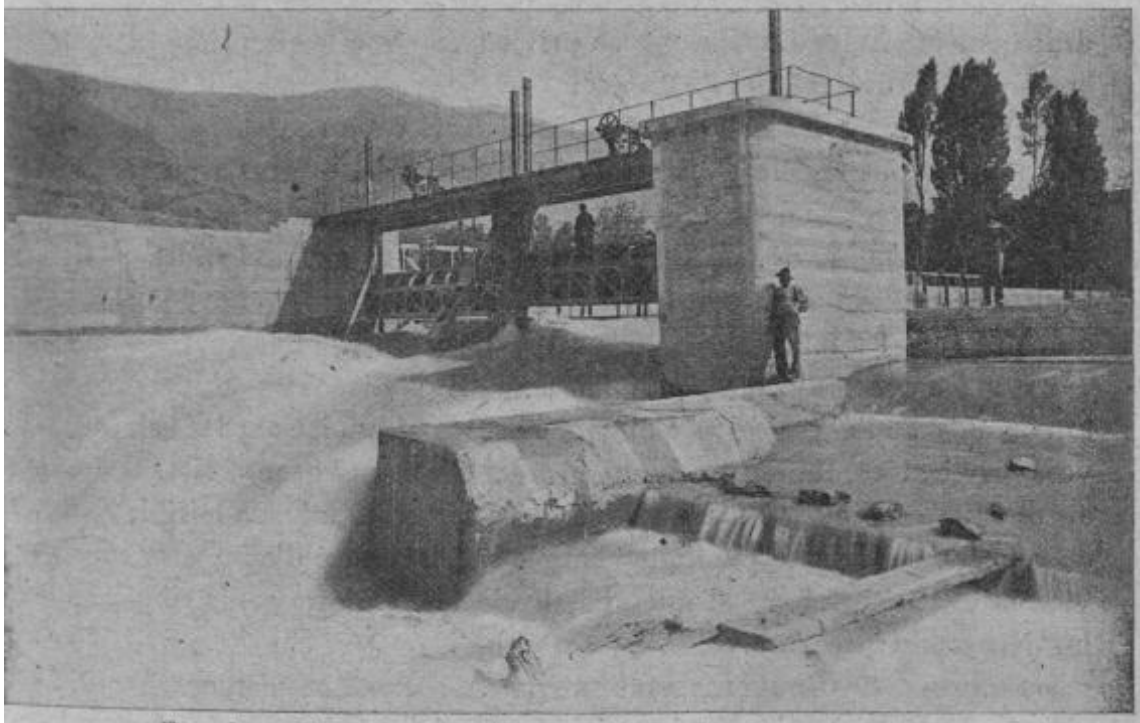


FIG. 6. — Vannage de décharge d'une usine hydroélectrique.

— qui est celle dont l'usine dispose en trop lors des heures de faible consommation des services publics (éclairage, élévation d'eau potable, tramways, etc.), — soit vendue à des industriels qui ont intérêt à se servir de ces « résidus », soit que ceux-ci constituent la totalité de la force qui leur est nécessaire, ou simplement un renfort appropriable à leurs besoins. L'État serait ainsi appelé à trafiquer de ses excédents de force, ce qui pourrait le mettre dans une situation particulièrement difficile pour concilier à la fois les aspirations, le plus souvent de caractère opposé, de l'intérêt général et de celui des particuliers, ceux-ci pris tant comme clients des usines de l'État que comme concurrents ou propriétaires d'usines privées.

Sous le bénéfice de cette observation, le projet de loi est acceptable, car il conserve ce que notre législation actuelle a de bon et il accorde des faci-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lités aux industriels qui se heurteraient à la résistance obstinée et invincible des barreurs de chutes. C'est au juge qu'il appartiendra de solutionner tous les litiges entre l'usinier et les riverains. Ces derniers se verront indemnisés de tous les droits à l'usage de l'eau que leur reconnaît l'article 644 du Code civil, exercés ou non. -

« Et l'industriel du fait de la loi ne sera pas placé dans une situation défavorable, au point de vue de la concurrence, vis-à-vis des usiniers déjà établis. Pour compenser les facilités qu'elle lui donne en permettant au juge de tenir compte dans sa sentence des intérêts de l'industrie, au même titre que des intérêts de l'agriculture ou de la propriété, l'Administration n'exigera de l'industriel que le prélèvement, au profit des services publics et moyennant une juste compensation, d'une fraction de l'énergie produite par la chute. L'usine privée privilégiée reste la propriété pleine et entière de l'industriel qui l'a fondée.

« D'autre part les intérêts de la collectivité ne seront pas sacrifiés. Nous voudrions encore insister sur ce point. C'est le gros argument des partisans du régime de la concession.

« L'État dispose de toute la force des cours d'eau navigables et flottables, de ceux-là mêmes qui peuvent donner le plus de chevaux permanents et sont les fournisseurs naturels des services publics.

« Sur les cours d'eau non navigables, l'État disposera d'une fraction importante de l'énergie brute ou transformée, produite par les usines privées privilégiées. Il pourra, en outre, créer des usines génératrices de force autonomes, partout où le besoin s'en fera sentir. Il lui sera loisible, enfin, de concéder une usine publique chargée spécialement d'alimenter un service public déterminé, tel que chemin de fer, tramway, distribution de lumière ou de force, etc.

« Le projet du Gouvernement sauvegarde donc, amplement, les intérêts de l'Administration, qui ne risque pas d'être prise au dépourvu.

« A l'État, aux départements, aux communes, aux associations de propriétaires de se montrer prévoyants, et de s'assurer, dès maintenant, sur les cours d'eau non navigables, la part d'énergie à laquelle ils ont droit.

« D'ailleurs, ici encore, la nature a bien fait les choses. Les services publics seront toujours des clients très recherchés de l'industrie privée qui ne saurait sans eux utiliser fructueusement ses chevaux permanents, l'électro-métallurgie ou l'électro-chimie se contentant de la force périodique à bon marché.

« De toutes façons, le monopole des forces hydroélectriques aux mains d'une fraction d'usuriers capitalistes, pressurant le consommateur, pour employer une terminologie courante, n'est pas à craindre. Du reste la loi du 17 juin 1906 sur les distributions d'énergie ainsi que les deux décrets

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du 17 octobre 1907, rendus en exécution de l'article 18 de cette loi, et ceux qui ont suivi fournissent à l'État une arme redoutable contre les trusts possibles.

« Au contraire, l'intervention directe de l'État en notre matière, n'aurait d'autres résultats que de bouleverser notre régime des eaux, sans profit pour l'industrie nationale et au détriment des riverains que l'on frustrerait, plus ou moins, des droits à eux reconnus par l'article 644 du Code civil (1). »

A part la loi du 9 avril 1908, régissant les cours d'eau navigables, la législation des chutes d'eau s'est enrichie, dans les années qui ont précédé la guerre, de quelques lois ou décrets conçus dans un esprit réellement libéral. Nous citerons plus particulièrement : les lois du 21 avril 1906, pour la protection des sites classés, celle du 8 avril 1910 sur la navigation des cours d'eau du domaine fluvial public ; les décrets du 1er août 1905 réglant la forme et l'instruction des demandes pour l'établissement des ouvrages sur les cours d'eau, du 13 juillet 1906, sur les redevances à payer par les concessionnaires de prises d'eau ; les circulaires ministérielles des 1er juin 1906 et 1er mai 1907 visant la police des rivières non navigables ni flottables, constituant un règlement d'administration complétant la loi de 1898. Mais la guerre, avec ses nécessités de premier plan, a fait sortir une réglementation nouvelle concernant la réquisition des usines tributaires de l'énergie hydraulique et la simplification des formalités d'occupation des propriétés privées pour l'exécution des travaux déclarés d'utilité publique avec urgence (loi du 28 mai 1915), commentée par la circulaire du ministre de la Guerre du 4 mai 1916. Le ministre de l'Armement et des Munitions a été chargé par le décret du 22 décembre 1916 de l'aménagement et de l'utilisation des forces hydrauliques des cours d'eau non navigables, ni flottables. Un service spécial, chargé d'assurer l'exécution du décret a été rattaché à l'organisation générale de la production. La loi de finance du 28 septembre 1916 a autorisé la participation de l'État à l'établissement sur les cours d'eau de toutes catégories d'usines hydrauliques intéressant la Défense nationale. Sous la poussée des événements, et en vue de la reprise économique, le gouvernement a déposé en juillet 1917 un projet de loi en vue de l'utilisation de l'énergie des cours d'eau tant navigables que non navigables. Cette nouvelle législation envisage des dispositions permettant d'une part de porter remède aux inconvénients résultant du classement des rivières en domaniales ou en non domaniales et, d'autre part, d'assurer la mise en valeur de l'énergie des eaux dans les conditions techniques et économiques les plus conformes à l'intérêt géné-

(1) *La législation des eaux et les cours d'eau non navigables ni flottables* (G. Tochon docteur en droit).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ral. Son but est d'instituer un régime complet d'aménagement et d'exploitation des forces hydrauliques. Le rôle de l'autorité publique est déterminé en vue de l'importance et de la destination de la force aménagée. L'unité de direction, quelle que soit la nature du cours d'eau, serait assurée par la création d'un sous-secrétariat d'État rattaché à la présidence du conseil des ministres (1).

D'après ce projet de loi toute utilisation de l'énergie hydraulique serait désormais subordonnée à une intervention de la puissance publique. Les conditions de concession ou d'autorisation seraient différentes suivant l'importance de l'énergie aménagée. La concession s'appliquerait à toutes entreprises ayant pour but le fonctionnement des services publics et suivant la force aménagée, à celles dont la puissance dépasse 500 kilowatts. Toutes les autres entreprises resteraient soumises au régime de l'autorisation. Les concessions seraient stipulées au nom de l'État.

Ces dernières, à raison de leur importance ou de leur objet, bénéficieraient d'un ensemble de prérogatives ordinairement réservées aux travaux publics, telles que servitudes spéciales pour faciliter l'établissement des usines, recours à l'expropriation, après déclaration d'utilité publique. La nouvelle loi consacrerait ce principe : qu'il est d'intérêt national que l'énergie des chutes d'eau soit mise en valeur au même titre que les minéraux que le sol renferme.

La loi tiendrait compte d'une manière complète des usages antérieurs que les riverains ont pu faire des droits que le Code civil leur accorde sur les rivières non navigables.

La loi établit des redevances en faveur des riverains, des redevances fiscales proportionnelles à la force utilisée (droit de statistique), des redevances contractuelles déterminées par un cahier des charges.

L'État se réserverait en tout temps le droit de rachat.

Les autorisations seraient limitées à une durée de soixante-quinze ans, d'ailleurs renouvelables, et elles sont taxées de la même façon que les concessions.

A l'expiration des soixante-quinze ans, les installations hydrauliques feraient retour à l'État qui pourra soit les concéder ou les autoriser à nouveau, soit les exploiter directement par les moyens de la régie simple ou intéressée, soit en exiger la suppression, s'il s'agit de simple autorisation.

Pour les installations ne dépassant pas 50 kilowatts, la perpétuité en est maintenue absolue.

Enfin le Gouvernement, à l'effet de réduire au minimum toutes les for-

(1) L'administration de l'hydraulique agricole, de laquelle dépendent les cours d'eau non navigables, continueront à relever du ministre de l'Agriculture. Le service de la navigation et de l'entretien des rivières domaniales resterait intégralement sous la direction du ministre des Travaux publics.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

malités relatives à l'instruction des demandes d'établissement d'usines

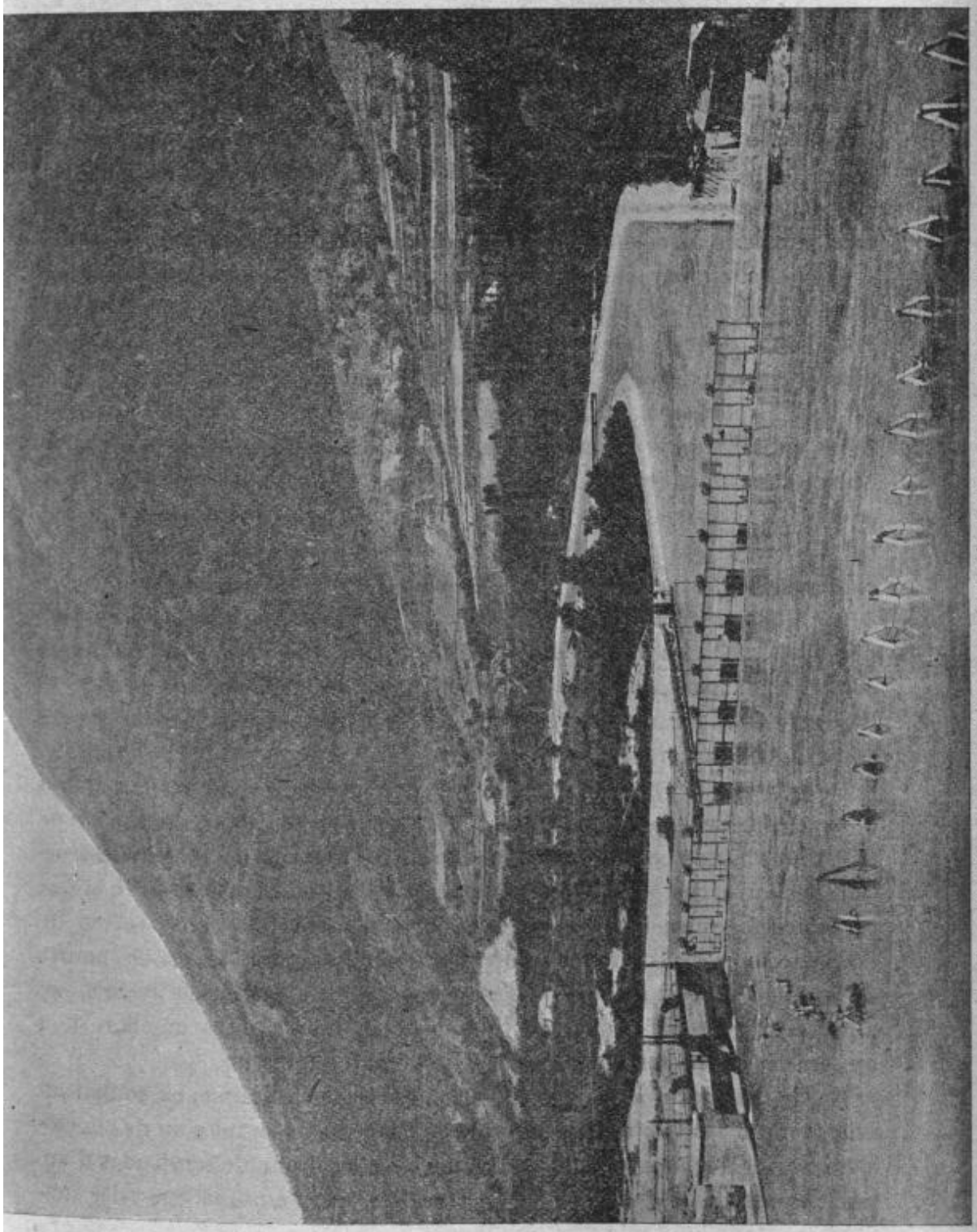


Fig. 7. — Vannes de décharge et canal d'amenée d'une usine hydroélectrique.

hydrauliques sur les cours d'eau domaniaux, a déposé un projet de décret réformant l'ordonnance du 13 février 1834 et le décret du 1er août 1905.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce décret impose à tous les degrés de l'instruction des délais rigoureux et formels pour l'étude et la solution des affaires.

En vue du relèvement social et économique d'après-guerre, les représentants des travailleurs ont manifesté des desiderata formulés par M. Jouhaux, qui visent la collaboration du capital et du travail. La gestion des établissements de houille blanche serait confiée aux intéressés eux-mêmes : producteurs (ingénieurs, employés et ouvriers) ; consommateurs (les communes éclairées et les industriels utilisant la force motrice). Ces deux classes seraient représentées au sein des conseils d'administration par leurs associations ou syndicats respectifs (ingénieurs, employés et travailleurs), par leurs conseils élus (communes et départements) et par leurs chambres de commerce (industriels tributaires de la force motrice).

Le point délicat de cette conception est de trouver un juste équilibre entre l'élément ouvrier, l'élément consommateur et le capital.

La prospérité économique des forces hydrauliques nécessite une équitable application des charges fiscales qui les frappent laquelle ne peut qu'aider à en étendre la plus large et la plus féconde utilisation. Les enseignements de la guerre au point de vue économique ne pourront que fortifier les pouvoirs publics dans l'idée de donner par les mesures les plus convenables l'essor le plus considérable à l'industrie des chutes d'eau.

La meilleure utilisation des chutes d'eau est aussi liée à l'obtention d'améliorations assurant, d'une part, la protection de nos montagnes contre le déboisement, la dénudation et le dégagement des pentes, et d'autre part, l'extension des distributions d'énergie et en particulier des transports de la force à grande distance.

Dans le premier cas, on demanderait de réglementer par des lois claires et sévères le droit privé de coupe de forêts sur les terrains en pente, en un mot tout abus de propriété, — qui aboutit à l'obstruction ou à la destruction des ouvrages protecteurs imposés par l'Administration, — ainsi que certaines modifications de la loi propres à assurer la conservation du domaine forestier et l'aménagement rationnel des montagnes. On pourra se rendre compte, au cours de cet ouvrage, qu'il a été législativement et administrativement apporté d'heureuses et importantes améliorations aux lois et coutumes qui régissaient le domaine forestier.

En ce qui concerne les distributions d'énergie électrique, on souhaitait voir faciliter leur obtention par voie de concessions simples ou de concessions par déclaration d'utilité publique avec les droits de servitudes d'appui, de passage ou d'ébranchage, nécessaires pour l'établissement des conducteurs et le bon entretien des lignes. On préconisait enfin des mesures relatives à la police et à la sécurité des lignes de transport dont dépendent directement la sécurité des personnes, des services publics intéressés, et la protection des paysages. La loi du 17 juin 1906 sur les distributions

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'énergie électrique donne en grande partie satisfaction à ces desiderata ; elle était d'ailleurs attendue avec impatience.

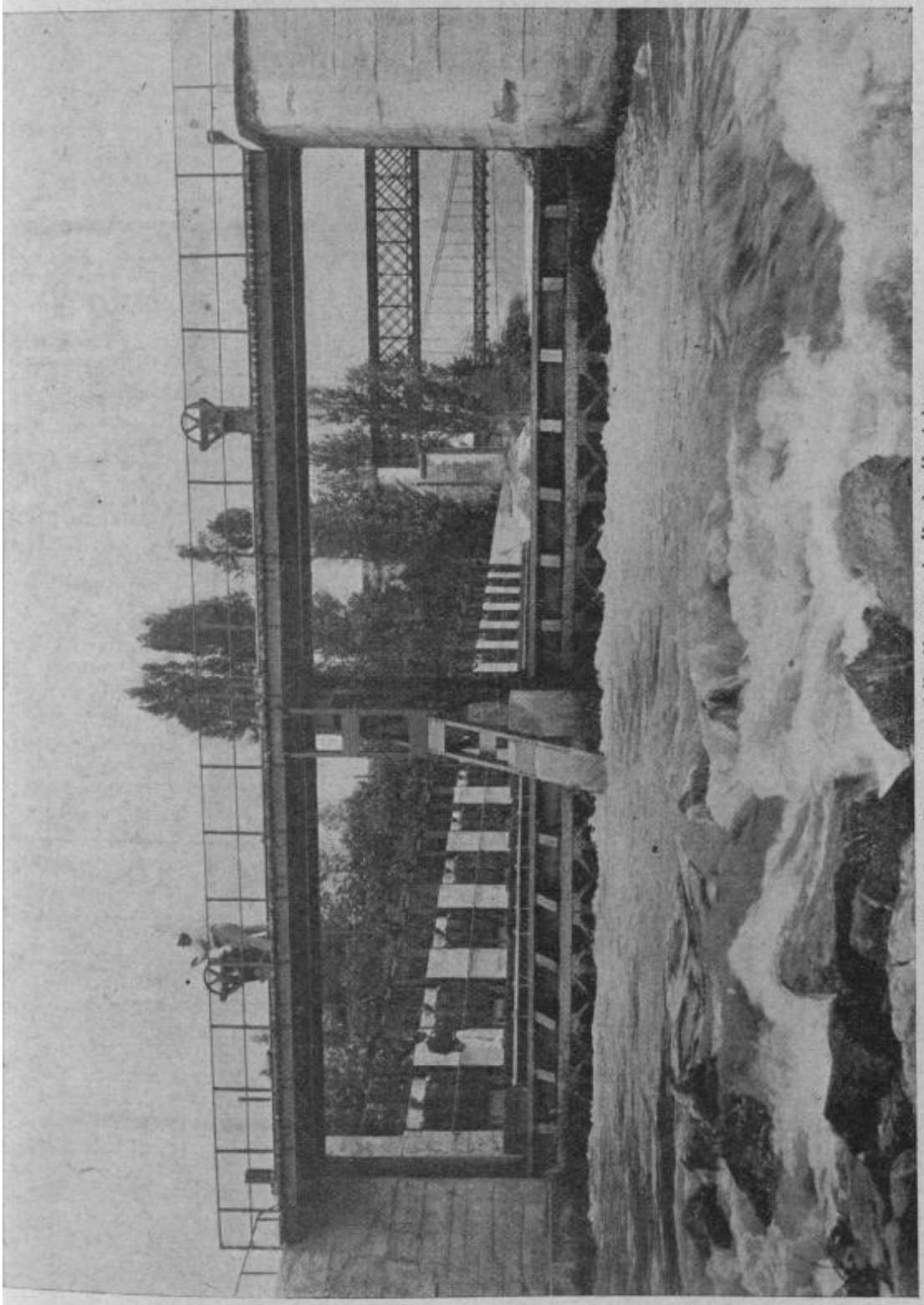


FIG. 8. — Barrage mobile d'une usine hydroélectrique.

Elle permet la concession municipale de distribution d'énergie avec ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sans déclaration d'utilité publique, et la distribution par simple autorisation de voirie reste possible. Depuis, les pouvoirs publics ont montré le haut intérêt qu'ils attachent au développement des industries hydroélectriques par l'élaboration d'un nombre important de décrets, arrêtés et circulaires, complétant ou expliquant cette belle loi du 17 juin 1906. Le lecteur trouvera tous ces documents résumés dans les parties de cet ouvrage réservées à la législation et réglementation des forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique.

Quant à l'arrosage en pays de montagne, il est toujours facile à concilier avec les exigences des captations de force, et les sources abondantes dans ces régions donnent suffisamment d'eau aux habitations très disséminées.

Les rivières navigables ou flottables, ainsi que nous l'avons noté plus haut, sont appelées de plus en plus à fournir un appoint considérable à notre houille blanche ; mais, comme elles font partie du domaine public de l'État, celui-ci est maître des conditions des autorisations qu'il accorde et le grave inconvénient de ces autorisations est d'être précaires et révocables sans indemnité. Il ne peut donc se créer qu'exceptionnellement de grands établissements industriels sur ces rivières. Mais ici, comme nous l'avons exprimé au sujet des questions fiscales, il importe que l'Administration s'inspire des méthodes les plus rapides pour ne plus laisser en suspens des dossiers qui intéressent au plus haut point l'avenir économique de notre pays.

Nous avons dit que l'électricité convient admirablement aux distributions d'énergie de grande importance et que la force hydraulique, transformée en énergie électrique, peut être transportée au loin sans qu'elle perde de ses avantages économiques (1). Il est, en effet, de pratique cou-

---

(1) Nous pensons intéressant de consigner dans cet historique les découvertes qui ont marqué les étapes qui ont précédé la venue de l'électricité industrielle depuis la mémorable invention de Gramme qui a marqué l'apparition des machines électriques modernes.

En l'an 600 avant J.-C. Théoclès de Millet découvre que l'ambre a la propriété d'attirer les corps légers et en l'an 79 J.-C. Pline constate que l'ambre doit être frotté pour obtenir ses propriétés attractives.

Gilbert, en l'année 1600, ouvre la voie aux phénomènes magnétiques par ses recherches sur la pierre d'aimant et Otto de Guericke, en 1602, invente la première machine électro-statique, que Nollet et Hawksbee perfectionnent. En outre ces derniers font les premiers essais sur la conductibilité, que n'avait qu'entrevue Grey, en 1709. Puis De Fay, en 1733, en collaboration avec Nollet fait une série d'expériences sur la conductibilité du corps humain.

Franklin, en 1746, découvre la puissance des pointes, Massenchembrock, la bouteille de Leyde et Randsen, en 1777, établit la première machine statique proprement dite. Narne, Winter et Le Ray perfectionnent cette machine.

En 1792, apparaît avec l'illustre Volta, la pile électrique qui tenait en germe l'électrochimie.

Œrsted, en 1820, amorce l'électromagnétisme dont le grand Ampère, en construisant la premier électro-aimant, va fixer la théorie.

En 1881, Faraday fait connaître les lois qui régissent la science électrique et, en 1832

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rante d'utiliser des forces hydrauliques considérables, sous forme d'énergie électrique, à des distances dépassant aisément 300 à 400 kilomètres, où elles sont distribuées entre des usines locales, aux lieu et place de la houille noire. Et là la houille blanche ne sert pas seulement à donner la vie aux puissants moteurs de la grosse industrie : par sa production économique, par les qualités si connues et si appréciées du courant électrique qu'elle a fait siennes, elle atteint le petit moteur familial, l'âme de la petite industrie, répandant les bienfaits de son œuvre civilisatrice : propreté, hygiène, diminution de fatigue physique et bien-être.

Les réseaux de distribution d'énergie ont pris en quelques années un développement tel que les exploitants ont dû créer de toutes pièces des services d'entretien très complets, à l'effet d'assurer autant la régularité du fonctionnement des lignes que la sécurité du personnel chargé de leur surveillance et celle des tiers appelés à cheminer dans le voisinage des réseaux à haute tension. Ainsi, au fur et à mesure que les constructeurs adoptaient des tensions plus élevées, des unités plus puissantes(1), des lignes de longueur plus grandes, les sociétés d'exploitation augmentaient le nombre de leurs usines génératrices et prenaient les mesures spéciales pour assurer le fonctionnement régulier et inoffensif des réseaux de distribution.

Mais si le transport exige de hautes tensions, la distribution en réclame, en général, de très modérées. C'est le transformateur, cette admirable invention d'origine française, qui a pu concilier, par son jeu propre, des conditions qui paraissaient contradictoires. Et vers la même époque, la merveilleuse découverte des champs tournants et les courants polyphasés sont venus donner au problème son extrême souplesse. Tandis que, vers l'année 1900, on trouvait déjà remarquable qu'on pût transporter quelques milliers de chevaux à 30 ou 40 kilomètres de distance, de 1904

Pixii établit la première machine électromagnétique. Puis Clarke, en 1836, invente une nouvelle magnéto, où les bobines sont mobiles et enfin en 1842, Dove trouve son réducteur de courant.

La même année, Bréguet crée les premières bobines d'induction, Foucault invente son interrupteur et sur les plans de Nollet, la Société l'Alliance met à jour les premières machines industrielles magnéto-électriques que Meritens perfectionnera en employant l'induit bobiné de Siemens.

L'année 1851, Ruhmkoff crée la bobine à interrupteur de Foucault et à condensateur.

En 1860, Planté ouvre un nouveau domaine avec son accumulateur, et en 1864, Lenz, dans le domaine de la théorie, complète les lois de Faraday.

Durant les années 1864 à 1867, Wilde et Ladd apportent des perfectionnements caractéristiques aux machines magnéto-électriques, puis Siemens et Wheatstone construisent des machines a excitation en dérivation. Enfin en 1869, Gramme crée de toutes pièces la dynamo moderne, et en 1882, le transport de l'énergie électrique s'affirme avec l'invention du transformateur par Gaulard.

(1) L'usine hydroélectrique de la Tallassee Power C^ie, sur le Yadkin Riwer (E.-U.), contient des alternateurs d'une puissance unitaire de 25.000 chevaux à la tension de 13.200 volts. Ces machines ont un rendement qui dépasse 0,96. On rencontre assez couramment des unités de 18.000 kilowatts à des tensions de 15.000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à 1906, la Toronto and Niagara Power and Cº transportait 125.000 che-

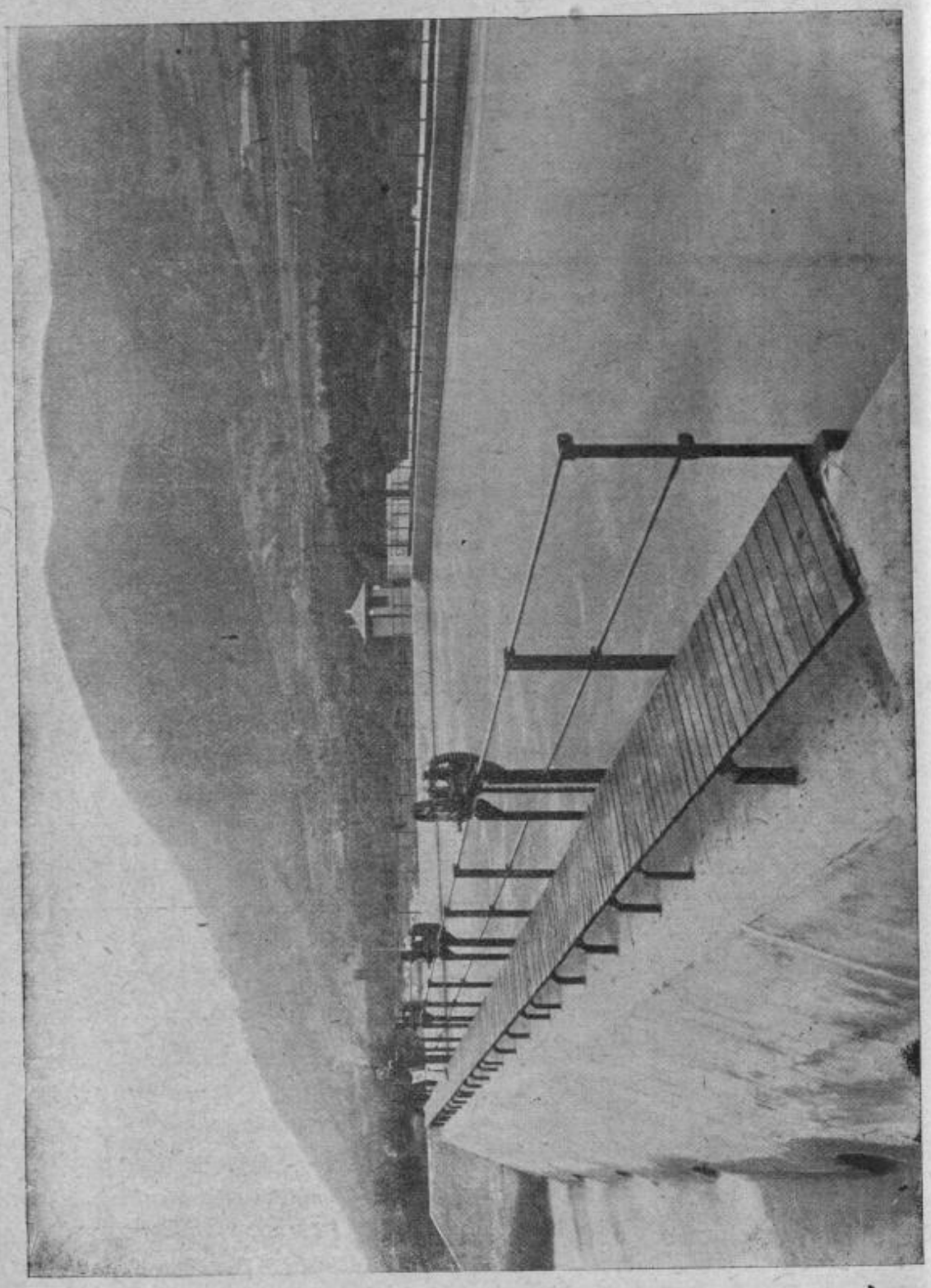


Fig. 9. — Chambre d'eau, et grillage de garde d'une usine hydroélectrique.

vaux à 120 kilomètres de distance, et la Baty-Coutres Company portait cette distance à 370 kilomètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nombreuses sont, de nos jours, les transmissions d'énergie électrique installées ou en voie de réalisation, utilisant les tensions de 50.000 et 60.000 volts et permettant de franchir des distances considérables : usine hydroélectrique de Nexaca, transport de 270 kilomètres ; transport de Colgate, 358 kilomètres ; de Winnipeg, d'Uppemborn, de Kikkelsrud, de Tuilière, de Taylors'Falls, de Trölhatan, du Niagara, de Pomblière, de Gaucin, de Caffaro, d'Orlu, de la Brillanne, du canal Guiliani, d'Augst et Wilhem, d'Aelf Karleby, de Ventavon, de Molinar, de Rutz, de Soulom, de Eget, de Riton, de Capdella, d'Adamello, etc.

Mais la nécessité, l'esprit d'initiative, aidés et soutenus par des progrès rapides et insoupçonnés dans les moyens de génération des courants à haute tension, par des perfectionnements incessants dans la construction et l'adaptation du matériel mécanique et électrique des usines de houille blanche, ainsi que dans la protection, l'isolement et le perfectionnement des lignes à haut voltage, firent envisager sans crainte le maniement de tensions beaucoup plus élevées pour la meilleure utilisation des forces hydrauliques dans des régions situées à des distances jugées naguère infranchissables (1).

A l'honneur de la France, berceau de la houille blanche, ce furent ses ingénieurs qui osèrent les premiers affronter ces gigantesques projets que l'on voit, à l'heure actuelle, éclore à peu près chez toutes les nations privilégiées de houille blanche. C'est ainsi qu'en 1903 MM. A. Blondel, Harlé et Mähl, s'inspirant des travaux et expériences remarquables de M. Thury sur le système à courant continu, à intensité constante, proposèrent et étudièrent les moyens d'utiliser les forces naturelles du haut Rhône, capables de produire une puissance de 150.000 chevaux pouvant être transportée à Paris sous une tension de 150.000 volts.

Une telle installation eut constitué, si elle avait été réalisée en temps, une partie importante de notre outillage national à une époque où les intérêts économiques gouvernent le monde et font les grandes nations, et eut été un instrument puissant pour les fabrications de guerre de la Défense nationale en même temps qu'un mobile supérieur en faveur de la vulgarisation des chutes d'eau. D'autres résultats, non moins importants, peuvent être attendus de la mise en valeur des efforts des vaillants et savants promoteurs de cette véritable œuvre nationale, tels que : le développement rapide des industries parisiennes et de la banlieue directe,

(1) Les premiers tableaux de distribution bâtis sur le principe de l'isolement des appareils dans les cellules incombustibles furent exécutés vers 1890 par Ferranti ; Stillwel et Price ont d'autre part été les principaux promoteurs de la subdivision des machines et feeders en groupes ; enfin, c'est Partridge qui a le premier employé l'interrupteur à huile en 1891, à Deptfort, disposition que Brown a mise définitivement en pratique en 1897

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'amélioration des finances de la Ville de Paris, de l'hygiène publique et privée, et une réduction considérable du tribut que l'étranger prélève sur notre consommation de charbon.

L'exploitation des forces naturelles nous apparaît en outre, à notre sens, comme un puissant moyen d'arrêter l'émigration de nos capitaux à l'étranger et de les utiliser à nos entreprises nationales, dont une des conséquences serait d'assurer à notre commerce ce grand avantage qu'il a pu jusqu'ici garder : le crédit à bon marché.

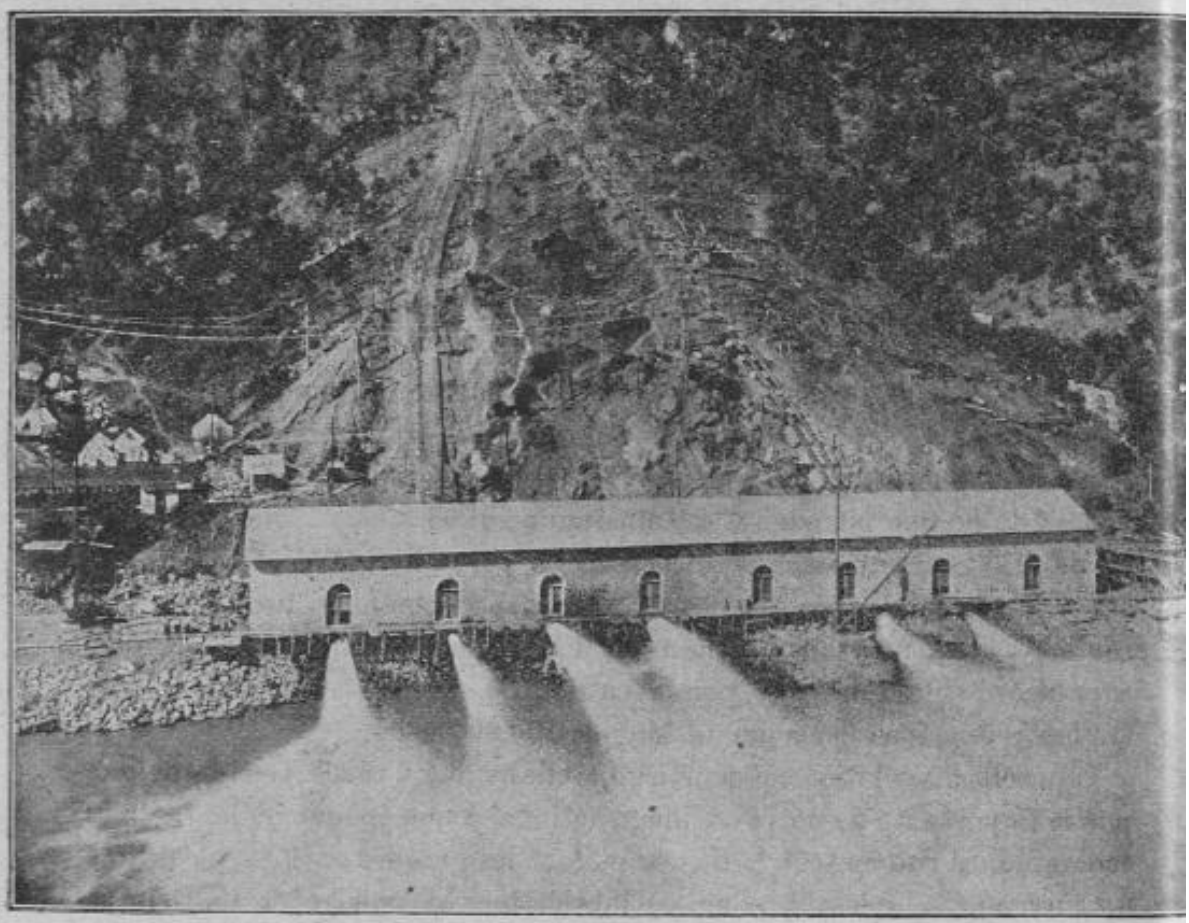


FIG. 10. — Usine hydroélectrique de Colgate (Amérique).

Les audacieuses conceptions de nos ingénieurs eurent pour conséquence une émulation féconde chez les autres nations. Parmi les projets grandioses élaborés à ce jour, — qui marquent les brillantes étapes des chutes d'eau, — celui qui a le plus frappé l'imagination des peuples est l'aménagement des chutes du lac Victoria (sur le fleuve Zambèze) pour l'alimentation des villes de Johannesburg et de Prétoria, situées à 1.200 kilomètres du point de captation des forces motrices, avec l'emploi d'une tension de 150.000 volts. Les grandes installations réalisées depuis montrent le che-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

min parcouru dans cette voie si féconde des transports d'énergie électrique à grande distance et par conséquent à haute tension.

Parmi ces installations nous citerons notamment : En Europe, les usines de Koebuk (110.000 volts) et d'Empreza (120.000 volts), de l'Ebro (110.000 volts) ; en Amérique, celles de l'Ontario Power Cº (110.000 volts), de Los Argelés (106.000 volts), du Boulder (100.000 volts), du Central Colorado Power Cº (100.000 volts), de Muskegon River Cº (110.000 volts), de Great Falls (100.000 volts), de Hydro Electric Power (110.000 volts), de Stanislaus Power Cº (104.000 volts), de Chuquinata (110.000 volts), Great Western (100.000 volts), Mexico Nothern (110.000 volts), Schawinigan Watter (100.000 volts), Yadkin River Power (103.000 volts), Sierra San-Francisco (104.000 volts), Washington Watter (110.000 volts), Georgia Power (110.000 volts), Fuergas y Riego del Ebro (110.000 volts), Southern Sierra Power (140.000 volts), au Sable (140.000 volts), Seros (140.000 volts) et Pacific Light and Power (150.000 volts).

Il n'est pas sans intérêt de consigner, à propos de transport de force, que la Suisse a pris des mesures légales pour éviter la dispersion, au moyen de la transmission électrique en pays étrangers, de ses forces hydrauliques qu'elle considère, à juste titre, comme constituant une partie importante de sa richesse nationale (1). La France, à l'instar des pays helvétiques, a voulu aussi protéger ses richesses naturelles contre les empiétements des nations voisines, et elle a introduit dans la législation une disposition semblable.

Les chutes d'eau de montagne, utilisées rationnellement, ont permis de répandre de la lumière électrique à flots, avec tout son confort, dans les villages les plus reculés. Ainsi la force captée des cascades, qui fait mouvoir les turbines mères de l'électricité magique, se joue des distances, dissipant les ténèbres et prodiguant, sur son chemin, la chaleur et la vie.

Aujourd'hui, l'ondine dégringolante des rivières torrentielles actionne les chemins de fer et les tramways de montagne, soutient l'élan vertigineux des chemins de fer de la plaine et des grands express internationaux. L'emprise de ce dernier domaine n'est plus qu'une question de transformation du matériel moteur de nos lignes à vapeur actuelles.

La traction électrique date d'hier, mais elle a fait en peu de temps des progrès immenses et elle a permis de réaliser le transport des foules dans des conditions de célérité inconnues jusqu'alors ; grâce aux lignes de ban-

(1) Toute dérivation à l'étranger d'énergie électrique provenant de forces hydrauliques suisses ne peut avoir lieu sans l'autorisation du Conseil fédéral ; cette autorisation, qui n'est accordée qu'en tant que la force hydraulique ne trouve pas d'emploi en Suisse, est donnée pour un temps limité et ne peut excéder vingt ans ; elle peut être, pour des raisons d'utilité publique, retirée en tout temps, mais moyennant indemnité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lieue, la population des grandes agglomérations, avide d'air et de lumière, s'accoutume à profiter des espaces libres que lui offrent les environs.

Tous les pays s'occupent activement de l'application de l'électricité aux chemins de fer électriques. Sans compter l'Amérique, l'Italie et la Suisse, les lignes en exploitation se chiffrent par milliers de kilomètres. La France, outre les métropolitains, possède des lignes électriques établies par la Compagnie P.-L.-M., en Savoie et dans l'Isère ; par la Compagnie du Midi, dans les Pyrénées. D'autre part toutes les pénétrations des grandes lignes à Paris seront bientôt électrifiées, ainsi que la Grande Banlieue parisienne. Il apparaît que l'électrification va prendre un essor nouveau à l'après-guerre en raison de la question du charbon. En France, les chemins de fer représentent une consommation annuelle de près de 8 millions de tonnes (8 millions de chevaux, à $2^{k},5$ de charbon par cheval-heure).

M. Loucheur, l'éminent industriel, estime que cette consommation pourrait être réduite de 75 0/0 par l'électrification de nos lignes de chemins de fer. En temps normal au point de vue mécanique et économique l'emploi de la vapeur atteint au plus 20 0/0 du rendement du charbon, soit donc 80 0/0 de perdu ou pratiquement 7/10. L'énergie hydraulique transportée coûte 60, 45 et 30 millimes le kilowatt, alors qu'avec le charbon, par l'emploi des turbines, la dépense varie entre 45 et 90 millimes. On peut donc envisager comme pratiquement possible l'électrification sur l'ensemble du réseau du Midi, de l'Orléans, du P.-L.-M. et une partie de l'Est. Il est donc souhaitable que les études, pour l'électrification des lignes existantes, soient mises à l'ordre du jour dans notre pays. Enfin pour la question également si intéressante de la traction électrique sur canaux, la France a fait les premières tentatives pratiques.

Le four électrique, qui a déjà pris une place prépondérante dans la grande industrie de la métallurgie, suit sans arrêt la marche triomphale que lui ont ouverte de nombreux succès. Parmi ses conquêtes, nous nous bornerons à citer : la fabrication des aciers ordinaires, demi-fins et fins, des aciers spéciaux, des alliages du fer, de l'aluminium, du silicium et de ses dérivés, du cuivre, du zinc, du nickel, du phosphore, de la baryte, des carbures métalliques, du manganèse, des nitrates, et la préparation des métaux divers.

Le four électrique permet, grâce aux températures élevées dont il est le siège, d'obtenir la désulfuration et la déphosphoration presque complètes de l'acier. L'arsenic et le cuivre qui constituent les impuretés très néfastes d'habitude ne le sont plus dès que le soufre et le phosphore ont disparu. Les aciers électriques sont équivalents aux meilleurs aciers au creuset. Ils présentent en plus d'excellentes qualités de trempe. Ils sont très homogènes et, au point de vue de la pureté, on arrive à abaisser la teneur en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soufre et en phosphore à quelques cent millièmes, quelles que soient les matières premières.

Les avantages particuliers du four électrique dans la métallurgie sont d'une grande importance au point de vue pratique : tels sont la suppression de la ventilation, de la confection des briques ou agglomérés de charbon, des accrochages, des engorgements dans les fours et les creusets, la possibilité de fondre des lits de fusion beaucoup plus réfractaires que ceux passés au four à manche, enfin la réduction de la main-d'œuvre.

Les usines électrométallurgiques assurent la très grande partie de la production française d'acier au four électrique. Pour l'aluminium et les ferros alliages elles se sont créées des débouchés au delà de nos frontières et sont parvenues à concurrencer leurs rivaux étrangers sur le marché extérieur. La guerre a appris le chemin de la Houille blanche à la grande métallurgie française en créant elles-mêmes ses chutes d'eau ou en utilisant l'énergie des grands secteurs d'électricité. Pour le traitement de la fonte de fer et du zinc on utilise de nos jours des fours atteignant 5.000 chevaux de puissance.

La préparation de la fonte par la réduction électrique du minerai est maintenant résolue industriellement en Suède, au Canada et à l'usine hydroélectrique de Livet. La fabrication du fer électrolytique permet déjà de fabriquer des tuyaux et des tôles qui se caractérisent par une résistance élevée et allongement spécifique considérable et une grande perméabilité. Avec un kilowatt-an on peut fournir deux tonnes de fer et la dépense n'excède pas 100 francs par tonne de fer.

La métallurgie du zinc a pris un développement longtemps souhaité. On peut traiter les minerais sans grillage préalable et l'utilisation de matières peu riches avec le minimum de charbon. On est enfin sur la voie du traitement pratique par le four électrique des minerais de cuivre sulfurés ou oxydés, et de la fabrication du nickel par l'électrolyse. Au point de vue du développement du four électrique, certaines industries qui consomment beaucoup de charbon, auront tout intérêt à s'adresser à l'énergie électrique (verreries, porcelaineries, poteries, tuileries, etc.).

L'électro-chimie [1], comme le four électrique, a donné naissance à de

---

[1] L'électro-chimie est une science très jeune, dont l'origine ne date que du commencement du XIXe siècle et les applications pratiques ne remontent pas au delà d'une trentaine d'années.

En 1800, Carlisle et Nicholson décomposent l'eau en ses éléments, hydrogène et oxygène et, en 1806, Humphry Davy, le fondateur de l'électro-chimie et de l'électro-métallurgie, montre les effets chimiques de la pile. Dès 1807, il isole les métaux alcalins et alcalino-terreux et, en 1813, il découvre l'arc voltaïque et se livre à d'admirables expériences sur les effets lumineux et calorifiques du courant électrique.

En 1815, Pepys réussit à transformer en acier, par le courant électrique, un fil de fer épais et, en 1849, apparaît le premier four électrique, celui de Despretz. En 1853, Pichon prend le premier brevet en date de four électrique pour usages métallurgiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

colossales usines, fixées au cœur même des montagnes, où elles ont pour mission d'élaborer des produits de grande consommation.

L'avenir de cette industrie est immense, ses horizons sans bornes, ses chercheurs légion. Il est à souhaiter que les capitaux continuent à faire à ces installations la plus grande confiance en s'y intéressant largement, pour le plus grand profit de notre commerce.

Les opérations électro-chimiques les plus importantes sont actuellement : la fabrication du carbure de calcium, des chlorates, de la soude, des hypochlorites, des nitrates, des cyanamides et autres produits azotés ; la galvanoplastie, la galvanisation, la production de l'acide azotique, la fixation de l'azote et de l'ozone atmosphériques, de l'oxygène et de l'hydrogène, le blanchiment des matières textiles, etc.

Une autre application de grande envergure de la houille blanche, qui présente un intérêt capital pour le Midi, est l'emprunt que l'on pourrait faire d'une certaine puissance aux cours d'eau des Alpes pour actionner des usines élévatoires des eaux du Rhône en vue de l'irrigation du bas Languedoc.

Un vaste champ d'exploration est réservé aux industries agricoles. La rareté de la main-d'œuvre, la nécessité d'utiliser toutes les terres disponibles et enfin le prix élevé du charbon vont apprendre à nos agriculteurs et cultivateurs le chemin des Secteurs de distribution d'énergie électrique.

Les usines hydrauliques adjoignent de nos jours à leurs réseaux des centrales à vapeur qui servent à parer aux alternatives d'abondance et de disette pour la meilleure utilisation de la puissance dynamique et économique des cours d'eau. Pour l'augmentation des puissances à transporter un adjuvant nouveau est venu en faciliter la réalisation tout récemment. Il résulte de la substitution de la turbine à vapeur à la machine à piston et des progrès accomplis dans la construction des turbines. On fait couramment aujourd'hui des turbines de 5.000 kilowatts et on en a établi qui peuvent fournir jusqu'à 40.000 chevaux.

Au point de vue de leur exploitation, les usines hydroélectriques ont bénéficié de la connaissance plus approfondie des régimes d'étiage des

---

En 1878, Siemens construit deux types de fours électriques et, en 1880, Clerc procède à des essais sur la fusion de la chaux. Six ans plus tard apparaît le four de Cowles avec lequel il opère la réduction des oxydes. L'année 1887 est signalée par l'invention du four Héroult pour la préparation des alliages d'aluminium. Dès lors, les applications de l'électrolyse par fusion ignée se multiplient et le four électrique se perfectionne : Minet et Hall pour l'aluminium, Grabau pour le sodium, Grætzel pour le magnésium, Borchers pour le sodium (1891), Acheson (1892) pour le carborundum, Girard et Street (1893) pour la transformation du charbon ordinaire en graphite. En 1896, on trouve le four à résistance de King et Wyat, et de 1892 à 1902 les fours Moissan pour la production des carbures métalliques.

Après 1902 survient la période de développement intensif des produits électro-métallurgiques et avec les fours de création récente.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cours d'eau et on a pu aussi, par l'association des cours d'eau à régimes différents et de réserves à vapeur, créer de grands réseaux sans recourir à l'emploi de grandes réserves hydrauliques. L'admirable réseau du Littoral méditerranéen, en France, est une des installations modernes de ce genre les mieux conçues.

Le fonctionnement en parallèle de grosses usines situées à de grandes distances les unes des autres, à l'effet d'étendre leur rayon d'action, marque un très intéressant progrès dans l'exploitation des grandes centrales. De ce fait, l'industrie des chutes d'eau a bénéficié de l'esprit d'entente qui anime aujourd'hui les exploitants qui, au lieu de se faire une concurrence à outrance, se prêtent un secours mutuel par l'échange de leurs excédents et limitent leurs domaines d'exploitation à des champs respectifs basés sur le revenu le plus profitable à chacun d'eux.

L'attention des ingénieurs se porte de nos jours sur les questions se rattachant à l'isolement électrique des machines et appareils, tributaires des hautes tensions employées actuellement. Les progrès les plus récents, dans la construction des alternateurs, consistent à obtenir le plus grand coefficient de sécurité dans l'exécution des bobinages. On tâche d'obtenir des enroulements à peu près complètement privés d'air, pour atteindre un isolement extrêmement élevé. Les unités de 30.000 kilowatts sont courantes. Pour la centrale de Chicago on construit des types de 70.000 et 90.000 kilowatts.

Pour les isolateurs, qui ont donné lieu à une crise en raison d'accidents survenus sur les lignes à très haut voltage, on a reconnu que les faiblesses constatées provenaient de la qualité de la matière employée dans leur fabrication. On étudie le meilleur profil à adapter et on a augmenté la rigueur des essais de réception. En Amérique, on envisage avec une certaine confiance l'utilisation des conduites avec circulation d'huile, dans lesquelles seraient placés les conducteurs sous-tension.

On a pu se rendre compte de la grande importance des cours d'eau naturels comme éléments d'économie sociale, que signalait déjà, dès l'année 1898, le savant électricien et puissant vulgarisateur, M. A. Blondel, dans une étude sur « l'Utilité publique des distributions d'énergie » (1), qui a d'ailleurs aidé à l'élaboration de la loi sur les distributions d'énergie que nous avons commentée plus haut.

Il démontrait dès lors l'intérêt qu'il y avait à aller chercher au loin dans les chutes d'eau l'énergie nécessaire pour créer artificiellement des régions industrielles nouvelles ou développer celles existantes, à l'effet de répondre aux besoins d'énergie de plus en plus grands des énormes agglomérations pour les transports en commun, les différentes industries grandes et pe-

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, 1er trimestre 1898, Vve Dunod, éditeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tites, les exigences de l'hygiène actuelle. Dans un tel ordre d'idées, il indiquait comme possible et nécessaire l'établissement de districts manufacturiers, — permettant d'appeler les ouvriers dans des pays peu habités, — et d'ateliers familiaux, un tel ensemble devant constituer un élément d'amélioration sociale de premier ordre dans les sociétés modernes.

Il importe donc que, plus que jamais, en vue de la guerre économique des nations, telles que les trouvera la fin du plus grand drame que le monde ait vu, non seulement les pouvoirs publics organisent les services hydrauliques, tant pour les travaux de régularisation des fleuves, rivières et torrents, que pour rassembler les données nécessaires aux études de la puissance hydraulique, en dressant un cadastre des eaux publiques répondant au critérium des exigences modernes quant aux avantages industriels ; mais il est encore nécessaire, dans toutes les régions où les eaux naturelles abondent, d'encourager et cela par tous les moyens possibles toute initiative de substitution de l'énergie hydroélectrique à celle du charbon.

Nous nous autorisons à cet effet de suggérer de poser le problème à notre sens, en partant de ce principe que l'extension de l'industrie des chutes d'eau doit rechercher les méthodes les plus économiques pour la captation de l'énergie que celles-là renferment. Les gisements de mine blanche relativement économiques au point de vue des capitaux à y consacrer et plus rapides d'exécution sont aujourd'hui, à quelques rares exceptions près, réalisées (1). Il faut donc envisager la mise en valeur des chutes d'eau qui demandent davantage de capitaux et plus de temps pour la période des travaux. Telles sont surtout les chutes d'eau à gros débit et de faible hauteur que l'on peut créer sur les fleuves ou rivières du domaine public.

Ici il faut créer des usines de grande puissance comme celles que l'on peut établir notamment sur le Rhône et la Durance. La question de l'accumulation hydraulique s'impose désormais non plus simplement comme un moyen de régularisation du débit des cours d'eau, mais aussi comme un adjuvant devant sinon éviter totalement l'emploi de réserves thermiques dans les usines hydroélectriques, mais tout au moins à réduire leur capacité au strict indispensable, à l'effet d'économiser la consommation du combustible.

La mise en parallèle des usines hydroélectriques, bien comprise, devra

(1) On avait à tort parcimonieusement limité la capacité des premières dérivations sous prétexte de s'en tenir aux forces permanentes. On revient peu à peu de cette erreur ; on transforme même là, où c'est possible sans trop de frais, les anciens canaux de prise d'eau pour accroître leur capacité, comme, on vient de le faire, par exemple, à l'usine de Rouperioux sur la Romanche (Tome VII, Service des Grandes Forces hydrauliques).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans tous les cas avoir une répercussion notable sur la diminution des réserves thermiques et sur leur durée saisonnière et journalière de fonctionnement. Une étude des réseaux à haute tension existants et de ceux en projet pourrait amener des centres d'exploitation plus en rapport avec une distribution générale du pays visant le meilleur rendement économique.

Nos voisins, les Suisses, préoccupés eux aussi de rendre le plus productif possible leur richesse en eaux motrices, se préparent aux luttes à venir dans un esprit qui convient à notre tempérament en ce sens que dans leur programme ils s'inquiètent de ménager tous les intérêts en ne faisant intervenir que progressivement l'État, c'est-à-dire au mieux des intérêts généraux.

Dans cet ordre d'idée il apparaît nécessaire de réunir toutes les associations techniques et économiques du pays pour l'étude de la limitation de la consommation du charbon et du pétrole provenant de l'étranger, de former des syndicats de grandes entreprises dans le but d'arriver à une réaction entre les usines génératrices de façon à diminuer l'importance des réserves, à utiliser et assurer l'utilisation complète de l'énergie des chutes d'eau et à uniformiser les systèmes de courant à haute tension ainsi que leur mode d'exploitation, à répartir au mieux la main-d'œuvre par des équipes donnant leur maximum d'effet dans une durée déterminée, pour leur assurer un repos et une existence plus en rapport avec les besoins sociaux actuels.

Il va de soi que les taxes et les impôts sur les usines hydroélectriques doivent être établis à des taux supportables pour les entreprises. Tout en assurant la complète liberté des tarifs pour ces dernières, on pourrait établir la fixation d'un dividende maximum pour les concessionnaires en même temps que l'établissement d'un taux pour l'intérêt et l'amortissement des capitaux des entreprises de l'État, des départements, des communes et des particuliers et enfin prévoir une participation ouvrière dans les bénéfices.

Notre houille blanche aurait pu sinon enrayer totalement la terrible crise de charbon de l'hiver 1916, mais au moins la réduire à des conditions acceptables, si on avait bien compris depuis dix ans son utilité en cas d'événements comme ceux qu'une grande et longue guerre amène à sa suite.

En même temps que la guerre nous apprenait nos ressources et notre erreur d'en limiter l'utilisation, elle a contraint notre industrie à revivre, sous peine de mourir de la mort même du pays qu'elle n'eût pas sauvé. L'esprit d'entreprise, de conception rapide, de réalisation hardie s'est réveillé, alors que l'on avait compris que les hésitations n'étaient plus permises. Et la nation aidant, par des avances de capitaux formidables faites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à ses industriels, une activité dévorante a transformé les usines existantes et créé de toutes pièces dans toutes les régions de la France des ateliers et des usines pour la fabrication du matériel de guerre. Tout a été mis à contribution : ressources inutilisées, richesses inexploitées, forces inemployées. Là où on aurait mis dix ans en temps ordinaire pour mettre sur pied une usine de quelque importance, en six mois ou un an avec une main-d'œuvre décuplée on a édifié des aciéries prêtes à travailler en plein rendement. Où l'on jetait un million, on en a jeté dix et l'industrie française en trois ans a décuplé ses forces. Et à côté de la victoire du guerrier, de nos immortels poilus, s'est élevée au ciel de France la victoire du travailleur.

Dans ce puissant mouvement de rénovation industrielle, les forces hydrauliques dans toutes les branches de leur activité se sont montrées à la hauteur de la tâche qu'on attendait d'elles ainsi que nous le montrons dans un paragraphe spécial consacré au rôle des usines hydroélectriques dans la Défense nationale. Les industries électro-chimiques et électro-métallurgiques se sont outillées et développées et presque partout les forces inemployées ont été utilisées à l'armement de guerre appelant transformations sur transformations, agrandissements sur agrandissements. Et toute cette organisation nouvelle est prête pour la lutte et la vie économiques aux lendemains de la paix. Espérons que les audaces, que le sens des associations, que les énergies qu'a développés l'esprit de guerre pour fournir à nos soldats les moyens matériels de la victoire, se retrouveront pour mener notre belle France aux plus hautes destinées industrielles garantes d'une paix à l'abri de tous coups de force.

Cette évolution de l'industrie des forces hydrauliques dont nous avons essayé de donner une idée par les lignes qui précèdent, nous l'avons suivie pas à pas dès son origine, passionné, en raison de notre origine savoyarde, des choses de la montagne, heureux et fier de ses succès.

Le temps est déjà loin où nous saluions avec enthousiasme, dans le journal *le Savoyard de Paris*, la rénovation industrielle des hauts reliefs pour l'utilisation des richesses qu'ils renferment.

Qu'il nous soit permis d'envoyer à ces vaillantes populations de la montagne l'expression de notre admiration pour le concours qu'elles ont apporté à l'implantation chez elles d'une industrie qui intéresse tous les enfants de la France, à ces populations qui, selon les remarquables paroles de M. Hanotaux, « ont supporté le poids du jour, même dans les moments où elles auraient pu en être accablées », et dont elles viennent encore de nous donner un magnifique exemple au cours de la Guerre « et qui n'ont pas toujours été récompensées des initiatives heureuses qu'elles ont eu bien des fois dans le passé ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LA TECHNIQUE
DE LA
HOUILLE BLANCHE
ET DES
TRANSPORTS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

TOME I

CRÉATION ET AMÉNAGEMENT DES CHUTES D'EAU ET DES USINES HYDROÉLECTRIQUES

CHAPITRE PREMIER

FORMATION ET RÉGIME DES COURS D'EAU

I. — NOTIONS GÉNÉRALES

1. Nature des eaux. — L'étude hydrologique d'une région montagneuse est très complexe et comporte plusieurs questions d'ordre assez différent. Telles sont, pour ne parler que des principales, l'étude de l'écoulement des rivières et leur jaugeage, celle des précipitations atmosphériques et de la transmission des pluies aux thalwegs, avec les questions secondaires qui s'y rattachent, notamment celle du reboisement, enfin l'étude de la propagation des crues.

C'est le mouvement des eaux du cours d'eau allant à la mer que l'on utilise pour la création des forces hydrauliques. L'évaporation qui se produit sous l'influence de l'action solaire, à la surface des mers, donne naissance à des nuages qui se condensent sur les continents et se résolvent en pluies, lesquelles forment les ruisseaux, les rivières et les fleuves qui retournent à la mer.

La chute de la pluie et de la neige, ainsi que la fonte des glaciers, depuis les nuages jusque sur le sol, se divisent en trois parties : une qui est évaporée, une qui s'infiltre directement dans le sol et une autre enfin qui ruisselle à la surface. Ces deux dernières donnent respectivement naissance aux *eaux souterraines* et aux *eaux superficielles*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les eaux superficielles suivent d'abord les lignes de plus grande pente, puis se réunissent en filets, ruisselets, ruisseaux et cours d'eau, en se concentrant dans les lignes de déclivité maximum. La surface finie, couverte par le faisceau de lignes de plus grande pente, constitue le *bassin* du cours d'eau, dont le thalweg est la ligne de plus grande pente collectrice. Le contour du bassin est la ligne de faîte.

Si le sol présente des interstices, des fissures, et s'il est perméable, les eaux se répandent à l'intérieur et, en s'y accumulant, donnent naissance à des nappes souterraines. Lorsque celles-ci atteignent un certain niveau, elles finissent par trouver dans les dépressions des points par lesquels elles viennent s'épancher à la surface en formant des sources.

2. Classification des cours d'eau. — Les cours d'eau de montagne ont de fortes pentes et sont alimentés en partie par la neige, dont la fonte progressive a pour effet de régulariser leur régime. Ces cours d'eau se divisent en quatre catégories : les rivières, les rivières torrentielles, les torrents et les ruisseaux.

Les rivières, coulant dans les vallées larges, ont un assez fort volume d'eau et des crues prolongées ; leur pente constante sur de grandes longueurs n'excède pas 15 millimètres par mètre. Les dimensions et la nature de leur lit d'écoulement obligent les eaux à conserver un niveau moyen presque uniforme, sauf dans les cas de pluies torrentielles.

Les rivières torrentielles forment les affluents principaux des rivières proprement dites ; leurs vallées sont à la fois moins larges et moins longues et les variations de leur pente plus rapides. La pente n'y excède pas 60 millimètres par mètre. Ces cours d'eau produisent, dans des conditions favorables, une puissance constante et peu coûteuse, bien qu'à la fonte des neiges ou à l'époque des grandes pluies ils se transforment en torrents parfois formidables.

Les torrents coulent dans des vallées très courtes ; leur pente est supérieure à 60 millimètres par mètre sur la plus grande longueur de leur cours.

Enfin les ruisseaux ont un petit volume d'eau et un faible parcours. En général, ils n'affouillent pas les berges et ne charrient pas de matériaux.

En résumé, les cours d'eau tranquilles ont leur pente régulière, et la forme de leur lit varie peu ; l'eau n'est troublée par les pluies que pendant de courtes périodes, et leur maximum d'intensité ne se produit pas brusquement.

Les cours d'eau torrentiels, au contraire, se caractérisent par une pente très forte et irrégulière ; leur lit change fréquemment de forme et d'emplacement. Les troubles occasionnés par les crues sont très accusés et diminuent d'intensité à mesure qu'on s'éloigne de la source.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un cours d'eau torrentiel comporte quatre parties : le bassin de réception, le canal d'écoulement, le lit de déjection et le lit d'écoulement.

Le *bassin de réception* recueille les eaux et leur fournit les matériaux qu'elles entraînent. Les thalwegs du bassin de réception convergent toujours vers un orifice d'échappement que l'on appelle goulot. Les formes de ce bassin dépendent de la nature des parois qui encaissent les eaux.

Le *canal d'écoulement*, qui constitue le lit proprement dit du torrent, doit son origine à une bande de roches plus dures que celles du bassin de réception. Lorsque le canal est resserré entre des roches abruptes, cette partie du cours d'eau prend le nom de *gorge*.

Le *lit de déjection* est le lieu où s'accumulent les amas provenant des affouillements et des érosions produites par l'eau dans les régions précédentes. Ces dépôts affectent la forme d'un cône à base demi-circulaire dont le sommet est au débouché de la gorge et qui lui a fait donner le nom de cône de déjection. D'une manière générale, la pente des cônes de déjection est comprise entre 2 et 12°.

Dans le bassin de réception, le lit du torrent est dans un creux par rapport au sol environnant, et le lit de déjection, au contraire, est en relief.

Le lit d'écoulement sert de jonction entre la zone inférieure du lit de déjection et le thalweg de la vallée principale où se trouve la rivière réceptrice du canal du torrent. En cette partie basse de la vallée, le torrent s'encaisse lui-même et coule jusqu'à la rivière collectrice. Dans les vallées larges, les torrents ont tous un lit d'écoulement, tandis que dans les vallées étroites le lit d'écoulement n'existe pas.

On peut diviser les torrents en *torrents simples*, ou qui n'ont pas de bassin de réception, qui est lui-même simple ou formé par la réunion de ravins plus ou moins nombreux, et en *torrents composés*, formés par la réunion de plusieurs torrents simples aboutissant à une gorge unique ou à des gorges succinctes.

Il y a, entre les bassins des divers affluents d'un même cours d'eau et entre les bassins composants des cours d'eau d'une même région, des différences de pente, d'orientation, d'altitude, de culture et de terrain, qui exercent leur influence sur l'alimentation des émissaires suivant des lois plus ou moins complexes.

3. Action dynamique des cours d'eau.—La connaissance du régime des cours d'eau a une très grande importance au point de vue de leur aménagement industriel. Un cours d'eau d'une vallée supérieure, dont le bassin est entièrement fourni par de très hautes montagnes, est alimenté principalement par la fonte des neiges et des glaciers et l'influence de la pluie y est très faible. Aux altitudes dépassant 3.000 mètres, c'est, suivant une expression typique, la neige qui est la règle, et la pluie l'exception. La

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fonte de la neige, qui est sensiblement nulle en hiver, croît avec la température et atteint son maxima en été.

Les torrents d'origine glaciaire sont peu variables dans leur débit, ils ont leurs eaux basses, moyennes et grosses, chaque année, aux mêmes époques, qui permettent une exploitation assez régulière des usines qui les utilisent. Les torrents qui prennent naissance à de moyennes altitudes, et alimentés seulement par des eaux de pluie ou par des neiges temporaires, subissent les fluctuations des années pluvieuses ou sèches et, par suite, donnent lieu à un régime irrégulier. Certains torrents ne sont utilisables industriellement que dans un certain parcours, le reste étant à pente trop faible.

Sur les versants à grande pente, dénudés et imperméables, les eaux atteignent rapidement le lit du cours d'eau qu'elles alimentent en donnant lieu parfois à des crues violentes.

Quand la rivière a un bassin formé par des montagnes plus ou moins élevées avec ou sans glaciers, aux altitudes inférieures à 1.800 ou 2.000 mètres (qui est le cas le plus fréquent), les précipitations aqueuses fournissent la plus grande partie de l'alimentation des cours d'eau. Les versants couverts de prairies et de forêts retardent l'écoulement, et les cours d'eau ont alors un régime plus régulier et les crues y sont moins fortes.

Dans les vallées supérieures, le débit des cours d'eau pendant les mois de décembre, janvier, février et mars, c'est-à-dire pendant les mois froids, est très faible, car les précipitations neigeuses, qui viennent accroître les réserves de neige, sont sans influence sur le débit du torrent. En avril, époque à laquelle commence la fonte des neiges et des glaciers (la fusion superficielle des glaciers en été atteint 3 à 4 centimètres par jour), le torrent grossit progressivement, et les eaux atteignent leur maximum vers la mi-juillet, puis elles vont en s'atténuant jusqu'au mois d'octobre, par suite de la diminution des réserves de neige et de l'affaiblissement de la température. Le débit maximum (fin juillet) peut varier entre des limites étendues, selon l'importance plus ou moins grande des réserves de neige. La période des basses eaux s'étendant d'octobre à avril, soit six à sept mois, durant la période complémentaire les débits croissent, puis diminuent avec des variations en sens inverse, brusques et accentuées.

Dans les régions à altitudes moyennes, le maximum de débit, qui se produit de mai en juillet, est encore dû à la fonte des neiges. Les basses eaux ou périodes de creux ont lieu en hiver aussi ; mais, en automne, il se produit une deuxième période de basses eaux (août et septembre) et, en octobre, des crues provenant des pluies donnent une période de hautes eaux (*fig.* 11). Les pluies de printemps peuvent donner lieu à des crues plus ou moins fortes qui viennent se greffer sur la crue générale due à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fonte des neiges. En été et en hiver, les pluies sont presque sans influence sur le débit.

La forme sinueuse qu'affectent les rivières résulte de la constitution hétérogène de leur lit ; aussi, quand on veut rectifier une partie courbe d'une rivière, faut-il prendre des moyens de défense pour empêcher le cours d'eau de se rétablir dans son ancien lit. Ces travaux doivent toujours être envisagés avec beaucoup de circonspection.

Le profil en long d'une rivière présente une suite de pentes et de contre-pentes oscillant autour de la pente moyenne du cours d'eau. Le thalweg, en vertu de la force centrifuge due à la forme sinueuse du cours d'eau, tend toujours à s'établir contre la rive concave, et il se forme toujours des hauts fonds dans les régions où la courbure du thalweg change de sens. Les graviers charriés par la rivière subissent là un temps d'arrêt et tendent à exhausser le lit.

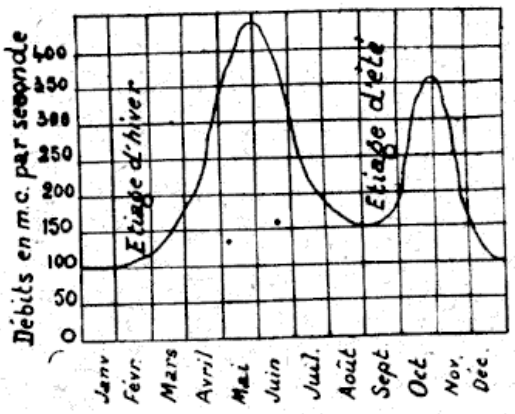


FIG. 11.

Le profil en travers de la rivière présente, dans les gorges, une forme trapézoïdale et, en plaine, le profil comporte un lit mineur ouvert dans les terrains d'alluvion et un lit majeur corrélatif aux eaux débordées. Le plafond tend à s'approfondir vers les points où le sol offre moins de résistance, et la position du thalweg dépend à la fois de la résistance du lit et des diverses circonstances qui font varier la force d'entraînement des matériaux charriés. Aux droits des courbes, le profil transversal affecte la forme d'un triangle avec, pour base, le plan d'eau, son sommet s'appuyant sur la ligne de thalweg.

Pour les rivières torrentielles, en temps de crues, l'écoulement ne se fait plus d'une façon normale, et les effets de courants se contrariant amènent les ruptures d'ouvrages de défense et les ravinements des terrains.

La largeur du lit va naturellement en augmentant de la source vers l'embouchure, mais l'accroissement ne varie pas exactement comme la surface du bassin versant ; elle croît plus vite dans les régions inférieures, où les terrains sont beaucoup moins résistants et où les crues s'y étalent plus facilement.

Les cours d'eau alimentés par la fonte des neiges et des glaciers ont aussi des variations diurnes ; ainsi la Valloirette (§ 38), à trois heures de l'après-midi, arrive à avoir un volume double de celui qu'elle a à six heures du matin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur la Mescla, affluent du Var, vers la fin du mois d'avril (fonte des neiges), le maximum se produit à sept heures du matin et le minimum à neuf heures du soir. L'amplitude de l'oscillation, qui est de $0^m,08$, correspond à un écart de 4 à 5 mètres cubes autour de 40 à 55 mètres cubes. Sur la Gyronde, à la Bessie, le maximum du flot se produit à trois heures du soir, le minimum à huit heures du matin ; l'amplitude de l'oscillation constatée le 20 août 1905 a été de $0^m,22$ correspondant, d'après les indications des graphiques des hauteurs d'eau, à un écart de 12 mètres cubes dans les débits qui atteignent à ce moment environ 20 mètres cubes en moyenne. Enfin sur la Durance (§ 40) à Rousset, le maximum de la crue se produit à trois heures du matin et le minimum à six heures du soir. Dans les premiers jours de juin 1905, l'amplitude de l'oscillation a atteint une moyenne de $0^m,30$ correspondant à un écart de 64 mètres cubes entre les débits qui oscillaient autour d'une moyenne de 200 mètres cubes (maximum de l'année).

En général les cours d'eau alpestres présentent une succession de rapides à parois rocheuses et séparés par des paliers ou parties à faible pente, où la rivière roule sur ses propres alluvions. Ces parties à faible pente sont d'anciennes cuvettes creusées par les glaciers en raison de la faible résistance qu'offraient les roches encaissantes à ces endroits. Après le recul des glaces, les eaux se firent leur lit dans les barrages de roches dures qui coupaient transversalement les vallées et peu entamées par les glaciers ; en même temps, elles remblayaient les cuvettes intercalées entre ces barrages et dans lesquelles, lors des alluvions, les charrois se classèrent par ordre de grosseur, les blocs et les cailloux en amont, les graviers et les sables en aval.

Si l'on considère une section déterminée du cours d'une rivière, il s'y dépense par seconde un certain travail égal au produit du débit par la différence des niveaux des plans d'eau aux deux extrémités de la section, et le travail moteur est complètement absorbé par les frottements intérieurs des molécules liquides les unes sur les autres et par les frottements extérieurs, qui sont ceux exercés par l'eau sur les parois du lit de la rivière ; c'est l'énergie perdue par le frottement de l'eau sur les aspérités du lit que l'on met en œuvre dans une chute hydraulique, par l'emploi d'un canal à frottement très réduit et d'un récepteur de force vive. En généralisant, on peut dire, avec M. F. Côte : la houille blanche est l'énergie qui se dissipe dans les cours d'eau et qui est mise par l'industriel sous forme de travail utile.

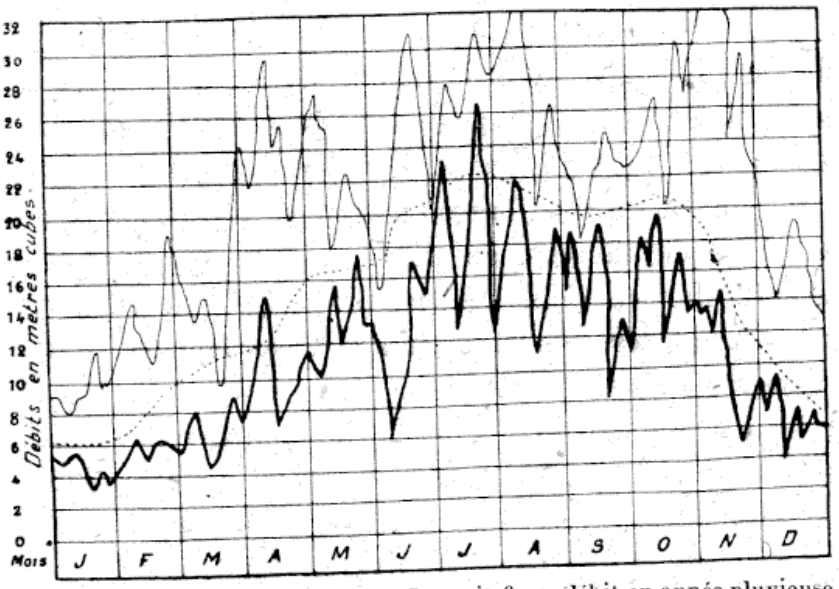
Dans les régions de faibles altitudes, les mois froids sont souvent moins pluvieux que les mois chauds, mais les pluies de mai à novembre ne profitent point aux cours d'eau. Les basses eaux ont lieu en été et les fortes eaux en hiver, celles-ci constituées par des successions de crues. Aussi, dans les vallées inférieures, les irrégularités du régime, dues à l'action des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pluies, sont encore plus sensibles que dans les vallées supérieures ou moyennes.

Entre les régimes que nous venons d'établir, il existe tous les régimes intermédiaires en ce qui concerne la durée des périodes des basses et hautes eaux, le rapport de leurs débits et l'époque maxima des hautes eaux de printemps. Même ces variations de régime peuvent être constatées sur un seul cours d'eau, lorsqu'il est suffisamment important.

En particulier le régime des cours d'eau alpestres est très variable (*fig.* 12) ; le débit des basses eaux est parfois le tiers du débit moyen et le dixième du maximum moyen des hautes eaux de printemps ; il peut n'être que la centième partie du débit des grandes crues exceptionnelles. Lorsqu'on ne peut utiliser que le débit correspondant aux basses eaux, qui sont



Le gros trait = débit en année sèche. Le trait fin = débit en année pluvieuse.
Le trait pointillé = régime des débits de 10 années.

FIG. 12. — Graphique des débits annuels d'une rivière de régime alpestre.

à peu près le quart des eaux moyennes, et si on est en présence d'une consommation très irrégulière, la moyenne étant le plus souvent inférieure à 40 0/0 du maximum, on utilise donc à peine dans ce cas 1/10^{me} du débit du cours d'eau. M. Crolard cite les chiffres suivants entre les régimes extrêmes de quelques rivières alpestres :

Rapport de 1 à 25 pour l'Arc (affluent de l'Isère, Savoie) ;
— 1 à 100 pour le Drac (affluent de l'Isère) ;
— 1 à 100 pour la Valloirette à Calypso (affluent de l'Arc) ;
— 1 à 400 pour le Fier (Haute-Savoie), qui passe de 2 à 800 mètres cubes.

Les gaves des Pyrénées subissent des variations plus grandes encore et il en est peu qui n'aient pas deux étiages plus ou moins réguliers avec, entre temps, des maxima soudains pouvant atteindre 700 ou 800 fois la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

valeur du débit d'étiage, et cela sans prévision possible de la périodicité de ces oscillations ; enfin il n'est pas jusqu'aux cours d'eau descendant du Plateau Central qui ne voient leur débit passer de 1 à 500 ou 600 fois sa valeur.

Les versants d'un même bassin peuvent présenter des caractères complètement différents. Tel est celui de la rivière le Bréda (§ 34) : le versant rive droite (est et sud-est), à pentes rapides, part d'une ligne de faîte d'altitude très élevée (2.500 à 3.000 mètres) avec des neiges éternelles en abondance ; le versant ouest et sud-ouest, par contre, à pentes plus douces, n'atteint pas 2.000 mètres et ne contient pas de glaciers. Certains torrents, tel le Cernon (§ 34), en temps normal comme aux époques d'extrême sécheresse ou de froid persistant, donnent quelques filets d'eau qui suintent à travers les interstices d'un cône de roches et d'éboulis et coulent lentement pour donner naissance au ruisseau. A la suite de violentes ondées et de pluies prolongées du printemps ou de l'arrivée de l'automne, quelquefois à la fonte des neiges, le Cernon s'élance tout à coup en trombe par l'ouverture de la grotte où il prend naissance et bondit pardessus le cône rocheux qui en barre l'entrée, en même temps qu'une infinité de ruisselets qui jaillissent de toutes parts le long de la pente du clapier constituent alors un débit relativement important. Le régime de ce genre de torrent est des plus irréguliers et essentiellement tributaire des moindres variations atmosphériques.

Lorsque les cours d'eau sont à peu près exclusivement alimentés par des glaciers et que l'on possède des données sur leur débit pendant quelques années consécutives, l'exploitant sait à peu près sur quel débit minimum il peut compter et quel sera approximativement le nombre de jours pendant lesquels il pourra réaliser une puissance maximum, en aménageant un débit compris entre l'étiage et le maximum des hautes eaux. Mais il n'en est plus de même pour les rivières torrentielles qui n'ont pas de glaciers comme régulateurs de débit. En face de celles-ci, l'installateur de chutes reste dans la plus grande perplexité quant au cube qu'il importe de dériver pour obtenir une puissance qui ne varie pas en dehors des limites compatibles avec l'alimentation d'un service public ou d'une industrie privée. La supériorité industrielle des cours d'eau à régime glaciaire tient à ce qu'ils ont des eaux abondantes en été, au moment de l'étiage du cours d'eau, directement alimentées par les pluies, et leurs débits varient régulièrement avec les saisons suivant une loi de périodicité qui ne change pas beaucoup d'une année à l'autre.

4. Glaciers. — Pour chaque altitude, il existe dans les montagnes une hauteur au-dessus de laquelle la neige forme des amas permanents. Le niveau des neiges persistantes atteint 2.800 mètres dans les Alpes du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Valais et 3.300 mètres dans les Alpes maritimes. Les neiges qui s'accumulent au-dessus de cette limite s'éboulent et se précipitent le long des déclivités, en formant des avalanches, et parviennent ainsi dans des régions où la température est suffisante pour en opérer la fusion. La neige qui échappe aux avalanches se tasse sous son propre poids et forme des amas qui prennent le nom de *névés*. Peu à peu ceux-ci se transforment en glace plus homogène et plus dense et donnent lieu à des champs de glace qui portent le nom de *glaciers*. Un glacier, en augmentant de volume, s'étale sur le fond du thalweg en raison de sa plasticité, qui lui permet de se mouler sur les roches d'appui, dans le sens de sa pente, en progressant vers les régions de plus grande action calorifique où s'opère son *ablation*.

On appelle *glaciers de vallées* ceux dont le bassin d'alimentation, en forme de cuvette ou de cirque où s'accumulent d'épaisses réserves de glace, est suivi d'une région de cheminement relativement longue et encaissée. Les *glaciers de cirques* s'entendent des glaciers de vallées dont la région de cheminement a été presque entièrement détruite par l'ablation ; ils ne sont plus représentés que par leur bassin d'alimentation ou sorte de culot de glace occupant le fond d'un cirque rocheux. Les *glaciers suspendus* consistent en des plateaux ou cuvettes glacés ou en sortes de plaques de glace sur des pentes abritées, dépourvues de région de l'acheminement individualisée.

Les volumes des glaciers sont toujours considérables par rapport au volume d'eau qu'ils débitent, et c'est ce qui les fait jouer le rôle d'immenses réservoirs. Le Rhône supérieur a 316 glaciers ; le Rhin, 71 dans le haut de sa vallée.

Les glaciers des Pyrénées sont au nombre de 51. Leur superficie est de 3.326 hectares répartis entre 12 massifs : Le Balaïtous, les monts d'Enfer, du Vignemale, de Gavarnie, du mont Perdu, de Troumousé, Pic Long, de Claraleide, d'Oo, du Lys, de Posets, et des Monts-Maudits. Leur inclinaison moyenne est de 30°. Sur le total indiqué, 1.923 hectares ruissellent sur les pentes françaises vers l'Atlantique et 1.403 par l'Espagne à la Méditerranée.

Les glaciers, loin d'être immuables dans leurs dimensions, sont soumis à des changements considérables se traduisant tantôt par des crues, tantôt par des réductions notables. M. Kelian, dans son livre *Grenoble et Dauphiné*, rapporte que les glaciers de la région méridionale du massif du Pelvoux sont en décrue et que leur disparition complète est à craindre dans un avenir peu éloigné. Et bien d'autres glaciers des Alpes sont dans ce cas et ne sont plus que des névés sans importance. Beaucoup sont en recul sensible.

Le recul éprouvé de 1873 à 1875 par le glacier de la Maladetta a été évalué à 50 mètres et 274 mètres de 1809 à 1876.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est probable que la décrue des glaciers du Dauphiné se poursuivra suivant une marche inexorable. La disparition des forêts entraîne le recul de la végétation forestière; autant les reboisements sont faciles dans des régions situées au-dessous de 1.600 à 1.700 mètres, autant ils sont difficiles dans les régions plus élevées. Pour sauver nos glaciers, il faut relever les forêts aux plus hauts niveaux avec des essences fouillues. Et n'oublions pas que la forêt rend à l'usine des eaux claires assurant son régime de chevaux permanents et le passage du régime d'hiver à celui d'été.

Cette perte notable de la glaciation, par suite de la variation de longueur des glaciers, n'a pas cependant une importance telle qu'elle puisse jeter un jour fâcheux sur l'avenir des forces hydrauliques, dont les glaciers assurent la continuité et l'abondance du débit, notamment pendant les mois de sécheresse.

Quoi qu'il en soit, la question de la régression des glaciers est nettement posée et, au point de vue qui nous occupe, on ne peut que souhaiter que les observations glaciologiques auxquelles se livrent les savants les mettent à même de déterminer exactement l'évolution de nos appareils glaciaires, pour en tirer des pronostics quelque peu rationnels sur le sort qui leur est réservé, d'une part, et d'arriver à déterminer le cubage précis des réserves glaciaires actuellement existantes dans nos montagnes, ainsi que l'évaluation de l'enneigement annuel avec les déplacements possibles de la limite des neiges persistantes, d'autre part.

La glaciologie emprunte un intérêt tout particulier à ce fait que les principaux cours d'eau de la région des Alpes principalement doivent une grande partie de leur débit estival à la fusion des glaciers. Ainsi d'après M. l'ingénieur Gaudenzio Fantoli, dans les bassins du lac de Côme et du lac Majeur, on a relevé que 1 kilomètre carré de glaciers fournit un produit journalier de 650 litres à la seconde, alors que dans les terrains ordinaires un kilomètre carré ne donne que 10 à 12 litres à la seconde.

En France, l'Administration a compris l'intérêt qu'il y avait, pour l'avenir des forces hydrauliques, à dresser l'inventaire des réserves glaciaires actuelles.

Elle a chargé de ce soin le Service des Grandes Forces hydrauliques (§ 24), qui a fait un levé des principaux glaciers des Alpes ; à cet effet, des repères ont été posés de manière à permettre de suivre les variations de leurs surfaces. Ces opérations seront étendues à tous les glaciers importants. Avec l'étude de leur masse on pourra avoir les accroissements ou les diminutions des réserves de houille blanche et avec la mesure exacte de la crue journalière d'un torrent glaciaire on aura le moyen de préciser les pertes de surface d'un glacier.

Le seul procédé pratique de sondage actuellement connu est celui qu'ont appliqué aux glaciers du Tyrol MM. Hess et Blumcke, professeurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aux lycées d'Ansbach et de Munich. Ils ont inventé un appareil portatif composé essentiellement d'un jeu de tubes de sondage, terminé à la partie

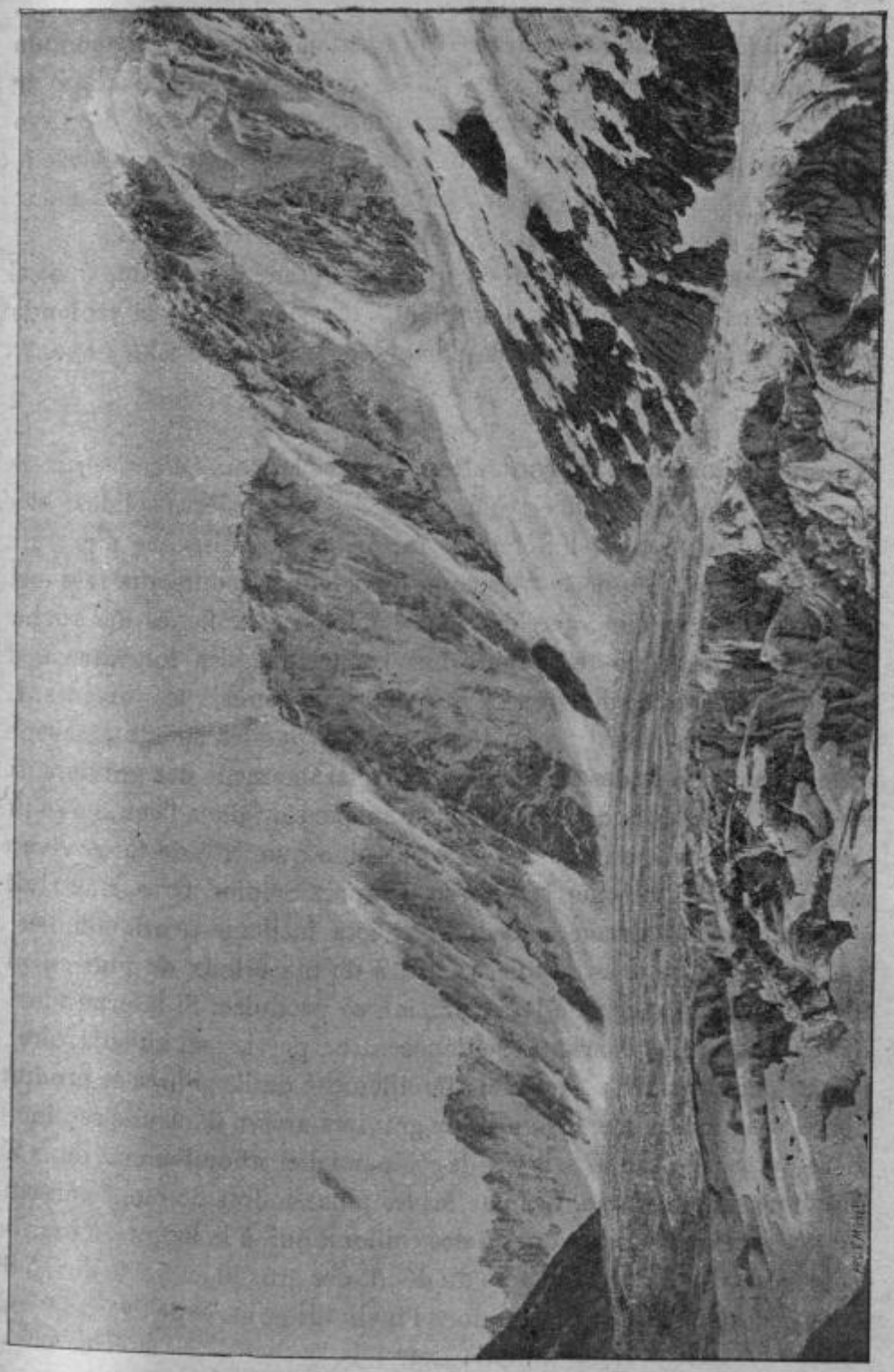


FIG. 13. — Glaciers du mont Blanc (chaîne de l'Aiguille-Verte).

inférieure par une tarière hélicoïdale. On imprime à la sonde un mouvement de descente ou de montée au moyen d'un treuil, par l'intermédiaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un câble qui s'enroule sur le tambour du treuil et dont l'extrémité libre porte un système de suspension mobile auquel on fixe le tube supérieur. En même temps, un moteur rotatif à bras imprime au système perforateur un mouvement de rotation. De plus, l'expulsion des débris de glace arrachés par la tarière est assurée par un courant d'eau sous pression circulant pendant toute l'opération dans les tubes de sonde et débouchant aux points d'attaque. L'eau provient de la fusion, sous l'influence des rayons solaires, de la glace contenue dans une sorte de bassin qu'on creuse à la surface. Une pompe à bras aspirante et foulante envoie l'eau dans la fouille, puis la ramène à la surface, mélangée de débris de glace.

On a utilisé depuis un appareil construit sur le même principe que celui de MM. Hess et Blumcke et on l'emploie à la recherche de la profondeur des glaciers des Alpes sur lesquels portent déjà des opérations ayant en vue la mesure de leur surface.

5. Charrois des eaux torrentielles. — Tous les cours d'eau torrentiels charrient des quantités plus ou moins grandes de matières solides : blocs, cailloux, graviers, sables, limons, en raison de la puissance d'entraînement très élevée qu'acquièrent les eaux dans leur parcours aux très fortes pentes. Les graviers sont arrachés par l'érosion aux flancs des rochers, formant les bassins de réception. Les roches friables fournissent des marnes, des schistes et des dépôts calcaires que roulent les torrents. Les matériaux résultent aussi de la désagrégation par les agents atmosphériques sur les surfaces des terrains nus. L'entraînement des graviers, soit par roulement sur le fond du lit, soit par suspension dans l'eau, ne se produit pas sans enlever au courant une certaine quantité de force vive et, par suite, sans en diminuer la vitesse. D'après Scipion Gras, une rivière coulant dans un lit formé par des graviers facilement affouillables se charge, en temps de crue, d'une quantité de matériaux de plus en plus considérable, jusqu'à ce que la saturation se produise. Si la crue vient à décroître, les graviers entraînés se déposent en partie ; si, au contraire, la crue vient à augmenter, un nouvel affouillement du lit pourra se produire. De même, si la masse d'eau *saturée* de graviers arrive dans une section de la rivière de pente moindre, il y a dépôt partiel et affouillement dans une section de pente plus forte. Les parties les plus tendres donnent naissance à du limon et les matériaux durs à des cailloux qui, à la longue, s'usent en forme de sable. La pente moyenne du dépôt des gros blocs varie de 5 à 8° ; après ceux-ci viennent les galets, dont l'inclinaison varie de 2°,5 à 5°, puis les cailloux et les graviers, au delà desquels les boues viennent s'étaler. Les matériaux charriés par les torrents proviennent de l'affouillement longitudinal, de l'affouillement latéral ou éboulement des berges, de la désagrégation résultant de l'action destructive des agents atmosphériques sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les surfaces des terrains nus, de fendillements, glissements, des éboulements auxquels cette action donne lieu. Les *clapes* ou *casses*, amas de blocs et de pierrailles qui se forment par suite d'éboulis ou d'avalanches dans le bassin de réception ou le canal d'écoulement de certains torrents, contribuent à grossir la masse de matériaux entraînés. Le Rhône, en France, reçoit de ses affluents torrentiels la majeure partie des matériaux qu'il charrie.

La Durance roule 11 millions de mètres cubes de matériaux par an, le Var autant, le Rhône 21 millions. Quand une crue survient, le sable est tout d'abord mis seul en mouvement ; les gros graviers apparaissent alors à la surface des bancs et, la vitesse augmentant, ils marchent à leur tour. Lorsque le courant se ralentit, les dépôts se font dans un sens inverse. Dans les très fortes crues, tout s'ébranle à la fois.

En hiver, lors des grands froids, les cours d'eau charrient des glaçons qui, à certain moment, se soudent ; quelquefois l'accumulation des glaces forme des embâcles qui se mettent tout à coup en mouvement lorsque la masse commence à fondre, produisant des débâcles aux effets redoutables.

Dans les Alpes, les terrains primitifs, granites et gneiss, n'apparaissent que sur les sommets ; au-dessous, on trouve les terrains tertiaires, le groupe crétacé et le groupe oolithique ; le calcaire ardoisé est particulièrement attaqué par les eaux. Pour déterminer les quantités de matériaux que peut charrier une rivière torrentielle, on procède comme suit : Quand il s'agit de limon, on prélève de temps en temps des échantillons d'eau trouble, et on fixe, à l'aide de pesées, la quantité de limon qu'elle contient. Pour les graviers, on admettra comme première approximation, d'après M. Wilhelm, ingénieur des Ponts et Chaussées, que le volume des graviers entraîné annuellement par la rivière est proportionnel au travail dépensé par l'écoulement de l'eau.

Soient : Q le débit moyen de la rivière considérée, q le volume moyen de gravier qu'elle entraîne annuellement, I sa pente.

On aura :

$$q = 523\mathrm{QI};$$

Q et q en mètres cubes et I en millimètres par mètre.

La proportion des sables en dissolution dans l'eau des torrents à régime glaciaire surtout varie dans le cours d'une journée d'une façon considérable. Ainsi on a constaté que l'eau du torrent de l'Arve en avril 1915, qui contenait $0^{gr},042$ de trouble par litre à 10 heures, avait atteint à $16^{h},30'$, $2^{gr},660$ par litre, c'est-à-dire dans le rapport de 1 à 64, en 6 heures et demie de temps.

Le débit solide et le débit liquide d'un même torrent varient dans le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même sens, chaque chute importante de pluie déterminant en même temps qu'une crue, une augmentation d'apport du sable. La vague de sable croît et décroît plus rapidement que la vague d'eau, ce qui provient du fait que l'eau de pluie, en ruisselant, lave le terrain au commencement de la crue. Lorsque cette dernière atteint son maximum, le terrain est déjà naturellement lavé, et le ruissellement n'entraîne plus que peu de matières.

Nous mentionnons ci-après les résultats des observations faites par MM. A. Muntz et E. Laîné sur divers cours des Alpes et des Pyrénées. La Garonne ne porte que 5 grammes à 50 grammes de limon par mètre cube. Au moment des crues exceptionnelles, elle en porte 1 kg,500. Son débit dépassant alors 400 mètres cubes par seconde, c'est encore 52.000 tonnes de limon charriées par vingt-quatre heures.

La Neste a une allure plus torrentielle, elle charrie 13 kilogrammes à 16 kilogrammes de matériaux par mètre cube. Mais en temps normal ses eaux sont claires.

Les eaux de l'Adour sont toujours claires, la proportion de limon ne dépasse jamais 50 grammes par mètre cube.

L'Agly est la seule de ces rivières qui s'alimente dans un massif calcaire, celui des Corbières. Ses eaux sont ordinairement limpides. Ce n'est que par de fortes crues qu'elles charrient jusqu'à 38 kilogrammes de limon par mètre cube.

Les eaux des Alpes sont incomparablement plus chargées de limons. La plus limoneuse des rivières alpines est l'Isère. Dans son cours supérieur, alimentées surtout par des glaciers, ses eaux sont assez claires et la proportion des limons atteint à peine 2 kilogrammes par mètre cube. Dans son cours moyen, il n'en est plus de même ; elle a reçu certains affluents tels que le Glandon, qui, au moment des crues, sont de véritables torrents de boue, charriant 150 kilogrammes à 260 kilogrammes de limon. Aussi les eaux de l'Isère tiennent-elles quelquefois en suspension 123 kilogrammes de limon par mètre cube. Le débit de l'eau étant alors de 380 mètres cubes par seconde, la quantité de limon charriée en vingt-quatre heures a atteint 4 millions de tonnes. Les eaux de la Durance sont également très limoneuses, sans toutefois atteindre les mêmes teneurs. Ainsi à Mirabeau, le maximum qui a été observé n'a été que de 11 kg,435 par mètre cube, au début d'une forte crue. Le débit étant alors de 375 mètres cubes à la seconde, la proportion de limon charriée en vingt-quatre heures atteignait 370.000 tonnes.

Ces quelques chiffres suffisent pour montrer combien sont élevées les teneurs en matériaux solides charriés par les cours d'eau des Alpes et pour mettre en garde contre le danger que présenterait la construction de barrages-réservoirs, qui s'ensableraient rapidement et cesseraient alors de fonctionner.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les eaux ne sont pas limoneuses à des époques quelconques de l'année. Les grandes rivières des Alpes, comme l'Arve, l'Isère, la Durance, dont le bassin d'alimentation comprend d'importants glaciers, ont un régime bien régulier. La période des basses eaux se confond avec l'hiver ; les eaux sont alors claires. Au printemps surviennent des crues importantes, provoquées par la fonte des neiges. Au début de ces crues, les eaux entraînent des quantités énormes de limons, qui résultent de la désagrégation des roches pendant la période de repos qui a précédé.

Les rivières des Pyrénées, où les glaciers sont absents ou peu importants, ont un régime différent. Les eaux sont claires en toutes saisons, sauf au moment des crues provoquées par des orages ou des pluies abondantes et qui peuvent survenir à une époque quelconque de l'année.

La proportion de matières dissoutes, principalement la chaux, est bien moins abondante dans ces eaux que dans celles des Alpes et n'est pas sujette à des variations notables.

Ce qui peut contribuer à donner aux Alpes une telle abondance de matériaux charriés par leurs rivières, c'est leur âge relativement récent. Les Pyrénées, de formation beaucoup plus ancienne, ont été délavées pendant un temps infiniment plus long.

Il ressort de l'ensemble de ces études qu'il ne faut entreprendre, sur les cours d'eau des Alpes, la construction de barrages-réservoirs qu'avec beaucoup de prudence, car un envasement très rapide est à craindre. Il n'en est pas de même dans les rivières des Pyrénées.

6. Hauteurs d'eau de pluie annuelles. — Les quantités d'eau qui tombent annuellement dans un bassin sont difficiles à évaluer exactement. La hauteur d'eau qui en résulte varie beaucoup d'un point à l'autre et, en un même point, elle varie entre des limites très étendues d'une année à l'autre.

D'une manière générale, la quantité de pluie augmente avec l'altitude, mais il n'y a là rien d'absolu, car en particulier le faîte d'une ligne de hauteurs reçoit moins de pluie que le versant, qui est habituellement remonté par les courants humides.

Sous les tropiques, où règnent les vents alizés, les versants de l'ouest sont inondés d'averses torrentielles, tandis qu'il ne pleut presque jamais sur le versant opposé.

En Europe, le maximum de pluie se produit sur les Alpes, le Caucase, les monts d'Écosse et le littoral de la Scandinavie.

Sous l'influence de l'évaporation, l'eau tombée sous forme de pluie ou de brouillard est restituée à l'atmosphère dans un laps de temps plus ou moins long. En été, cette évaporation peut être assez intense pour que des pluies abondantes n'influent pas sensiblement sur le débit du cours d'ea

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La hauteur de pluie est en moyenne de 12 0/0 plus grande en forêt qu'en

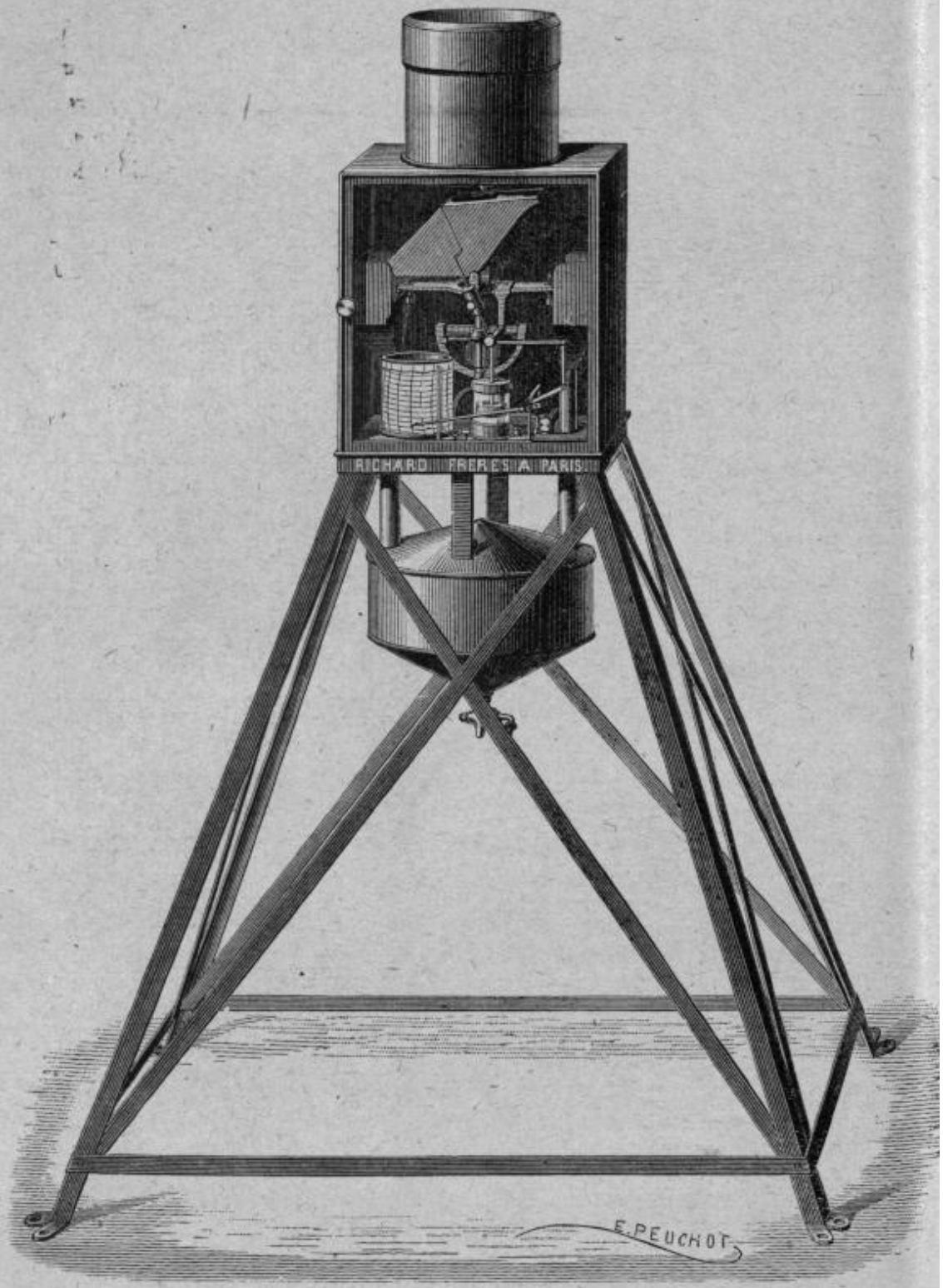


FIG. 14. — Pluviomètre enregistreur à balance, système J. Richard.

plaine ou plein champ. Il faut donc boiser le bassin supérieur pour augmenter la quantité d'eau dont il disposera dans le thalweg.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les *pluviomètres* sont des appareils fort simples destinés à mesurer les quantités de pluie qui tombent là où l'instrument est placé. On distingue le pluviomètre multiple de Belgrand, le pluviomètre total de Mangon. Les plus intéressants sont les appareils enregistreurs, qui permettent de déterminer la durée des averses ainsi que leur intensité. Pour obtenir les données relatives à un bassin d'une certaine étendue, il est nécessaire d'y établir un nombre suffisant de ces appareils en des points convenablement choisis, et surtout dans les points les plus élevés et dans le voisinage du partage des eaux, tant pour les eaux de pluie que pour celles provenant de la fonte des neiges (1).

La hauteur annuelle des chutes de neige sur les sommets élevés est très variable ; elle oscille de 5 à 10 mètres au Saint-Bernard et a atteint jusqu'à 17 mètres au Grimsel.

La quantité de pluie qui sert à alimenter un cours d'eau peut se déduire d'observations faites sur des vallées analogues et des cours d'eau semblables à ceux que l'on étudie. Mais la quantité d'eau qui se trouve dans le lit des rivières varie beaucoup d'une place à l'autre, suivant les pluies tombées pendant une semaine et même une journée.

Les observations pluviométriques faites dans le courant de l'année 1905 ont donné pour les hauteurs d'eau tombées dans les Alpes les chiffres suivants : bassin de l'Isère, $1^{m},50$; bassin du Guiers, $1^{m},72$, et bassin du Doron, $2^{m},50$.

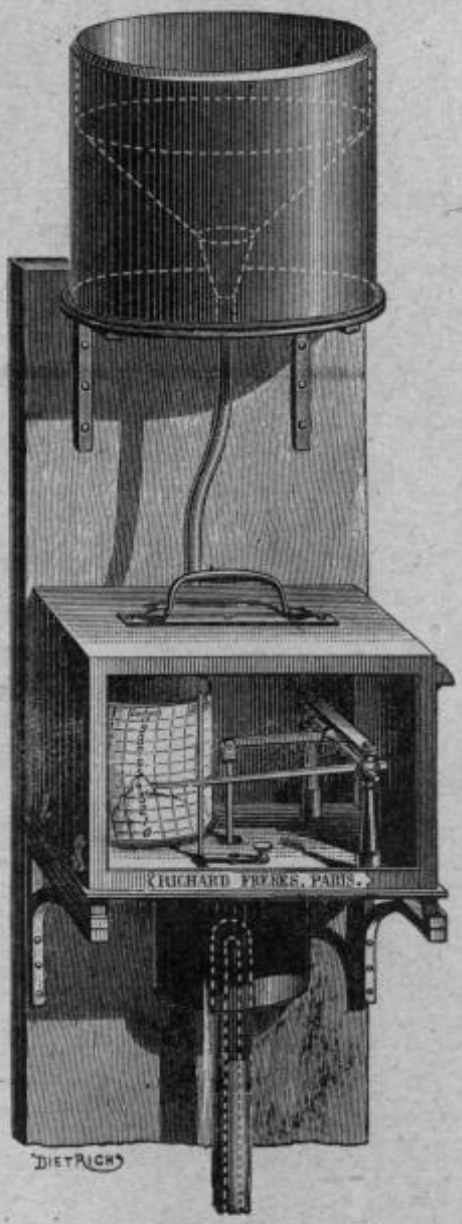


FIG. 15. — Pluviomètre enregistreur à flotteur système J. Richard.

Dans la chaîne des Pyrénées, la pluviosité est en général supérieure à 1 mètre de hauteur d'eau. Elle va en diminuant fortement de l'ouest à

(1) Pour donner des résultats corrects et comparables, les pluviomètres doivent être disposés de telle sorte que leur orifice supérieur soit dans un plan horizontal et que le contenu soit noté chaque jour.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'est avec légère recrudescence entre les sources de la Garonne et celles de l'Ariège. A Perpignan, elle est inférieure à 700 millimètres (1).

Dans les contrées très boisées, les eaux de pluie descendent moins facilement des hauteurs ; elles n'atteignent la rivière que lentement et graduellement. Il pleut 15 0/0 de plus dans les régions boisées que dans les régions déboisées. La forêt peut utiliser les 2/3 des eaux pluviales et abaisser le niveau des nappes phréatiques immobiles. La dénudation des forêts, ainsi que nous l'expliquons plus loin, a une répercussion très sensible sur les usines hydrauliques, dont elle rend les installations plus coûteuses en forçant à l'établissement de réservoirs. Il y a néanmoins un élément qui échappe aux pluviomètres dans les bassins formés par les montagnes très élevées : ce sont les condensations occultes qui ont lieu sur les sommets à haute altitude. Ces condensations occultes ont une importance considérable, reconnue de nos jours. Le contingent apporté par elles dépasse dans certains cas la quantité d'eau évaporée dans le bassin supérieur, quantité qui a été mesurée et qui dépasse elle-même la moitié des pluies ou des neiges décelées par le pluviomètre. Ainsi donc le reboisement augmente la pluviosité de plus de 10 0/0, et la condensation occulte sur les bois représentant 1/4 de la tranche d'eau pluviale (25 0/0), l'effet total est de 35 0/0. On peut donc estimer à 39 0/0 la quantité supplémentaire d'eau apportée par le reboisement correspondant à 33 0/0 de la tranche d'eau pluviale. La hauteur moyenne de pluie annuelle tombée sur la surface de la France est d'environ $0^{m},75$, représentant 7.800 mètres cubes environ par hectare et par an. Le nombre de jours de pluie est de 146 dans le Nord et 91 dans le Midi. La quantité de pluie tombée pendant une année dépasse 400 milliards de mètres cubes, d'après les calculs de M. Thomé de Gamond.

Le volume d'eau évacué en moyenne à la mer par nos fleuves, grands et petits, est, d'après les mêmes calculs, de 180 milliards par année ; la moitié environ de la pluie tombée sur le sol serait restituée directement à l'Océan par les voies fluviales, l'autre moitié s'élevant dans l'atmosphère par voie d'évaporations successives. Cette évaporation se fait par la surface d'eau, et elle est supérieure à la quantité d'eau de pluie tombée sur cette surface pendant le même temps ; elle se fait aussi par le sol nu qui évapore un peu plus de la moitié des eaux météoriques qu'il reçoit. L'évaporation horaire est maxima entre midi et deux heures et minima durant la nuit. Elle est différente selon les pays et, dans une même région, suivant les localités.

Les 180 milliards de mètres cubes ci-précités correspondraient, à raison de 10.000 mètres cubes par hectare, à l'arrosage de 18 millions d'hectares,

(1) Le Bureau Central Météorologique publie chaque année une carte de la répartition des pluies totales sur l'ensemble du territoire de la France.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

si ce volume pouvait être intégralement employé à l'irrigation. Ce même volume appliqué à la mise en œuvre des forces motrices alimenterait simultanément 2.000 usines de 100 chevaux par exemple, soit 200.000 chevaux. Cette production de force, renouvelée seulement 60 fois sur des chutes successives avec la même eau, avant d'arriver à la mer, représenterait l'équivalent de la puissance énorme de 12 millions de chevaux-vapeur.

La conquête d'un ensemble de telle puissance réaliserait pour l'industrie nationale (eu égard au coût de la force motrice d'un cheval-vapeur obtenu au moyen de charbon) un bénéfice annuel de plus de 900 millions.

7. Débits d'étiage des cours d'eau de montagne et de plaine. — Par suite de changements climatériques continuels, l'époque de la période de basses eaux ou des débits minima est sujette à des variations imprévues et ces variations peuvent même prendre des caractères différents dans chaque contrée. Une longue suite d'années peut parfois passer avant que l'écoulement des eaux, par suite d'hivers exceptionnellement longs et rigoureux ou bien de mois d'été et d'automne extraordinairement secs, soit tel qu'une détermination du *minimum minimorum* puisse se faire incontestablement.

Dans certaines circonstances, l'écoulement déjà exceptionnellement petit d'un cours d'eau pourra encore être influencé d'une façon sensible, sans qu'il soit possible de l'éviter. On peut penser sous ce rapport à la formation de glace de rivière solide ou spongieuse qui peut réduire plus ou moins subitement la quantité d'eau jusqu'à l'amener à la moitié de sa valeur normale.

Le débit d'un cours d'eau torrentiel est une donnée perpétuellement variable, laquelle subit d'énormes fluctuations, souvent dans la proportion de 1 à 100, en passant d'un jour d'hiver à un jour d'été. On distingue les débits d'étiage, en débit d'*étiage d'hiver* et en débit d'*étiage d'été*, ainsi que l'on a pu s'en rendre compte au cours des considérations qui précèdent. Le débit d'étiage d'hiver dépend surtout de la température ou du climat moyen du bassin à cette saison, et le débit d'étiage d'été, des quantités de neige qui peuvent subsister en août et en septembre. Le débit d'étiage d'hiver peut être inférieur à celui d'été dans les vallées supérieures et moyennes, mais l'étiage est plus grand en hiver qu'en été dans les vallées inférieures, à cause de la douceur plus grande du climat et de la hauteur moindre des montagnes qui se débarrassent plus vite de leur neige. Dans les vallées supérieures, le débit des cours d'eau est très faible en hiver, de décembre à mars, et le maximum des eaux se produit vers la fin du mois de juillet. Lorsque le bassin est formé de montagnes d'une hauteur moyenne, l'hiver est encore une période de basses eaux, mais il y a aussi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une saison de creux en automne (août et septembre), et le maximum des hautes eaux a lieu dans les premiers jours de juillet.

Les pluies de printemps peuvent donner lieu ici à des crues qui viennent ajouter leur effet aux eaux de la fonte des neiges et parfois, ainsi que le montre la (*fig.* 16) des crues exceptionnelles se présentent dans les mois froids. Le cas que nous signalons a été observé sur la Durance, à la suite de relevés journaliers, et pendant l'année 1895, par M. Wilhelm (1). Mais les cours d'eau à régime alpestre ont un étiage d'hiver régulier.

On attache au mot « étiage » des significations très diverses. D'une façon générique, cette appellation désigne bien une époque de « basses eaux », mais encore faut-il préciser à quelle saison cette période a lieu, et pour quelle durée. Certains usiniers l'appliquent à une saison entière, d'autres à un seul mois, et il en est qui la restreignent aux huit ou quinze jours de plus grande pénurie d'eau.

Pour les cours d'eau alpestres, on a proposé d'appeler du nom de *débit d'étiage normal* le débit moyen réalisé pendant les mois de janvier et février, lorsque l'hiver est moyennement froid et que le bassin est recouvert en totalité ou en partie par la neige tombée en novembre et en décembre. Le débit d'étiage *minimum* serait alors inférieur de 20 ou 25 0/0 au débit d'étiage normal défini comme ci-avant.

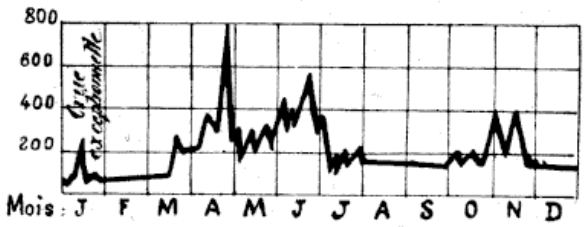


FIG. 16.

M. R. Tavernier, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, au premier Congrès de la Houille blanche, a proposé de définir la période des basses eaux d'un cours d'eau torrentiel par l'expression : *débit caractéristique d'étiage*, avec cette signification que ce débit est *celui au-dessous duquel le cours d'eau n'est pas descendu durant l'année considérée, plus de dix jours consécutifs ou non.* On n'est plus là en présence d'un étiage minimum, mais bien d'un état particulier de la rivière en rapport avec son utilisation industrielle.

M. F. Côte a proposé de modifier la définition du débit caractéristique d'étiage formulée par M. Tavernier en y introduisant la correction : *celui au-dessous duquel le cours d'eau descend pendant dix jours en l'année la plus sèche de dix années consécutives*, donnant pour raison principale que, dans

(1) Sur cette même rivière, d'après les observations de M. Imbeaux, la fonte des neiges, pendant les mois d'avril à août, fournit à la rivière une fraction de son débit total qui varie, suivant la température et l'humidité de la saison chaude et l'abondance des neiges de l'hiver précédent, entre 33 et 71 0 /0 et est en moyenne de 49 0 /0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les années sèches et très froides, les cours d'eau alimentés par des glaciers sont dans une circonstance très heureuse et que le minimum observé en ces années et dans la période froide donne le *minimum minimorum*. On peut aussi dire que le débit d'étiage d'une chute est le débit minimum que représente la force minima utilisable d'une *manière continue, sans approvisionnement d'eau artificielle.*

M. le commandant Audebrand a introduit dans la technique des chutes d'eau l'expression : *débit spécifique*, qui est le débit par mètre de largeur d'un cours d'eau, partant de cette conception que le débit d'un torrent est proportionnel à la largeur de celui-ci, quelles que soient la valeur de cette dimension et la forme du profil transversal. Pour fixer les idées, supposons un cours d'eau ayant $0^m,50$ de largeur avec un débit de 100 litres à la seconde ; le débit spécifique est ainsi égal à :

$$\frac{100}{0,50} = 200 \text{ litres.}$$

Ce procédé ingénieux et expéditif donne de bons résultats pour les cours d'eau à étiage d'été.

Il résulte d'observations de longue durée que le débit d'étiage d'une rivière peut être évalué de 5 à 10 litres par seconde et par kilomètre carré de surface du bassin versant, suivant que le climat de la vallée est plus ou moins rigoureux. Cette indication générale est précieuse à retenir, en l'absence de jaugeages ou de graphiques de débit d'une rivière.

Le service d'études des Forces hydrauliques du Bas-Congo, dont nous signalons les travaux (au paragraphe 26) a reconnu que la moyenne de la hauteur annuelle des pluies pour toute la colonie belge est de $1^m,35$. D'après Lancaster, il pleut au nord de la colonie quand la sécheresse sévit dans le sud, tandis qu'il pleut à peu près d'une façon continue dans les régions à cheval sur l'équateur.

La question du pouvoir d'évaporation n'a pas été suffisamment étudiée au Congo. D'après les observations du commandant Lemaire on peut admettre pour l'évaporation annuelle au lac Tanganika $1^m,35$ de hauteur environ (Mission scientifique de Katanga, 1898). Il est bien entendu que l'évaporation pour les autres points de la colonie est moins importante, l'évaporation sur un lac se faisant sentir sur toute l'année et toujours accélérée par l'existence de vents secs. En comptant sur $1^m,35$ de précipitation atmosphérique on obtiendrait un débit moyen de plus de 14 litres par seconde et par kilomètre carré.

M. H. Roussilhe, ingénieur hydraulicien de la marine française, qui a dirigé l'importante mission hydrographique du Congo-Ubanghi, a trouvé pour le débit d'étiage du Congo, au Stanley-Pool, 30,000 mètres cubes par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seconde, soit pour 3.603.326 kilomètres carrés du bassin hydrologique correspondant, 8l,4 par kilomètre carré et par seconde.

Si nous nous référons au chiffre de 9 litres, le service d'études a pris pour bases des calculs les chiffres suivants :

Précipitation atmosphérique moyenne pour l'ensemble du bassin du Congo	1m,35
Précipitation atmosphérique moyenne pour l'ensemble du basssin du Moero	1m,20
Précipitation atmosphérique moyenne pour l'ensemble du Tanganika	1m
Précipitation atmosphérique moyenne pour l'ensemble des lacs du bassin du Congo	1m
Pouvoir d'évaporation maximum sur le lac Tanganika (influence d'un alizé local).	1m,35,
Pouvoir d'évaporation moyenne sur les autres lacs du Congo,	1m.
Perte par évaporation à l'intérieur des terres :	1/3 de l'eau tombée
Perte par absorption à l'intérieur des terres :	1/3 de l'eau tombée

En résumé, ce qu'il est important de connaître, ce sont les débits correspondant, pendant chaque saison, au niveau le plus bas de la rivière.

Un moyen assez simple consiste à apprécier ces débits d'après la comparaison des niveaux de l'eau sur les endroits situés au bord de la rivière qui n'ont pas été recouverts par les eaux pendant une année.

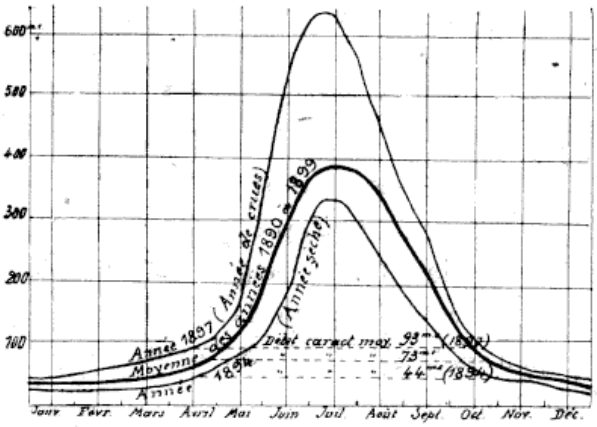


FIG. 17.

8. Débits moyens. — M. Tavernier définit le débit moyen, qu'il appelle *débit caractéristique moyen :* celui au-dessous duquel le cours d'eau descend, année moyenne, pendant six mois par an au plus, et au-dessus duquel, par conséquent, il se maintient pendant la période complémentaire des six autres mois ; mais, si on rapproche ces données de celles renfermées dans la définition du débit caractéristique d'étiage, du paragraphe précédent, on voit que la puissance moyenne d'un cours d'eau, correspondant à l'année tout entière, se trouverait en appliquant le maximum du débit à une période de neuf mois (1).

(1) Cette désignation est remplacée maintenant par l'appellation : *Minimum semi-permanent,* puisqu'il ne s'agit pas d'une moyenne quelconque, mais du minimum sur lequel on peut compter sur 180 jours, c'est-à-dire pendant la moitié de l'année.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tableau des débits d'étiage et des débits moyens de rivières appartenant aux Bassins du Rhône et de la Méditerranée d'après la statistique du Service des Grandes Forces hydrauliques de France.

DÉSIGNATIONS DES BASSINS	NOMS DES RIVIÈRES	DÉSIGNATION des stations de jaugeage	ANNÉES des observations	DÉBITS caractéristiques d'étiage	DÉBITS caractéristiques moyens	DÉBITS d'étiage par Km car.	DÉBITS moyens par Km car.	OBSERVATIONS
				mètres cubes	mètres cubes	litres	litres	
Bassin de l'Isère.....	Isère	Moutiers	1903 à 1907	11,295	17,555	12,45	19,35	
—	—	Rhonnaz	1903 à 1906	27,725	38,875	14,57	20,58	Haute Isère
—	—	Montmélian	1906-1907	40,500	123,300	8,35	25,44	Isère moyenne
—	—	La Sone	1904-1905	80,750	216,000	7,88	21,65	Basse Isère
—	L'Arc	Termignon	1907	1,427	5,463	3,98	15,12	Isère moyenne
—	—	Hermillon	1903-1905	14,400	23,800	9,7	15,9	
—	Le Drac	Pont-de-Claix	1904-1906	29,000	82,000	8,3	23,97	Basse Isère
—	—	Pont-d'Aubessagnes	1904-1906	2,463	7,950	4,84	15,53	Drac supérieur
—	—	Ponsonnas	1904-1907	10,800	32,500	7,17	21,59	Drac moyen
—		Allevard	1905-1907	1,532	4,187	11,02	30,12	Isère moyenne
—	Le Bréda	Moutiers	1907	5,652	12,242	8,46	18,32	Haute Isère
—	Le Doron de Bozel	Termignon	1906-1907	1,055	2,400	6,48	14,22	
Bassin de l'Arc.....	Le Doron	La Trinité	1905-1906	2,265	6,270	10,11	27,99	Drac moyen
Bassin du Drac.....	La Séveraisse	Entraygues	1906	1,380	2,745	9,65	19,20	
—	La Boune	La Mure	1907	0,055	0,418	1,1	8,36	
—	La Jonche	Villard-d'Arène	1906-1907	1,600	6,800	2,36	10,00	
—	La Romanche	Grand-Clos	1905-1907	0,790	2,207	4,67	12,90	
—	—	Bourg-d'Oisans	1904-1907	3,46	12,980	5,06	18,97	
—	—	Pernière	1906-1907	1,563	4,658	9,48	27,96	
Bassin de la Romanche...	L'Eau-d'Olie	Ugine	1907	0,758	2,380	7,50	23,60	
Bassin de l'Arly.....	La Chaise	Chamonix	1905-1907	2,200	6,000	12,13	35,00	
Bassin de l'Arve	L'Arve	Marignier	1905-1907	3,880	15,370	8,65	32,00	
—	Le Giffre	Pont-des-Plains	1905-1907	0,689	1,532	7,74	14,25	
—	La Borne	Bonne	1905-1906	0,100	1,527	0,70	10,91	
—	La Ménoge	Villaz	1905-1907	0,24	0,380	2,28	14,00	
Bassin du Fier.....	La Fillière	Pont-de-Bange	1906-1907	0,860	3,670	2,98	12,45	
—	Le Chéran	Entre-Deux-Guiers	1906-1908	0,250	2,830	1,77	22,50	
Bassin du Guiers.....	Le Guiers	Bioge	1906	3,600	9,500	7,29	19,23	
Bassin des Dranses.....	Les Dranses	Baume	1905	1,500	3,640	8,06	19,57	
—	—	Mirabeau	1905	»	»	4,70	14,10	
Bassin de la Durance.....	La Durance	Allos	»	»	»	3,90	»	
—	Le Verdon	—	»	»	»	16,50	27,40	
—	Le Chadoulin	Sisteron	»	»	»	2,70	11,70	
—	Le Buech	Monetier	»	»	»	7,20	20,60	
—	La Guisanne	Montdauphin	»	»	»	3,50	9,60	
—	Le Guil	Entrevaux	»	»	»	5,80	18,40	Bassin de la Méditerranée
Bassin du Var.....	Le Var	Balma-Negra	»	»	»	9,20	20,90	
—	La Tinée							

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le débit moyen d'un cours d'eau de régime alpestre varie entre 15 et 30 litres par kilomètre carré du bassin versant, ainsi qu'il résulte du tableau des débits ci-après.

Les incertitudes quant à une définition rigoureuse du débit moyen existent comme pour le débit d'étiage. Assez couramment, dans les Alpes, les industriels prévoient les travaux à construire en vue de l'établissement d'une dérivation pour un débit double (débit moyen) du débit d'étiage. M. Wilhelm, dont nous avons déjà relaté les travaux sur la Durance, a trouvé que le débit moyen de cette rivière, à Roussel, était le triple du débit de l'étiage. Et M. Tavernier, pour le haut Rhône, a observé que le débit moyen atteignait six fois la valeur du débit d'étiage et qu'il progres-

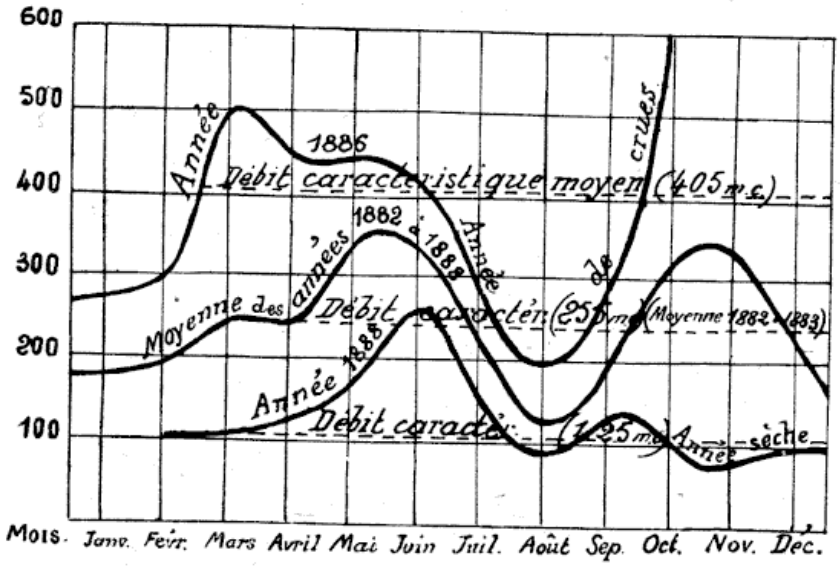


FIG. 18.

sait régulièrement d'avril à juillet pour descendre jusqu'à octobre. Les torrents de la Suisse et du Rhin donnent lieu aux mêmes phénomènes.

Quand on possède les courbes des débits moyens mensuels d'une rivière, on peut déterminer avec une approximation suffisante les débits caractéristiques moyens. Le graphique représenté par la (*fig.* 17), relatif à la Durance et dressé par M. Imbeaux, montre qu'en traçant sur les courbes des abscisses longues de six mois, celles-ci correspondent aux débits caractéristiques moyens. Il est particulièrement intéressant de remarquer que ce débit de la moyenne des années de 1890 à 1899 (73 mètres cubes) est un peu plus élevé que la valeur de la moyenne des années de crues et de sécheresse (68^{m3},35). La (*fig.* 18) montre un autre exemple provenant du Rhône à Saint-Maurice et la (*fig.* 19) présente les débits moyens du même fleuve en divers points de son parcours.

Au point de vue de l'importance à donner à l'installation ou, pour mieux dire, à la dérivation, il y a lieu de préciser autant que possible les débits

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

limites entre lesquels doit osciller le volume d'alimentation de l'usine à créer, toujours dans l'hypothèse d'un cours d'eau non régularisé par apport d'eau ou de machines thermiques. Si on n'a en main qu'un service public, il faut s'en tenir au débit minimum minimorum.

Mais, si on veut profiter de toute la puissance fournie par le cours d'eau pour l'appliquer à d'autres utilisations, on peut considérer comme débit

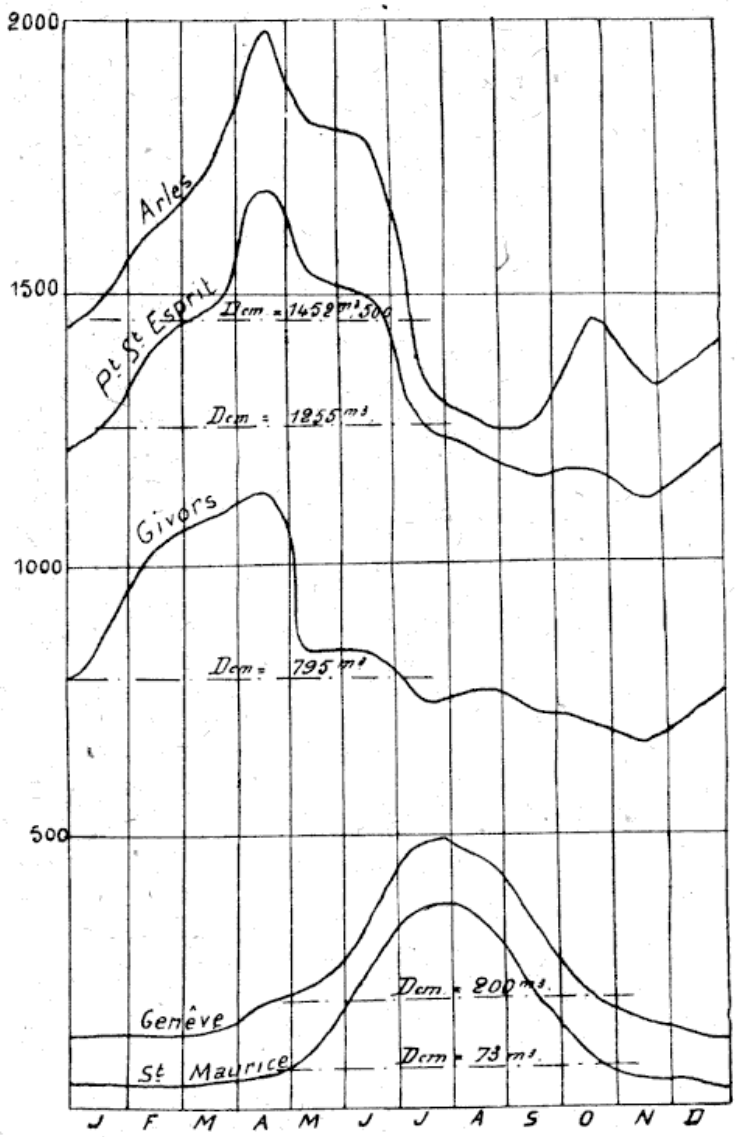


FIG. 19. — Graphique des débits moyens du Rhône en divers points de son parcours.

maximum celui donnant, en plus du débit minimum minimorum, une puissance variable caractérisant la limite d'utilisation de la puissance variable du cours d'eau pendant au moins 200 jours consécutifs en année sèche. Il conviendrait, selon M. F. Côte, de prendre ce débit inférieur au débit moyen et égal de préférence à celui au-dessous duquel le cours d'eau reste pendant huit mois au moins en année moyenne.

Un service d'observations *nivométriques* bien établi et convenablement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dirigé pourrait constituer un service d'annonces d'étiage qui évaluerait chaque printemps, d'après les quantités de neiges amoncelées sur les montagnes, les risques de pénurie du cours d'eau.

II. — HYDROGRAPHIE PANORAMIQUE DES GRANDES RÉGIONS MONDIALES DE HOUILLE BLANCHE

9. Région des Alpes. — Le massif des Alpes maritimes forme un groupe assez nettement limité : à l'est, le col de Tende ; au nord, les cols de Larche, de Largentière ou de la Madeleine. Les eaux torrentielles qui découlent au nord de ses versants boisés ont bientôt atteint la plaine d'alluvions que parcourt la *Stura ;* mais, sur la pente méditerranéenne, tous les cours d'eau échappés des lacs et des glaciers ont à traverser des roches de calcaires et de grès par d'étroits défilés. Le massif du mont Viso rattache les Alpes maritimes aux *grandes Alpes du Dauphiné.* A l'ouest de la dépression que parcourt la Durance s'élève un grand massif alpin : l'Oisans. Ce massif est délimité au nord par la profonde vallée de la Romanche et le col peu élevé du Lautaret, à l'ouest par le *Drac.* C'est une grande masse de granit à contour à peu près circulaire, et limitée de tous côtés par des roches jurassiques et crétacées.

Les glaciers de l'Oisans présentent, relativement à la surface des rochers, une étendue considérable, soit d'un tiers au moins sur un espace de 500 kilomètres carrés, et peuvent rivaliser en magnificence avec ceux de la Suisse ; le plus important des champs de glace est celui du Mont-de-Lans, qui occupe à lui seul

FIG. 20. — Alpes occidentales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une superficie d'au moins 15 kilomètres carrés. La hauteur générale du plateau sur lequel repose le massif du Pelvoux ne permet pas aux glaciers de descendre aussi bas dans les vallées que les grandes mers de glace de la Suisse et de la Savoie. Dans la vallée du *Drac*, les blocs erratiques se rencontrent à 1.500 mètres au-dessus du lit actuel.

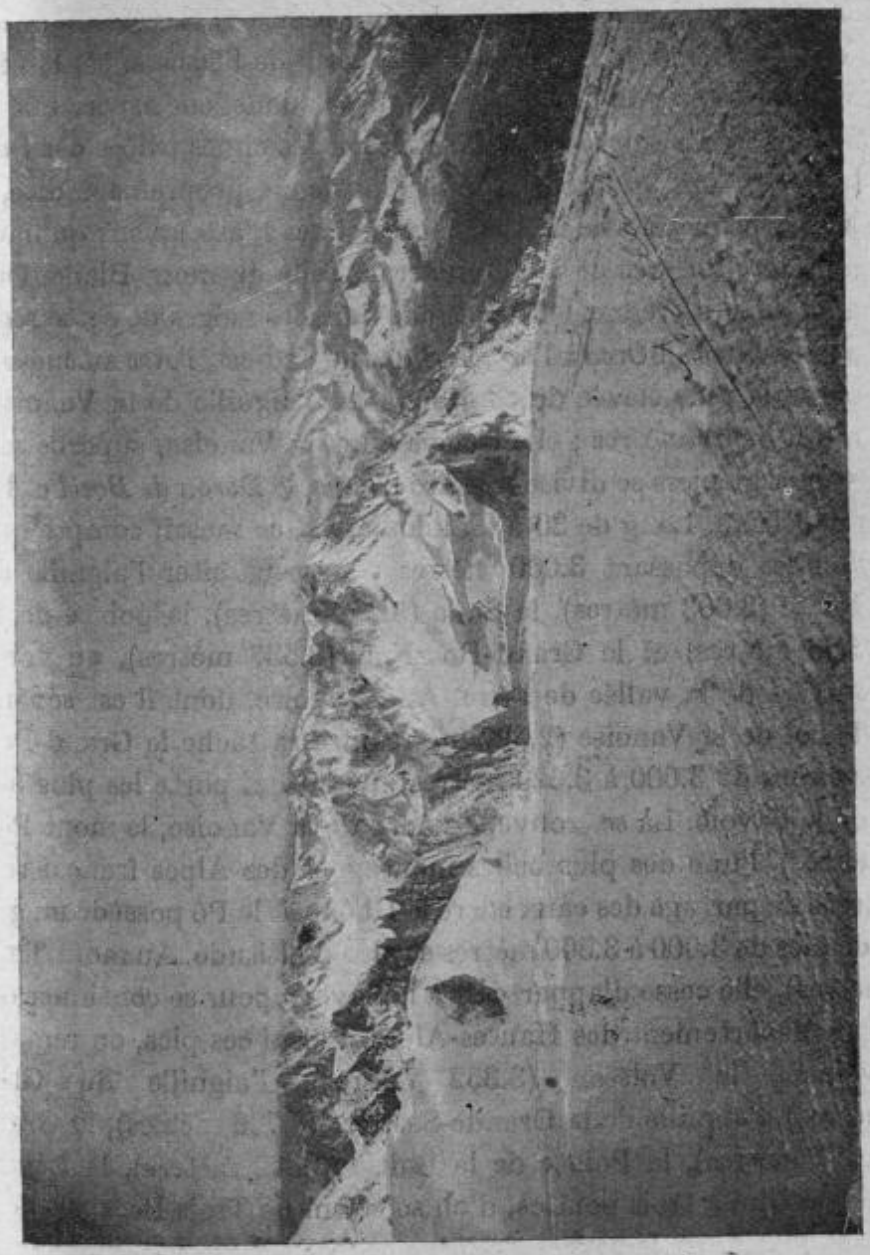


Fig. 21. — Chaîne des Alpes, vue du sommet du mont Blanc.

Le groupe du Pelvoux est rattaché aux monts du Grésivaudan par un plateau qui s'avance en promontoire au sud de la plaine de Grenoble, entre le Drac et la *Romanche*. Plus loin se développent les arêtes des « quatre montagnes », séparées les unes des autres par les affluents de l'Isère, et qui se continuent au nord par le massif de la Grande-Chartreuse,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au sud par les monts du Vercors. Les divers chaînons et les plateaux du Vercors occupent la partie orientale du grand labyrinthe de montagnes et de collines qui remplit le quadrilatère limité par le *Rhône*, l'*Isère*, le *Drac* et la *Drôme*.

Plus à l'ouest, au-dessus d'Apt et de Carpentras, s'élève la superbe montagne le Ventoux.

La chaîne, recourbée en demi-cercle, qui limite la Savoie méridionale au nord des sources de la *Durance* et du massif de l'Oisans, est la célèbre Maurienne. Les monts de la Maurienne offrent dans leur aspect une sorte de moyenne entre les sommets de la Suisse et les cimes pelées des Basses-Alpes. Celle de l'Arc, qui constitue la Maurienne proprement dite, présente des escarpements arides. Les hautes cimes n'atteignent qu'une élévation inférieure de près de 1.000 mètres à celle du mont Blanc. Quatre rivières abondantes prennent leur origine dans les neiges de cette région : l'*Isère* au nord-ouest, l'*Orca* à l'est, la *Slura* au sud-est, l'*Arc* au sud-ouest. La montagne la plus élevée de ce groupe est l'aiguille de la Vanoise, en Savoie, qui a 3.861 mètres ; elle s'élève dans la Vanoise, superbe massif dont les vastes glaciers se divisent entre l'*Isère*, le *Doron de Bozel* et l'*Arc*, affluents de l'Isère. Long de 30 à 35 kilomètres, ce massif compte quinze ou vingt cimes dépassant 3.000 mètres : on peut citer l'aiguille de la Grande-Motte (3.663 mètres), la Sana (3.450 mètres), la pointe de Wallonet (3.566 mètres) et le Grand-Roc-Noir (3.537 mètres), au nord de Lanslebourg et de la vallée de l'Arc. A la Vanoise, dont il est séparé au sud par le col de la Vanoise (2.527 mètres), se rattache le Grand-Pelvoz qui a des cimes de 3.000 à 3.620 mètres, massif qui porte les plus beaux glaciers de la Savoie. Là se trouve, au nord de la Vanoise, le mont Pourri (3.788 mètres), l'une des plus belles montagnes des Alpes françaises. La grande arête de partage des eaux entre le Rhône et le Pô possède un grand nombre de pics de 3.000 à 3.500 mètres et plus d'altitude. Au mont Thabor (3.212 mètres), elle cesse d'appartenir à la Savoie, pour se continuer entre l'Italie et le département des Hautes-Alpes. Parmi ces pics, on remarque successivement le Valétan (3.352 mètres), l'aiguille du Glacier (3.412 mètres), l'aiguille de la Grande-Sassière (3.756 mètres), la Grande-Parci (3.617 mètres), la Pointe de la Galise (3.342 mètres), la Lévanna (3.640 mètres) qui a trois pointes, d'où son nom de Trois-Becs, au-dessus du puissant glacier de la source de l'Arc et le Rochemelon, montagne si majestueuse quand on la voit d'Italie, qu'elle a longtemps passé, comme le mont Viso, pour la plus haute cime de toutes les Alpes.

Nous signalerons aussi dans la chaîne qui continue de limiter la Maurienne, le Grand-Galibier (3.242 mètres), qui domine le col de Galibier menant de Saint-Jean-de-Maurienne à Briançon ; la Part ou les Trois-Évêchés (3.120 mètres), les Aiguilles d'Arves (3.514 mètres). Divers som-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mets de plus de 3.000 mètres dominent les mers de glace des Grandes-Rousses.

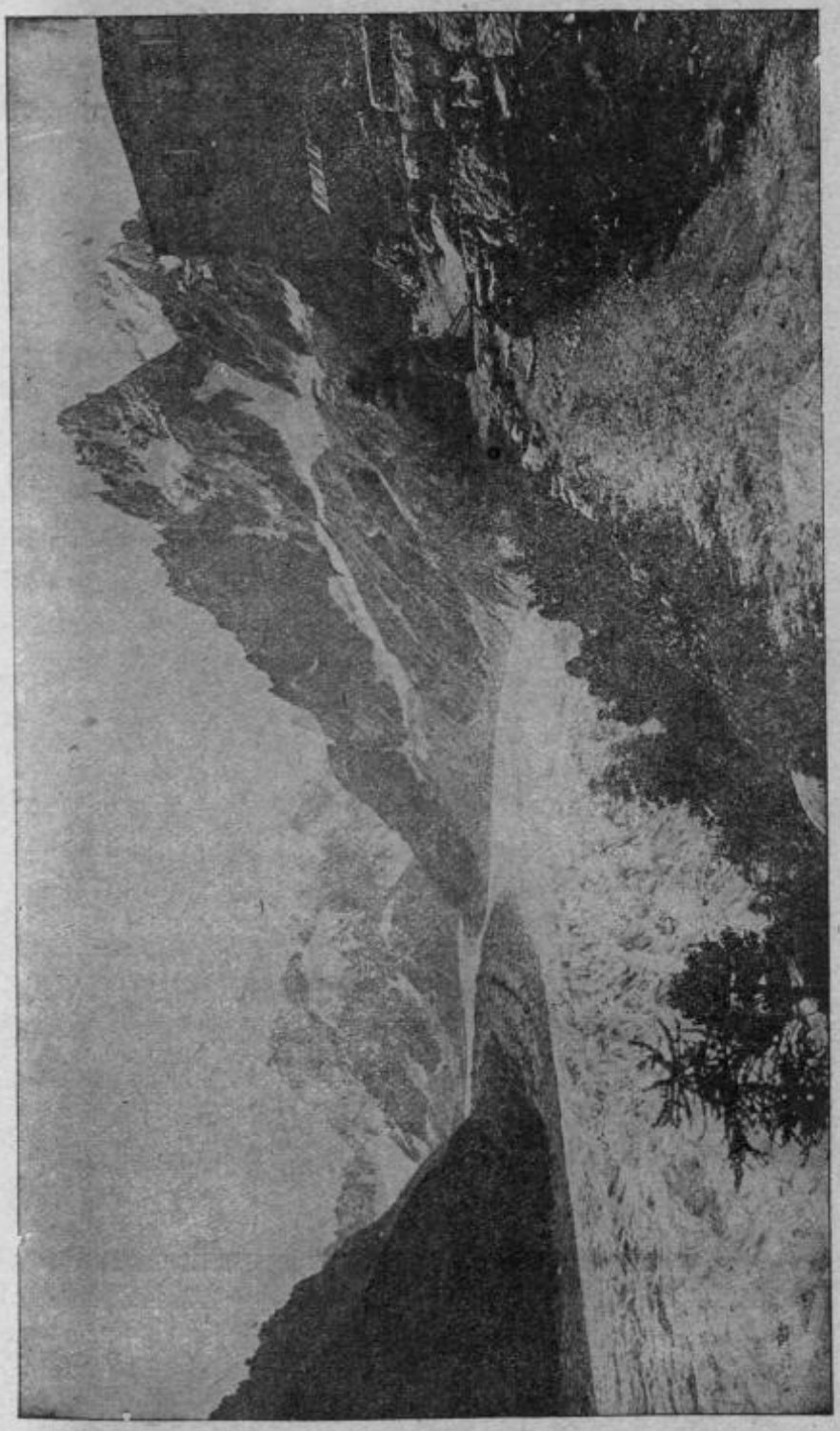


FIG. 22. — Mont Blanc. — La Mer de Glace.

Dans cette région montagneuse, certains vallons bien abrités sont peuplés jusqu'à près de 1.800 mètres de hauteur.

A l'ouest de la Maurienne, des montagnes de roches talqueuses et de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

granit s'alignent en une longue rangée parallèle à l'axe du Jura et limitée à la base occidentale par la vallée du Grésivaudan. L'*Isère* elle-même, l'*Arc* et la *Romanche* traversent cette zone de monts. L'un, voisin de l'Oisans, est celui des Grandes-Rousses ; un autre se termine par les trois pointes de Belledone.

Le prolongement septentrional des monts du Grésivaudan n'est autre que la double arête du mont Blanc et des Aiguilles-Rouges ; à l'occident, ses pentes plus douces et ses longues mers de glace s'inclinent vers la vallée de Chamonix.

Deux torrents seulement prennent leur naissance à la base du mont Blanc : à l'ouest, l'*Arve*, qui va s'unir au Rhône en aval de Genève ; à l'est, la *Doire*, qui se jette dans le Pô.

Le mont Blanc, dans sa faible étendue relative, contient une masse énorme de neiges et de glaces qui descendent au loin dans les ravins ; plus de la moitié des neiges et des glaces qui recouvrent le massif s'épanche dans l'Arve, soit 168 kilomètres carrés sur les 282 que comprend le mont Blanc (4.810 mètres).

Le plus vaste de ces glaciers est la Mer de Glace (2.989 hectares), qui se meut avec une rapidité moyenne de 100 mètres par an.

Après la Mer de Glace, parmi les glaciers du mont Blanc les plus importants, on peut citer le glacier de Leschaux (1.409 hectares), le glacier de Talèfre (1.379 hectares), le glacier d'Argentière (2.602 hectares), d'où s'échappe la principale source de l'Arve, le glacier des Bossons, suspendu sur la vallée de Chamonix, le glacier de Taconnaz, ceux de Bronnassay et de Trélatête dont les eaux s'écoulent dans le Bonnant. Parmi les cimes, il faut citer le mont Maudit (4.771 mètres), le Dromadaire (4.556 mètres), le Dôme du Goûter (4.331 mètres), l'Aiguille Verte (4.127 mètres), l'Aiguille du Géant (4.010 mètres). En dehors du massif du mont Blanc, la principale cime est le Buet (3.109 mètres) qui est séparé du mont Blanc par la vallée de Chamonix, d'où descendent le *Giffre* et la *Diosaz* et dont le panorama est vanté comme un des plus remarquables de la chaîne des Alpes.

Toute la partie septentrionale de la Savoie comprise entre le massif du mont Blanc, le Léman et le Rhône, est occupée par des massifs de montagnes qui forment la transition naturelle entre les Alpes et le Jura. Les diverses chaînes, qui affectent en général une direction sud-ouest-nord-est, sont celles de la Grande-Chartreuse, des Beauges [1], les montagnes d'Annecy, parmi lesquelles la Tournette (2.357 mètres), le Parmelan

---

[1] Les cimes principales des Beauges sont la Dent du Nivolet (1.558 mètres), le Trélod (2.186 mètres) et la Pointe d'Arcalod (2.223 mètres). Le plateau des Beauges a un peu moins de 1.000 mètres d'élévation moyenne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(1.855 mètres), le puissant Semnoz (1.704 mètres) et les longues crêtes du Salève (1.379 mètres) et des Voirons (1.486 mètres). Les eaux s'y sont

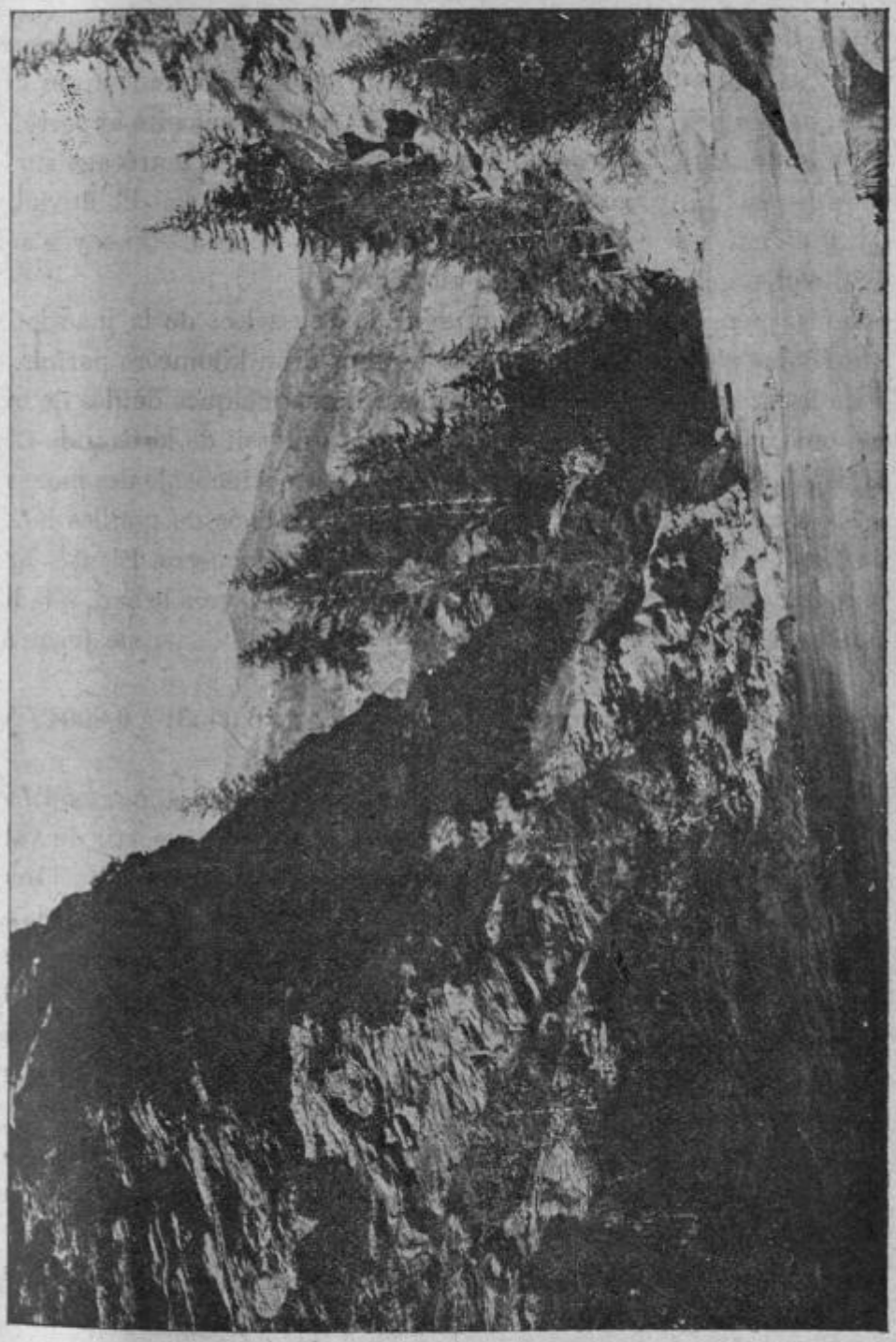


Fig. 23. — Gorges de l'Arc à Lanslevillard.

creusées d'assez larges vallées : ainsi la vallée de l'Isère entre Albertville et Grenoble et celle du Giffre.

C'est dans cette région que l'on trouve les lacs d'Annecy, du Bourget et d'Aiguebellette.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En avant du confluent de l'Arve, le Rhône, après avoir traversé les territoires du Léman, s'engage, à son entrée sur le territoire français, dans une étroite ouverture ménagée entre le rempart oriental du Jura et le mont du Vuache ou Chaumont (1.111 mètres). Après avoir reçu la cascade de la *Valserine*, il entre dans l'âpre défilé de Bellegarde. Deux torrents venus de la Haute-Savoie, les *Usses* et le *Fier*, le rejoignent après avoir traversé, par de beaux défilés, des remparts de roche calcaire appartenant au système du Jura. Le torrent des Usses n'a ni lac ni marécage sur son parcours : c'est un torrent qui a complètement formé son lit fluvial. Le *Fier*, lui, en est à sa période de transition, car le lac d'Annecy n'a pas encore été changé en plaine par les alluvions.

Devenu à peu près navigable en aval de Seyssel et de la jonction du Fier, le Rhône s'étale sur une largeur de plus d'un kilomètre parfois. Au sortir de la large plaine, le Rhône se glisse dans quelques défilés de montagnes, puis, gonflé du *Guiers*, qui descend du massif de la Grande-Chartreuse, il longe jusqu'à la plaine de l'*Ain* la base occidentale des monts du Jura. En aval de l'Ain, le Rhône s'étend en un lacis de mailles innombrables, et il a là un caractère demi-fluvial, demi-lacustre. Bientôt après le fleuve unit ses eaux en un seul lit et, se reployant vers le sud, à la base des collines de Lyon, va se joindre à la Saône, qu'il continue jusqu'à la mer.

Les pentes du Rhône en aval de Lyon varient de 0,00081 à 0,00049 pour finir à 0,000037.

En aval de Lyon, le plus grand cours d'eau que reçoit le Rhône est l'*Isère*, née comme le fleuve dans les hauts glaciers des Alpes. Au sortir du val de Tignes, l'Isère est déjà un torrent considérable, après avoir englouti toutes les eaux qui débordent de la vallée de la Tarentaise et le redoutable torrent de l'*Arc*, qui vient de parcourir la Maurienne. Elle continue seule son cours dans la vallée du Grésivaudan, où elle a près de 112 mètres de largeur. Le *Drac* se jette dans l'Isère, en aval de Grenoble, grossi d'une rivière encore plus violente que lui, la *Romanche*, issue des glaciers occidentaux du massif de l'Oisans.

Au-dessous de la jonction du Drac, l'Isère ne reçoit plus d'affluents des grandes montagnes ; elle ne se mêle plus qu'à de faibles cours d'eau : telle est la *Fure*, qui sort du lac de *Paladru*.

L'Isère apporte au Rhône une masse d'eau qui varie, suivant les saisons, de 60 à plusieurs milliers de mètres cubes. Sa pente est de 11 centimètres par kilomètre, et sa profondeur de mouillage ou tirant d'eau ne dépasse pas 30 centimètres à l'étiage.

La *Drôme*, descendue des montagnes du Luc, n'est pas soutenue en été par la fusion des glaces, et son bassin n'est point assez vaste pour que la rivière soit assez abondante en toute saison. De même les autres cours

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'eau qui s'épanchent des avant-monts alpins, le *Roubion*, le *Lez* et l'*Eygues*.

A l'ouest du Rhône, la proximité des montagnes du Vivarais et des Cévennes ne permet pas aux rivières tributaires du fleuve d'atteindre une longueur considérable. Ainsi sont le *Doux*, l'*Erieux* et l'*Ardèche*.

Deux autres torrents du versant occidental, la *Cèze* et le *Gardon*, ont des défilés très remarquables.

La *Durance*, qui s'unit au Rhône à quelque distance au-dessous d'Avignon, peut être considérée comme un fleuve presque indépendant. Comme l'Isère, la Durance est fille des grandes Alpes ; mais en été ses premières eaux ne sont pas gonflées par la fonte des neiges et des glaces. Mais plus bas, en avant de Briançon, la *Guisanne* et la *Gironde* lui apportent le flot abondant descendu des glaciers de l'Oisans, le Celé et d'autres. Jusqu'à son confluent avec le Rhône, ce cours d'eau garde son allure de torrent, roulant parfois des masses d'eau excessivement considérables, parfois réduit à d'étroits filets. Tous les anciens lacs de son parcours ont été remplis d'alluvion. La Durance n'est pas même navigable dans la partie inférieure de son cours, quoiqu'elle ait 380 kilomètres de développement.

10. Région des Pyrénées. — Entre deux mers, entre deux pays, les majestueuses Pyrénées dressent une formidable barrière de montagnes, longue de 440 kilomètres, épaisse de 90 à 100 kilomètres et dont les cimes, crénelées de cols à peine inférieurs aux

FIG. 24. — Pyrénées continentales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sommets, forment un rempart inexpugnable où la France, si largement ouverte sur les plaines du Nord, vient brutalement se buter au Midi et se clore en impasse. Leur extrémité orientale, déjà presque africaine d'aspect, plonge ses rocs colorés dans l'azur lumineux de la Méditer-

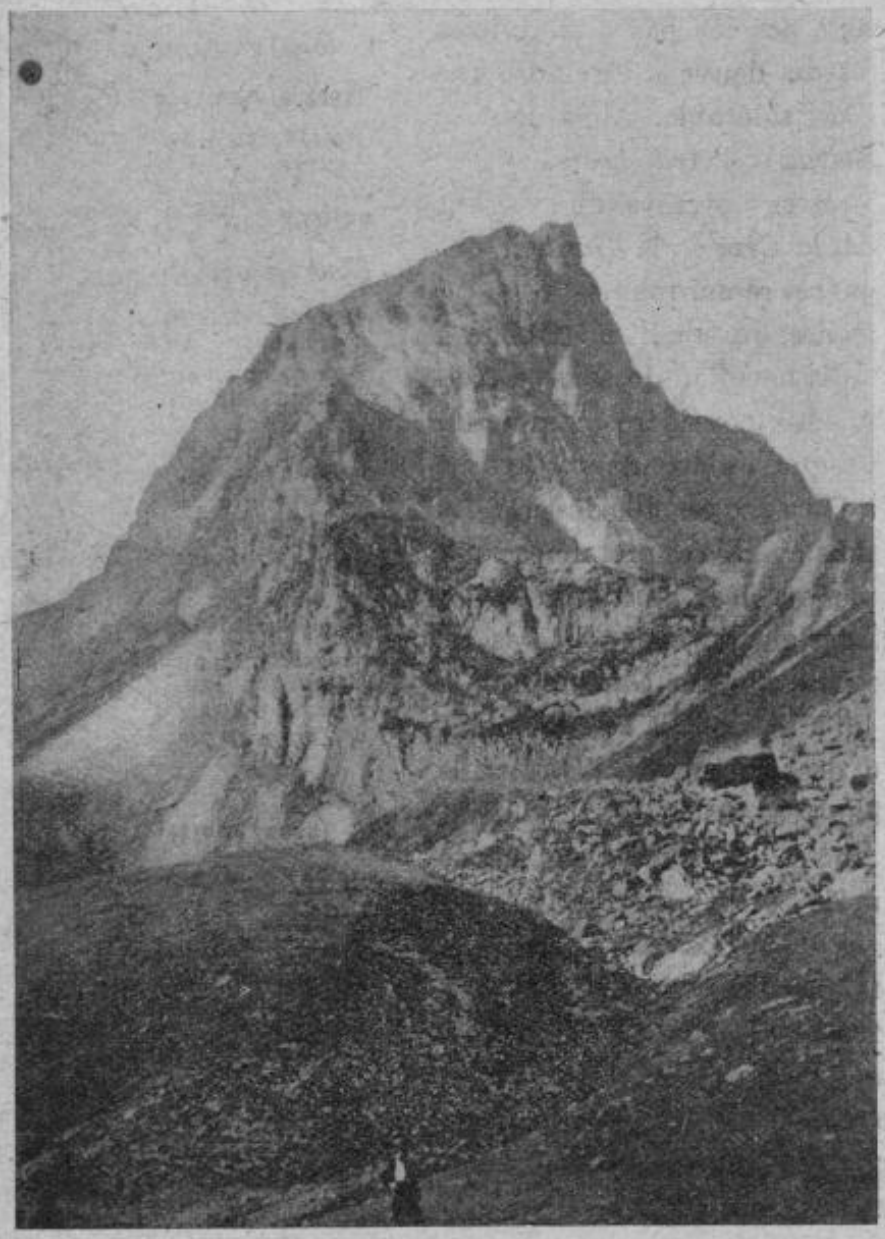


FIG. 25. — Le Canigou.

ranée, tandis qu'à l'occident leurs croupes verdoyantes et fraîches tombent dans les flots de l'Océan.

Si les Alpes ont souvent la majesté écrasante, la grâce est l'apanage des Pyrénées. La splendeur des cirques, la profondeur des gaves, la poésie des lacs, la fraîcheur des vallées, la grâce des cascades, les chaudes colorations des roches en font une contrée radieuse et unique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le versant septentrional des Pyrénées, plus riche et plus varié que le versant méridional, ouvre de belles et fertiles vallées mais ne contient pas de contreforts considérables. Les plus remarquables sont : le Canigou (2.785 mètres), et les Alpes qui se détachent du pic de Castabone

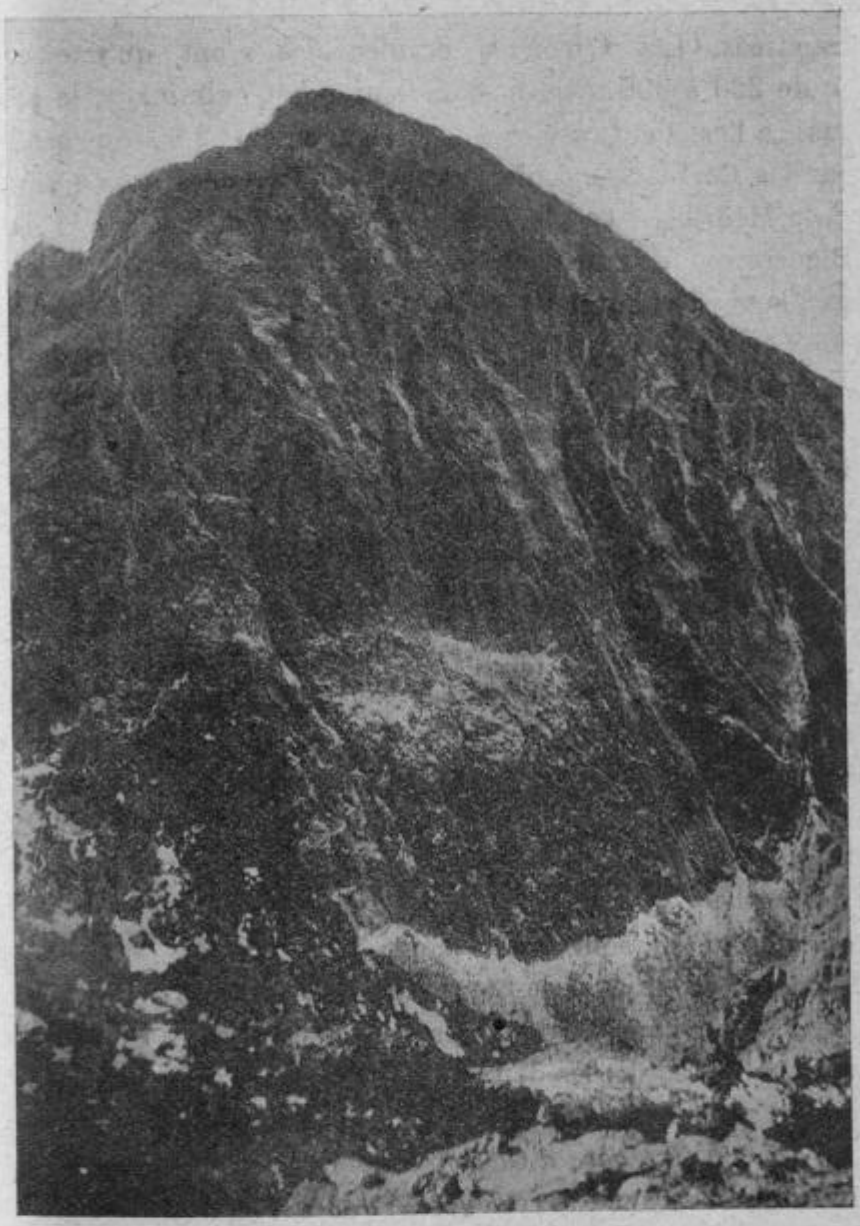


FIG. 26. — Pic du Midi d'Ossau.

(2.421 mètres), vers les sources du *Tech* et du *Ter ;* les Corbières orientales qui partent du pic de Carlitte vers les sources divergentes du *Tet* et de la *Sègre* et se prolongent jusqu'à la pointe de Leucate ; les Corbières occidentales qui prennent naissance au même pic de Carlitte, mais près des sources de l'*Ariège* et de l'*Aude* qu'elles séparent ; enfin les monts Bigorre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre les vallées de la *Neste* et de l'*Adour*, qui contiennent les plus belles sommités des Pyrénées françaises.

Le Canigou forme une masse très imposante qui se prolonge presque dans la plaine du Roussillon par les Aspres, montagnes très épanouies et très confuses. Les Corbières orientales ont une hauteur moyenne de 1.500 mètres, sont arides, épaisses, difficiles, coupées de vallées obliques et tourmentées. Les Corbières occidentales n'ont qu'une élévation moyenne de 300 à 400 mètres, mais leur point culminant, le pic Saint-Barthélemi, à l'est de Tarascon sur Ariège, atteint 2.333 mètres. L'angle formé par les Corbières occidentales et les Pyrénées donne cinq petits bassins à la Méditerranée : le *Tech*, le *Réar*, le *Tet*, la *Gly* et l'*Aude*. Les monts Bigorre ont une hauteur moyenne de 2.000 mètres et leur point culminant, le pic de Cambielle, s'élève à 3.254 mètres ; ils décroissent très rapidement au nord et s'effacent dans les coteaux qui séparent l'*Adour* de la *Garonne*. L'angle formé par les monts de Bigorre et les Pyrénées occidentales donne à l'Océan les bassins de *Nivelle* et de l'*Adour*. Le *Tech* qui coule dans une gorge très profonde et tourmentée, le Valspir se dirige parallèlement aux Pyrénées du sud-ouest au nord-est ; c'est un torrent, souvent à sec dans l'été et qui devient dangereux dans l'hiver.

La *Têt* est aussi une rivière torrentueuse dont le bassin contient le célèbre Canigou ; en sortant de son défilé, au-dessus de Prades, elle jette des dérivations très nombreuses. La *Gly* a le même caractère que les deux torrents précédents.

L'*Aude*, à sa sortie du pic de Corlitte, traverse le Caspir, conque de 10 à 20 kilomètres de diamètre couverte de forêts et élevée de 1.500 mètres. Elle reçoit de nombreux ruisseaux qui sont coupés par le canal du Midi.

La *Nivelle* est un torrent qui descend du col de *Naya*.

L'*Adour* prend sa source au mont Tourmalet, à une hauteur de 1.930 mètres ; il est sujet à de nombreux débordements. Les affluents de gauche de l'Adour courent dans des vallées étroites et peu fertiles. Les plus remarquables sont : les deux *Luy*, de nature torrentielle ; le *gave de Pau*, qui descend de la belle cascade de Gavarnie (2.331 mètres), et se grossit du *Baslan*, du *gave d'Oloron*, lequel reçoit lui-même l'*Aspre* qui vient du col de Canfranc ; la *Bidouze*, la *Joyeuse* et enfin la *Nive* qui descend du mont Orcullo, grossie de la *Bayunza*.

Les affluents de droite de l'Adour n'ont que peu d'importance ; le plus remarquable est la *Midouze*.

La ceinture de montagnes qui forment le bassin de la Garonne, indépendamment des monts Bigorre et des Corbières occidentales qui nous sont connues, comprend les Pyrénées centrales et les Cévennes méridionales.

Les Pyrénées centrales sont très élevées et très difficiles ; elles ont pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

points culminants le pic du Montcalm (3.250 mètres), le pic d'Estaz (3.234 mètres), la romantique Maladetta (3.312 mètres) et le pic de Nethou (3.370 mètres). Elles ne sont coupées que de sentiers praticables à peine pour les contrebandiers. Les seuls passages à peu près accessibles à travers les Pyrénées centrales sont le port de Saldéou qui mène à Andoire, le port de Venasque et le port d'Oo, étroits et dangereux.

Les Cévennes méridionales se dirigent à partir du col de Naurouze du sud-ouest au nord-est sous les noms divers de Montagnes Noires, de l'Espinous (1.280 mètres), de l'Orb, de Garrigues, du Gévaudan jusqu'au mont Lozère vers les sources du *Tarn*, du *Lot*, de la *Truyère* et du *Viaur*. Descendues des cimes en torrents, ces rivières ont scié, à force de siècles, le socle épais des plateaux ; elles s'y sont enfouies en de profondes meurtrissures avant de se déboucher dans les plaines pour s'y reposer en une flânerie fertilisante parmi les grasses alluvions et les collines plantureuses. Leur flanc occidental est doux et jette de longs contreforts, courant entre Agout et Tarn, et Tarn et Aveyron ; leur flanc oriental est très rude et se rapproche constamment du Rhône. Leur élévation moyenne est de 1.000 à 1.200 mètres. Au mont Lozère, le faîte général de partage des eaux se continue au nord-est par les Cévennes septentrionales et il s'en détache, à quelques kilomètres au nord du mont Lozère, vers la source de l'*Allier*, les monts Margeride à une hauteur moyenne de 1.200 à 1.400 mètres. Elle verse les eaux du *Lot* dans le bassin de la Garonne et jette des contreforts très longs, les Causses et le Rouergue, qui s'inclinent en souriant jusqu'aux rives bavardes de la Garonne.

La *Garonne* prend sa source au val d'Aran, dans un cercle qui s'appuie aux deux pics de la Maladetta et du mont Vallier (2.833 mètres) ; son lit est sans profondeur et varie souvent à cause du peu d'élévation de ses rives ; ses débordements sont fréquents et dévastent les campagnes voisines, qui sont d'une grande fertilité. Au bec d'Ambez, la Garonne se réunit à la Dordogne et forme une masse d'eau embarrassée d'îles et de bancs de sable.

Les principaux affluents de gauche sont d'abord deux torrents montagneux : la *Pique*, qui descend du port de Venasque en traversant une vallée profonde, et la *Neste*, qui traverse la belle vallée d'Aure. Après ces torrents, les affluents de gauche viennent des hauteurs qui encaissent la rive droite de l'Adour ; on y distingue la *Save*, le *Gers* et la *Baïse*.

Les affluents de droite sont nombreux, considérables, tortueux et difficilement navigables. Ainsi sont : le *Salat ;* l'*Ariège*, qui descend du col de Puymorens et grossie, entre autres, du puissant *Vicdessos ;* le *Lers*, le *Tarn* qui du bois des Armes (770 mètres), dans le massif de la Lozère aux altitudes chaudes et glacées, reçoit l'*Agout*, l'*Aveyron*, au cours dangereux ; le *Lot* qui dévale des Cévennes, au lit embarrassé et souvent barré

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de rochers ; la *Dordogne* qui descend du mont Dore, où le pic de Sancy domine la France centrale, rivière célèbre par le fameux phénomène du mascaret, dont l'impétuosité renverse tout sur son passage. Celle-ci reçoit

Fig. 27. — Monts Ceredale.

un grand nombre d'affluents ; la *Cère* avec ses merveilleuses gorges, qui part du Cantal et se grossit de la *Corrèze* ; l'*Isle*, qui coule dans une large vallée et qui reçoit un grand nombre d'affluents, parmi lesquels la *Dronne*.

11. La Suisse. — En Suisse, le *Rhin* a une allure torrentielle, tour-

Fig. 28. — Mont Zermatt.

menté par les montagnes, coupé par des chutes nombreuses. Il est formé par de nombreuses sources descendant des Alpes centrales et dont les principales sont le *Rhin postérieur* (Hinter-Rhein) et le *Rhin citérieur*. Le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Rhin postérieur descend par deux sources du San Bernardino et du Maloïa (3.500 mètres), court du sud-est au nord-ouest, traverse la Via-Mala et tourne au nord-ouest pour aller rejoindre le Rhin citérieur (Voder-Rhein). Celui-ci descend du col d'Ober-Alp, à 2.558 mètres d'altitude, dans la

FIG. 29. — Massif de la Vanoise.

masse du Saint-Gothard, court au nord-est, se grossit de plusieurs torrents dont le plus grand, le *Rhin du milieu* (Mittel-Rhein) traverse une vallée âpre et profonde, couronnée de tous côtés par des glaciers, puis tourne directement à l'est pour aller joindre l'autre Rhin à Reichenau.

A partir de Vaduz, chef-lieu de la petite principauté de Lichtenstein, il est continuellement serré sur sa gauche par une muraille de montagnes,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce qui l'empêche de recevoir aucun affluent, tandis que sur sa droite il se grossit de plusieurs rivières, parce qu'il n'est encaissé que par des rameaux perpendiculaires à son cours. Au-dessous de Reineck, il tombe dans le lac *Boden* ou de *Constance* après 120 kilomètres de parcours. Une presqu'île

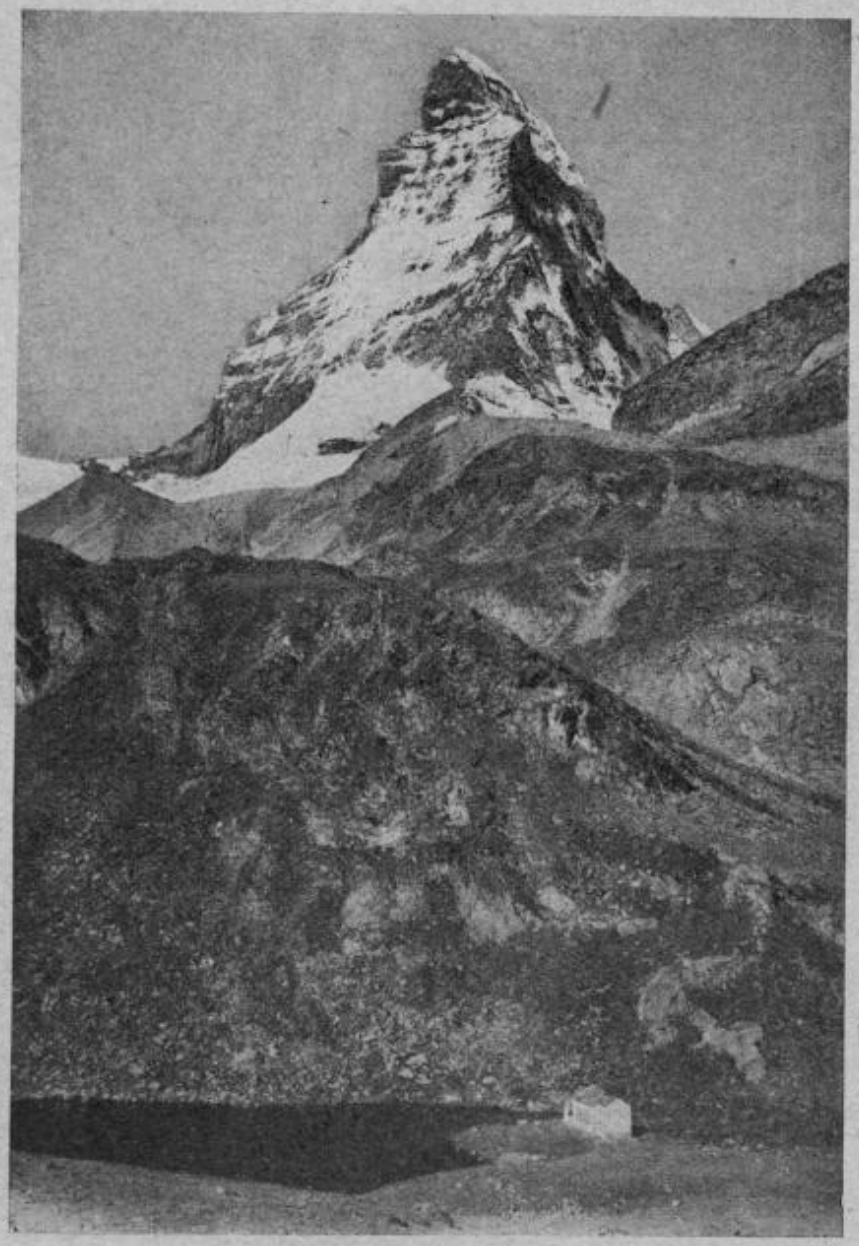


FIG. 30. — Le lac Noir et le Cervin.

formée par la rive droite sépare le lac de *Constance* du lac de *Zell*, que traverse aussi le Rhin. Au-dessous de Schaffausen, le fleuve rencontre un chaînon des Alpes qui se croise sur son cours avec un des rameaux de la Forêt Noire et ne parvient à les franchir qu'en faisant une cascade de 15 à 20 mètres. Il tourne alors au sud-ouest avec une grande rapidité jusqu'au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

confluent de la *Toss* et court dans un défilé resserré entre les montagnes des deux rives, en séparant les cantons d'Argovie et de Bâle du grand-duché de Bade. Il reçoit la masse d'eau de l'*Aar*, rive droite, et fait une chute à Lauffenbourg (rive gauche) et arrive à Bâle.

A la hauteur de cette dernière ville, le Rhin, pressé par les dernières pentes du Jura et de la Forêt Noire, tourne brusquement au nord et coule dans cette direction pendant presque tout son cours. Il quitte la Suisse et change alors presque complètement de caractère.

Les principaux affluents de gauche du Rhin, dans la région suisse, sont le *Thur*, la *Toss*, la *Glatt*, l'*Aar*, l'*Ergoltz* et la *Birse*.

Le *Thur* descend des monts Kurfisten qui encaissent le lac Wallenstad,

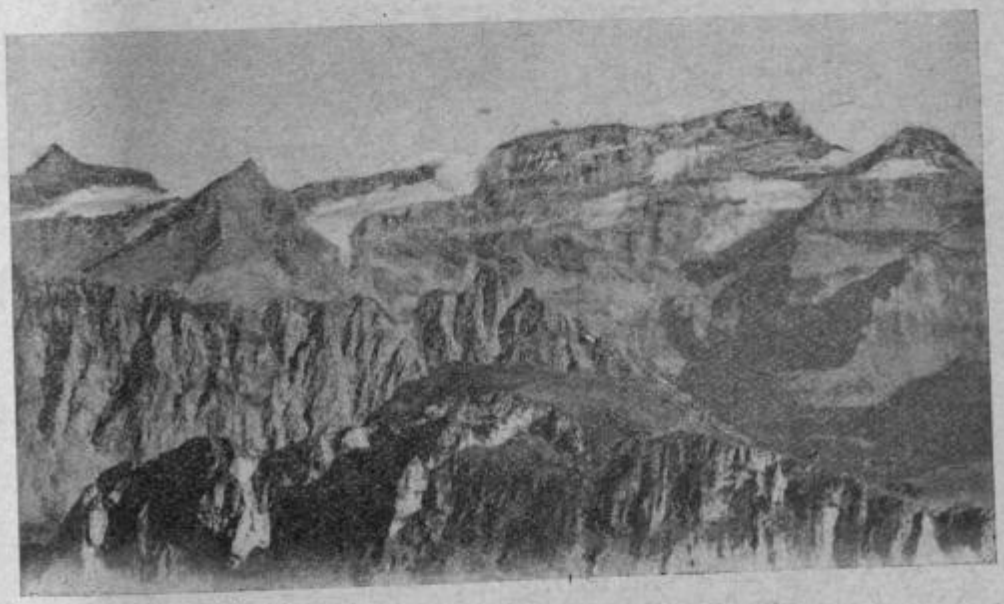


FIG. 31. — Les Diablerets.

reçoit le *Siller* à Bischofzell et finit entre Schaffausen et Eglisau. Le *Thur*, la *Toss* et la *Glatt* sont d'allure torrentielle et d'un débit peu important. L'*Aar*, qui descend des glaciers du Finster-Aar-Hon, traverse le lac de *Brienz* (380 mètres), le lac de *Thun* (578 mètres), arrose Berne et finit en face de Waldshut par un courant très rapide, dans un lit embarrassé de rochers et dont les rives sont fortement escarpées. La masse d'eau qu'il apporte au Rhin est plus considérable que celle du fleuve. Son bassin, qui comprend la plus grande partie de la Suisse, est formé à l'ouest par les Alpes helvétiques, le Jorat et le Jura, à l'est par les montagnes qui encaissent le Rhin jusqu'à Sargans et de là par celles qui séparent la *Limmat* de la *Thur*.

Les plus remarquables affluents de gauche de l'Aar sont : le *Limmen*, qui tombe dans le lac de *Thun*, après s'être grossi de la *Kander ;* la *Sarine*, alimentée par la *Glane*, descend des monts Diablerets, se grossit de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 32. — Alpes Pennines et Alpes Centrales.

Sensée, à la hauteur de Lauppen et tombe dans l'Aar entre Aarberg et Berg ; le *Thiel*, qui sort du lac de *Neufchâtel* (32 kilomètres) et reçoit l'*Orbe*, la *Reuss*, la *Broye* (qui traverse le lac de Morat) et coupe le lac de *Bienne*, près de la ville du même nom ; la *Suze* et enfin le *Dunneren*.

Parmi les affluents de droite de l'*Aar*, il faut citer : l'*Emmen*, qui descend des monts de Brientz et tombe au-dessous de Soleure ; le *Langelen ;* le *Wiger*, qui traverse les lacs de *Baldegger* et d'*Halhvyler* ; le *Surh*, qui sort du lac de *Sempach* (515 mètres) et finit au-dessous d'Aarau *;* la *Reuss*, formée de deux sources qui viennent de la *Furca* et du mont Saint-Gothard, à 2.500 et 2.144 mètres de hauteur, se dirige au nord dans des abîmes effroyables, au pont du Diable, traverse le lac des Quatre-Cantons (437 mètres), puis sort du lac de *Lucerne*, reçoit les eaux du lac de *Zug* et celui-ci des eaux du lac *Morgalen*, puis finit au-dessous de Brugg ; la *Limmat*, qui descend du mont Dodiberg (3.623 mètres), reçoit les eaux des vallées sauvages de l'Engi et du Kloen, du lac *Wallensladl* et traverse les lacs de *Rapperschmil* et de *Zurich* (409 mètres). Cette rivière reçoit le *Sihl*, au-dessous de Zurich.

12. L'Italie. — La ligne de partage des eaux de la région italique est très fortement marquée et se compose : des Alpes Centrales, Pennines, Grées, Cottiennes, Maritimes, pour la partie occidentale de l'Italie continentale ; des Apennins pour toute la péninsule ; des Alpes Centrales, Rhétiques, Carniques et Juliennes pour la partie orientale. Elle forme deux versants principaux : l'un sur l'Adriatique, qui donne les bassins du *Pô*, de l'*Adige* et autres rivières ; l'autre sur la Méditerranée toscane et sicilienne, qui donne les bassins de l'*Arno*, du *Tibre*, du *Volturno* et autres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le versant méridional, formé par les Alpes occidentales, jette des rameaux très courts, perpendiculaires à la crête, de telle sorte que la ceinture se dessine à l'intérieur d'une manière abrupte et tranchée, tandis qu'à l'extérieur elle s'abaisse par des gradations lentes. D'un côté, on trouve la fraîcheur, des ruisseaux, des pâturages ; de l'autre côté, l'aridité, des torrents effroyables, des roches nues et verticales.

Cette portion de la ceinture occidentale comprend les plus majestueuses montagnes de l'Europe, couvertes d'énormes glaciers, déprimées par une multitude de cols au-dessus desquels dominent des pics formidables qui ressemblent à des géants de glace.

Le bassin du *Pô*, l'un des plus beaux et des plus fertiles du monde, forme, avec ceux des autres petits fleuves qui se rendent dans l'Adriatique, un espace demi-circulaire formé par une épaisse arête de montagnes

FIG. 33. — Glaciers du Trient.

qui le séparent des bassins du *Rhône*, du *Rhin* et du *Danube*. Le *Pô* prend naissance à la base du mont Viso pour s'engager dans une allée bordée à gauche par les colosses neigeux des Alpes, à droite par les Apennins boisés, qu'il parcourt rapidement. Il recueille les eaux qui descendent des deux versants : torrents, rivières, émissaires des lacs, arrivés à leurs confluents en franchissant par bonds les moraines successives, et après s'être frayé un chemin dans les gorges des montagnes. C'est au col de Cadibone qu'est la dépression la plus grande de toute la chaîne et on le regarde comme la fin des Alpes. Alors commencent les Apennins, montagnes secondaires dont la hauteur moyenne est de 1.200 mètres et qui n'offrent ni les cimes pyramidales des Alpes, ni les pics sourcilleux des Pyrénées. L'Apennin septentrional circonscrit au sud le bassin du Pô ; ses principaux sommets sont le Cimone (2.170 mètres) et le Cattaro (1.790 mètres). La plupart des vallées forment avec le faîte un angle droit, ce qui fait que la chaîne ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donne naissance qu'à des rivières perpendiculaires, et par conséquent très courtes. Il en est de même des contreforts, dont le plus remarquable est celui qui part des sources de la *Scrivia* et de la *Trebbia*, affluents torrentiels de droite du Pô. Il est très épais et encaisse à droite, le bassin de la Trebbia comme par une longue muraille, et à gauche, jette entre les affluents de la Scrivia, entre la *Staffora*, le *Tidone*, etc., de longs rameaux qui aboutissent sur la route de Voghera à Plaisance et en font un long défilé parallèle au Pô, célèbre sous le nom de la « Stradella » ; cette route, qui a une grande importance stratégique, est unique entre le fleuve et les Apennins et il faut nécessairement l'aborder, soit qu'on aille de Plaisance sur le *Tanaro*, affluent de droite du Pô, soit qu'on aille d'Alexandrie sur la *Trebbia*.

Les dépressions de la chaîne sont nombreuses ; les principales sont le col de la Boccheta (777 mètres), qui est le prolongement dans le bassin du Pô du fameux chemin de la Corniche, qui va de Nice à Gênes ; le col de Pontremoli sur la *Magra*, à Fornovo sur le *Taro*, affluent de droite du Pô, qui débouche au col de Pontremoli.

Le *Tanaro*, qui descend du mont Tende, coule pendant tout son cours parallèlement aux deux arcs de cercle que décrit le Pô depuis sa source jusqu'à Valenza. Ses affluents sont à gauche : l'*Etero*, la *Stura* qui descend du col d'Argentière, et à droite la *Bormida*, formée de deux rivières parallèles et de même nom, qui se réunissent en avant de Bestagno.

La *Bormida*, à partir de la ville Acqui, où elle devient large et rapide, reçoit les eaux de plusieurs torrents dont l'un, le *Lemme*, grossi par l'*Orba*, passe au débouché du col de la Boccheta.

La *Parma*, torrent à sec pendant l'été, la *Secchia* qui s'unit au Crostolo par une multitude de canaux et le *Panaro*, qui finit à Stellata, fournissent un sérieux contingent d'énergie au Pô.

Enfin les derniers affluents de droite du *Primaro* sont des torrents qu'on a canalisés avec des travaux immenses et qui font de ce pays un chaos de digues, de fossés, de marais et de coupures. Là se trouvent le *Reno*, grossi de plusieurs rivières, puis le *Santerno* et le *Senio*.

Les Alpes orientales ou Alpes Rhétiques, Carniques et Juliennes, forment une courbe tortueuse de 640 kilomètres de développement. Leur versant méridional présente à peu près les mêmes caractères que celui des Alpes occidentales ; parmi les rameaux qui s'en détachent, il en est surtout deux très remarquables, qui vont à la rencontre l'un de l'autre sur l'*Adige* et enferment le bassin supérieur de ce fleuve dans un triangle de montagnes, dont les Alpes Rhétiques sont la base : c'est le Tyrol italien. Le premier de ces rameaux ou Alpes de l'Ortler et du Tonal, qui interrompt la grande plaine de l'Italie septentrionale et la couvre de masses montagneuses, se détache des Alpes Rhétiques entre les sources de l'*Adda*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de l'*Eisch*, affluents de gauche du Pô, et court au sud-est en séparant le canton des Grisons du Tyrol, par les monts Braglio (2.980 mètres), Bormio (2.419 mètres), Stelvio (2.797 mètres), vaste amas de glaciers dont la principale sommité atteint 3.917 mètres. Là, il sépare le Tyrol de la Lombardie, culmine aux sources de la *Nos*, affluent de l'*Adige*, et se divise en deux branches, les Alpes de la Valteline et les Alpes du Tonal. Celle-ci continue le partage des eaux entre les bassins du *Pô* et de l'*Adige*, atteint la masse du Tonal (3.345 mètres), aux sources de l'*Oglio*, affluent de gauche du *Pô*, de la *Sarca*, affluent du *Mincio*, affluent de gauche du *Pô*, et d'un affluent

FIG. 34. — Lac de Garde.

de la *Nos*, et se prolonge par des murailles énormes, couvertes de glaciers, qui forment la limite sud-ouest du Tyrol et barrent les communications de la Lombardie avec le *Mincio* et l'*Adige*. Au sud du Tonal, la chaîne se partage en deux branches dont l'une court entre la *Nos* et la *Sarca*, puis sépare la *Sarca* de l'*Adige* et se prolonge entre l'*Adige* et le *lac de Garde* (60 kilomètres de longueur). Elle se termine sur l'*Adige* par des rochers abrupts qui forcent ce fleuve à couler dans un long défilé ; ses dernières hauteurs finissent entre Peschiera et Vérone.

Les Alpes de la Valteline courent au sud-ouest en séparant le bassin de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'*Adda*, sur lequel elles tombent en pentes escarpées, des bassins de l'*Oglio*, du *Serio*, affluent de l'Adda, du *Brembo*, entre lesquels elles jettent de longs contreforts. Les Alpes de la Chiese courent d'abord entre la *Chiese*, affluent de l'*Oglio*, et la *Sarca*, se prolongent, entre les *lacs d'Iseo* et de *Garde*, par des montagnes de 1.800 mètres et se terminent par de fortes collines qui mamelonnent tout le pays au sud du *lac de Garde*, entre la *Chiese* et le *Mincio*, affluent de gauche du *Pô*.

Les Alpes de l'Ortler sont traversées par la route du Stelvio, la plus élevée de toute l'Europe (2.797 mètres), qui ouvre du Tyrol (par le Brenner, le haut Adige, la Valteline et l'Adda), une communication directe avec Milan. Elle tourne non seulement les rivières qui se serrent dans l'Adriatique, au nord-est du Pô (1), mais aussi le *Mincio*, l'*Oglio* et l'*Adda*.

Les eaux des glaciers du Saint-Gothard et du Simplon se mélangent dans le *lac Majeur* et forment le *Tessin*, puissant affluent de droite du Pô. Il passe à Bellinzona et de là tombe dans le lac Majeur, où il reçoit la *Tossia*, où débouche la route du Simplon.

Non moins importants sont l'*Olona* qui descend des montagnes qui séparent les lacs *Majeur* et *Lugano*, le *Lombro* qui dévale des montagnes qui séparent les deux branches du *lac de Côme*, la *Sésia* qui descend du mont Rosa et finit au-dessous de Casal, la *Doria-Baltea*, formée de deux torrents qui partent du mont Blanc et qui ouvrent les cols du Petit et du Grand Saint-Bernard, la *Doria-Riparia*, qui descend du col d'Abriès et finit à Turin, la *Chilosa* et enfin le *Clusone* qui prend sa source au mont Genèvre.

Entre la *Sesia*, qui reçoit à gauche de nombreux affluents, et le Tessin, coulent quelques rivières qui ne naissent pas dans la grande chaîne ; l'une d'elles, l'*Agogna*, passe près de Novare, et l'autre, le *Terdoppio*, arrose Vigevano.

Le deuxième rameau se détache de la ceinture orientale, court entre les sources de l'*Eisach* et de la *Piave*, affluents de l'*Adige*, sous le nom d'Alpes Cadoriques ; c'est une des grandes routes d'Italie en Allemagne. Ses points culminants sont la Marmolata (3.508 mètres) et le Sasso-Vernale (3.450 mètres). Il sépare le *Lavis* de la *Brenta*, affluents de l'*Adige*, et longe la rive gauche de l'*Adige*. Les premiers contreforts des monts Lésiniens donnent source aux affluents de la *Brenta*, de l'*Aslico*, du *Bacchiglione ;* ils finissent par des collines entre toutes ces rivières.

A partir des sources du *Ronco*, la chaîne des Apennins cesse d'appartenir à la ceinture des montagnes du *Pô ;* elle atteint sa plus grande hauteur au

(1) Depuis les bouches du Pô jusqu'à celles de l'*Isonzo*, soit pendant 160 kilomètres, la partie du golfe qui reçoit les sept rivières n'est ni une mer ni une terre, c'est la lagune, couverte d'un à deux pieds d'eau et coupée par des canaux qu'entretient la main de l'homme.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mont Corno (2.992 mètres). Vers le lac de *Pesole*, au sud de Venosa, elle se partage en deux rameaux dont l'un contient les montagnes de la Calabre. Cette longue chaîne présente les mêmes caractères que l'Apennin septentrional, mais de nature, en partie, volcanisée avec le célèbre Vésuve (1.198 mètres). Il se détache de forts rameaux de toute la longueur de l'Apennin, dont les plus considérables courent entre le *Tibre* et l'*Arno*, et couvrent de leurs ramifications toute la Toscane. L'*Arno*, qui naît au mont Falterona, est une rivière endiguée et canalisée ; elle communique avec le *Tibre* par le canal de Chiana et reçoit la *Sieve* et l'*Ombrone*. Entre l'Arno et le Tibre, on rencontre la *Marta*, qui sort du lac de *Bolsena*. La *Polcevera* et le *Bisagno*, torrents à sec la moitié de l'année, passent sous

Fig. 35. — Lac de Côme.

les murs de Gênes. Le littoral, depuis Gênes, jusqu'au golfe de la Spezia, est arrosé par la rivière du *Levant*. En cet endroit l'Apennin semble suspendu jusqu'à la mer.

Au-dessous de Bonco, l'*Adige* reçoit l'*Alpon*, ruisseau qui traverse des marais, et entre le bas *Mincio*, le *Pô* et l'*Adige*, où on voit de nombreux ruisseaux canalisés, se trouve la *Molinella*, affluent du *Tartaro*, qui est coupé par la route de Mantoue à Vérone.

Le *Tibre*, la plus grande rivière de la presqu'île, reçoit quarante affluents, dont les plus importants sont la *Chiana*, le *Topeno*, le *Nera* grossi du *Velino* et du *Sallo*, le *Teverone*, le *Carigliano* formé du *Liri* et du *Sacco* et le *Vollurno*.

Entre le *Tibre* et le *Carigliano*, la côte est un des pays les plus malsains ; elle se creuse faiblement pour former le golfe de Gaëte. Depuis le *Vol-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Iurno jusqu'au cap Spartivento, on ne trouve plus que des torrents sans importance.

Les cours d'eau qui sillonnent le versant méridional de l'Italie péninsulaire, depuis le cap Spartivento jusqu'au cap Leuca ne sont que des torrents à sec pendant la moitié de l'année et dont les plus considérables sont : le *Crati* grossi du *Coscile*, l'*Agri*, le *Bozente* et le *Bradano*.

Le versant oriental est moins découpé que le versant méridional ; il projette des saillies moins nombreuses, mais une, le Monte Gargano, est très considérable. Depuis le cap Leuca jusqu'au Ronco on rencontre les rivières l'*Ofanto*, le *Candelaro* grossi du *Celone*, le *Biferno*, le *Pescara* dont les bassins de ses deux sources, l'*Allerno* et le *Gizio*, forment le haut plateau des Abruzes, le *Tordino*, le *Tronto*, le *Chienti*, le *Melauro*, la *Foglia*, la *Marecchia*, le célèbre *Rubicon*, le *Sano* et le *Ronco*.

En Italie, les torrents qui descendent des sommets des Apennins ont une chute élevée, mais manquent d'eau l'été ; ceux qui viennent des Alpes ont un cours plus lent et moins variable. Au point de vue de l'utilisation de l'énergie hydraulique, ce sont les émissaires des grands lacs, lac Majeur, lac de Côme, qui se présentent sous l'aspect le plus avantageux.

13. Amérique méridionale. — Le versant oriental des Andes ou Patagonie, depuis le cap Froward jusqu'aux sources du Rio-Negro, composé de vastes solitudes, arides et froides, n'a qu'un seul cours d'eau remarquable, le *Negro* qui descend des Andes du Chili ; il mesure plus de 800 kilomètres de cours.

Au voisinage des Andes se trouvent les chaînons qui indiquent le partage de la *Plata* et du *Negro ;* ils constituent les Andes du Chili qui sont plus élevées et plus épaisses que celles de la Patagonie. Elles ont leur point culminant dans le Descabezado (6.400 mètres) et l'Aconcagua (7.300 mètres) et se prolongent jusqu'aux sources du *Desaguadero* qui se jette dans le lac *Beveredo* et du *Pilcomayo* où commencent les Andes du Pérou. C'est de là que se détache, dans la direction de l'est, le seul grand rameau auquel les Andes donnent naissance, et qui, en courant dans toute la largeur de l'Amérique méridionale jusqu'au cap San Roque, sépare les bassins de la *Plata* et du *Marañon* ou *Amazone*, le plus grand fleuve du globe. Cette masse formée de monticules et de collines de sable renferme les sources de plus de trente rivières, entre autres du *Guaporé*, de l'*Ubaz*, du *Tapajos* et du *Xingu*, affluents de droite du *Marañon* et celles du *Paraguay*, affluent de droite de la Plata. De là la ligne de partage se dirige au sud-est entre les premiers affluents de gauche du *Paraguay* et les sources de l'*Araguay*, affluent du *Marañon*, puis passe entre le Tocantin et le Paranahyba, d'une part et le *San Francisco*, d'autre part. Le *Colorado* descend des Andes du Chili et coule du nord-ouest au sud-est.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le *Rio de la Plata*, qui prend sa source dans la Sierra de Villa Boa, derrière le Tocantin, se réunit à l'Uruguay après un cours de 2.800 kilomètres. Alors il ressemble à un bras de mer qui a 80 kilomètres de large devant Buenos-Ayres, pour finir par une bouche énorme de 240 kilomètres de largeur. Le *Paraguay* est séparé du Parana par la Sierra Amanbay, qui est assez élevée, et il ne reçoit de ce côté que de petits cours d'eau, mais du côté des Andes il a de grands affluents : le *Pilcomayo* qui naît au pied de la Sierra de Porco, non loin des bords du lac Aticaca (4.000 mètres), pour finir par plusieurs branches au-dessous de l'Asuncion, après un cours de

Fig. 36. — La rivière Kennebec au-dessous de Madison.

1.360 kilomètres ; le *Vermijo*, qui prend sa source dans les monts Tacsora, et le *Salado*, qui naît dans les plateaux de Salta.

Les affluents de gauche de la *Plata*, qui sont en très grand nombre, descendent tous de la chaîne maritime du Brésil. Les plus importants sont le *Tielé* qui confluе au Parana dans le pays des Gayapas, et l'*Uruguay*, rivière rapide, large, interrompue par des chutes. Au nord-est de la Plata, entre les caps San-Thomé et San-Roque, se présente le *San Francisco*, cours de 1.700 kilomètres et qui forme de nombreuses cataractes. Dans la partie supérieure de la chaîne maritime du Brésil, qui donne source au *San Francisco*, au *Paraïba*, au *Rio Grande*, se trouve le district des diamants et des lavages d'or.

Le bassin du *Marañon*, qui comprend la moitié de l'Amérique méridio-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nale, renferme les plus hautes sommités du nouveau monde, le pic de Sorata (7.696 mètres), le pic d'Illimani (6.700 mètres), le Chimboraço (6.400 mètres), le Cotopaxi (5.750 mètres) et le Cayambé (6.140 mètres). Le plateau de Quito offre, depuis la rivière de *Chota* jusqu'au Paramo d'Assuny, un dos de 3.000 mètres entouré de sommets élevés, qui sont rangés sur deux lignes et forment une double crête, pays merveilleux où les céréales et les fruits d'Europe sont cultivés à une hauteur où chez nous l'on trouve des neiges éternelles.

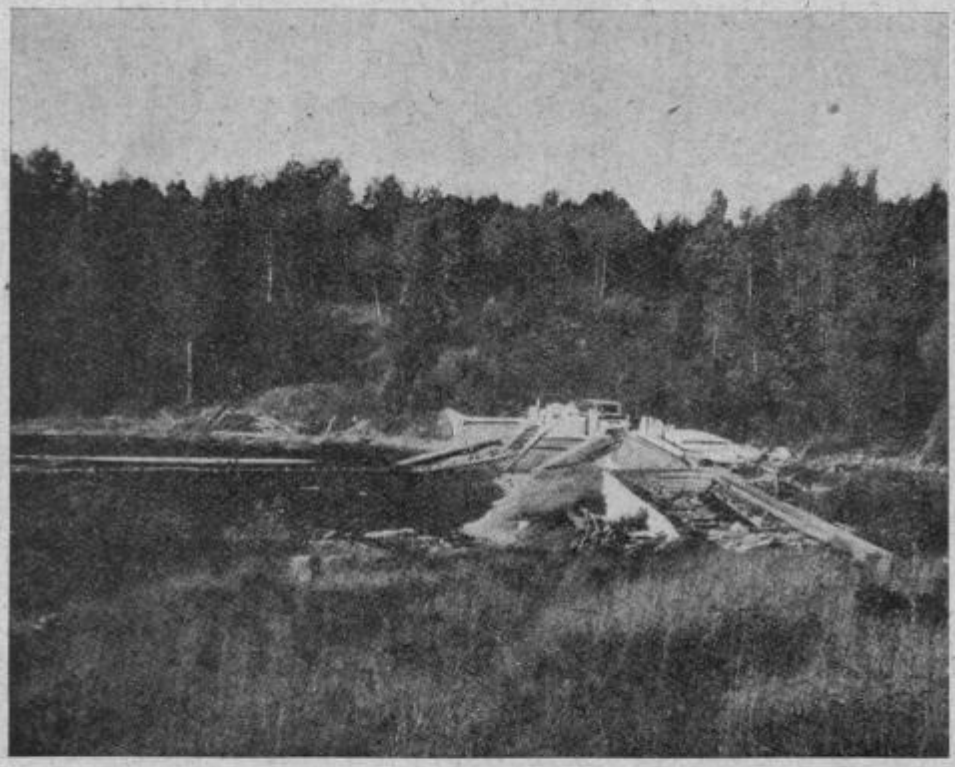


FIG. 37. — Barrage-réservoir sur la rivière Moose.

Dans le plateau d'Almaguer, la branche orientale sépare le bassin de la *Magdalena* de celui de l'*Orénoque* et s'élève jusqu'à 5.000 mètres.

Les affluents de droite du *Marañon* sont innombrables et sont dirigés du sud-ouest au nord-est : le *Purus*, le *Javary*, le *Jutay*, le *Jurua* traversent des solitudes et ont des cours de 1.000 à 1.200 kilomètres ; le *Madeïra*, formé du *Beni*, du *Guapay* et du *Guaporé*, finit au-dessous de Borba, après un cours de 1.800 kilomètres.

Les affluents de gauche ; le *Mantaro* traverse le plateau de Guamanga ; le *Vieux Marañon* grossi du *Guallaga* prend sa source dans le plateau de Guanuco ; le *Napo*, le *Pulumayo*, le *Yapura* traversent aussi des solitudes et le *Rio Negro* reçoit, entre autres affluents, le *Cassiquiare*, canal naturel qui réunit le *Negro* à l'*Orénoque*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au nord du *Marañon*, on trouve des rivières d'une longueur peu considérable, peu profondes, embarrassées de rapides bas et nombreux : l'*Oyapok*, qui sert de limite entre la Guyane française et le Brésil ; l'*Oyak*, qui forme à son embouchure une île dans laquelle est située Cayenne ; le *Sinnamari ;* le *Maroni*, qui sépare les Guyanes française et hollandaise ; le *Surinam ;* le *Courentin*, limite des Guyanes hollandaise et anglaise ; le *Demerari* et l'*Essequibo* qui arrosent la Guyane anglaise.

L'*Orénoque* naît dans les Sierras inconnues de la province de Venezuela ; la masse d'eau qu'il jette est si considérable et si rapide qu'elle adoucit les flots de la mer à plus de 100 kilomètres de la côte. Le *Ventuari*, le *Caura*, le *Carony*, affluents de droite de l'*Orénoque*, traversent des pays sauvages, montueux et inconnus. Le *Guaviare*, le *Meta* et l'*Apure* grossis par un grand nombre de torrents sont les principaux affluents de gauche de l'Orénoque.

Au sud du *Marañon* coulent le *Parahyba* en traversant d'immenses forêts vierges, l'*Itapicuru* qui se grossit de plusieurs rivières et enfin le fleuve des *Tocantins*, lequel reçoit l'*Araguay*.

Le fleuve *Magdalena*, dont le bassin est formé par les Cordillères orientale et occidentale, reçoit la *Bogola*, petite rivière qui forme des cascades magnifiques, le *Sogomozo*, le *Cauca*, cours d'eau aussi considérable que la Magdalena, et dans la vallée duquel sont les plus riches lavages d'or du nouveau monde.

14. Amérique septentrionale. — Le versant du Grand Océan, qui s'étend depuis l'isthme de Panama jusqu'au détroit de Behring, ne présente pas un caractère aussi net que le versant homogène de l'Amérique du Sud ; il est bordé de hautes montagnes, mais qui ne forment pas aussi distinctement que les Andes une digue superbe contre l'Océan. Il est étroit au sud, dans toute la partie isthmique du continent, mais au nord, il s'élargit et verse de grandes rivières. La Cordillère de Guatemala est toute volcanique et a des sommets de 4.800 mètres à la hauteur d'Oaxaca ; elle se partage en deux branches qui à la hauteur de Chihuahua paraissent se réunir pour longer le cours du *Rio del Norte* jusqu'à la Sierra Verde.

Entre Acapulco et Oaxaca est le petit bassin du *Tlascala*, rivière qui naît dans les plateaux du centre. Au nord de ce bassin, le continent s'élargit et sur les plateaux intérieurs naît le *Rio-Grande* qui prend sa source au pied du Nevado de Toluca et qui reçoit du nord le *Silao*. Après ce confluent, le *Rio-Grande* traverse le lac *Chapala*, magnifique nappe d'eau. Au delà du bassin de Rio-Grande, les plateaux intérieurs vont en s'élargissant et deviennent si considérables, entre le bassin de *Rio del Norte* et les petites rivières qui tombent dans le Grand Océan, qu'ils renferment des rivières sans écoulement ; leur élévation ordinaire est de 2.000 à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2.400 mètres. La Nouvelle-Californie, qui s'étend au nord de la presqu'île et du golfe de Californie, ne possède qu'un petit nombre de cours d'eau : le *Colorado* ou *Green-River* long de 1.600 kilomètres ; le *Sacramento* et le *San-Joaquin*, qui se réunissent pour tomber dans la baie de San-Francisco après s'être grossis d'un grand nombre de rivières.

Vers les sources du *Tacoulché*, les montagnes Rocheuses se rapprochent constamment de la côte pour se séparer en deux cordillères dont les grands sommets sont le mont Saint-Élie (5.000 mètres) et le Murchison (4.820 mètres). La *Colombia* ou l'Orégon naît dans ces montagnes et se grossit d'une multitude d'affluents, dont le *Lewis* est le plus considérable.

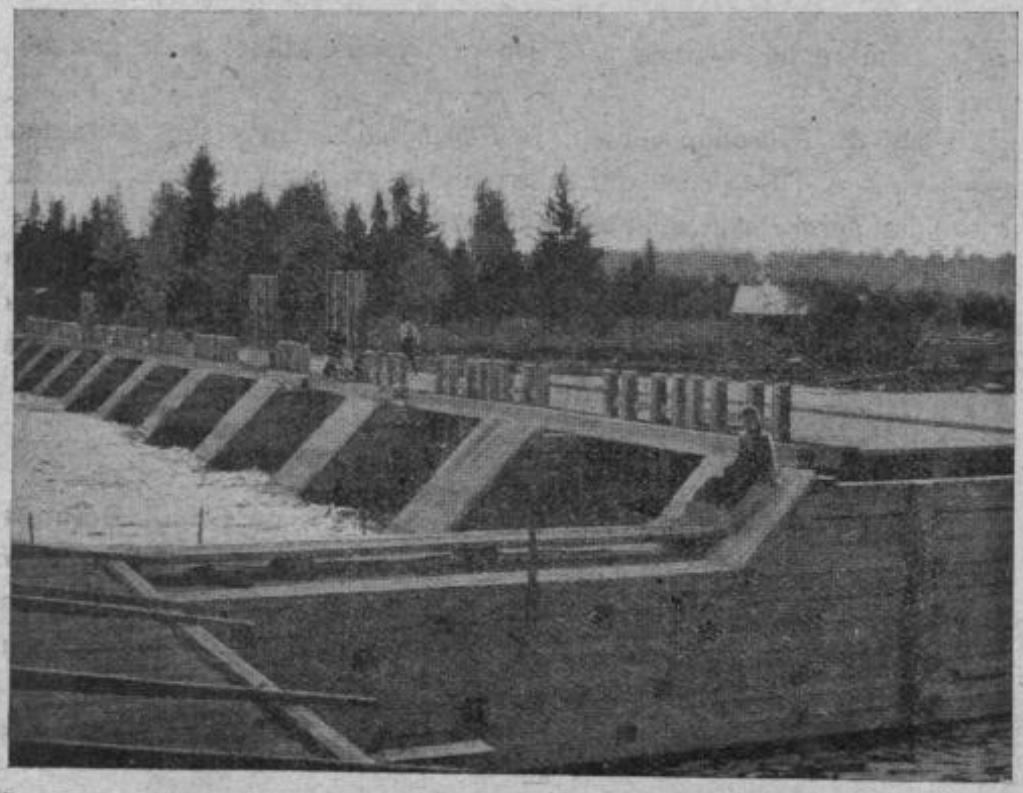


FIG. 38. — Vannes à la sortie du lac Mooschead.

Le versant oriental de la mer des Antilles possède des forêts magnifiques, des montagnes inabordables et des marécages abondants. La chaîne des cordillères, étant voisine de l'autre océan, laisse un assez large espace entre elle et la mer, et permet à quelques cours d'eau de s'écouler ; le plus remarquable est le *San-Juan* qui prend sa source dans le lac *Managua* et s'écoule dans le lac *Nicaragua*, qui a 280 kilomètres de long sur 120 de large.

Le versant occidental du Mexique est étroit au sud, montueux, fortement incliné et s'efface dans un plateau où les rivières prennent leur source et s'échappent par des brèches. Au nord, il est très large, presque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plat, et fournit des fleuves considérables. Le *Tabasco* coule du sud-est au nord-est ; le *Moctezuna* prend sa source dans le plateau d'Anauac ou de Mexico (2.377 mètres), l'un des plus remarquables du globe et qui est traversé par une série de cinq lacs, dont le lac *Tezcuco*, réuni au *Moctezuna* par le canal de Huehuetoca ; le *Rio-Grande-del-Norte*, dont les principaux affluents, le *Conchos* et la *Salado*, traversent le pays des Apaches. Entre le *Rio-del-Norte* et le Mississipi tombent plusieurs grandes rivières parallèles qui traversent le Texas.

Le bassin du *Mississipi*, dont le cours est de 3.800 kilomètres, embarrassé de nombreuses chutes et de bancs de sable, est formé par le versant oriental des montagnes rocheuses, le versant méridional d'une série de hauteurs qui séparent les bassins du *Winnipeg*, du fleuve *Saint-Laurent*

Fig. 39. — Les chutes du Potomac.

et du *Mississipi*, et le versant occidental des Alleghanys. Le *Missouri*, principal affluent de droite du Mississipi, a un cours aussi étendu que ce dernier, soit 3.700 kilomètres ; il est alimenté par la *Pierre-Jaune* (800 kilomètres), la *Platte* (1.000 kilomètres), le *Kansas* (640 kilomètres). L'*Arkansas*, autre affluent de droite du *Mississipi*, a un cours de 1.640 kilomètres et la *rivière Rouge* forme plusieurs lacs. Les affluents de gauche du *Mississipi* ont un caractère aussi important : ce sont l'*Illinois*, qui prend sa source au sud du lac *Michigan ;* l'*Ohio*, formé par l'*Alleghany* au nord, qui descend des rochers du *lac Erié ;* le *Monongahela*, au sud, qui descend des monts Alleghanys ; le *Wabasch*, qui sépare l'État d'Indiana de celui de l'Illinois ; le *Cumberland ;* le *Tennessee* qui traverse le pays de même nom, contrée montagneuse et très fertile. L'*Ohio* dont le cours est de 1.500 kilomètres reçoit : le *Sciolo*, à droite, sur lequel aboutit le grand

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

canal de l'Ohio qui joint cette rivière avec le *lac Erié* et fait communiquer le fleuve *Saint-Laurent* avec le *Mississipi* et Québec, avec la Nouvelle-Orléans ; le *Kentucky*, à droite, dans un pays bien coupé, fertile et pittoresque.

A l'est de l'embouchure du *Mississipi*, jusqu'au cap Sable dans la Floride, on rencontre : la *Mabile*, rivière formée du Tombeckbec, dans l'État d'Alabama ; l'*Apalachicola*, qui reçoit le *Flint* et sépare l'Alabama de la Géorgie.

Le versant des Alleghanys, le pays le plus cultivé, le plus peuplé et le

FIG. 40. — Charrois du fleuve Potomac, à Harpers Ferry.

plus civilisé du nouveau monde, est coupé de belles rivières, de montagnes peu élevées, de coteaux et de plaines superbes. Au sud, la Floride orientale est parcourue du sud au nord par la rivière de *Saint-Jean*, qui traverse plusieurs lacs. L'*Alatahama* traverse l'État de Géorgie ; le *Savannah* coule du nord-ouest au sud-est ; le *Congare* coule du nord-ouest au sud-est ; le *Cap-Fear* traverse des pays fertiles mais insalubres ; la *Nuse* passe près de Raleigh, capitale de la Caroline du Nord ; le *James River*, qui descend des montagnes Bleues et arrose Richmond, capitale de la Virginie orientale, l'un des plus grands États de l'Union ; le *York*, dont les environs renferment des mines d'or considérables ; le *Potomac*, qui arrose Washington, capitale de l'Union, et sépare les États du nord et du midi de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'Union ; le *Pelapsco*, qui traverse l'État de Maryland ; le *Susquehannah*, formé de deux grandes branches qui viennent des hauteurs les plus septentrionales de l'Alleghany, traverse l'État de Pensylvanie, et s'unit à l'*Ohio* par un système de canaux ; le *Delaware*, qui sépare la Pensylvanie des États de New-York et de New-Jersey ; l'*Hudson* grossie du *Mohank* qui descend des hauteurs qui encaissent le *lac Champlain* et arrose Albany, où commence le canal de l'Hudson au *lac Erié ;* enfin le *Connecticut* qui traverse le pays de même nom et le Massachussetts.

Le versant occidental des Alleghanys, le versant septentrional des plateaux du *Mississipi*, le versant méridional des collines de la mer d'Hudson constituent le bassin du fleuve *Saint-Laurent* (1.200 kilomètres), bassin unique sur le globe par la suite des grands lacs qu'il contient et qui font de lui une sorte de Méditerranée dont le fleuve Saint-Laurent n'est que l'issue. La petite rivière de *Saint-Louis*, qui prend sa source dans le plateau où naissent le *Mississipi* et le *Winnipeg*, paraît être l'origine du *Saint-Laurent ;* elle coule du nord-ouest au sud-est dans le pays des Algonquins et tombe dans le lac *Supérieur* (1.750 kilomètres), magnifique mer d'eau douce alimentée par quarante rivières. Ce lac se déverse par une suite de descentes rapides (le Saut Sainte-Marie) dans le lac *Huron* (1.200 kilomètres) lequel reçoit, par un détroit, le lac *Michigan* (600 kilomètres) et se décharge dans le lac *Saint-Clair* par la rivière rapide de *Saint-Clair*. Le petit lac de Saint-Clair s'écoule dans le *lac Erié* par le canal paisible appelé le Détroit, et le lac Erié (402 kilomètres), orageux et peu profond, se déverse dans le fameux *Niagara* qui s'écoule dans le lac *Ontario* (800 kilomètres).

Les lacs, étant enveloppés par la ceinture du bassin, ne reçoivent que des rivières peu considérables ; le fleuve lui-même n'a qu'un petit nombre d'affluents remarquables : l'*Ottava* (à gauche), qui traverse plusieurs lacs et forme de belles cataractes et reçoit les eaux du lac *Rideau ;* la *Sorelle* (à droite), qui débouche du lac *Chaplain*, et le *Saguenay* (à gauche), qui déverse les eaux du lac *Saint-Jean* et a des aspects de grand caractère.

Parmi le chaos de rivières et de lacs qui débouchent dans la mer d'Hudson, on remarque le *Nelson*, formé de la rivière *Rouge* et du *Saskatchaouna* et qui se grossit des eaux du lac *Winnipeg* dont l'origine est dans le plateau où naissent le Mississipi et le Saint-Laurent. Le principal fleuve de la mer Glaciale est le *Mackensie*, qui reçoit les eaux du lac des *Montagnes*, traverse le lac *Athabasca*, forme le lac de l'*Esclave* et finit dans l'océan Glacial arctique après un cours de 3.200 kilomètres.

15. Région des pays scandinaves. — La charpente des montagnes de cette région se rattache aux hauteurs de l'Europe septentrionale par les plateaux d'Olonetz, vers les sources de l'*Enara* et de la *Tornéa*. De ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

point part l'immense chaîne qui sépare la Norvège de la Suède. La partie qui s'étend au nord est peu élevée et se prolonge pendant 200 kilomètres en se courbant à l'est jusqu'au golfe de Tana. Celle du sud se courbe à l'ouest en montagnes hautes et épaisses, constamment couvertes de neige ; elle longe la mer Atlantique à laquelle elle n'envoie que des torrents. Les Koelen au nord, les Dofrines au centre et le Lanfield au sud en forment les trois groupes principaux. Les monts Sèves, qui se détachent du Langfield, se prolongent au sud-est entre le *Glommen* et la *Dala*, les lacs *Wéner* et *Wetter* pour se terminer au cap Falsterbo. Ces deux branches forment la charpente des deux espèces de presqu'îles dans lesquelles se partage la péninsule totale et qui sont séparées par le Skager-Rack et le Kattégat. La longueur de toute la chaîne scandinave est de plus de 2.000 kilomètres et sa largeur est en quelques endroits de 160. C'est généralement un massif sans crête et sans pics aigus, formant des plateaux de 40 à 50 kilomètres d'étendue, élevés de 500 et 1.000 mètres, très découpés et très sauvages. La plus haute sommité est le Skagestollund, qui atteint 2.500 mètres.

Le versant oriental de cette longue chaîne qui constitue le territoire de la Suède est presque plat et parcouru par un grand nombre de rivières qui vont toutes du nord-est au sud-est et qui forment une multitude de lacs. La *Tornéa*, qui sert de limite entre la Russie et la Suède, est presque constamment glacée ; le *Kalix*, l'*Ulea*, grossie du *Vendel*, le *Pitea*, l'*Umea*, la *Skellefléa* sont des rivières de même espèce ; l'*Angermanna* traverse le Wester-Nortland, montagneux comme la Suisse ; la *Dala* arrose le pays sauvage et montueux de Dalécarlie et forme une longue suite de lacs ; le *Moelarn*, aux côtes très déchiquetées qui reçoivent un grand nombre de lacs ; le *Helga* qui débouche à Christiansald.

Le versant méridional ou pays de Norvège, qui est la plus belle partie de la péninsule, est coupé par une multitude de lacs, de rivières et de golfes profonds. La *Gotha* sort du grand lac *Wener* (140 kilomètres de longueur et 80 de largeur), lequel communique avec le lac *Wetter* par un canal qui joint ainsi le Kattégat à la Baltique ; le *Glommen*, le plus grand cours d'eau de la péninsule, sort du Langfield et reçoit un grand nombre de lacs et de rivières, dont la principale est la *Lessoe*, qui sort des monts Dorre ; la *Tarris*, qui prend sa source dans les monts Nordenfields.

Le versant occidental est très rapide et semble ne former qu'une côte très étroite. Il est découpé par une multitude de baies profondes et difficiles. Le sol tout granitique n'est sillonné que par quelques cours d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

HYDROLOGIE DES BASSINS DE MONTAGNE

I. — CARACTÉRISTIQUES DES COURS D'EAU

Pour apprécier les ressources hydrauliques d'un bassin, il faut en connaître l'étendue, l'altitude, l'exposition, la constitution géologique, les surfaces lacustres ou glaciaires, le développement comparatif des cultures, des forêts, l'importance, la nature et l'exposition des précipitations aqueuses, etc. Pour les superficies, on les obtient directement sur les cartes à l'aide du planimètre polaire Amsler, du planimètre roulant Coraldi ou du planimètre hachette de Pritz. L'étude des bassins comporte celle des débits des cours d'eau, des relations entre les débits des cours d'eau et les pluies reçues par les bassins, entre les crues et les pluies qui les produisent.

16. Graphiques des débits. — Le régime d'un cours d'eau est défini par l'établissement de graphiques de débits permettant d'en embrasser d'un seul coup toutes les variations, de reconnaître les lois de périodicité et d'en dégager les états extrêmes, moyens et minima. La plupart des observations périodiques sur les cours d'eau sont traduites en hauteurs d'eau, mais les graphiques des hauteurs d'eau seuls ne permettent pas de bien définir le régime d'un cours d'eau, surtout pour les aménagements industriels où la question de débit est primordiale.

En effet, il n'est pas toujours possible d'avoir une relation invariable entre les hauteurs d'eau à l'échelle provenant d'observations hydrométriques et les débits correspondants ; tel est le cas des cours d'eau à fond mobile en raison des graviers qu'ils charrient. Lorsque le fond reste fixe, il suffit de construire une fois pour toutes une courbe dont les ordonnées représentent les débits en fonction des hauteurs d'eau prises comme abscisses.

Pour les cours d'eau dont le lit est à peu près fixe, on peut, à l'aide des hauteurs d'eau relevées pendant un certain nombre d'années, établir la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courbe des débits au moyen d'une courbe de transformation des hauteurs d'eau tirée d'un certain nombre de jaugeages directs.

Les graphiques doivent renseigner sur presque toutes les circonstances du régime d'un cours d'eau qu'un industriel a à connaître pour l'aménagement d'une chute d'eau. Leur étude, faite sur quelques années d'observations, montre bien qu'il ne suffit pas de s'en tenir à quelques jaugeages opérés de loin en loin et à des moyennes. Même, il est bon de connaître l'amplitude des variations que le débit peut subir à une date donnée ; ces observations sont d'autant plus indispensables qu'il s'agit de cours d'eau de montagne.

On ne doit donc pas s'en tenir, pour connaître réellement le régime d'un cours d'eau, à un graphique d'une année et encore moins à quelques jaugeages faits de temps à autre, mais recourir à des observations rapprochées comme dates et longtemps prolongées.

Lorsqu'on possède les graphiques pour plusieurs années, on en établit la moyenne, et de cette façon on peut se rendre compte des époques de disette et de leur durée, des crues ordinaires et de celles extraordinaires, de l'amplitude des variations à une même date sur plusieurs années consécutives.

La représentation graphique du régime peut se faire utilement de deux manières : soit par juxtaposition sur une bande de papier continue embrassant une période de plusieurs années avec une échelle des temps très réduite, soit par juxtaposition sur une bande de papier transparent avec une échelle des temps beaucoup plus forte. La première représentation permet de discerner les variations à longue période et la seconde l'amplitude des variations pour une même date annuelle et facilite le calcul des moyennes.

Il est bon, quand on a affaire à des cours d'eau à lit très mobile, de placer les échelles hydrométriques sur les points de la rivière où le fond est le moins mouvant ; il devient aussi nécessaire de refaire des jaugeages après chaque crue. De plus, il faut poursuivre, en même temps que celle des débits, l'étude des déformations du lit.

Si l'on dresse le profil en long d'une rivière, ce profil marque autour de la pente moyenne une oscillation, plus ou moins accentuée ; les parties surélevées ou seuils succèdent aux parties profondes, nouilles ou fosses, suivant une alternance à laquelle on a reconnu sur beaucoup de cours d'eau quelque régularité au point de vue de la longueur d'onde et à celui de son amplitude.

En eaux basses, la section des fosses est très supérieure à la section mouillée des seuils et, en eaux moyennes ou fortes, c'est l'inverse qui se produit et, comme conséquence, la vitesse y devient plus faible. Les seuils ou fosses ne se déplacent pas ou presque pas en plan, mais leur relief s'at-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ténue ou s'amplifie tour à tour, suivant l'état des eaux. La comparaison des plans de sondage qu'on relève périodiquement sur les cours d'eau navigables permet de dégager, avec plus ou moins de certitude, la loi des déformations du lit.

La correspondance entre les variations du lit et celles des paramètres de la formule qui lie les débits aux hauteurs d'eau, exposée ci-après, est, selon M. R. Tavernier, un moyen qui permet de diminuer considérablement le nombre des jaugeages nécessaire à la détermination des débits journaliers du cours d'eau. D'autre part, l'amplitude et la nature des mouvements oscillatoires du lit et la détermination de la position à laquelle il y a plus de chance de pouvoir fixer un seuil fixe et invariable, au moyen d'ouvrages légers, sont des causes qui empêchent souvent de pouvoir obtenir un tarage définitif de l'échelle en débits.

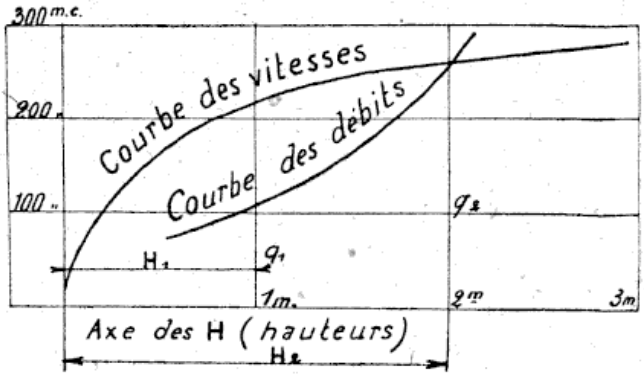


FIG. 41.

Pour bien connaître le régime d'un cours d'eau, il est nécessaire d'établir des graphiques quotidiens des débits obtenus en faisant des jaugeages soit par la méthode des déversoirs, soit par celle de la mesure des vitesses.

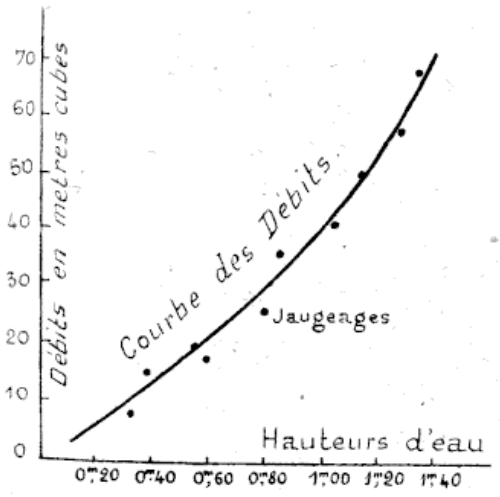


FIG. 42. — Graphique des débits d'une rivière à lit fixe.

Si l'on prend des profondeurs d'eau à un poste déterminé d'observation pour abscisses, et que l'on porte à l'extrémité de ces abscisses, pour ordonnées, les valeurs de q (déterminées au moyen de jaugeages directs), on obtient une courbe qui est la courbe des débits (*fig.* 41 et 42).

Une fois la courbe des débits déterminée pour une station, il devient aisé d'édifier le graphique des débits ; ceux-ci se déduisent de la hauteur par l'application des formules que nous allons indiquer ou par la mesure de l'ordonnée sur la courbe elle-même.

Dans la plupart des cas, les observations périodiques sur les cours d'eau sont traduites en hauteurs par la lecture des cotes données par les échelles hydrométriques, et on ne rencontre que très peu de graphiques de débit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le débit q d'un cours d'eau en un point donné est lié à la hauteur d'eau h par une relation de la forme :

$$q = a + bh + ch^2,$$

dans laquelle a, b et c sont des paramètres qu'on détermine par expériences.

La méthode générale employée pour cette détermination consiste à mesurer chaque jour, à la même heure, la hauteur d'eau à l'échelle d'une station de jaugeage et à en déduire le débit correspondant, après avoir effectué, pour diverses hauteurs, une série de jaugeages.

Pour que les jaugeages successifs exécutés à une même station puissent fournir des renseignements concluants, il est indispensable que toutes les opérations aient lieu au même point et soient rattachées toujours au même repère. Il faut aussi prendre les précautions les plus minutieuses dans l'emploi des hydromètres (§ 54), pour éliminer autant que possible les causes d'erreur dues aux modifications du courant, à l'influence des fonds de rive, la vitesse des filets liquides, etc.

Quand on désire obtenir un débit journalier moyen aussi exact que possible, il faut, pendant les périodes de crues, observer les échelles (limnimètres) à un moment où la hauteur est moyenne, ou mieux installer, si on veut éviter de prendre plusieurs lectures dans la journée, des enregistreurs (limnigraphes) de niveau qui mesurent automatiquement et à chaque instant la hauteur de l'eau, permettant d'en déduire le débit instantané et par suite le débit journalier. Quant aux échelles de stations, elles doivent autant que possible être à l'abri des remous et à bonne portée de l'observateur et les lectures faites avec régularité et précision.

Le Service des Grandes Forces hydrauliques de France (§ 24), pour les opérations qu'il a effectuées sur les cours d'eau de la région des Alpes, s'est préoccupé tout d'abord de déterminer les valeurs des paramètres a, b et c ci-dessus.

Dans ce but, en ce qui concerne chaque station de jaugeage, avec les résultats d'un certain nombre de jaugeages, on construit la courbe caractéristique de la station. On utilise numériquement les mêmes éléments pour traduire les résultats sous forme d'un tableau constituant un barème local des débits en fonction des hauteurs. Puis au moyen des courbes ou tableaux et avec les chiffres fournis par les lectures journalières faites aux échelles des stations et après avoir tenu compte, s'il y a lieu, des changements brusques accusés par les appareils enregistreurs, dans le but d'établir les hauteurs moyennes journalières, on calcule les débits correspondants. Il est alors possible d'établir des graphiques donnant par année les variations des hauteurs et des débits. Sur ces graphiques on inscrit les caractéristiques d'étiage et moyennes de l'année, qui permettent de déter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

miner tous les éléments utiles aux industriels : moyennes, maxima et minima mensuels, moyennes pour la saison des basses eaux d'hiver,

FIG. 43. — Carte des bassins fluviaux de la région des Alpes, dressée par le Service des grandes forces hydrauliques.

volumes totaux débités pendant l'hiver et pendant l'année entière, enfin

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nombre de jours pendant lesquels les débits varient entre des limites déterminées. Plusieurs exemples de ces courbes figurent dans le chapitre qui suit.

Lorsque le lit n'est pas entièrement fixé, la mobilité du fond, comme nous l'avons dit, introduit un élément variable qui complique beaucoup la loi des débits. A la station de jaugeage de Briançon, sur la Durance, dans la période de fixité relative séparant les périodes de perturbations, qui s'est écoulée entre le 1er janvier 1904 et le 4 août 1905, le Service des Grandes Forces hydrauliques a exécuté trois séries d'opérations et construit un nombre égal de courbes des débits en fonction des hauteurs. On en a déduit deux courbes de régime, l'une pour l'année 1904 et l'autre pour 1905.

Pour transformer les cotes de hauteurs d'eau en une expression corrélative du débit, on emploie des formules qui se rattachent à cinq types savoir :

1° Type de Tadini : $q = K\omega\sqrt{Ri}$;

2° Type du déversoir : $q = MH^{\frac{3}{2}}$;

3° Type de Boussinesq : $q = M'(H' + C)^{\frac{3}{2}}$;

4° Type de Lombardini : $q = MH^{\frac{3}{2}} \pm NH^{\frac{3}{2}}$;

5° Type parabolique : $q = a + bH' + cH'^2 + dH'^3$.

Dans ces formules, H′ est la hauteur de l'eau au-dessus du zéro de l'échelle hydrométrique et H celle au-dessus du fond, au poste d'observation où on opère. En d'autres termes, la profondeur H est la somme de la hauteur H′ de l'eau au-dessus du zéro où l'on veut connaître le débit et d'une quantité constante représentant la hauteur du zéro au-dessus du fond.

Dans chacune de ces formules, les constantes arbitraires se déterminent au moyen d'un nombre égal de valeurs de q évaluées par des jaugeages directs.

Comme formules utilisées se rapportant à l'un ou l'autre des types des formules ci-dessus, nous citerons celles ci-après :

Type I : Tadini : $u = 50\sqrt{Ri}$; Graeff : $u = 36\sqrt{Ri}$ (R, rayon moyen) ;

Type II : Graeff : $q = 100\,(H' + 0{,}25)^{\frac{3}{2}}$ (la Loire à Nantes) ;

Cuvinot : $q = 95\,(H' + 0{,}70)^{\frac{3}{2}}$ (la Seine à Mantes) ;

$q = 280\,(H' - 0{,}70)^{\frac{3}{2}}$ (le Drac à Grenoble) ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Type IV : Lombardini : $q = 100\ (H^{\frac{3}{2}} - 3{,}20^{\frac{5}{2}})$ (l'Adda à Côme) ;
Type V : $q = 325 + 365\ H' + 40\ H'^2 + 14\ H'^3$ (le Rhône à Valence) ;
Fargue : $q = 86{,}52 + 120{,}18\ H' + 41{,}70\ H'^2$ (la Garonne à Langon) ;
De la Brosse : $q = 72^{m3} + 202{,}5\,h + 9{,}5\,h^2$ (l'Isère à Grenoble).

Pour la Neste, à Sarrancolin, les formules reliant les hauteurs d'eau à l'échelle et les débits correspondants, déduites d'expériences, ont été trouvées :

$$Q = 32.222\,h^2 + 25{,}68\,h + 5{,}620$$ (Expériences de 1899, échelle n° 4 *bis*)

et,

$$Q = \frac{1}{1{,}57}\,h^2$$ (Expériences de 1901. — Échelle n° 3).

17. **Relations entre les débits des cours d'eau et la pluie reçue par leurs bassins.** — On sait que le débit d'un cours d'eau est lié aux pluies qui tombent sur le bassin versant par des lois complexes dépendant du relief et de la nature géologique du sol. Pour cela, il faut étudier l'importance et la nature des précipitations du bassin que l'on étudie ; il faut en même temps, par des études planimétriques détaillées, évaluer séparément les surfaces du sol qui jouent un rôle différent dans l'alimentation du cours d'eau. Les opérations de planimétrie sont faciles, bien que, lorsqu'on se trouve en présence de massifs recouverts de formations glaciaires dissimulant des thalwegs rocheux, les limites des périmètres soient parfois peu apparents. Elles ont pour objet de permettre de découper sur la surface de chaque bassin des zones d'altitude variant de 500 en 500 mètres par exemple, dans le but de rechercher les variations des précipitations atmosphériques avec l'altitude, ainsi que les coefficients d'alimentation des cours d'eau et de ruissellement superficiel (1). Dans les terrains cal-

(1) La planimétrie des bassins de la région des Alpes ainsi que des bassins de l'Adour et de la Haute-Garonne est aujourd'hui complètement achevée par les soins du Service des Grandes Forces hydrauliques. Les résultats ont été utilisés pour l'établissement de cartes par bassins à l'échelle de $\frac{1}{50.000}$ sur lesquelles on a rapporté les courbes d'altitude de 500 en 500 mètres, puis les limites de chaque bassin avec les limites des bassins des affluents ; elles donnent, en outre, les stations de jaugeage, les postes pluviométriques, les principaux canaux d'irrigation, enfin les grandes usines actuellement existantes. Ces dernières sont représentées par des cercles dont le centre est à l'emplacement même de l'usine et dont la surface est proportionnelle à la puissance hydraulique de l'établissement. Le ministère de l'Agriculture a publié celle de la région des Alpes à l'échelle de $\frac{1}{500.000}$ et au $\frac{1}{100.000}$ pour les bassins de l'Arve, de l'Arc et de la Romanche. Mais les cartes par bassins à plus grande échelle seraient de nature à rendre de grands services aux industriels exploitant des chutes d'eau ou désireux d'édifier de nouvelles usines hydro-électriques.

Leur publication serait très utile, et, avec M. Lévy-Salvador, le distingué ingénieur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

caires une forte proportion des eaux pluviales et des neiges pénètre par infiltration dans le sol et va grossir, après des cheminements souterrains très mal connus, des sources lointaines. Par suite, la répartition des eaux entre les différentes parties d'un bassin ne concorde pas toujours avec l'étendue et le module de l'émissaire. Mais dans ce cas, la connaissance de la surface du bassin orographique apparent permet de juger de l'importance des anomalies lorsqu'elles existent.

A des époques à peu près fixes de l'année, les bassins reçoivent des précipitations qu'ils ne peuvent absorber et qui se traduisent par un écoulement abondant de leurs émissaires. Dans les autres périodes, les bassins sont uniquement alimentés par la réserve qu'ils créent. Ceux qui possèdent des glaciers et des forêts emmagasinent leurs eaux durant l'hiver et les dévalent sur leurs pentes avec une grande régularité, alors que ceux qui en sont dépourvus sont sujets à des alternatives de crues violentes et de disettes d'eau.

Plus le bassin laisse échapper lentement l'eau qu'il a reçue, plus son pouvoir régulateur est grand ; aussi les bassins à versants constitués par des rochers nus jettent immédiatement leurs eaux dans leurs émissaires qu'ils grossissent soudainement, et les pluies une fois terminées, les lits des rivières s'assèchent ; tandis que, si les versants sont recouverts de végétations, les eaux sont retardées, réparties plus régulièrement, et le débit des cours d'eau ne grossit que lentement. De plus, les sources restituent à l'émissaire, pendant l'intervalle des pluies, l'eau captée au moment où elle est tombée.

---

du ministère de l'Agriculture, nous émettons le vœu que cette réalisation se fasse dans un avenir très prochain (1).

Les études ayant pour objet la détermination du régime caractéristique se poursuivent activement sur un grand nombre de rivières. Aux 190 stations de jaugeage actuellement existantes, il avait été exécuté, à la fin de l'année 1916, plus de 3.500 jaugeages. Les bassins étudiés à ce jour sont les suivants : bassins de l'Arve, des Dranses, du Fier, du Guiers, de l'Isère, du Drac, de la Romanche, de la Drôme, de la Durance, du Bréda, du Trient, de la Morge, des Usses, de la Bourbre, du Roubion et de l'Eygues.

Lorsque, pour une station de jaugeage, on sera arrivé à établir d'une façon certaine la courbe des débits en fonction des hauteurs d'eau et à tracer la courbe des débits annuels moyens, on arrêtera les jaugeages ; mais l'Administration fera poser des échelles fixes repérées de telle sorte que les intéressés puissent à tout moment lire la hauteur de l'eau et en déduire les débits correspondants au moyen des courbes et des tableaux établis par le soin du Service d'études des grandes forces hydrauliques.

Les renseignements sur les débits seront complétés par la production du profil en long des cours d'eau d'où l'on déduira les hauteurs de chute utilisées ou disponibles, et par conséquent la puissance hydraulique des divers cours d'eau ou tronçons de cours d'eau.

(1) Le service des Grandes forces hydrauliques, pour les bassins de l'Adour et de la Haute Garonne, à l'effet de morceler les surfaces à planimétrer en un nombre suffisant de bassins secondaires en rapport avec les postes de jaugeage établis ou à installer a exécuté le même travail sur des cartes à $\frac{1}{200.000}$ du Ministère des Travaux Publics.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 44.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour discerner les lois qui régissent la distribution des pluies suivant l'altitude et l'exposition, il faut un très grand nombre de stations pluviométriques réparties d'une façon méthodique. La carte représentée par la (*fig.* 44) montre la répartition des postes pluviométriques qui existaient dans la région des Alpes à la fin de l'année 1903. Pour l'ensemble des dix départements de cette région, on comptait, en 1904, un chiffre de 0,40 pluviomètre par myriamètre carré, alors qu'en Suisse, ce chiffre est de 0,88. Mais l'Administration, depuis, a augmenté le nombre des postes d'une façon notable.

En 1910, le nombre de stations pluviométriques pour le bassin de l'Adour était de 44 (soit 0,26 par myriamètre carré), 63 pour le bassin de la Garonne (0,63 par myriamètre carré). Sur la Dordogne, le Tech, la Têt, l'Agly, l'Aude, l'Orb, l'Hérault, le Lez, le Vidourle, le nombre de pluviomètres est satisfaisant. Dans le département des Pyrénées-Orientales, il y a 1,20 pluviomètre par myriamètre carré, dans celui de l'Aude, 0,76, celui du Gard, 0,79 et celui de la Lozère, 0,71, chiffres particulièrement satisfaisants.

Des observations faites par Graëff sur le Furens, l'Auzou et le Sornin (département de la Loire), il résulte que le rapport de leur débit au cube de pluie reçu par leur bassin est de 0,64 en moyenne pour l'année entière ; il tombe à 0,27 en été, reste voisin de la moyenne au printemps et à l'automne et dépasse l'unité en hiver, parce qu'aux eaux superficielles s'ajoute le produit des sources. Dans d'autres bassins moyennement perméables, dès que la proportion des terrains perméables atteint 47 0/0 du total, le rapport se maintient dans le voisinage de 0,47.

Les bassins moyens sont ceux dont l'écoulement par seconde est de 9 litres par kilomètre carré ; les mauvais bassins, 8 litres, et les bons bassins, 10 litres.

On a vu qu'il est d'usage de mesurer l'intensité d'une pluie au moyen de la hauteur qu'occupe l'eau tombée pendant une heure sur le sol sans trouver aucun écoulement, et cela à l'aide des pluviomètres. Lorsqu'on parle d'une pluie de 30 millimètres, on veut dire qu'elle amènerait une hauteur d'eau de 30 millimètres sur un sol imperméable pour une durée d'une heure.

Certaines pluies produisent une hauteur d'eau effrayante.

On peut se trouver en présence soit d'une pluie persistante d'intensité modérée, mais de longue durée, soit d'une averse de faible durée, mais de forte intensité.

Dans l'évaluation des quantités de pluies, rien n'est rigoureusement exact, car on ne saurait établir d'une façon mathématique le régime pluvial d'un territoire ainsi que les lois qui régissent l'écoulement des eaux ; on ne peut procéder que par évaluation approximative, en se basant sur le plus grand nombre d'expériences possible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'habitude on adopte un certain maximum pour les grandes averses habituelles auxquelles la région est assujettie.

Prenons, pour fixer les idées, un chiffre de 150 litres par hectare-seconde (150 l. h-.s.). Mais à ce chiffre il convient d'apporter des corrections provenant du retard et des déperditions des eaux en cours de route avant d'arriver à une rivière, corrections qui varient avec la nature des terrains sur lesquels ruissellent ces eaux.

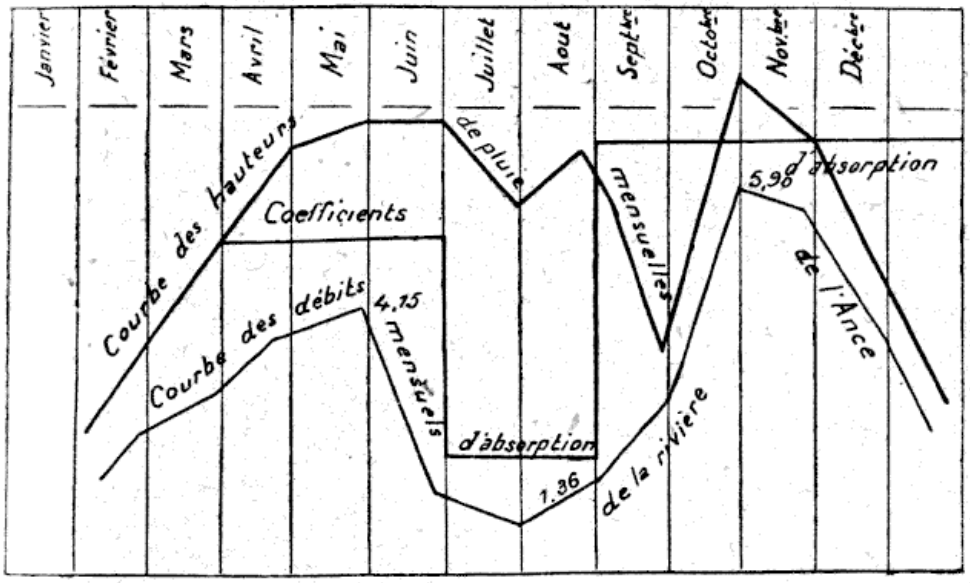


FIG. 45. — Graphique des coefficients d'absorption d'une rivière.

Le coefficient de déperdition varie de 0,15 à 0,30 pour des surfaces en gravier et de 0 à 0,25 pour les terres naturelles.

Quant au coefficient de retard, il dépend de l'éloignement des points mouillés à la rivière, c'est-à-dire de l'étendue du bassin.

Si on appelle S la superficie du bassin en hectares, N un nombre variant de 4 à 6 suivant que la pente est faible ou forte, on a le symbole :

$$S^{-\frac{1}{N}}. \qquad \text{Pour } N = 6, \qquad \text{on a :} \qquad \frac{1}{N} = 0{,}167.$$

Le débit par seconde des eaux de pluie amenées à la rivière est égal au produit de l'étendue du bassin par le débit unitaire donné en litres-hectare-seconde affecté des deux coefficients ci-dessus.

Si on prend un bassin de 3.000 hectares et que l'on applique les chiffres énoncés plus haut, on obtient d'abord :

$$3.000^{-0{,}167} = 1{,}6.$$

Puis :

$$3.000 \times 150 \times 0{,}25 \text{ (déperdition)} \times 1{,}6 = 180.000 \text{ litres par seconde,}$$

soit un débit horaire de 648.000 mètres cubes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

18. Relations entre les crues et les pluies qui les produisent. — Dans une région à caractère éminemment torrentiel, on peut distinguer deux périodes dans l'écoulement des pluies : l'une où une partie notable de la pluie est employée à saturer le sol et à remplir le bassin de réception. (Dans les localités où il existe un service d'annonce des crues, cet état est défini par les hauteurs de crues déterminées aux échelles, lectures qui sont faites par les soins des services d'annonce de crues.)

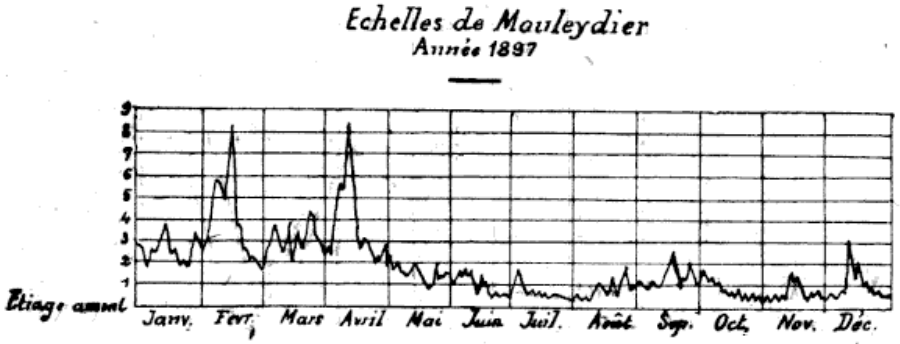


FIG. 46.

La seconde période des crues correspond au cas où le bassin dépasse l'état de saturation. A ce moment, toute la pluie qui n'est pas évaporée ruisselle avec une certaine vitesse le long des déclivités du bassin. Alors toute la pluie qui tombe a un effet direct et est inscrite sur la cote à l'échelle. La (*fig.* 46) montre le relevé fait, pendant l'année 1897, aux échelles de Mouleydier, installées sur la Dordogne.

L'eau qui s'infiltre ou s'accumule dans le bassin, pendant les grandes crues, est proportionnellement très faible, sauf pendant la période du commencement de la crue ; après cette période, qui est terminée bien avant que les crues atteignent leur pleine intensité, la quantité d'eau qui s'infiltre est simplement celle nécessaire pour maintenir la saturation du sol qui aurait tendance à s'épuiser. La portion des eaux de pluie retenue dans le sol est faible dans les fortes crues, et le plus souvent l'accumulation temporaire des eaux n'est que d'un intérêt secondaire.

Étant donné que l'on est en possession de tableaux de concordance donnant les pluies totales tombées en vingt-quatre heures, aux divers pluviomètres, et les hauteurs de crues correspondantes aux diverses échelles, on en déduit le rapport entre la hauteur totale d'eau tombée dans la région que l'on étudie et la crue au point déterminé que l'on a en vue. La cote à l'échelle dépend de la hauteur de pluie accumulée dans la région depuis un certain temps dans le bassin, — avant l'instant où l'on mesure cette cote, — et de l'intensité de la pluie qui s'écoule directement. Le départ entre ces deux causes est très délicat, mais l'importance, dans les grandes crues, doit être attribuée aux pluies de quelques heures de durée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si on dispose de jaugeages permettant de transformer les hauteurs d'eau en débit, on construit la courbe des débits journaliers ainsi que celle du régime et on en déduit, par des constructions graphiques, les débits caractéristiques. Si le cours d'eau n'est pas jaugé et qu'on dispose de relevés hydrométriques relatifs à une série d'années, on peut déterminer d'après ces relevés les hauteurs d'eau correspondant aux débits caractéristiques et se contenter d'effectuer quelques jaugeages en un endroit facile du cours d'eau.

Les services hydrométriques ont les moyens d'apprécier avec assez d'exactitude les hauteurs maxima qu'atteindra une crue donnée à un emplacement donné, un certain temps à l'avance. Ils peuvent même, quand ils disposent de procédés pour la prévision journalière des crues, déterminer d'avance un certain nombre de points de la branche ascendante de la courbe de crue. S'ils disposent en outre d'une courbe de jaugeage du cours d'eau, au voisinage de l'emplacement considéré, ils peuvent transformer à vue leurs courbes de hauteur en courbes de débit.

A l'aide de cette série de renseignements, on a donc à peu près tout ce qu'il faut pour tracer approximativement la courbe probable d'une crue dès qu'elle est annoncée. A ce point de vue il n'est pas inutile d'observer immédiatement qu'on sera d'autant mieux placé pour faire un pareil tracé qu'on se trouvera plus éloigné vers l'aval. Disons que c'est là une raison qui milite en faveur de la disposition des réservoirs de crue le plus en aval possible.

La forme des crues dans un bassin déterminé rentre dans un petit nombre de types, qu'on peut reconnaître en étudiant les crues anciennes. La forme des très grandes crues est même complètement fixée. Dans le bassin supérieur de la Loire, cette forme est presque assimilable à un triangle.

Le volume total d'une crue peut se déduire avec une approximation assez grande des hauteurs de pluie tombée dans les bassins versants. Pour chaque bassin versant de la Loire, Graeff a montré que le coefficient d'écoulement, rapport entre le volume de l'eau débité et celui de la pluie tombée, ne variait qu'entre des limites assez étroites d'après les circonstances de saison et d'imbibition du sol. Il est plus fort néanmoins dans les bassins des affluents supérieurs et plus faibles pour ceux d'aval.

M. l'ingénieur Delemer a fait paraître dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (année 1904) une étude très intéressante sur la transmission des crues de l'Ardèche.

Les expériences de cet ingénieur ont porté sur la portion du cours d'eau qui s'étend de Vallon à Saint-Martin, à l'aval de la réunion de ses affluents. En ces deux points, des échelles donnent la hauteur d'eau, et le lit de la rivière est formé sur presque toute sa section par une gorge très resserrée, assez régulière et de forte pente, qui a facilité les observations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 47) donne les diagrammes des débits en fonction des hauteurs d'eau à Vallon et à Saint-Martin.

Les jaugeages effectués l'ont été par la méthode de Fargue. On a pris quatre profils de la rivière, à 100 mètres de distance les uns des autres, et on a mesuré au moyen de flotteurs la vitesse superficielle entre les profils 1 et 3 et entre les profils 2 et 4, après multiplication par 0,80. Pour avoir la vitesse moyenne, on a appliqué la première vitesse à la section mouillée dans le profil 2 et la deuxième à celle du profil 3, et on a ainsi obtenu par trente-neuf expériences le débit et la vitesse moyenne à différentes hauteurs.

Pour les crues supérieures à 8 mètres, il a fallu renoncer aux flotteurs et

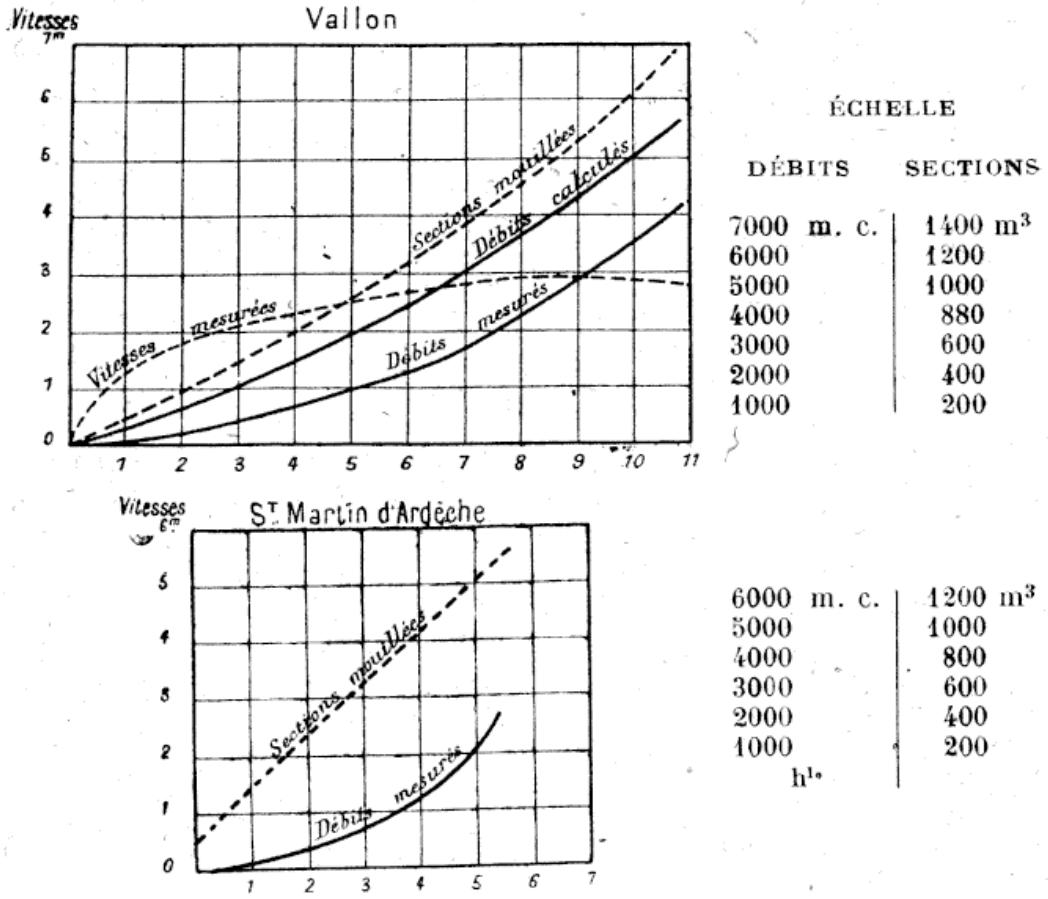


FIG. 47.

mesurer simplement la vitesse des gros troncs de bois charriés par la rivière.

Le diagramme des hauteurs établi à l'échelle de Saint-Martin, en fonction des hauteurs de celle de Vallon (courbes de concordance), a permis de constater que les mêmes hauteurs donnent des débits égaux à très peu de chose près. Ce qui prouve que la conservation des débits maxima est suffisamment exacte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les crues des grands cours d'eau torrentiels comprennent presque toujours une première montée subite et très courte, que suit une baisse relative au bout de un ou deux jours, puis la crue se prolonge à un niveau moindre. Ainsi on peut caractériser la nature des cours d'eau à cet égard par la durée plus ou moins considérable des troubles. L'intensité de ceux-ci est des plus variables et n'est pas proportionnelle au débit d'un cours d'eau. Dans les régions du sud-est de la France, les plus grands troubles sont dus la plupart du temps à des orages locaux qui éclatent dans quelques portions d'un bassin supérieur et ne produisent que des crues relativement faibles. Aux époques de a fonte des neiges, la proportion de limon est également assez considérable, et les eaux sont généralement claires pendant la période d'hiver. La puissance colmatrice d'un cours d'eau ne peut se déterminer qu'en recherchant le volume total de limon charrié pendant une année entière.

Le volume des crues, en d'autres termes la quantité d'eau qui afflue à la surface à un moment donné, dépend de l'étendue du bassin versant à l'amont du point que l'on considère, de la répartition d'une même averse ou des pluies successives sur les divers points du bassin, de la hauteur d'eau tombée pendant chaque pluie, de la nature plus ou moins perméable du sol et de son état de saturation par suite des pluies antérieures, de la déclivité des versants et de leur degré de déboisement, etc.

Pour la détermination de la section définitive à donner à un cours d'eau, la connaissance de l'ensemble de ces circonstances, qui demanderait une étude très longue et difficile, n'est pas indispensable. Quand on connaît pour la région le coefficient d'écoulement ou rapport entre la quantité d'eau tombée et le volume débité pendant le même temps pour les cours d'eau qui la sillonnent, ainsi que le relevé des hauteurs d'eau fournies par les orages qui produisent les crues de printemps ou d'été, on a à très peu près les éléments nécessaires pour l'opération en vue. Nous avons donné plus haut quelques chiffres pour les rapports entre l'étiage et les crues.

Dans la plupart des cas, on ne connaît pas le coefficient d'écoulement, et souvent aussi les observations pluviométriques font défaut ; on en est réduit alors à examiner les débouchés superficiels des ponts de la vallée, en tenant compte de la manière dont ils se comportent lors des grandes crues. On peut aussi établir des analogies avec d'autres cours d'eau de la région, comparables comme terrain, perméabilité, déclivité, et dont les débits sont connus ; de plus, l'on admet que les sections de ces ruisseaux sont proportionnelles aux surfaces des bassins versants dont elles écoulent les eaux.

Les crues torrentielles n'arrivent pas toutes en même temps au thalweg principal. Les ruisseaux les moins longs donnent les premiers, et leur crue

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

torrentielle est déjà passée quand arrivent les flots d'autres ruisseaux plus éloignés.

Les cours d'eau de la partie de la France située au nord du Plateau Central et comprise entre le Jura, les Vosges et l'Océan, c'est-à-dire la Loire, la Saône, la Meuse et la Seine, entrent en crue en même temps dans la saison humide. Le bassin du Rhône, au contraire, n'est pas soumis aux mêmes influences pluviométriques dans toute son étendue.

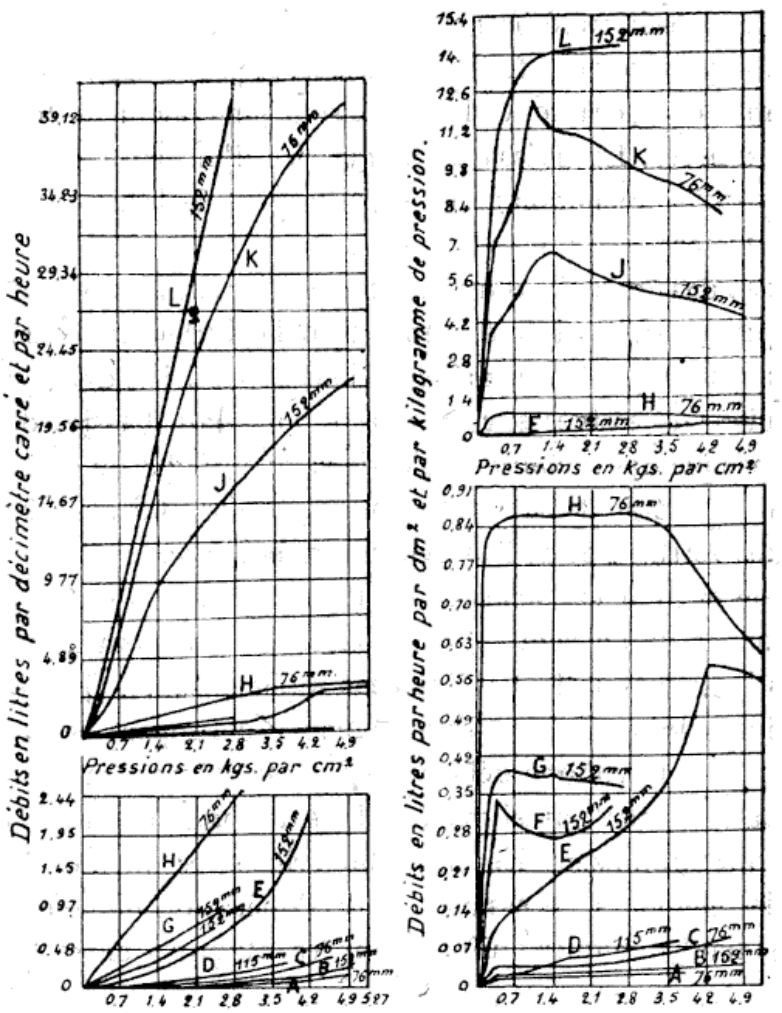


FIG. 48. — Diagrammes donnant le débit par filtration en fonction de la pression dans des roches.

A, D, Calcaires oolithiques de Bath. — B, C, Calcaires oolithiques de Bradfort. — E, H, Pierre meulière. — F, Calcaire de Micheldever. — J, K, Grès durs de Daresbury. — L, Grès tendre de Daresbury.

La durée des averses et leur intensité n'ont entre elles aucune relation : ainsi, sur les côtes de la Méditerranée et en Provence, la plupart des pluies sont de faible durée et d'intensité relativement considérable ; en Bretagne, elles sont de longue durée, mais fines et drues et sans donner un volume d'eau très notable.

Le volume d'eau total retenu par le sol comprend la fraction qui a ruis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sélé à la surface et celle qui a pénétré dans la couche poreuse de la terre. Le coefficient d'écoulement varie avec les années, suivant leur caractère climatologique, selon la répartition des températures, des hauteurs de pluie, des quantités de neige, etc. Pour une même année il y a une grande différence entre les saisons chaudes et les saisons froides, et il est beaucoup plus fort dans le premier cas que dans le second, souvent plus du double.

Pour la France, où le coefficient d'écoulement, d'après M. Bechmann, est de 0,45 et le ruissellement de 0,25 à 0,33, l'infiltration ressort à 0,12 à 0,20 de la pluie tombée ; ce dernier coefficient varie naturellement suivant la nature des couches superficielles.

Le coefficient d'écoulement de la pluie, pour le bassin de la Seine, est de 0,31, la Saône 0,44, la Garonne 0,65, le Rhin 0,65, la Durance 0,70.

En France, les terrains perméables dominent ; sur une superficie totale de 53 millions d'hectares, il y en a 21 millions d'imperméables contre 32 millions de perméables.

La soudaineté et l'importance des crues qui provoquent les inondations, qui causent tant de désastres, sont dues aux cours d'eau torrentiels qui reçoivent leurs eaux de bassins où les terrains imperméables dominent.

Pour déterminer le volume d'eau à écouler pendant les plus fortes crues, en l'absence de jaugeages, et en se basant sur les observations pluviométriques, on peut appliquer la formule dite de Possenti :

$$Q = \frac{ca}{S}\left(m + \frac{p}{3}\right),$$

dans laquelle m représente la partie montagneuse de la surface du bassin versant en kilomètres carrés, p la partie en plaine de la même surface, a la hauteur en mètres de plus grande pluie tombée en vingt-quatre heures sur la région considérée, S la longueur en kilomètres du cours d'eau depuis son origine, c un coefficient qui augmente avec la nature torrentielle du fleuve et croît quand S diminue ; c varie entre 600 et 1.000.

19. Services d'études et d'annonces des crues. — En France, un service de ce genre existe pour chacun des fleuves. En Allemagne, pour le Rhin, est un des mieux compris : il comporte 42 stations hydrostatiques sur le Rhin lui-même et 59 sur les affluents.

Ces stations d'études sur le Rhin sont accouplées deux à deux, une à l'amont, une à l'aval de chaque confluent, et sont munies le plus souvent d'hydrographes enregistreurs. Les stations sont distantes de 30 à 70 kilomètres.

Les observations ont lieu trois, quatre et même douze fois par jour, suivant la hauteur et la rapidité de croissance, de façon à donner le débit de la montée, la hauteur du maximum, la durée de l'étale, etc. Les observa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions météorologiques (pluies, vents, neiges, glaces, etc.) sont aussi consignées dans les graphiques.

Le procédé adopté pour la représentation de la marche des crues dérive de celui de MM. G. Lemoine et de Préaudeau, qui permet de représenter la marche du maximum en fonction du temps et de S (distance à une origine fixe).

Lors des crues, on relève les niveaux aux diverses stations hydromé-

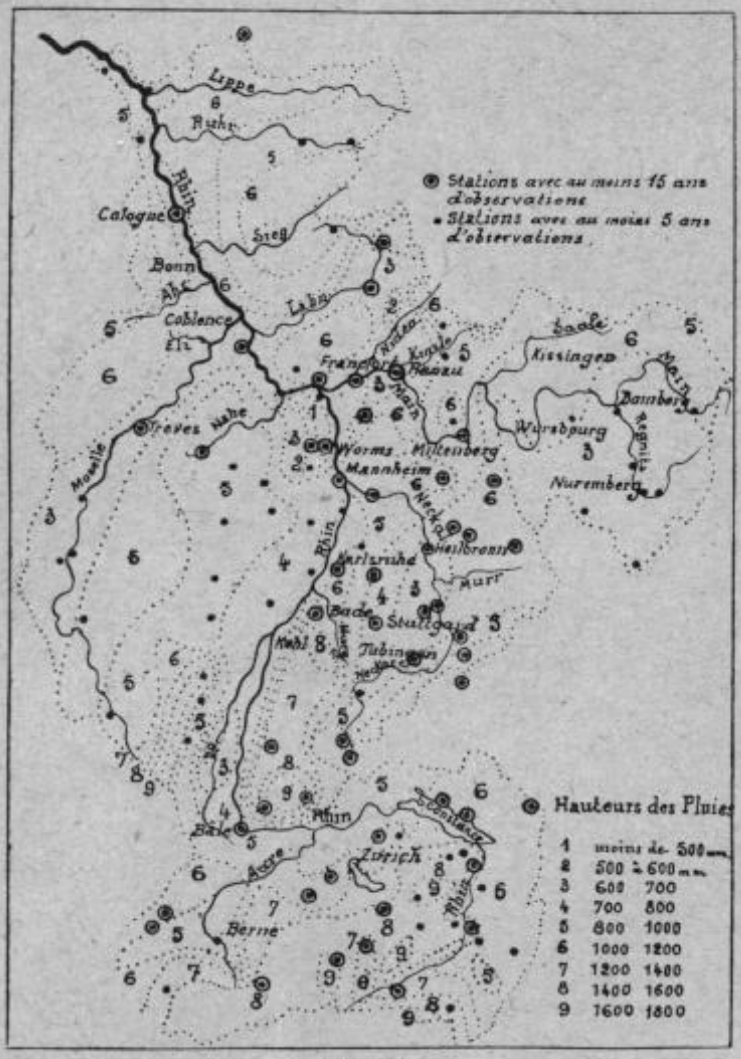


FIG. 49.

triques, avec lesquels on dresse des tableaux numériques et graphiques du fleuve et des affluents. Ces tableaux sont accompagnés de cartes d'égale pluie (*fig.* 49) et de tableaux de pluies pour les crues plus récentes.

En ce qui concerne la propagation des crues lorsque l'action des affluents est aussi faible que possible (recherche de l'onde primaire ou onde qui se produirait si les affluents n'existaient pas), la relation reliant le niveau de chaque station au niveau correspondant d'une ou plusieurs stations d'amont est établie d'une manière graphique dont l'équation approchée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est de la forme : $h_2 = ah_1 + b$, où a et b ont des valeurs constantes quand h_1 reste compris dans une certaine limite.

Pour la détermination de la vitesse de la propagation des flots, M. Von Tein, collaborateur scientifique du Bureau central badois, a remarqué que la durée t de propagation est fonction de la distance D′ à la station d'origine et de la hauteur h du fleuve à cette station $[f(D'h)]$. Il construit les courbes $h = C^{te}$ pour toutes les stations et, pour quelques-unes d'entre elles, les courbes $D' = C^{te}$ qui sont en forme de S.

Pour préciser la hauteur des eaux courantes dès que les pluies d'où elles viennent sont tombées, c'est-à-dire prévoir la hauteur des crues en un point déterminé, on a vu que l'on pouvait recourir à la mesure même de ces pluies, et utiliser soit les relations entre les hauteurs d'eau et les débits, soit les comparaisons entre les cotes absolues des graphiques d'amont et d'aval.

Mais, quel que soit le mode adopté, il est impossible de s'abstenir, dit M. Robinet, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, d'avoir égard à l'influence des terrains perméables et imperméables, la combinaison des montées reposant sur la notion essentiellement pratique de la nature des terrains traversés par les eaux.

Pour les fleuves et rivières d'allure torrentielle, l'Administration, par un simple *avis de crue*, fait connaître en aval, dans le plus bref délai possible, les hauteurs exceptionnelles observées en amont.

L'annonce des crues est prescrite maintenant non seulement pour nos fleuves, mais aussi pour diverses rivières (la Durance, la Drôme, l'Ardèche, l'Hérault, les Gardons, l'Arve, l'Isère, l'Ain, la Dordogne, la Maine, le Loir, la Sarthe, la Mayenne, etc.).

Dans le bassin de la Garonne 41 échelles sont observées régulièrement à l'amont du confluent du Lot (soit 0,08 échelle par myriamètre carré) ; au-dessus de Toulouse, le nombre est de 25 (0,15 par myriamètre carré). Dans le bassin de l'Adour, le nombre est de 34 (soit 0,20 par myriamètre carré). Il existe aussi des échelles sur l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech.

Pour le Rhône, en particulier, le service d'annonce des crues comporte deux divisions ; les ingénieurs chargés de la partie inférieure (entre le confluent de l'Ardèche et la mer) reçoivent les observations de stations très éloignées et convenablement choisies, et le service de la navigation du Rhône à Lyon est tenu d'avertir les riverains du fleuve jusqu'à Pont-Saint-Esprit, en utilisant les indications que doivent lui fournir les postes établis sur l'Arve, l'Ain, la Saône, l'Isère et la Drôme.

Les graphiques des hauteurs d'eau et les tableaux de tenue des eaux sont élaborés dans les bureaux des Ingénieurs en chef des Ponts et Chaussées, tableaux que l'on transforme en graphiques des débits.

En Suisse, le Gouvernement fédéral a entrepris une étude hydrologique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'elle poursuit depuis un certain nombre d'années. Chaque petit bassin partiel (dans les bassins supérieurs du Rhône et du Rhin) est mesuré au planimètre sur une carte au $\frac{1}{50.000}$, puis décomposé, suivant les courbes de niveau, en zones d'altitude à l'équidistance de 300 mètres, ensuite en natures de terrains : névés et glaciers, lacs et forêts, roches ou éboulis et autres terrains ; à chacune de ces catégories sont appliqués des coefficients appropriés d'alimentation pluviale, d'évaporation, d'absorption et de ruissellement, déduits des données météorologiques et géologiques connues, qui permettent ainsi de définir complètement et avec une grande précision le régime hydrologique de chaque bassin.

En France, M. de La Brosse, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a proposé la classification représentée par les deux tableaux ci-après :

1° Zones d'altitude :

Au-dessous de 500 mètres	De 500 à 1.000 m.	De 1.000 à 1.500 m.	De 1.500 à 2.000 m.	De 2.000 à 2.500 m.	De 2.500 à 3.000 m.	Au-dessus de 3.000 m.
					neiges persistantes	

2° Terrains :

Très perméables ou absorbants (sols complèt. boisés, terres profondes, calcaires fissurés, etc.).	Moyennement perméables ou absorbants (pâturages, alluvions anciennes, cultures diverses, etc.).	Imperméables (roches non fissurées, cuvettes lacustres, etc.).

M. l'ingénieur Lamaireste (*Etudes hydrologiques sur le Jura*) a divisé ce bassin en trois régions. Le premier plateau s'étend du nord au midi sur une largeur de 97 kilomètres ; l'altitude varie de 400 à 600 mètres et la hauteur moyenne de pluie est environ de $1^m,40$, à peu près égale à celle qu'on observe à Poligny. Ce plateau, qui est en forme de cuvette, domine la plaine d'une grande hauteur. Le deuxième plateau monte jusqu'à l'altitude de 900 mètres ; la hauteur annuelle de pluie est dans la partie moyenne, à Saint-Claude, de $1^m,46$ et de $1^m,77$ à Syam. Le troisième plateau comprend les cimes les plus élevées du Jura ; il est caractérisé par l'absence des céréales, et, au delà de 1.500 à 1.600 mètres, il ne reste que les pâturages.

La hauteur moyenne de pluie a été trouvée de $0^m,934$ aux forts de Joux et des Rousses.

Ainsi, dans le Jura, il pleuvrait beaucoup moins sur les hauts sommets que sur les rampes ; on y voit là un cas caractéristique de l'influence des obstacles sur la répartition des pluies.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. de La Brosse, au sujet de l'étude hydrologique de notre territoire, a demandé, pour faciliter la comparaison dans les divers bassins, de dresser des graphiques sur un cadre uniforme, à une échelle identique, et que les courbes représentatives des débits de chaque année soient tracées en couleurs différentes d'une année à l'autre. De même, on tracerait en traits différents les courbes enveloppes à la fin de la décade et l'on coterait les points extrêmes en même couleur que le trait.

Les indications hydrologiques qui suivent et qui ont trait à quelques fleuves allemands donneront une idée de la façon dont ces études sont appliquées outre-Rhin.

Le *Main* (affluent de rive droite le plus important du Rhin) a une longueur de 529 kilomètres, et la superficie de son bassin est de 27.206 kilomètres carrés. Il est limité au nord et à l'est par des collines atteignant 800 à 1.100 mètres d'altitude. Au point de vue géologique, on y rencontre principalement le terrain primitif, des roches éruptives, les terrains cambriens, dévoniens, le jurassique, et enfin les terrains du trias, tertiaires et quaternaires.

La grande majorité des terrains se classe dans les terrains semi-perméables.

La superficie couverte en forêts est de 36 0/0 de la totalité.

Le nombre des stations d'observations est de 107. Le nombre de jours de pluie est de 184 en moyenne, et la saison froide est moins pluvieuse que la saison chaude. Sur la rive droite du Main, le mois le plus pluvieux est juillet, et, sur la rive gauche, c'est le mois de juin.

Les plus faibles totaux de pluie se rencontrent dans les vallées ; c'est à l'entrée du bassin, à Mayence, et au centre du bassin qu'il pleut le moins. La plus forte pluie en vingt-quatre heures a été de 69 millimètres en juin.

Les plus fortes averses ont lieu surtout en juillet. La neige tombe d'octobre à mai, surtout de décembre à mars ; sauf sur le pourtour du bassin, elle séjourne rarement plus de 30 jours consécutifs en moyenne sur le sol.

Le Main est bas dans la saison chaude et les crues ont lieu surtout en novembre et mars ; les crues d'été sont rares. La pente moyenne sur 400 kilomètres, à partir de l'embouchure, n'est que de $0^m,384$ par kilomètre.

L'étude des relations qui lient les niveaux des diverses stations entre elles (propagation des crues) a été faite en négligeant les effets des affluents. Ces relations sont de la forme suivante :

$$h\,(\text{Miltemberg}) = 0{,}69h\,(\text{Viereth}) + 0^m,64 - 0^m,08 \leq hv \leq 3{,}05.$$

Les glaces ne sont pas rares ; le Main y est pris 29 jours en moyenne,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mais ce n'est qu'exceptionnellement que le dégel est accompagné d'une crue sérieuse et d'embâcles.

Suivant que la pluie prédomine dans le haut Main, il s'écoule entre les maxima de la pluie et de la crue 1 ou 2 jours en moyenne.

Pour une crue non suivie d'autres crues ou de gelées, il s'écoule de 11 à 21 jours, suivant que h (voir formule ci-avant) varie entre $1^m,98$ et $3^m,44$, entre le maximum et le retour à l'état normal. Une fonte de neige, donnant 1 millimètre d'eau par jour, permet la prévision d'une montée.

Le tableau ci-après donne les relations entre les crues et les hauteurs de pluie deux à trois fois plus fortes pour produire les mêmes effets (1) :

HAUTEUR DE PLUIE MOYENNE A L'AMONT	MAIN à BAUNCAH		REGNITZ à BAMBERG		TAUBER à MERGEINTHEIM		KINZIG à HANAU		NIDA à VILBEL		SAALE à SCHONDERFELD	
	Cas ordinaire	Sol gelé, etc., neige	Cas ordinaire	Sol gelé, etc.	Cas ordinaire	Sol gelé, etc.	Cas ordinaire	Sol gelé, etc.	Cas ordinaire	Sol gelé, etc.	Cas ordinaire	Sol gelé, etc
millimètres	m.		m.		m.		m.		m.		m.	
5	2,0	1 fois 1/2 à 2 fois	2,3	3,0 à 3,5	»	2,5 à 3,0	1,5	1,8	1,5	2,0 à 2,7	»	»
10	3,0		2,7	4,0	»	»	1,8	2,2	2,0	3,5	2,0	3,0
12	»		»	»	»	6,0	»	»	»	»	»	»
15	4,0		3,0	?	3,0	»	2,1	2,6	3,4	»	»	»
20	5,0		3,1	?	4,0	»	2,5	3,0	2,7	»	3,0	3,5 à 4,0
25	»		»	»	»	»	»	»	3,0	»	»	»
27	6,0		»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
28 à 30	»		»	»	6,0	»	3,0	2,0	»	»	»	»
Intervalle entre le commencement de la pluie et de la crue.....	1 à 2 j.		1 jour		1 à 2 j.		1 à 2 j.		2 jours		2 à 3 j.	
Intervalle entre le maximum de la pluie et de la crue.....	1 à 2 j.		1 à 2 j.		1 à 2 j.		m. de 1 j.		2 à 4 j.		le même jour	

Les pentes et débits sont : pour les premières, 0,048 à 0,349 par kilomètre, et pour les seconds : 370 mètres cubes à 545 mètres cubes en eaux moyennes, 34 à 190 mètres cubes en basses eaux et 1.633 à 2.600 mètres cubes en hautes eaux.

Le régime des crues et des basses eaux est très analogue à celui de l'Elbe, mais les crues d'été y sont moins rares.

C'est la méthode du resserrement que l'on a appliquée pour la régularisation de ce fleuve, par l'emploi exclusif d'épis transversaux (2) en fasci-

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, Étude hydrologique du Rhin, par M. E. Maillet, ingénieur des Ponts et Chaussées.

(2) Cette méthode consiste à calibrer la rivière à une largeur normale déterminée d'une manière plus ou moins empirique, en tenant compte de la pente et du débit, et cela au moyen d'ouvrages continus (digues longitudinales) ou discontinus (épis transversaux).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nage. Les largeurs normales de rétrécissement du niveau des basses eaux varient de 40 mètres à la Neisse à 132 mètres à Custrin.

La Vistule. — Longueur : 1.125 kilomètres. Superficie du bassin : 198.285 kilomètres carrés ; après le Rhin, c'est le plus étendu des fleuves de l'Allemagne du Nord. Les matériaux du lit sont exclusivement composés de sable quartzeux à grains fins, et les rives sont constituées par un mélange de sable et de limon.

Les pentes et débits sont : pour les premières, 0,053 à 0,178 par kilomètre, et pour les seconds : 950 à 1.333 mètres cubes en eaux moyennes; 430 à 550 mètres cubes en basses eaux et 5.000 à 8.250 mètres cubes en hautes eaux. Crues ordinaires au printemps et étiages en été. De grandes crues se produisent parfois en août et en septembre ; mais les plus dangereuses sont celles du printemps, à cause des embâcles de glaces. Les travaux de régularisation consistent en épis transversaux principalement, dont un grand nombre atteignent des longueurs considérables à cause de la largeur excessive du lit naturel, qui parfois dépasse 1.000 mètres.

L'Elbe. — Longueur du fleuve : 1.154 kilomètres. Superficie du bassin : 144.055 kilomètres carrés. L'Elbe coule tantôt dans des alluvions n'offrant qu'une faible résistance à l'érosion, tantôt dans des vallées rocheuses.

Le coefficient d'allongement général moyen du fleuve est de 23,5 0/0.

Les eaux moyennes de l'Elbe sont aujourd'hui concentrées dans un lit mineur à peu près unique, dont la largeur varie entre 100 et 600 mètres.

Les pentes et les débits varient, pour les premières, de 0,066 à 0,390 par kilomètre, et, pour les seconds, de 255 mètres cubes à 1.508 mètres cubes en eaux moyennes, 38 mètres cubes à 432 mètres cubes en basses eaux et 4.300 mètres cubes à 5.000 mètres cubes en hautes eaux.

Les crues se manifestent à la fin de l'hiver, à la suite de la fonte des neiges dans les bassins montagneux de la Bohême et de la Saxe, et elles reviennent généralement à la fin de février et en mars. Les crues d'été (fortes pluies prolongées) sont moins fréquentes que celles de printemps.

Les basses eaux se produisent en août et surtout en septembre ; on constate parfois des étiages d'hiver lors des gelées dans la partie montagneuse du bassin.

L'Oder. — La longueur totale de l'Oder est de 944 kilomètres, et la superficie du bassin 119.337 kilomètres carrés.

Les terrains dans lesquels coule l'Oder appartiennent à la même formation que l'Elbe. Le lit de l'Oder est plus sinueux que celui de l'Elbe ; son coefficient d'allongement est de 30 0/0. Les largeurs du lit mineur varient entre 100 et 200 mètres (moyennes).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — RÉGULARISATION DU RÉGIME DES COURS D'EAU

Les considérations qui précèdent s'appliquent aux cours d'eau à écoulement libre. Il y a des causes naturelles qui améliorent leur régime, tels que les forêts, les lacs et les terrains perméables, que nous allons successivement examiner.

20. Action des forêts. — Belgrand et Surrel personnifièrent, il y a quelque trente ans, les doctrines scientifiques relatives aux questions torrentielles, l'un par la distinction judicieuse des conditions de perméabilité du sol, l'autre par la mise en valeur du rôle des forêts en matière d'érosions.

« La destruction d'une forêt, disait Surrel, livre le sol en proie aux torrents, et la présence d'une forêt empêche la formation de ceux-ci. Tous les efforts individuels ou collectifs qui constituent la forêt demandent peu au sol, mais beaucoup à l'atmosphère, et tendent ainsi à l'accaparement des eaux aériennes, véritable captage de l'eau atmosphérique. Les forêts condensent mécaniquement sur le sol une partie de l'humidité entretenue par les précipitations atmosphériques et évaporent le reste ; elles sont donc un agent de réception et de réutilisation des réserves hydrauliques qu'elles puisent dans l'atmosphère. De plus, elles protègent le sol contre les érosions et contre les attaques des météores. Les masses d'air qui surplombent ou avoisinent les grands massifs forestiers sont plus ou moins saturées de vapeur d'eau transpirée par les forêts, lesquelles vapeurs, sensiblement constantes, donnent lieu à des condensations qui se résolvent en pluies modérées et fréquentes qui n'influent pas sensiblement sur les pluies torrentielles donnant lieu à des inondations. »

« L'évolution de la forêt, dit M. Fabre, se poursuit avec l'unique objectif de l'approvisionnement à long terme des *réserves hydrauliques* qu'elle mettra plus tard physiologiquement en œuvre. » La forêt constitue ainsi un organe perpétuel de véritable gisement de houille blanche. Les forêts des hauteurs agissent davantage sur le ruissellement que sur les eaux souterraines. D'après M. Imbeaux, le reboisement et le gazonnement des régions élevées sont parmi les plus puissants moyens de lutter contre le ruissellement torrentiel et les inondations qui en sont la conséquence.

L'infiltration des eaux superficielles dans le sol étant d'autant plus rapide que ce dernier est moins revêtu d'humus, — que la couverture forestière élabore plus vite que toute autre couverture du sol, — il en résulte que le reboisement des sols dénudés à ruissellement s'impose comme un moyen économique très efficace pour ralentir ce filtrage permanent et progressif, en permettant ainsi une plus grande utilisation des eaux superficielles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette utilisation s'impose d'autant plus que l'on envisage avec une certaine inquiétude la régression des glaciers et, par suite, le tarissement progressif des sources continentales de l'eau.

L'action essentielle des forêts est de faire perdre aux rivières leur caractère torrentiel par le reboisement, car celui-ci permet d'édifier des endiguements d'une sécurité absolue et pouvant s'approprier à toutes les captations de forces hydrauliques. En créant de puissants massifs forestiers dans les bassins supérieurs, on arriverait à former des réservoirs d'eau naturels, autrement certains que les réservoirs artificiels. Il convient cependant de remarquer que les forêts n'améliorent guère que les étiages d'été et non les étiages d'hiver, qui sont les plus gênants pour l'industrie. D'autre part, M. Houillier estime que l'appauvrissement des sources dans les régions de plaines résulte du perfectionnement de l'exploitation agricole des terres, entraînant une augmentation importante de l'évaporation par transpiration végétale. De ce fait, la diminution du débit des sources émergeant des bassins cultivés proviendrait du perfectionnement des procédés de culture et de la suppression des jachères, auxquels il conviendrait de fixer une limite, *a priori* impossible, plutôt que de recourir aux reboisements, si on veut assurer l'alimentation publique en eaux potables ainsi que le développement de la houille blanche.

La forêt, comme la mer, est une source d'humidité. Pour un bassin de 10.000 hectares boisé au tiers, la quantité d'eau extraite par les arbres des couches profondes du sol et rendue à l'atmosphère atteindrait de 4 à 10 milliards de kilogrammes d'eau. Transformée en pluie cela donnerait une tranche de 400 à 1.000 millimètres.

Les barrages-réservoirs pour emmagasiner les eaux des saisons pluvieuses, tout en ayant leur intérêt, ne peuvent être comparées à l'action des forêts dans le sens qui nous occupe. D'autre part, on ne peut recourir à ceux-ci que dans les régions bien boisées avec des sols imperméables et non affouillables, avec aussi des eaux pures et exemptes de limon. On a vu des réservoirs comblés en un temps relativement court. Ainsi le réservoir de Quinson, sur le Verdon, a été comblé en 5 ans sur 4.700 mètres de long et celui d'Avignon, sur le Drac, en 8 années sur 3.500 mètres.

Le reboisement de nos forêts offre donc un intérêt capital pour la bonne utilisation de nos richesses hydrauliques.

La loi du 4 avril 1882 a armé l'Administration des Eaux et Forêts pour le reboisement et le gazonnement des montagnes. Puis en 1887 a été créé un service des améliorations pastorales. Mais le reboisement n'a pas toujours été bien compris par les populations montagneuses ; il fut plutôt un objet de discorde entre les habitants de la plaine et ceux de la montagne.

Alors est intervenue l'Association Centrale pour l'aménagement des mon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tagnes et son action bienfaisante dès son origine ne s'est plus ralentie. Cette œuvre obtint que les propriétaires de forêts eussent la faculté de les soumettre au régime forestier, de là surgit la loi du 2 juillet 1913 qui a permis d'inaugurer un nouveau régime, fécond et libéral.

Cette dernière loi a été suivie de celle du 16 août 1913 modifiant la loi du 4 avril 1882, sur la restauration et la conservation des terrains en montagne.

La loi du 16 août 1913 vise la restauration et la conservation de tous les terrains en montagne dont le reboisement s'impose, alors même, ce qui est capital, que l'équilibre et la stabilité ne se trouvent pas en cause. Les travaux de reboisement intéressant la régularisation du régime des eaux peuvent être subventionnés ; pour les terrains appartenant aux communes à des établissements publics ou à des associations d'utilité publique, l'État doit subventionner au moins dans la proportion de deux tiers les travaux de reboisement reconnus nécessaires pour la constitution des massifs.

Le relèvement économique des montagnards se trouve retardé par certains obstacles, tels que droits de pacage, de passage, d'affouage, de marronnage, etc., qui demandent à être nettement régis par une loi déclarant obligatoires les déclarations de servitudes occultes.

Nous citerons aussi le projet de loi de la Société Forestière de Franche-Comté et de Belfort sur la conservation des forêts de protection. Les forêts, bois, prés-bois et pâturages boisés auront pour but : 1° le maintien des terres sur les montagnes et sur les pentes ; 2° d'assurer l'existence et l'amélioration du régime et la salubrité des sources et cours d'eau ; 3° assurer la protection des terrains contre les avalanches et contre les influences climatologiques nuisibles. Enfin le projet de loi sur le régime pastoral (MM. Cazeaux-Gazalet et consorts).

Les relevés des jaugeages du service des Grandes Forces Hydrauliques montrent que les valeurs moyennes des débits des cours d'eau vont en affaiblissant chaque année, ce qui selon M. Descombes est une aggravation de leur irrégularité qui doit attirer la plus grande attention, car l'industrie de la houille blanche est ainsi menacée de voir s'allonger les périodes de basses eaux et se multiplier les crues.

Il faut donc y obvier en ralentissant le ruissellement par le reboisement, et ici les réservoirs peuvent jouer un rôle bienfaisant, en les disposant le long du thalweg.

Quand on considère l'action du reboisement au point de vue de l'atténuation des inondations, on cherche à réduire le débit maximum, et quand on envisage l'industrie de la houille blanche, il faut avoir pour objectif l'augmentation du débit minimum. L'irrégularité des eaux est sensible-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment doublée par le déboisage du sol, ainsi que le montrent les tableaux suivants (1) :

	INDICES D'IRRÉGULARITÉ					
	BASSINS		DIFFÉRENCE		TOTAUX	
	Boisés	Déboisés	+	—	+	— 0/0
Écart maximum des débits	169,5	222,4	52,9		31	
	192,5	231,4	38,9		20	
Débits de crues	89,4	182	92,6		103	
Débits d'étiage	23,1	9	14,0		65	

LA CRENTIÈRE-LE-BOUCHAT

Coefficients d'écoulement	0,0529	0,1270	0,741		139	
Coefficients d'action inondante	0,0174	0,0391	0,217		124	

LE ZORN-LA-BIÈVRE

On a remarqué que le régime hydrologique où des déboisements avaient été opérés pendant la période d'observation, a subi une aggravation simultanée du nombre des jours de crues et de basses eaux ; que le régime s'est amélioré dans les bassins où ont été faits des reboisements.

L'intensité de l'action hydrologique varie d'ailleurs avec l'âge, l'essence et la compacité des arbres, l'état de la couverture vive et de la couverture morte, comme aussi avec la disposition rationnelle des surfaces boisées et avec leur mode d'exploitation.

A cet effet il est recommandé de créer sur les pentes des ceintures boisées, de couper les plaines par des bandes boisées perpendiculairement à la direction des vents dominants, d'augmenter le taux de boisement sur les sols sablonneux exposés à la transformation désertique, enfin d'aménager les bois en futaie plutôt qu'en taillis simple, d'y conserver leur couverture morte et d'allonger la durée des révolutions sylvestres, d'exploiter les bois de montagnes pour jardinage, les bois de coteaux par parcelles consécutives le long des lignes de niveau et les bois de plaine par parcelles perpendiculaires à la direction des vents dominants et de généraliser le gemmage des résineux.

21. Action des lacs. — Les lacs produisent un effet naturel dans le même sens que les forêts, très sensible au moment de la fonte des neiges, mais à peu près nul en hiver. Ils sont de merveilleux réservoirs naturels, et de cette façon ils peuvent fournir aux industriels qui en sont tributaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la facilité de faire des appoints considérables à une chute d'eau, soit pendant une saison entière, soit chaque jour pendant quelques heures critiques. En effet, la force donnée par les basses eaux d'un cours d'eau torrentiel est sensiblement plus faible que celle produite pendant huit ou dix mois de l'année par les eaux moyennes. Souvent l'étiage n'est que les 2/3 des eaux moyennes, et les plus basses eaux exceptionnelles sont admises comme le 1/4 des eaux moyennes. D'autre part, la consommation d'une usine varie beaucoup d'une heure à l'autre, et la moyenne est assez souvent inférieure à 40 0/0 du maximum. On utilise donc moins de 40 0/0 du 1/4 de la force de l'eau, soit moins de 1/10e. On conçoit donc que l'action d'un lac peut jouer un grand rôle.

Lorsqu'une force motrice est alimentée par un cours d'eau et un lac, ou seulement par un lac trop petit pour pouvoir réglementer complètement toutes les eaux pluviales de son bassin hydrographique, elle est partiellement régularisable. Quand elle est alimentée par un ou plusieurs lacs et que ceux-ci sont assez grands et assez profonds pour pouvoir emmagasiner chaque année, en toute saison, toute l'eau que le ciel leur envoie en ne débitant cette eau qu'au fur et à mesure des besoins de l'exploitation, sans jamais en laisser perdre aucune quantité, on se trouve en présence d'une force régularisable.

On distingue les lacs, au point de vue de leur formation, en deux classes : 1° ceux qui ont leur lit dans la roche même, et 2° ceux qui sont formés par un barrage. Dans les premiers, la formation a pu être faite ou par des forces d'origine interne qui agissent sur l'écorce terrestre, comme l'action volcanique, les mouvements lents de l'écorce terrestre (lacs Crozet, Domènons, Sept-Laus), l'affaissement du massif alpin (lacs de Genève, du Bourget, d'Annecy), ou par des causes d'origine externe, comme l'action du vent, des eaux superficielles, des eaux souterraines suivies d'effondrements (lacs du Mont-Cenis, de Tigne, de la Girotte), ou bien ce sont des couches de gypse qui ont été dissoutes par l'eau. Enfin c'est l'action dynamique de l'eau dans une fissure (lac de Challeixon, lac Robert, ou de la glace (lac de Paladru).

Dans la seconde classe, le barrage formant le lac peut être produit par différentes causes dont les principales sont : un éboulement (lacs de Montriond, de Sylans, de Saint-André), un glacier en surface (lac de Marjelen), un glacier avec lac intérieur (lac de la Tête-Rousse) ; par la moraine d'un glacier actuel ou d'un autre glacier (lacs de Tigne, de Challain, des Rousses, de Laffrey) ; par une coulée de lave, par un volcan (lacs du Massif Central) ; par les alluvions d'une rivière (lacs du Mont-Cenis, de Sainte-Hélène-sur-Isère) ; par un cordon littoral (étangs de Thau) ; par les dunes (lacs des Landes).

Les avalanches, la végétation qui envahit le fond d'un lac et le trans-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

forme en tourbières, les alluvions, une évaporation intensive, sont les principaux moyens employés par la nature pour déterminer la disparition des lacs.

Lorsque les lacs ont un bassin de réception considérable par rapport à leur surface, la quantité d'eau tombée (pluie) sur cette surface est négligeable par rapport à l'eau qui lui est fournie par ses affluents, qui peuvent être superficiels ou sous-lacustres ou les deux à la fois. Les lacs n'ont généralement qu'un émissaire, et celui-ci peut parfois devenir affluent (lac du Bourget). On distingue aussi les lacs à déversoir superficiel et ceux avec déversoir sous-lacustre ; le premier genre de déversoir constitue un régulateur de niveau bien plus puissant que le déversoir sous-lacustre, s'il ne s'agit que de maintenir le niveau constant.

Au sujet des variations de niveau, M. Crolard indique comme amplitudes maxima : $8^m,11$ pour le lac Majeur, $6^m,07$ pour le lac de Joux, $3^m,98$ pour le lac de Constance, $2^m,60$ pour le lac de Genève.

Les crues des lacs sont généralement occasionnées par la fonte des neiges ou par des pluies diluviennes ou par ces deux actions combinées. Les basses eaux sont dues à la sécheresse de l'été ou à la congélation hivernale qui donnent lieu à des minima en automne et en hiver.

Les lacs importants sont des modérateurs de climat, par la chaleur qu'ils emmagasinent en été et dégagent en hiver ; M. Forel a calculé que, pendant l'hiver 1879-1880, la quantité de chaleur dégagée par le lac Léman aurait été égale à celle que donnerait la combustion de 55 millions de tonnes de charbon. A la surface, les variations du thermomètre suivent les mêmes lois que les eaux courantes, c'est-à-dire qu'elles sont de même sens et seulement de moindre amplitude que celles accusées par la température de l'air. A mesure que l'on descend dans les couches profondes, la température diminue et devient de plus en plus constante et se rapproche de celle du maximum de densité de l'eau, soit 4°.

Connaissant la superficie d'un lac, les graphiques de débit de la rivière, on peut se rendre compte de la surélévation à donner au lac pour, en emmagasinant à l'époque des hautes eaux une partie du débit qui sera restituée à la chute au moment des eaux basses, obtenir le maximum de puissance à peu près constante.

Ainsi le lac aménagé pourra à chaque instant faire office d'accumulateur, rendant à la chute, aux heures de travail, le débit non absorbé lors des périodes d'arrêt ou de faible activité des usines.

Il s'ensuit que, quel que soit le mode d'utilisation, — continu ou intermittent, — du travail de l'eau qu'on se propose, on obtient par l'intermédiaire des lacs la meilleure utilisation possible de l'énergie de la rivière.

Les lacs sont en outre des bassins de décantation tout indiqués, car les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

eaux, en y pénétrant, y amortissent leur vitesse tout d'un coup, laissant déposer les matières entraînées.

Le déversement des lacs non réglementés s'effectue par un seuil fixe. Comme les déversoirs ou les canaux de sortie ne peuvent laisser passer un débit variable que si leur hauteur noyée se modifie en conséquence, le niveau du lac est appelé à subir, suivant l'apport des affluents, certaines oscillations naturelles, d'amplitude généralement faible. Ces lacs se comportent, en définitive, comme de simples dormants de rivière.

Par contre, les lacs réglementés éprouvent des variations de niveau beaucoup plus fortes, soit par l'abaissement et le relèvement alternatifs ou sériels de déversoirs, soit par la manœuvre méthodique de vannes noyées. Si les propriétaires sont parfois lésés dans quelques-uns de leurs droits par l'établissement d'un semblable régime, en revanche les riverains et usagers d'aval peuvent en retirer des avantages incontestables. D'abord l'existence d'un vide de crue aux périodes critiques est une garantie contre les inondations ; en outre, la tranche d'eau circonscrite par l'oscillation du niveau constitue un volant précieux pour la régularisation du débit. Les usines inférieures peuvent ainsi disposer d'un volume bien supérieur à l'étiage naturel des affluents.

Ce sont des arrêtés préfectoraux qui réglementent le déversement des lacs en tenant compte du régime de la pêche, de la culture des francs bords, conditions qui ne sont souvent pas compatibles avec l'aménagement industriel d'une chute d'eau.

Au point de vue des travaux d'aménagement des lacs, on peut construire un tunnel débouchant au fond du lac, ce qui permet d'abaisser le plan d'eau pendant les périodes d'étiage, solution qui a été réalisée avec succès par M. Bergès. Cependant cette méthode ne paraît pas recommandable pour les lacs vaseux (lacs avec barrages rocheux).

Ainsi, quand le lac se termine par un goulot de faible largeur, il paraît plus avantageux d'établir un barrage permettant d'avoir une forte réserve d'eau et d'augmenter la hauteur de chute.

Lorsque la tranche d'eau réservée par la réglementation est faible, la seule présence d'un lac sur un cours d'eau, alors même que le lac n'est pas muni de barrages, suffit, en raison de l'élargissement du lit, à produire une certaine régularisation. Ainsi, en faisant subir au plan d'eau du lac de Genève une augmentation de 1 mètre environ, on a pu doubler l'étiage du Rhône à la sortie du lac, et pour le lac d'Annecy on est arrivé à assurer un débit constant dans les émissaires en opérant dans le lac une retenue artificielle qui ne dépasse, en aucun cas, $0^m,80$ de hauteur.

Le système de régulation adopté pour le lac d'Annecy, conçu par M. Carnot, ancien président de la République française et alors qu'il était ingénieur des Ponts et Chaussées de la Haute-Savoie, donne aux usines

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui en utilisent l'émissaire une puissance moyenne triple, sinon quadruple, de la puissance minimum.

Avec l'augmentation continuelle des grandes installations hydrauliques, les cours d'eau laissés complètement à eux-mêmes rentrent toujours de plus en plus dans l'arrière-plan. Les atteintes artificielles à l'écoulement naturel des cours d'eau ont pris, surtout en ces dernières années, un développement et une aggravation tels que les variations de niveau et de débits qui en résultent et qui durent plus ou moins longtemps peuvent parfois se faire sentir d'une façon fort désagréable ; c'est spécialement le cas lorsque l'écoulement minimum se trouve momentanément coïncider avec le maximum d'une usine hydraulique.

Suivant les circonstances dans lesquelles un cours d'eau peut être utilisé et surtout suivant le mode d'emploi de l'énergie électrique que l'on en retire, on doit examiner si une accumulation journalière suffit ou bien si une compensation des débits disponibles pendant une plus longue durée est nécessaire. Le premier mode d'accumulation est dans la règle facilement exécutable, pour les installations avec un petit débit et forte chute, généralement par l'augmentation du volume de la chambre de mise en charge.

Dans certains cas, peu nombreux, une augmentation sensible de la quantité d'eau peut être atteinte en augmentant le bassin de réception d'un cours d'eau, d'un réservoir naturel ou artificiel par l'adduction d'eau d'un bassin avoisinant. A cet égard, l'utilisation du lac Ritom (en Suisse) en est un exemple typique ; son bassin de réception est considérablement étendu par l'addition d'une partie de l'eau des rivières Camaria, Tremola, Reuss du Gothard, Reuss d'Interalp, val Cadlinio et val Maigels.

Dans certaines circonstances tout à fait propices, il est possible d'augmenter la chute utilisable ou bien d'obtenir rationnellement une installation plus économique en déplaçant la rentrée de l'eau. C'est spécialement le cas lorsqu'il s'agit de l'exploitation industrielle d'une longue section d'un cours d'eau important, conjointement avec ses affluents.

Dans les installations hydrauliques de grande envergure l'on tend actuellement à combiner des eaux de caractère différent, quant à l'écoulement et à la chute, de façon à obtenir le maximum de force.

Les paires de cours d'eau propices sous ce rapport sont celles dont l'un, même sans chute excessive, possède pendant un temps assez long une quantité d'eau assez importante, mais qui ne peut être accumulée qu'insensiblement, tandis que l'autre, avec une chute relativement très forte, est pourvu d'un bassin assez grand pour que les apports, très pauvres en général, puissent être emmagasinés à volonté. La station de force hydraulique de ce dernier cours d'eau doit suspendre le service entièrement ou en partie lorsque l'écoulement du premier est abondant et propice pour l'uti-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lisation, afin de retenir autant d'eau que possible pour la période pauvre en eau se présentant en même temps pour les deux stations. Pendant cette période, l'installation avec accumulation a à secourir l'autre le plus possible. Entre autres exemples de ce procédé, l'on peut citer la combinaison de l'usine de Beznau avec celle de Löntsch ; les usines de la Kander et de Hagneck (Suisse).

Un expédient, qui est surtout employé dans ce dernier pays, pour augmenter la force hydraulique permanente, consiste dans l'emploi de pompes accumulatrices. Une telle combinaison remplit d'une façon excellente ses deux buts principaux, soit de compenser les troubles causés par les dépressions temporaires et souvent inattendues de l'écoulement, soit d'être toujours prête à satisfaire l'augmentation momentanée de la demande de force. La centrale de Ruppoldingen près d'Aarburg peut être présentée comme exemple classique de ce genre d'installation.

La régularisation des chutes par accumulation naturelle ou artificielle est d'une grande importance ; aussi au cours de cet ouvrage aurons-nous souvent l'occasion de revenir sur cette si intéressante question.

22. Réservoirs artificiels. — Les réservoirs peuvent se classer en trois catégories : les réservoirs de crue, les réservoirs régulateurs ou d'étiage, selon l'expression de M. Pingeau, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées [1] et les réservoirs industriels.

Les premiers servent à emmagasiner temporairement ce que les débits naturels des cours d'eau ont d'excessif et de dommageable et les seconds, à accumuler pendant certaines périodes plus ou moins prolongées des réserves d'eau à l'effet de régulariser le régime du cours d'eau pendant les périodes d'étiage où les débits ont besoin d'être plus élevés pour satisfaire à des besoins divers, industrie, navigation, etc. ; enfin les réservoirs industriels, généralement placés, soit sur le cours d'eau, soit en dérivation, sont affectés le plus souvent au service d'une seule usine hydraulique et à la moindre distance en amont de celle-ci. Leur fonction est soit d'augmenter la hauteur de chute disponible, soit de régulariser celle-ci dans d'assez courtes périodes, soit enfin de permettre de suivre, avec la plus grande économie d'eau, les variations de débit de l'usine, entre le jour et la nuit par exemple. Au point de vue des débits de la rivière, ces réservoirs introduisent plutôt un facteur local de pertu bation qu'un facteur de régularisation.

Réservoir de crue. — Un tel ouvrage doit normalement demeurer vide, et quand il est rempli par une crue, on doit avoir pour objectif de le vider de nouveau dans un assez court délai ; son rôle sera d'autant plus

[1] *Annales des Ponts et Chaussées.* — Septembre 1916.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

efficace qu'il se trouvera plus rapproché de la région à protéger, c'est-à-dire le plus en aval.

Avec ces réservoirs des submersions accidentelles, de quelques jours de durée, restent compatibles avec la mise en culture des terrains et dans quelques cas même profitables. On peut distinguer les réservoirs de crue en réservoirs automatiques ou à pertuis libres et ceux munis d'engins de régularisation des débits.

Un réservoir automatique se compose essentiellement d'un barrage, d'une certaine hauteur, dans la partie basse duquel on ménage une ouverture ou pertuis, toujours libre, permettant de laisser passer naturellement, ou sous une charge d'eau très faible tout au moins, le débit de la rivière, quand celle-ci n'est pas en crue. Ce pertuis bien entendu peut être établi en tunnel à côté du barrage, et l'ensemble est complété par un déversoir de superficie placé au niveau supérieur du barrage, moins une certaine revanche.

Les réservoirs automatiques ne permettent en réalité qu'une médiocre utilisation des capacités disponibles, par cette raison, entre autres, que l'on emmagasine forcément de l'eau presque dès le début de la crue, alors que les débits sont encore faibles, et cet emmagasinement ne correspond à rien de bien utile, autant pour les réservoirs isolés que pour ceux étagés, où il n'est guère possible de faire une sommation quelconque des capacités et de pouvoir admettre un coefficient d'utilisation moyen.

Les réservoirs manœuvrés permettent d'arriver à un résultat plus satisfaisant. Si les dispositions sont prises de façon à ne causer aucun inconvénient en aval, à savoir d'obtenir l'embouteillage de l'eau emmagasinée. On suppose que l'on peut établir un système d'ouvrages régulateurs suffisamment puissants pour que l'on puisse régler le débit sortant et de lui assigner une valeur convenable dans toutes les périodes de la crue. Il faut évidemment un déversoir de superficie capable d'évacuer au besoin le débit maximum, lequel peut faire partie du système de régulation en lui donnant une certaine hauteur et en le munissant de vannes.

Il est à remarquer que le système d'embouteillage n'est complètement satisfaisant que si l'on a une série de réservoirs échelonnés sur le cours d'eau principal. Quoi qu'il en soit à la base de l'étude de pareils ouvrages il faut avoir en possession les éléments suivants : courbes de jaugeage des cours d'eau aux emplacements des réservoirs projetés ; les formes types des crues anciennes dans leur état naturel au droit des mêmes emplacements ; comparaison de leurs volumes aux quantités de pluie tombées dans les bassins versants supérieurs, de manière à obtenir des coefficients d'écoulement moyens, ou à établir dans diverses circonstances une échelle rationnelle de ces coefficients d'écoulement ; prévisions (d'après l'état des stations hydrométriques ou pluviométriques d'amont) pour les débits

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maxima des crues à l'emplacement des réservoirs, et si possible des prévisions journalières ; enfin, estimation des débits qu'on peut considérer comme inoffensifs pour l'aval au moment où l'on doit faire des restitutions d'eau, en déterminant autant que possible les époques où ces restitutions peuvent être effectuées sans danger.

Réservoirs d'étiage. — Pour l'établissement de ces ouvrages, indépendamment de l'étude topographique locale, il faut connaître d'une façon précise : le débit d'étiage minimum et moyen dans l'état naturel du cours d'eau, le débit moyen des basses eaux, celui sur lequel peuvent compter les industriels d'aval et qu'il faut respecter, le débit moyen des hautes eaux, ou mieux encore le débit dont on peut disposer, mois par mois par exemple, pendant cette période des hautes eaux, en sus du débit moyen réservé de la période des basses eaux.

Le volume total de l'eau dont on peut ainsi disposer est évidemment une seconde limite supérieure à assigner à la capacité du réservoir.

Ces renseignements découlent soit de relevés de hauteurs faites à l'échelle hydrométrique la plus voisine s'étendant sur plusieurs années et de relevés spéciaux aux plus grandes crues observées et de la courbe de jaugeage du cours d'eau rapportée à cette même échelle d'observation.

Une fois cette capacité arrêtée, on peut déterminer la ligne du débit d'étiage amélioré que l'on peut espérer entretenir avec la réserve, en comblant les vides laissés sur les graphiques annuels entre la ligne horizontale représentant le débit d'étiage amélioré et les débits d'étiage naturels. Plus ce débit amélioré se rapprochera du débit moyen des basses eaux, plus la situation sera satisfaisante. Comme ouvrages régulateurs indispensables, on recourera à un déversoir capable d'écouler le débit maximum des grandes crues qui peuvent survenir pendant la période où le réservoir est plein et un ouvrage de prise d'eau suffisant pour écouler, dans la situation la plus favorable du plan d'eau, le débit d'étiage amélioré et le débit moyen réservé de la période de basses eaux.

Si l'on s'impose, en vue de la sécurité, la condition de ne pas faire de manœuvres sous une charge d'eau supérieure à 15 mètres, comme limite supérieure, il y aura lieu de recourir à un système de vannes étagées, si faible que soit le débit moyen réservé de la période des basses eaux.

Le mieux est de prévoir des engins de réglage des débits sur les déversoirs aussi, en prévoyance des débits des crues, et cela à l'effet de limiter dans des conditions acceptables la hauteur de la lame déversante.

Au point de vue de la mise en valeur des ressources hydrauliques de régions étendues, on peut concevoir la création de réservoirs, les plus grands possibles avec déversoirs manœuvrés et réglementés au point de vue de leur fonctionnement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces réservoirs pourraient servir à la régularisation des crues dans un domaine fort étendu.

On pourrait ainsi annexer au réservoir d'étiage un réservoir de crue d'une capacité plus ou moins grande. De même qu'il serait possible d'adjoindre à tout réservoir de crue un petit réservoir d'étiage constitué par ses parties les plus basses.

L'utilisation d'une chute d'eau serait évidemment complète si la puissance absorbée était constamment égale à la puissance maximum journalière qu'elle peut produire, autrement dit si, pour la puissance constante de ladite chute, on avait une puissance absorbée également constante. Mais il n'en est pas ainsi, et la majeure partie du temps on a une fraction seule de la puissance absorbée. Dans une chute ordinaire, que les turbines tournent ou soient en repos, l'eau coule sans cesse, et, si les récepteurs hydrauliques chôment, la puissance inutilisée est immédiatement perdue ; avec un réservoir, la mise en chômage temporaire de la totalité ou de la partie de la force motrice peut se faire par un simple appel téléphonique au garde-vannes qui réduit ou interrompt l'écoulement du réservoir. Ce dernier emmagasine la puissance pendant les arrêts pour la restituer pendant la période de marche.

On peut de cette façon, à l'usine, mettre en service le nombre de groupes de machines qui correspondent à la consommation au moment considéré. Alors intervient le rôle de volant du réservoir, lequel emmagasine l'eau destinée aux groupes en repos et la restitue ultérieurement et en temps opportun, de telle sorte qu'aucune parcelle de la puissance disponible ne soit perdue et quelles que soient les variations du régime d'utilisation.

La capacité du réservoir doit être suffisante pour permettre une réserve de l'eau au moment où la charge est très faible, et son utilisation lorsqu'elle est très forte. Elle peut être absorbée de jour et emmagasinée de nuit. On doit toujours prévoir l'installation d'un bassin de secours quand sa construction n'est pas trop dispendieuse.

Il est à recommander de placer le réservoir à l'extrémité du canal d'amenée, afin de construire ce canal pour la puissance moyenne et non pour la puissance maximum. Les dimensions du réservoir dépendent, à hauteur de chute égale, du diagramme de consommation de l'usine. Les réservoirs ont les dimensions plus petites dans les endroits où les périodes d'accumulation et d'emploi (charge et décharge) se succèdent rapidement, où les maxima et minima alternent fréquemment comme dans le cas d'une installation pour traction. Un grand réservoir est nécessaire dans le cas où une grande quantité d'énergie doit être produite pendant un temps relativement long, et qu'ensuite on a des périodes de fourniture faible d'énergie très longues (par exemple pour le cas d'une utilisation de dix heures sur vingt-quatre).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour des chutes importantes, les dimensions des bassins sont relativement faibles et peu coûteuses si l'on tient compte des avantages énormes produits. A l'aide des diagrammes, on calcule les dimensions des réservoirs et généralement ces dimensions sont beaucoup plus faibles qu'on ne l'aurait prévu, car, dans le diagramme, les surfaces positives et négatives qui se succèdent s'équilibrent fréquemment et n'entrent pas en ligne de compte.

Ainsi, par exemple, le volume d'un réservoir de retenue permettant l'exploitation d'une usine utilisant une puissance de 3.680 kilowatts pendant dix heures au moyen d'une chute d'une puissance de 900 kilowatts serait :

Avec une différence de niveau de	300	mètres, de :	7.700	mètres cubes	
—	—	200	—	11.500	—
—	—	100	—	23.000	—

On voit donc que de tels réservoirs nécessaires pour des installations importantes n'ont pas des dimensions exagérées et qu'il serait facile de les construire au moyen de barrages, de murs, etc.

Lorsqu'on veut assurer à un cours d'eau un régime constant, connaissant la courbe annuelle du débit d'une rivière, la capacité à donner au réservoir pour régulariser ce débit peut s'obtenir à l'aide de calculs et de graphiques très simples, comme l'indique M. l'Ingénieur en chef Malterre.

Soient (*fig.* 50) m, n, p, une courbe de débit annuel ; m, p, la ligne correspondant au débit constant ; A_1, A_2, A_3, les cubes des excédents ; B_1, B_2, B_3, les cubes des insuffisances ; la capacité du réservoir est :

$$C = A_1 + (A_2 - B_1 + A_3 - B_2 + \ldots\ldots),$$

étant entendu que les différences successives, $A_2 - B_1$, $A_2 - B_1 + A_3 - B_2$ ne s'ajoutent au terme principal A_1 qu'autant qu'elles sont positives. Un autre graphique plus élégant et d'une application plus commode a été employé dans le Service du Chemin de fer transpyrénéen d'Ax à Puigcerda, pour étudier l'emmagasinement à prévoir au lac Lanoux. Il a été introduit dans ce service par M. l'Ingénieur Pendaries.

On porte sur des ordonnées successives les débits totaux mensuels (ou journaliers) en ayant soin de les cumuler. Le débit total d'une année est égal à $b\beta$ et le débit moyen réalisable pendant toute l'année est $\frac{b\beta}{a\beta}$. La capacité à donner au réservoir pour obtenir ce débit moyen est représentée par l'ordonnée Cc_1.

De même, pour obtenir la régularisation du débit moyen $\frac{a\varphi}{af}$ de n années, il faut disposer d'un réservoir dont la capacité soit égale à la plus grande des ordonnées Dd_1, Ee_1, etc...

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette construction se prête très bien, non seulement à la recherche de la capacité d'un ouvrage à créer, mais encore à l'étude de l'utilisation d'un réservoir existant renfermant un emmagasinement d'eau donné. Il suffit de porter sur les ordonnées *f* et *b* des longueurs *fm* et *bn* égales à

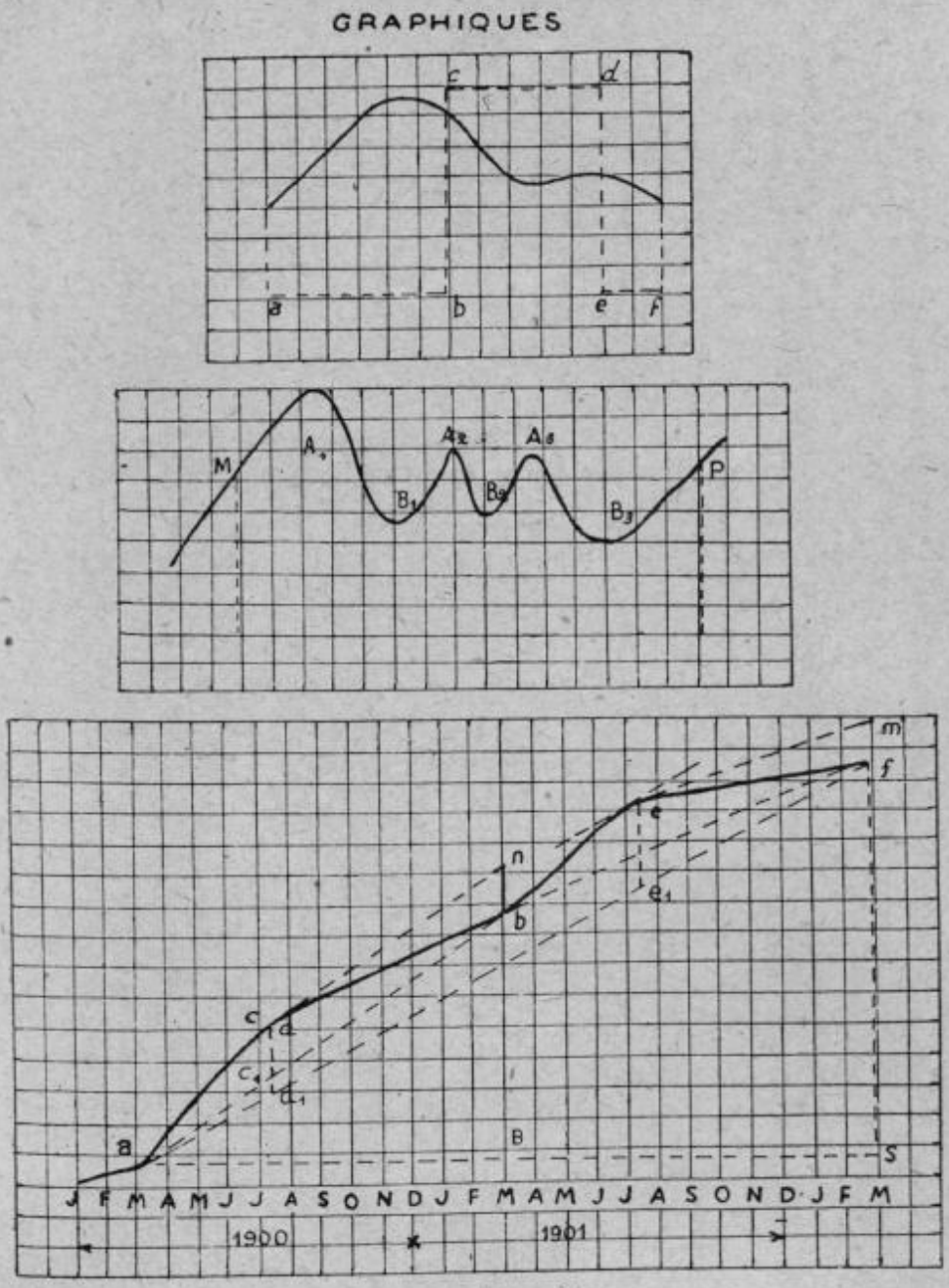


FIG. 50.

cette réserve, et de tracer par les points *m* et *n* des tangentes aux courbes des années précédentes ; on détermine ainsi l'inclinaison de la ligne, qui donne la consommation réalisable pendant les périodes d'étiage. Il faut, en outre, s'assurer en traçant les lignes de consommation partant des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

points *a* et *b* et parallèles à ces tangentes que l'apport du cours d'eau suffit pour emplir le réservoir.

On peut avoir une première approximation des réservoirs utilisables à une haute altitude en faisant usage du coefficient de régularisation tiré des hauteurs de pluie mensuelles. Ainsi dans le bassin méditerranéen ce coefficient peut être pris égal à 33 ou 35 0/0 et pour les Pyrénées centrales à 42 0/0.

23. Régularisation des cours d'eau au moyen de la puissance totale que l'on peut en tirer ainsi que de ses affluents. — Cette méthode, préconisée par MM. Edoux et Causse (1) à la suite de leurs beaux travaux hydrologiques de la vallée d'Aure, mérite l'attention des ingénieurs qui ont à étudier des captations hydrauliques. Ils estiment ainsi que par un choix judicieux et une étude rationnelle des chutes possibles d'une région, on peut avec un cube de réserves donné avoir un effet de régularisation plus marqué que par la méthode suivie jusqu'à ce jour, c'est-à-dire par la régularisation du débit du cours d'eau.

Pour bien se pénétrer de cette méthode, il convient de signaler l'exemple typique qu'ils en donnent en appliquant le problème à l'étude hydraulique de la haute vallée d'Ossau (Basses-Pyrénées). L'étude hydrologique des bassins versants leur ayant permis de calculer, pour chaque mois, le débit moyen par seconde et par kilomètre carré ainsi que le débit total moyen correspondant au bassin versant de chaque usine, le choix de celles-ci déterminé, par une étude préalable, ils multiplient ces résultats par la hauteur nette de l'usine correspondante, obtenant ainsi pour chaque mois la puissance moyenne que chacune des deux usines intermédiaire et inférieure (dans le cas de trois usines en échelon sur le même cours d'eau) est susceptible de fournir de façon continue pendant vingt-quatre heures et qui est dénommée : *puissance moyenne continue*.

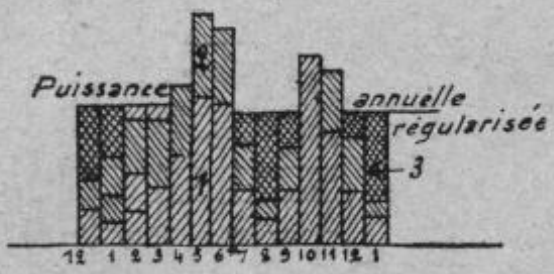


FIG. 51.

1. — Puissance due au débit naturel du cours d'eau dans l'usine inférieure.
2. — Puissance due au débit naturel du cours d'eau dans l'usine intermédiaire.
3. — Puissance due au débit de l'appareil régulateur dans les trois usines.

Ensuite on construit une courbe (*fig.* 51) ayant mois par mois pour ordonnée la somme des puissances moyennes de ces deux usines et, une fois en possession de cette courbe, on cherche quelle ordonnée il convient

(1) *Revue générale d'Électricité*, tome II, n° 22.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de donner à l'horizontale figurative de la puissance annuelle régularisée, pour que les vides restant entre elle et la courbe définie ci-dessus puissent être comblés, mois par mois, par la puissance fournie par le débit de l'appareil régulateur (lac ou réservoir) tombant d'une hauteur représentant la somme des hauteurs de chute nettes des trois usines considérées (pour le cas qui nous occupe).

Ayant tracé une première horizontale avec une ordonnée approchée quelconque, on mesure mois par mois, à l'échelle, par la différence entre l'ordonnée de la courbe et l'ordonnée de la droite, la puissance que l'émissaire du réservoir devra fournir; on en déduit le cube total qui serait mensuellement nécessaire pour assurer ce débit de façon continue et on construit mois par mois (*fig.* 52) la courbe des débits cumulés de l'émissaire du réservoir, appelée *courbe de consommation* par opposition à la *courbe des débits cumulés* du bassin versant.

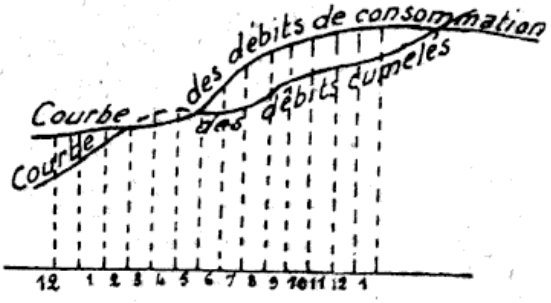


FIG. 52.

La courbe des débits cumulés MNPQ (*fig.* 53) est celle dont l'ordonnée en chaque point est définie en fonction du temps et du débit instantané Q par l'expression :

$$y = \int_{t_0}^{t} Q dt.$$

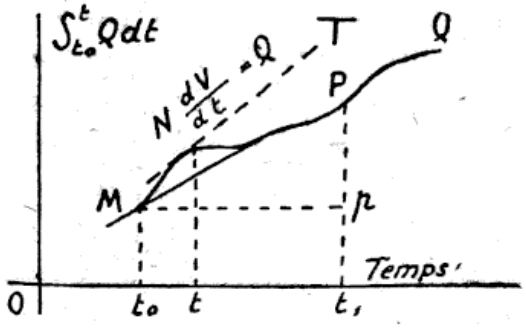


FIG. 53.

c'est-à-dire qu'une ordonnée quelconque Pp de cette courbe présente, à l'échelle adoptée, le volume total de l'eau passé entre les temps t_0 et t_1 au point où ont été mesurés les débits.

Le débit moyen entre deux instants t_0 et t_1 s'obtient en prenant le coefficient angulaire $\frac{Pp}{t_1 - t_0}$ de la droite MP.

En admettant qu'on parte du réservoir plein (soit à la fin de la période de la fonte des neiges), l'origine de la courbe de consommation se trouve au-dessous de la courbe des apports cumulés, à une distance représentant à l'échelle adoptée pour les ordonnées, la capacité du réservoir que l'on s'est fixée.

Selon la position respective de ces deux courbes, on déplace par approximations successives l'horizontale définie plus haut jusqu'à ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que, pendant toute la période sur laquelle porte l'étude de la conjugaison, la courbe de consommation correspondante se rapproche le plus possible par ses points hauts de la courbe des apports, sans jamais la couper. L'ordonnée de l'horizontale définitive mesure alors à l'échelle la puissance moyenne annuelle continue que l'ensemble des usines est susceptible de fournir, et l'approximation est d'autant plus grande que l'étude porte sur un plus grand nombre d'années. On peut suivre alors mois par mois, par simple inspection de ces courbes de débit, la quantité d'eau emmagasinée dans le réservoir, puisque cette quantité est figurée par la différence des ordonnées de deux courbes. Lorsque cette différence est nulle, c'est que le réservoir est vide ; si la courbe de consommation coupe la courbe des apports pour passer au-dessus, c'est que les apports du bassin sont insuffisants pour assurer le régime figuré par la courbe de consommation ; enfin, s'il existe entre les deux courbes une distance supérieure à la capacité du réservoir, cette situation indique que le lac déverse, et que l'on perd ainsi, au moins pour l'usine haute, une quantité d'eau que l'on peut immédiatement déterminer par la différence entre cette distance et la hauteur représentant la capacité du réservoir.

Pour la meilleure solution du problème, c'est-à-dire pour pouvoir établir avec quelque certitude les graphiques de conjugaison, il y a lieu de faire porter l'étude sur une période aussi longue que possible.

En remarquant que la puissance complémentaire fournie par le débit du réservoir se répartit mois par mois entre les trois usines proportionnellement à la hauteur de chute de chacune d'elles, on peut dresser la courbe figurative de la puissance moyenne mensuelle continue relative à chaque mois en ayant soin de distinguer par des hachures la part de cette puissance qui est due au débit de l'émissaire du lac. On détermine ensuite, par la simple considération du graphique des puissances, la puissance moyenne de chaque usine.

Il ne reste plus ensuite qu'à fixer la puissance d'armement qui dépend uniquement du rapport que l'on est tenu d'adopter entre la puissance moyenne et la puissance en pointes que le groupe d'usines doit être susceptible de fournir.

Disons enfin que ce mode de régularisation permet d'obtenir, d'une façon constante, pendant toute l'année, une puissance sensiblement supérieure à celle qui correspondrait au débit de six mois.

III. — SERVICES D'ÉVALUATION DES FORCES HYDRAULIQUES

24. Service des Grandes Forces hydrauliques en France. — Nous complétons ici les premiers renseignements fournis au paragraphe 17, concernant cet important service. Par arrêté en date du 25 mars 1903, M. le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ministre de l'Agriculture a confié à MM. René Tavernier et R. de la Brosse la mission spéciale d'organiser et de diriger le Service d'études de nos forces hydrauliques dans les Alpes. Cette mission a été étendue aux Pyrénées par décret du 19 février 1909. Ces études ont pour but final l'évaluation des Grandes Forces hydrauliques, aménagées ou susceptibles de l'être. La région alpestre est définie par l'étendue comprise à l'intérieur d'un quadrilatère limité, au nord, par le lac de Genève et le Rhône, au sud, par la mer Méditerranée et, à l'est, par les frontières de Suisse et d'Italie. Cette surface embrasse la totalité ou une partie du territoire des dix départements, Haute-Savoie, Savoie, Isère, Drôme, Hautes-Alpes, Basses-Alpes, Vaucluse, Bouches-du-Rhône, Var, Alpes-Maritimes, dont l'étendue globale est de 567 myriamètres carrés. Elle comprend les bassins de 37 cours d'eau, dont 8 se jettent dans la Méditerranée, les autres étant des affluents du Rhône.

Les relevés des jaugeages donnent pour chaque station les cotes et les débits par seconde pour chaque jour d'une année ; la courbe de régime pour la conversion des côtes en débits ; les résultats mensuels ; les débits maxima, moyen et minima de l'année ainsi que leurs rapports et leurs valeurs par kilomètre carré du bassin versant ; les résultats spéciaux à l'hiver ; le nombre de jours où les hauteurs et débits ont été compris entre certaines limites ; les caractéristiques de la station. Le rapport $\frac{M}{m}$ entre le débit maximum M et le débit minimum m est celui qui caractérise le mieux l'irrégularité du cours d'eau, qu'on peut appeler *écart de débit*, pour l'année considérée. Les chiffres de cet écart sont reproduits avec ceux du débit minimum pour un certain nombre de stations des Alpes et du bassin de la Garonne.

Ces écarts de débit sont extrêmement divers d'une station à l'autre et pour une même station d'une année à l'autre ; ils sont d'autant plus considérables que le bassin est plus petit.

On doit compléter ces données par l'étude des variations glaciaires, l'évaluation des cultures, des relations qui existent entre ces variations annuelles et tous les éléments qui peuvent influer sur leurs amplitudes et leurs évolutions.

Il faut donc que ce service s'étende à tous les cours d'eau de France et que tous les propriétaires de chutes d'eau établissent des stations de jaugeage permanentes soit dans le canal de fuite, soit dans les canaux d'amenée.

Pour constituer ce service, les chefs de la mission ont fait appel aux commissions départementales météorologiques, aux services d'annonces des crues, aux services géologique, géographique de l'armée, du nivellement général de la France, des mines, des forêts, à la Commission des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

glaciers, aux syndicats d'irrigation, aux industriels exploitant des usines hydrauliques, etc.

Actuellement, le service du nivellement général de la France poursuit dans les vallées alpestres la pose de nombreux repères, au moyen desquels on pourra calculer la pente des différents tronçons des cours d'eau et déterminer les cotes des zéros des échelles de stations.

Les limites de ces nivellements en altitude sont poussées, dans les principales vallées, jusqu'aux cols principaux des lignes de partage ; dans les vallées latérales, jusqu'aux moraines glaciaires, là où il existe des glaciers, jusqu'aux lacs ou aux emplacements de réservoirs, là où il s'en rencontre.

A ce moment, plus de 2.000 kilomètres de vallées ont fait l'objet de nivellements spéciaux et, par le soin de ce service, des repères ont été scellés sur les bords immédiats des rives, soit dans les rochers, soit dans les constructions existantes, à tous les confluents, prises d'eau, ouvrages d'art, ainsi qu'à tous les points intéressants accessibles, tels que chutes naturelles, changements brusques de pente, etc. Les nouveaux repères ont été multipliés suffisamment pour que la détermination d'une cote en un point intermédiaire puisse désormais se faire avec des appareils sommaires, tels qu'un niveau de poche. Les nivellements seront poursuivis jusqu'à ce que des repères aient été posés le long de toutes les vallées alpines et dans tous les points où cette opération sera jugée utile.

On se propose de tirer parti de ces repères pour dresser le profil en long des cours d'eau, en vue de l'évaluation de leur puissance hydraulique. Dans ce but on mesure, sur les cartes à grande échelle de la région, la longueur de chaque cours d'eau ou tronçon de cours d'eau en suivant la direction générale du lit majeur et sans tenir compte des divagations du lit mineur, qu'on constate dans certaines rivières à lit de gravier, parfois très larges, la Durance notamment. Dans ce dernier cas on a décidé, en principe, de reporter les profils en long à l'axe du champ de gravier. On dresse une sorte d'itinéraire indiquant des points remarquables où il y a lieu de relever des cotes. Muni de cet itinéraire, un opérateur rattache sur le terrain, par les procédés les plus rapides, les points susdits aux repères voisins. Il relève pour chacun de ces points la cote du niveau de l'eau ; et dans la mesure du possible, celle des berges insubmersibles et du point le plus bas du lit ; il note également la largeur des cours d'eau, ainsi que le jour et l'heure de l'observation. Avant d'utiliser les renseignements fournis par les opérateurs pour dresser le profil en long, il convient de corriger les niveaux d'eau en tenant compte des observations continues faites aux échelles des stations voisines, de manière que le profil en long soit dressé dans son entier pour un même état d'eau, pour un état moyen, par exemple.

Pour pouvoir établir le profil en long d'un cours d'eau, il faut connaître,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

non seulement les dénivellations des points saillants successifs de ce profil, mais encore les distances de ces points, prise à l'origine des longueurs, prise à l'embouchure du cours d'eau.

Dans les premiers temps, en vue d'assurer l'homogénéité du travail, le

FIG. 54.

service d'études des Grandes Forces hydrauliques avait demandé que la carte d'état major fût exclusivement utilisée pour la mesure des longueurs. Les distances indiquées sur les profils étaient, par suite, entachées des erreurs inhérentes à la carte, augmentées de celles commises par l'opérateur dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le report, à vue, des points nivelés. Mais cette façon de faire, qui pouvait convenir pour les grands cours d'eau de plaine, offrait des inconvénients pour les cours d'eau de montagne où en se basant uniquement sur les données planimétriques de la carte on pouvait commettre de graves erreurs.

Aussi a-t-on résolu de faire état des longueurs mesurées par les opérateurs.

Quel que soit d'ailleurs le mode d'évaluation des distances, tous les profils sont corrects au point de vue qui est essentiel, celui de « l'évaluation des puissances hydrauliques ».

Le tableau ci-après donne l'état d'avancement des nivellements de vallées et de profils des torrents et la carte (*fig.* 54) indique les profils relevés au 31 décembre 1916 dans la région des Alpes.

TABLEAU DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DES NIVELLEMENNTS DE VALLÉES ET DES PROFILS DE TORRENTS

RÉGION DES ALPES	BASSINS							
	MORGE	ARVE	ISÈRE	DURANCE	ARGENS SIAGNE LOUP	VAR	ROYA	ENSEMBLE
I. NIVELLEMENTS DE VALLÉES	km.	km.	km.	km.	km.	km.	km.	km.
exécutés de 1904 à 1912 inclus	»	60	1 800	617	132	273	50	2 931
exécutés en 1913 et 1914.....	6	150	130	32	»	»	»	318
TOTAL au 31 décembre 1916..	6	210	1 930	649	132	273	50	3 249
II. PROFILS EN LONG								
a) relevés de 1906 à 1912 inclus.	»	128	1 178	1 166	»	406	41	2 919
a) relevés en 1913 et 1914.....	5	229	246	»	»	»	»	480
TOTAL au 31 décembre 1916..	5	357	1 424	1 166	»	406	41	3 399
b) dessinés de 1906 à 1912 inclus.	»	31	1 240	1 166	»	377	39	2 853
b) dessinés en 1913 et 1914.....	»	160	»	»	»	9	2	171
TOTAL au 31 décembre 1916...	»	191	1 240	1 166	»	386	41	3 024
c) publiés en 1910 et 1912.....	»	»	1 196	297	»	»	»	1 493
c) publiés en 1916.....	»	»	»	965	»	»	43	1 008
TOTAL au 31 décembre 1916...	»	»	1 196	1 262	»	»	43	2 501

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En outre, pendant les années 1913 et 1914, le service du Nivellement général de la France a exécuté 685 kilomètres de vallées dans la zone des Pyrénées, pour le compte du service des Grandes Forces hydrauliques de la région du sud-ouest.

Les profils en long relevés, accompagnés de leurs cartes, concernent pour la région des Alpes :

Les diverses sections de la Durance, des affluents de la Durance (Ubaye, Sasse, Buech, Jabron, Vaucon, Bléone, Largue, Verdon), du bassin de la Roya et de ses affluents (Cairos, Bendosa et Bévera).

Les cartes annexes des profils en long sont établies aux échelles de $\frac{1}{50\,000}$ ($0^m,02$ par kilomètre) pour les longueurs et de $\frac{1}{500}$ ($0^m,002$ par mètre pour les hauteurs. On y trouve les renseignements suivants : stations de jaugeage, échelles hydrométriques, altitudes du zéro d'une échelle hydrométrique type, repères de nivellement, altitudes des niveaux semi-permanents, emplacements des usines hydrauliques, ponts, passerelles, des confluents des rivières ou ruisseaux notables, des débouchés, des ravins, des prises d'eau. Il existe actuellement 119 planches ou cartes concernant les bassins de la Dranse, de l'Arve, du Fier, du Guiers, du Rhône, de l'Isère de la Drôme, de la Durance, du Var et de la Roya.

Le service des Grandes Forces hydrauliques en est actuellement au tome VIII (année 1917) de ses publications sur les travaux que nous venons de résumer.

La détermination des débits caractéristiques, tels que les a définis M. Tavernier (§ 7 et 8), repose sur la connaissance du débit moyen journalier, déduit des lectures hydrométriques à l'aide d'une formule dont les jaugeages ont pour objet de déterminer les coefficients.

L'étude méthodique des Grandes Forces hydrauliques entreprise par MM. Tavernier et de la Brosse a pour base l'établissement d'un certain nombre de stations permanentes de jaugeage dans les divers bassins soumis à leur investigation.

Le tableau ci-après a trait aux stations de jaugeage édifiés par le Service des Grandes Forces hydrauliques dans les bassins de l'Arve, de l'Isère, de la Durance, du Fier, des Usses, des Dranses, du Guiers, de la Bourbre, de la Drôme, du Roubion, du Lez, de l'Eygues, de la Gère, des Collières, de la Galaure, du lac du Bourget, du lac d'Annecy, de la Morge et du Trient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BASSINS COMPOSANTS — NOMS	CONTENANCE en HECTARES	STATIONS DE JAUGEAGE — NOMS	PLUVIOMÈTRES — NOMS DES STATIONS
I. — Bassin de l'Arve (Savoie)			
La Diosaz	5.495	Chamonix	Annemasse
Le Bon Nant	14.805	Servoz	Boège
Le Flain	2.960	Bonneville	Saint-Julien
Le Foron de Scionzier	4.915	Etrembières	Bonneville
Le Giffre	45.265	Marignier	Mélan
Le Bronze	2.940	Pont-des-Plaines	Sallanches
Le Borne	16.495	Pont-du-Borne	Chamonix
Le Foron de la Roche	4.420	Bonne	Samoens
Le Foron de Reignier	2.535	Sixt	
Le Viaison	3.225	St-Julien	
La Ménoge	15.980		
Le Foron de Juvigny	4.160		
L'Aire	9.386		
Le Seimaz	3.825		
Ensemble pour le bassin de l'Arve	208.000		
II. — Bassin de l'Isère			
R. de la Calabourdane	4.715	Bourg St-Maurice (l'Isère)	
Lac de Tignes	2.977	Moutiers (l'Isère)	
R. de Sassières	2.170	Rhonnaz (l'Isère)	
Nant Cruet	1.561	Montmélian (l'Isère)	
Nant de St-Claude	4.799	Sône (l'Isère)	
Torrent du Moulins	1.788	Sône (l'Isère)	
Nant de Pisse Vieille	1.612	Moutiers (le Doron de Bozel)	
R. du Reclus	2.350		
Torrent des Glaciers	13.227	Albertville (l'Arly)	
Ponturin	9.251	Ugines (la Chaize)	
Vallon des Frasses	2.399	La Pierre (le Doron de Beaufort)	
R. d'Ormente	4.625		
Doron de Bozel	66.789	Termignon (le Doron de Termignon)	
R. de Maret	3.448		
R. de Celliers	5.584	Termignon (l'Arc)	
R. de Grande-Maison	3.090	Hermillon (l'Arc)	
R. de Bénétan	2.364	Aiguebelle (l'Arc)	
L'Arly	64.798	Aubessagnes (le Drac)	
R. du Bayet	1.862	Ponsonnas (le Drac)	
L'Arc	195.650	Pont-de-Claix (le Drac)	
Gelou	12.313	La Trinité (la Séveraisse)	
Le Bréda	22.608	Pont-Vieux (la Malossane)	
R. de Tenein	3.699		
R. de Lumbin	863	Pont-Haut (la Bonne)	
R. de Froges	1.585	Pont-Haut (la Roizonne)	
R. de Brignoud	3.225	La Mure (la Jonche)	
R. de Vorz	3.396	Villard (la Romanche)	
R. de San-Pancrasse	742	Grand-Clot (la Romanche)	
R. de Lancey	1.865		
Doménou	4.494	Bourg d'Oisans (la Romanche)	
Drac	355.619		
Furon	7.717	Puy-Colèfre (le Morian)	
Vence	7.036	Fréaux (le Guâ)	
Roize	1.646	Bourg-d'Arud (le Vénéon)	
Fures	10.578	La Pernière (l'Eau d'Olle)	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BASSINS COMPOSANTS — NOMS	CONTENANCE en HECTARES	STATIONS DE JAUGEAGE — NOMS	PLUVIOMÈTRES — NOMS DES STATIONS
II. — Bassin de l'Isère (*suite*)			
Drevenne	2.602	St-Jean-en-Royans (la Lyonne)	
R. de Malleval	1.759	St-Jean-en-Royans (le Cholet)	
Tiery	4.160	Tignes (l'Isère)	
R. de Vezy	1.622	Montrigou (l'Isère)	
La Bourne	82.640	Sillard (l'Isère)	
R. du Furaud	11.004	Bessans (l'Avérola)	
Joyeuse	4.604	Corbières (le Drac)	
Savasse	5.464	Chazeaux (Romanche)	
Herbasse	18.531	Bourg-d'Oisans (la Rive)	
Ensemble du bassin de l'Isère	1.179.965	Pont-Rouillard (la Bourne	
		Foulons (la Vermaison)	
III. — Bassin de la Durance			
La Clairée	19.279	Plampinet (la Clairée)	
La Guisanne	20.218	Briançon (la Durance)	
La Cerveyrette	11.750	Monetier (la Guisane)	
La Gyronde	24.074	Briançon (la Guisane)	
Le Fournel	5.145	Briançon (la Cerveyrette)	
La Biaisse	10.266	Vallouise (l'Onde)	
Le Guil	72.467	Vallouise (le Gir)	
Le Crévoux	6.508	La Bessée (la Gyronde)	
Torrent des Vachères	9.896	La Bessée (la Durance)	
L'Ubaye	100.561	Plan des Léothauds (le Fournel)	
Le Rabioux	16.243	Freyssinière (la Biaisse)	
La Luye	12.665	Montdauphin (la Durance)	
Le Sasse	32.324	Abriès (le Bouchet)	
Le Buech	148.529	Abriès (le Guil)	
Le Jabron	20.334	Ville-Vieille (l'Aygue-Blanche)	
Le Vançon	16.605	Ville-Vieille (le Guil)	
La Bléone	90.824	Pont-la-Pierre (le Cristillan)	
Le Rancure	9.530	Guillestre (le Chagne)	
L'Asse	65.796	Montdauphin (le Guil)	
Le Largue	37.359	Les Bourillons (le Crévoux)	
Le Verdon	221.799	Embrun (la Durance)	
R. de St-Baschi	10.047	Baratier (les Vachères)	
La Lèze	16.457	Gleyzolles (l'Ubayette)	
La Merderie	6.595	La Condamine (l'Ubaye)	
L'Aiguebrun	8.637	Barcelonnette (l'Ubaye)	
Le Coulon	97.585	Uvernet (le Bachelard)	
Surface de la Durance jusqu'a Mirabeau	1.191.749	Moulin du Lauzet (l'Ubaye)	
Surface de la Durance jusqu'au confluent	1.422.646	Ubaye (l'Ubaye)	
		Pont de Rousset (la Durance)	
		Pont de Rousset (la Blanche)	
		Nibles (le Sasse)	
		Veynes (Petit-Buech)	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BASSINS COMPOSANTS — NOMS	CONTENANCE en HECTARES	STATIONS DE JAUGEAGE — NOMS	PLUVIOMETRES — NOMS DES STATIONS
III. — Bassin de la Durance (*suite*)			
		St-Julien-en-Bauchène (Grand-Buech)	
		Serres (Grand-Buech)	
		Sisteron (Grand-Buech)	
		Sisteron (la Durance)	
		Sisteron (le Jabron)	
		Sourribes (le Vançon)	
		Barles (le Bès)	
		Blégiers (la Bléone)	
		Digne (la Bléone)	
		La Brillanne (la Durance)	
		Barème (l'Asse de Clumane)	
		Barème (l'Asse de Blieux)	
		Cluse de Chabrières (l'Asse)	
		Volx (le Largue)	
		Allos (le Verdon)	
		Allos (le Chadoulin)	
		Colmars (le Verdon)	
		Villars-Colmars (T. de Chasse)	
		Saint-André (l'Issole)	
		Saint-André (le Verdon)	
		Castellane (le Verdon)	
		Castellane (le Verdon)	
		Quinson (le Verdon)	
		Gréoux (le Verdon)	
		Mirabeau (la Durance)	
IV. — Bassin du Fier (138.559 hectares)			
		Val de Fier	
Lac d'Annecy	30.267	Villaz	Thônes
Le Nom	7.581	Brogny	Annecy
La Filière	16.580	Annecy	Alby
Le Chéran	43.261	Pont de Bange	Rumilly
		Rumilly	Le Châtelard
		Brassilly	Faverges
		Dingy	Talloires
		Verthier	
V. — Bassin des Usses (30.791 hectares)			
Les Petites Usses	3.527	Pont des Douattes	Cruseilles
Le Fornant	3.553	Frangy	Frangy
Le Croisse	792		
VI. — Bassin des Dranses (53.555 hectares)			
Dranse du Biot	20 519	Bioge	Abondance
Dranse d'Abondance	20.308	Abondance	Le Biot
Le Brévon	8.376	La Baume	Col des Gets
Dranse de Larringes	1.088	Morphoz	St Gingolph
		Pont de Charny	Thonon
		Montriond	Evian

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BASSINS COMPOSANTS — NOMS	CONTENANCE en HECTARES	STATIONS DE JAUGEAGE — NOMS	PLUVIOMÈTRES — NOMS DES STATIONS
VII. — Bassin du Guiers (6.164 hectares)			
Le Guiers Mort	16.248	Saint-Jean-Fourvoirie	St-Laurent-du-Pont
Le Guiers Vif	14.354	Entre-Deux-Guiers (2)	Pont de Beauvoisin
L'Ainan	8.317	Le Piraud	Navalaise
Le Tiers	9.655	Gué-des-Planches	
VIII. — Bassin de la Bourbre (75.502 hectares)			
L'Hien	6.549	Bourgoin	
R. d'Agny	6.259	L'Isle-d'Abeau	
R. de St-Savin	4.045	Jameyzieu	
IX. — Bassin de la Drome (164.166 hectares)			
Le Maravel	4.047	Luc	Jansac
Le Béoux	2.912	Saillans	Châtillon
Le Bez	26.896		Die
Le Meyrosse	5.641		Luc
Le Chamaloc	2.320		Crest
Le Marignac	2.204		
La Suze	7.232		
La Roanne	23.150		
Le Riousset	2.773		
La Gervanne	15.616		
La Sye	2.705		
La Grenelle	4.190		
X. — Bassin du Roubion (61.273 hectares)			
Le Soubriou	2.438	Bourdeaux	La Bégude-de-Mazenc
La Bine	1.909	Pont de Barret	
La Vèbre	2.675	Soyans	
La Rimandoule	2.667	Bridon	
La Lancellé	7.411		
Le Jabron	20.006		
XI. — Bassin du Lez (43.877 hectares)			
R. de la Veysanne	2.152		
R. de la Coronne	7.884		
R. de la Talobre	1.908		
R. de l'Erem	6.393		
XII. — Bassin de l'Eygues (101.000 hectares)			
L'Esclate	2.100	Pont de Rémuzat	Nyons
L'Armalaude	3.277	Pont de la Lune	Cornillon
Le Lidanne	2.538	Nyons	
L'Oude	24.546	Rémuzat	
L'Ennuyé	9.919	Curnier	
R. de Bentux	7.288	Cornillon	
R. de Sauve	2.364		

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BASSINS COMPOSANTS — NOMS	CONTENANCE en HECTARES	STATIONS DE JAUGEAGE — NOMS	PLUVIOMÈTRES — NOMS DES STATIONS
XIII. — Bassin de la Gère (38.505 hectares)			
La Vésone	18.010		
La Véga	8.750		
XIV. — Bassin des Collières (66.589 hectares)			
Les Eydoches	12.685		
Le Suzon et L'Ayetta	4.533		
XV. — Bassin de la Galaure (23.220 hectares)			
Le Grignon	2.657		
Le Galaveyson	2.684		
XVI. — Bassin du lac du Bourget (62.924 hectares)			
La Leysse	31.754	Chambéry	St-Thibaud-de-Couz
Le Tillet	4.919		Chambéry
Le Sierros	13.430		
Le Lac	4.462		
XVII. — Bassin du lac d'Annecy (30.267 hectares)			
Nan de Tamié	2.045	Annecy	Annecy
L'Eau Morte	3.712		
L'Ire	2.699		
Le Bournette	1.828		
Le Landan	3.498		
XVIII. — Bassin de la Morge			
	18.000	Saint-Gingolph	
XIX. — Bassin du Trient			
	23.000	Vallorcine	

BASSIN DE LA GARONNE

Bassins composants (superficie)	
De l'Espagne au confluent de la Pique	68.678
Bassin de la Pique	16.447
Bassin de l'One	225.934
(dont 81.805 pour le bassin de la Neste d'Aure)	
Bassin du Ger	11.851
— du Job	763.430
(dont 416.037 pour le bassin de l'Ariège).	
Ensemble	1.086.340 hectares

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BASSIN DE L'ARIÈGE

De l'Espagne au confluent du Vicdessos	71.335	
Bassin du Vicdessos	344.682	
Ensemble	417.987	hectares

BASSIN DE L'HERS

De la station de Belesta au confluent du Touyré.	42.834	
Bassin du Touyré	38.671	
— du Douctouyre	59.476	
Ensemble	140.981	hectares

BASSIN DU SALAT

De la source au confluent de l'Alet	7.990	
Bassin de l'Alet	17.896	
— du Garbet	12.017	
— de l'Arac	27.964	
— du Lez	90.985	
Ensemble	156.852	hectares

BASSIN DE LA NESTE

De la source à la station d'Arreau sur la Neste d'Aure	34.692	
Bassin de la Neste de Louron	13.754	
— du Lastrés	33.359	
Ensemble	81.805	hectares
Bassin du Lot	11.351	
— de la Baïse	296.700	
— du Gers	123.000	
— du Tarn	1.595.500	

BASSIN DE L'ADOUR

De la source au confluent de l'Adour	7.504	
Bassin de l'Adour de Gripp	10.021	
— — de Lesponne	12.033	
— — de la Gaillesse	2.516	
— du Gave d'Ossouet	371.235	
— de la Midouze	1.059.662	
— de la Bidouze	210.361	
Ensemble	1.673.292	hectares

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BASSIN DE LA NIVE

Bassin de la Nive de Becheroy	11.712	
— — d'Arneguy	9.607	
— — de Laurhibar	18.112	
— des Aldudes	19.972	
Du confluent de la Nive au confluent de l'Adour.	39.247	
Ensemble	98.650	hectares
(dont 12.174 sur le territoire espagnol)		

BASSIN DU GAVE DE PAU

Bassin du Gave de Heas	8.578	
— — de Gavarnie	21.106	
— — de Cauteret	22.050	
— — d'Azun	11.457	
— — d'Estaing	17.218	
— — du Neez	19.807	
— — de l'Ouzom	154 207	
— — d'Oloron	261.499	
— du Bastan	18.939	
Ensemble	534.861	hectares

BASSIN DU SAISON

Bassin du Gave de Larreau	11.051	
— — de St-Engrace	50.838	
Ensemble	61.889	hectares

BASSIN DU GAVE D'ASPRE

De la source au confluent de Lescun	15.639	
Bassin du Gave de Lescun	16.102	
— — d'Aydins	13.620	
— — de Brousset	5.327	
— — de Bious	9.966	
— — du Soussouniou	25.980	
— de Lourdios	6.227	
Ensemble	92.851	hectares

Dans le bassin de la Garonne les débits caractéristiques d'étiage oscillent autour de 8 litres à la seconde par kilomètre carré du bassin versant et les débits caractéristiques moyens, autour de 25 litres. Dans le bassin de l'Adour, les valeurs de 8 litres et 25 litres semblent être plutôt des minima que des moyennes; ainsi les cours d'eau pyrénéens paraissent, à égalité de surface de bassin, mieux alimentés que les cours d'eau des Alpes provençales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU DES DÉBITS

BASSINS	DÉBITS D'ÉTIAGE en mètres cubes	DÉBIT MOYEN sn mètres cubes	DÉBIT en litres par kilomètre carré — (DÉBIT D'ÉTIAGE)
I. — BASSIN DE LA HAUTE-GARONNE			
Garonne à Toulouse	36		3,6
— à Muret	33,857	102,818	6,38
— en aval du Tarn	48		1,5
— en aval du Lot	75		1,5
— à Saint-Béat			11,59
Ariège à Lacroix-Falgarade			4,2
— à Foix	10,056	46,938	7,4
Salat	12,471	39,079	8,7
La Lez à Saint-Girons	4,614	8,484	11,1
— à Valentin	18,310	68,943	8,23
La Pique à Cier de Luchon	3,860	8,326	12,89
L'Arget à Foix	0,580		
Le Tarn	25		1,6
Le Gers	1		0,8
Baïse	2		0,7
Le Lot	20		1,8
II. — BASSIN DE L'ADOUR			
Gave de Bious (St. de Bious)	0,150	0,738	7,5
Gave de Brousset (St. de Camps)	0,425	1,408	9,2
Le Néez (St. de Saint-Créac)	0,503	1,559	8,02
Gave d'Arrens (St. d'Arrens)	1,040	3,142	13,12
Gave d'Estaing (St. de Bun)	0,756	2,033	10,14
Gave de Gavarnic (St. de Saint-Sauveur)	3,130	10,200	10,54
Gave de Pau (St. de Jurançon)	11,500	56,000	6,5

TABLEAU DES DÉBITS MENSUELS MOYENS DE LA GARONNE (ANNÉE 1909) ET DE L'ARIÈGE (ANNÉE 1910)

MOIS	GARONNE STATION DE TOULOUSE	ARIÈGE STATION DE FOIX
	m. c.	m. c.
Janvier		16,581
Février	211,516	43,421
Mars	100,02	52,590
Avril	248,860	96,903
Mai	401,859	173,005
Juin	314,176	213,466
Juillet	301,548	105,746
Août	197,330	71,570
Septembre	93,934	35,416
Octobre	86,671	25,517
Novembre	63,193	86,328
Décembre	82,834	69,456

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

STATIONS DE JAUGEAGE DU BASSIN DE LA GARONNE

NUMÉROS D'ORDRE	DATES D'INSTALLATION	EMPLACEMENTS DES STATIONS	SURFACES DES BASSINS alimentant la station (*en hectares*)	MÉTHODE employée pour LES JAUGEAGES	DÉBITS CARACTÉRISTIQUES	
					d'étiage	moyens
					m. c.	m. c.
1	1909	Portet sur la Garonne.....	1.001.326	Par Moulinet .		
2	1906	Lacroix-Falgarde sur l'Ariège.	416.037	Par Moulinet.. et flotteurs...	17,011	56,228
3	1911	Mazères sur l'Hers	127.371	Par Moulinet .		
4	1911	Carla-de-Roquefort sur la Douctouyré.....	5.055	»		
5	1911	Lavelanet sur le Touyré	5.762	»		
6	1911	Belesta sur l'Hers.....	20.124	»		
7	1911	Saverdun sur l'Ariège.....	179.392	»		
8	1906	Foix sur l'Ariège	134.106	Par Moulinet et flotteurs..	10,056	46,938
9	1906	Foix sur l'Arget	11.509	Par Moulinet .	0,584	1,562
10	1906	Arignac sur le ruisseau de Saurat	5.588	»		
11	1909	Tarascon sur l'Ariège	106.990	»		
12	1909	Sabart sur le Vicdessos.....	35.635	»		
13	1909	La Ramade sur le ruisseau de Siguer.....	8.081	»		
14	1906	Vicdessos sur le Vicdessos.....	21.041	»		
15	1906	Château-Verdun sur l'Aston..	16.223	»		
16	1906	Esquiroulet sur l'Ariège	31.116	»		
17	1906	Ax-les-Termes sur la Lauze ..	5.360	»		
18	1906	Ax-les-Thermes sur l'Oriège ..	9.013	»		
19	1906	Mérens sur l'Ariège	10.624	»		
20	1906	Mérens sur le Nabre.....	1.841	»		
21	1906	Mérens sur le Mourguillou....	1.505	»		
22	1906	Muret sur la Garonne	5[illegible]0.914	»	33.857	102,818
23	1911	Carbonne sur la Garonne	518.940	»		
24	1911	Carbonne sur l'Arize.....	53.016	»		
25	1906	Salies-du-Salat sur le Salat ...	143.418	Par Moulinet .	12,471	39,079
26	1909	Saint-Girons aval sur le Salat..	107.390	»		
27	1909	Saint-Girons sur le Lez.....	41.523	»	5,037	8,659
28	»	Engomer sur le Lez.....	36.233	»		
29	»	Audressein sur la Bouïgane...	11.088	»		
30	»	Castillon sur le Lez	21.875	»		
31	»	Bordes sur le Balamet	2.688	»		
32	»	Bordes sur le Riberot.....	5.022	»		
33	»	Orle sur l'Orle.....	2.928	»		
34	»	Bonac-Lascoux sur le Lez	8.083	»		
35	1909	Hameau du Pont sur l'Izard..	2.313	Par déversoir..	0,219	0,773
36	»	Estouéou sur le Lez	3.174	»		
37	1909	St-Girons amont sur le Salat .	65.867	Par Moulinet .	7,210	21,755
38	»	Alos sur l'Alos	2.800	»		
39	»	Kercabanac sur le Salat	56.215	»	4,700	14,800
40	»	Castet-d'Aleu sur l'Arac	15.498	»		
41	»	Bougaret sur l'Arac.	5.182	»		
42	»	Bougaret sur le Liers	4.004	»		
43	»	Ercé sur le Garbet.....	8.363	»		
44	»	Aulus sur le Fouillet	973	»		
45	»	Aulus sur le Garbet.....	1.789	Par déversoir..		
46	»	Aulus sur l'Arse	943	Par Moulinet .		
47	1909	Seix sur le Salat	22.349	»	2,952	8,458
48	»	Estours sur l'Estours.....	4.745	Par déversoir..		
49	»	Moulin-Lauga sur le Salat....	17.107	Par Moulinet .		
50	»	Ustou sur l'Alet	5.147	Par déversoir..		
51	»	Ustou sur l'Ossèze	1.973	»		
52	1909	Angouls sur l'Angouls	1.773	Par déversoir..		
53	»	Confluens sur le Salat	5.014	»		
54	,	Salau sur le Cougnets	901	»		
55	1911	Valentine sur la Garonne	222.891	Par Moulinet .	18,340	62,915

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

STATIONS DE JAUGEAGE DU BASSIN DE LA GARONNE *(Suite)*

NUMÉROS D'ORDRE	DATES D'INSTALLATION	EMPLACEMENTS DES STATIONS	SURFACES DES BASSINS alimentant la station (*en hectares*)	MÉTHODE employée pour LES JAUGEAGES	DÉBITS CARACTÉRISTIQUES d'étiage	DÉBITS CARACTÉRISTIQUES moyens
					m. c.	m. c.
56	»	Aspet sur le Ger	9.033	»		
57	»	Encausse sur le Job	12.437	»		
58	1909	Sarrancolin sur la Neste	55.499	»		
59	1909	Sarrancolin sur le Canal de dérivation	»	»		
60	1910	Jezeau sur le Lasties	2.570	»		
61	1909	Bordères sur la Neste du Louron	12.800	»		
62	»	Pont d'Estagnon sur la Neste du Louron	8.266	»		
63	1910	Loudenvielle sur le ruisseau d'Aube	1.395	Par déversoir..		
64	»	Arreau sur la Neste dAure	34.692	Par Moulinet .		
65	»	Guchen sur le Lavedan	3.316	Par déversoir..		
66	»	Bourisp sur le ruisseau de Mousquères	3.919	Par Moulinet .		
67	»	Tramezaygues sur le Riomajou	6.742	Par déversoir..		
68	»	Fabian sur la Neste d'Aure	4.094	Par Moulinet .		
69	1911	Fabian sur le ruisseau de Géla	1.941	»		
70	1908	Cier de Luchon sur la Pique	29.945	Par déversoir..	3,860	8,326
71	»	Pont de Mousquère sur l'One	14.220	Par Moulinet .		
72	1911	Station du lac d'Oo sur la Neste d'Oo	2.208	»		
73	»	Pont Lapadé sur la Pique	8.059	»		
74	»	Bonneau sur le Lys	4.456	»		
75	1908	Saint-Béat sur la Garonne	67.343	»	7,775	19,791

PUISSANCE HYDRAULIQUE DE LA HAUTE-GARONNE

POINTS LIMITES DES SECTIONS	ALTITUDES des POINTS	CHUTE TOTALE	LONGUEUR des SECTIONS	PENTE moyenne par kilomètre	DÉBITS CARACTÉRISTIQUES d'étiage	DÉBITS CARACTÉRISTIQUES moyens	PUISSANCES TOTALES en chevaux d'étiage	PUISSANCES TOTALES en chevaux moyennes
Pont du Roi	574							
(Frontière d'Esp.)		100	15k	7m,00	5m3,7	19m3,2	5.700	19.200
Embt de la Pique	474							
Embt de la Neste	414	60	24	2 50	9 6	27 5	5.760	16.500
Embt du Salat	254	160	45	3 50	17 7	44 3	28.320	70.880
Embt de l'Ariège	142	112	66	1 90	31 2	114 1	34.944	127.792
							74.724	2343.72
PUISSANCE HYDRAULIQUE DE L'ARIÈGE								
Mérens	1000							
Ax-les-Thermes	780	220	10k	22m,00	1m3,0	3m3,0	2.200	6.600
Foix	380	400	50	8 00	7 5	22 5	30.000	90.000
Garonne	142	238	85	2 8	13 0	60 0	30.940	142.800
							63.140	239.400
PUISSANCE HYDRAULIQUE DU SALAT								
Couflens de Salat	880							
Saint-Girons	404	476	30k	15m,86	4m3,0	12m3,0	19.040	57.120
Garonne	254	150	77	1 94	8 0	26 0	12.000	39.000
							31.040	96.120

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces puissances, inférieures à celles de la seule Durance, paraissent devoir tenter beaucoup moins les industriels, en raison du grand nombre des anciens moulins, dont la puissance totale représente environ 30.000 chevaux.

Entre Toulouse et la mer, la puissance hydraulique de la Garonne n'a ni une grande importance, ni une grande valeur, tant à raison du faible étiage que des faibles pentes.

TABLEAU DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES DU BASSIN DE LA GARONNE

NUMÉROS D'ORDRE	EMPLACEMENTS DES STATIONS	ALTITUDES	NOMS DES BASSINS	SUPERFICIE en kilomètres carrés
1	Fos	520	Garonne.	10.013
2	Saint-Gaudens	407	id.	2.228
3	Cazères	242	id.	»
4	Muret	163	id.	5.309
5	Toulouse	194	id.	10.013
6	Arreau	698	Neste d'Aure.	347
7	Bagnères-de-Luchon	641	Pique.	299
8	Caubous	1.230	Neste d'Oueil.	»
9	Oo	980	L'Osne.	22
10	Arguenos	600	Job.	134
11	Izaut	300	id.	»
12	Juzet	591	id.	»
13	Le Fréchet	400	Garonne	»
14	Fousseret	319	Louge.	416
15	Aurignac	396	id.	»
16	Sainte-Croix	356	Volp.	137
17	Mas-d'Azil	295	Arize.	530
18	Pibrac	185	Aussonnette.	»
19	Le Faget	262	Le Girou.	»
20	L'Hospitalet	1.436	Ariège.	»
21	Mérens	1.050	id.	106
22	Ax-les-Termes (C. M.)	711	id.	311
23	id. (E. et F.)	710	id.	»
24	Les Cabannes	435	id.	162
25	Tarascon-sur-Ariège	476	id.	1.070
26	Foix (C. M.)	397	id.	1.341
27	Foix (E. N.)	433	id.	»
28	Prade	1.250	L'Hers	»
29	Fougax	600	id.	»
30	Belesta	491	id.	201
31	Chalabre	384	id.	»
32	Mirepoix	301	id.	»
33	Rieucros	282	id.	»
34	Belpech	240	id.	»
35	Marc (commune d'Auzat)	1.050	Vicdessos.	»
36	Vicdessos (C. M.)	707	id.	210
37	Vicdessos (E. et F.)	825	id.	»
38	Goulier	1.084	id.	»
39	Capoulet	620	id.	»
40	Le Bosc	750	Arget.	»
41	Le Calmill	1.200	id.	»
42	Saurat	950	Saurat.	56
43	Larcat	830	Les Nubars.	»
44	Pradières	410	Alses.	»
45	Le Fossat	239	Lèze.	»
46	Couflens (C. M.)	705	Salat.	50
47	Couflens (E. et F.)	706	id.	»
48	Seix (C. M.)	514	id.	223
49	Seix (E. et F.)	503	id.	»
50	Saint-Girons	391	id.	1.074

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES DU BASSIN DE LA GARONNE *(Suite)*

NUMÉROS D'ORDRE	EMPLACEMENTS DES STATIONS	ALTITUDES	NOMS DES BASSINS	SUPERFICIE en kilomètres carrés
51	Ustou	610	Alet.	51
52	Aulus	676	Garbet.	18
53	Massat	650	Arac.	52
54	Boussenac	962	id.	»
55	Rimont	532	Baup.	»
56	Riverenert	580	Nert.	»
57	Sentein	760	Lez.	40
58	Castillon (C. M.)	541	id.	219
59	Castillon (E. et F.)	525	id.	»
60	Moulis	470	id.	»
61	Saint-Lary	700	Bouïgane.	»
62	Orgibet	670	id.	»
63	Arien	696	Balamet.	»

STATIONS DE JAUGEAGE DU BASSIN DE L'ADOUR

NUMÉROS D'ORDRE	DATES D'INSTALLATION	EMPLACEMENTS DES STATIONS	SURFACES DES BASSINS alimentant la station (*en hectares*)	MÉTHODE employée pour LE JAUGEAGE	INSTRUMENTS EN SERVICE
1	1909	Cambo sur la Nive	85.704	Par Moulinet	Moulinet Ott n° 1189
2	1909	Saint-Étienne de Baïgorry sur la Nive des Aldudes.	15.323	»	Moulinet Ott n° 1179
3	»	St-Jean-Pied-de-Port sur la Nive de Beheroby	11.712	»	Moulinet Ott n° 1194
4	»	St-Jean -Pied -de-Port sur la Nive d'Arneguy	9.607	»	»
5	»	St-Jean-Pied-de-Port sur le Laurhibar	13.664	»	»
6	»	Ispourre sur l'Haruby	5.907	»	»
7	1909	Mauléon sur le Saison	45.761	»	Moulinet Ott n° 1184
8	»	Tardets sur le Saison	26.089	»	»
9	1909	Pont des Deux-Eaux sur le Saison	19.204	»	Moulinet Ott n° 1566
10	»	Larrau sur le Gave de Larrau	4.274	»	»
11	»	Gorges d'Holçarté sur le Gave d'Holçarté	4.705	»	»
12	»	Pont Saint-Laurent sur le Gave de St-Engrâce	6.603	»	»
13	»	Oloron sur le Gave d'Oloron	106.230	»	Moulinet Ott n° 1188
14	»	Bidos sur le Gave d'Aspe	58.730	»	»
15	»	Lourdios sur le Lourdios			
16	»	Pont d'Escot sur le Barescou	3.794	Par déversoir	»
17	»	Pont d'Escot sur le Gave d'Aspe	2.433	»	»
18	»	La Sablière sur le Gave d'Aydius	41.462	Par Moulinet	»
19	»	Pont d'Esquit sur le Gave d'Aspe	2.924	Par déversoir	Moulinet Ott n° 1185
20	»	La Cascade sur le Gave de Lescun	25.307	Par Moulinet	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

STATIONS DE JAUGEAGE DU BASSIN DE L'ADOUR *(suite)*

NUMÉROS D'ORDRE	DATES D'INSTALLATION	EMPLACEMENTS DES STATIONS	SURFACES DES BASSINS alimentant la station (*en hectares*)	MÉTHODE employée pour LE JAUGEAGE	INSTRUMENTS EN SERVICE
21	1909	Pont de Sebers sur le Gave d'Aspe	9.922	Par déversoir	»
22	»	Oloron sur le Gave d'Ossau.	47.500	Par Moulinet	»
23	»	Arudy sur le Gave d'Ossau.	42.407	»	Moulinet Ott nº 1188
24	1909	Lhey sur le Valentin	1.289	»	»
25	»	Gabas sur le Gave d'Ossau.	10.690	Par déversoir	»
26	»	Gabas sur le Gave de Bious.	4.463	Par Moulinet	»
27	1909	Bious sur le Gave de Bious.	2.016	»	»
28	»	Pont de Camps sur le Gave de Brousset	4.642	Par déversoir	»
29	»	Orthez sur le Gave de Pau.	266.388	»	»
30	1909	Artiguelouve sur le Gave de Pau	184.632	Par Moulinet	»
31	»	Arthez d'Asson sur l'Ouzom.	13.039	»	»
32	»	Ferrières sur l'Ouzom	7.303	»	Moulinet Ott nº 1187
33	»	Lourdes sur le Gave de Pau.	107.154	»	»
34	»	Saint-Créac sur le Néez	6.271	»	Moulinet Ott nº 1572
35	1908	Argelès sur le Gave d'Azun.	20.553	Par déversoir	»
36	1908	Arrens sur le Gave d'Arrens	7.923	Par Moulinet	Moulinet Ott nº 1571
37	1908	Bun sur le Gave d'Estaing.	7.453	Par déversoir	»
38	1911	Concé sur le Gave de Cauterets	4.792	»	»
39	»	Viey sur le Bastan	9.569	Par Moulinet	Moulinet Ott nº 1193
40	1909	Luz-St-Sauveur sur le Gave de Gavarnie	29.684	»	»
41	1911	Gèdre sur le Gave de Héas.	8.578	Par déversoir	»
42	»	Gavarnie sur le Gave de Gavarnie	1.787	Par Moulinet	»
43	»	Maubourguet sur l'Adour.	46.840	»	»
44	1909	Trébons sur l'Ossouet	3.210	»	Moulinet Ott.
45	1909	Pouzac sur la Gailleste	2.356	»	Moulinet Ott nº 1180
46	»	Asté sur l'Adour	28.209	»	»
47	»	Lesponne sur l'Adour de Lesponne	5.558	»	»
48	»	Pont d'Arteil sur l'Adour.	16.437	»	»
49	»	Gripp sur l'Adoue de Gripp.	4.700	»	»
50	»	Payolle sur l'Adour de Payolle	3.691	»	«
»	1899 1908	Ancienne station de Bizanos sur le Gave de Pau	»	Par flotteurs	Flotteurs.

A l'exception du poste de Cambo, les postes les plus bas sont à des altitudes compensés entre 100 et 170 mètres. La moyenne du nombre de postes par myriamètre carré est de 0,93.

Les tableaux suivants, tirés du tome II, publié par le Service d'études des Grandes Forces hydrauliques montrent l'organisation de l'admirable service dont les ingénieurs Tavernier et de la Brosse ont doté notre pays.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

I. — Première section

Planimétrie. Position des bassins par altitudes

BASSINS COMPOSANTS			DÉFINITIONS	SURFACES des BASSINS COMPOSANTS			RÉPARTITION DES SURFACES D'APRÈS LES ALTITUDES							OBSERVATION
isolés	par groupes	depuis l'origine jusques et y compris	des BASSINS COMPOSANTS	isolés	par groupes	cumulés depuis l'origine (col 3)	au-dessous de 500	de 500 à 1.000	de 1.000 à 1.500	de 1.500 à 2.000	de 2.000 à 2.500	de 2.500 à 3.000	au-dessus de 3.000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
				ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	

II. — Deuxième section

Profils en long du cours d'eau. Croquis, places et détails divers

III. — Troisième section

Observations annuelles (hydrométrie, jaugeages, etc.)

NUMÉROS D'ORDRE	DATES D'EXÉCUTION	MÉTHODES EMPLOYÉES	HAUTEURS MOYENNES		PENTES en MILLIMÈTRES			DIMENSIONS ET DONNÉES DES PROFILS DE JAUGEAGE						VITESSES CONSTATÉES			RAPPORTS			COEFFICIENTS	DÉBITS OBTENUS	DÉBITS par SECTION et par KILOMÈTRE CARRÉ de bassin	OBSERVATION
			à l'échelle de station ◐	aux repères ou échelles auxiliaires	i_d	i_g	i	l	P	p	χ	S	R	maxima v	maxima V	moyennes $U = \frac{J}{S}$	$\frac{v}{V}$	$\frac{U}{v}$	$\frac{U}{V}$	$e = \frac{U}{\sqrt{Ri}}$	J		
																					m^3	litres	

l largeur à la surface, **P profondeur maxima**, p profondeur moyenne $\left(p = \frac{S}{l}\right)$, χ périmètre mouillé, S section transversale, R rayon moyen $\left(R = \frac{S}{\chi}\right)$, v vitesse maxima à la surface, V vitesse maxima absolue, U vitesse moyenne $\left(U = \frac{J}{S}\right)$, i_d pente superficielle le long de la rive droite, i_g pente superficielle le long de la rive gauche et i pente superficielle sur l'ensemble du courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IV. — Observations pendant les années...

I. — Station de...

§ 1. — *Cotes et débits de l'année*

DATES	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE

§ 2. — *Résultats des jaugeages*

NUMÉROS D'ORDRE	DATES DES OPÉRATIONS	COTES A L'ÉCHELLE	VITESSE MOYENNE (u)	SECTION DU PROFIL	DÉBITS PAR SECONDE	NIVEAU DU FONDS MOYEN	MODE DE JAUGEAGE EMPLOYÉ	DÉBIT DU CANAL DE L'USINE	OBSERVATIONS
		m	m	m^2	m^3			m^3	

§ 3. — *Barème des débits*

COTES	DEBITS	COTES	DÉBITS	COTES	DÉBITS	COTES	DÉBITS	OBSERVATIONS
m	m^3	m	m^3	m	m^3	m	m^3	

II. — Résumé du mouvement des eaux

§ 1. — *Résultats mensuels*

SAISONS	MOIS	MOYENNES MENSUELLES	MAXIMA MENSUELS			MINIMA MENSUELS			OBSERVATIONS
			VALEURS	DATES	HEURES	VALEURS	DATES	HEURES	

§ 2. — *Résultats spéciaux pour l'hiver...*

MOIS D'HIVER	MOYENNES MENSUELLES		MAXIMA			MINIMA			OBSERVATIONS
	HAUTEURS	DÉBITS	HAUTEURS	DÉBITS	DATES	HAUTEURS	DÉBITS	DATES	

§ 3. — *Nombre de jours pendant lesquels les hauteurs et les débits ont varié entre les limites ci-dessous*

Hauteurs d'eau (h).. { de..... à.....	
Débits (q)..... { de..... à.....	
Nombre de jours dans l'année.....	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le service d'études du *Sud-Ouest*, sous la direction de M. Tavernier, inspecteur général des Ponts et Chaussées, avait fait porter tous ses efforts principalement sur les Pyrénées et les cours d'eau importants qui en descendent, et au début des hostilités, en 1914, l'étude des Forces hydrauliques du Massif Central était à peine effleuré, pour les cours d'eau tributaires de la rive droite de la Garonne.

Faute de personnel technique, le Service du Sud-Ouest et celui du Massif Central fut laissé en souffrance.

L'opinion publique, cependant, réclamait de plus en plus vivement l'utilisation et l'exploitation des ressources hydrauliques des cours d'eau du Massif Central ; les pouvoirs locaux, le Parlement lui-même, se préoccupaient de cette question, dont l'importance devenait de plus en plus capitale en présence des difficultés du ravitaillement en charbon.

D'accord avec les ministères de l'Agriculture et des Travaux publics, le ministère de l'Armement décida, en 1917, de reprendre les études interrompues par la guerre et de les étendre à l'ensemble des cours d'eau qui descendent du Massif Central.

Une décision du 22 mars 1917 confiait, à cet effet, à M. Lemoine, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, directeur des travaux de la Ville de Lille, une mission pour organiser, en liaison avec les ministères de l'Agriculture et des Travaux publics, « un service d'études des ressources hydrauliques contenues dans les cours d'eau du Plateau Central ».

Cette décision était complétée par celles du ministère de l'Agriculture du 20 avril 1917, et du ministère des Travaux publics du 26 juin suivant.

Le service fut immédiatement organisé avec du personnel mobilisé, et aussi avec le concours dévoué et précieux du personnel local des Ponts et Chaussées et du Service Vicinal qui, malgré les difficultés du moment, n'hésita pas à accepter la charge d'occupations nouvelles, très intéressantes, il est vrai, mais néanmoins absorbantes.

Il fut étendu aux départements suivants, pour la région Sud et Sud-Ouest du Massif Central :

Aveyron, Cantal, Corrèze, Dordogne, Lot, Lozère, Tarn, Tarn et-Garonne;

Aux départements ci-après :

Allier, Creuse, Indre, Loire, Haute-Loire, Puy-de-Dôme, et Haute-Vienne, pour la région Nord ;

Et enfin, au département de l'Ardèche, en ce qui touche le bassin du Rhône, rive-droite.

Dans la partie Sud et Sud-Ouest, qui avait déjà été le champ d'études faites par le Service des Études du Sud-Ouest de la France (siège à Toulouse), les installations existantes, — stations de jaugeage des débits des cours d'eau, postes d'observations des hauteurs d'eau, — furent remises en état, réorganisées et complétées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au 1er janvier 1918, 94 stations de jaugeage fonctionnaient dans cette région.

Les jaugeages déjà effectués à cette date, les observations des hauteurs d'eau faites aux échelles anciennes des Services hydrométriques et à celles installées par le Service des Forces hydrauliques, permettent déjà d'amorcer utilement l'étude générale du régime des cours d'eau.

Le profilement des cours d'eau a été commencé dans les régions hautes du bassin de la Dordogne, et les résultats obtenus à ce jour sont complétés utilement par les documents précieux que les bureaux locaux des Ponts et Chaussées ont pu mettre à la disposition du Service.

La détermination des ressources hydrauliques de la région Sud et Sud-Ouest du Massif Central, et l'étude des aménagements généraux des cours d'eau pourront, semble-t-il, être faites et entreprises dans un délai assez rapproché.

Dans les régions Nord du Massif Central et dans le département de l'Ardèche, tout était à faire.

Les études y sont moins avancées que dans le Sud. Le plan d'organisation du Service est, néanmoins, définitivement établi.

Dès les premiers mois de l'année 1918, 50 stations de jaugeage fonctionneront. Les postes correspondants d'observations de hauteurs d'eau s'ajouteront à ceux que possèdent déjà les services hydrométriques. L'année en cours ne se terminera pas sans que soit fixé le régime des cours d'eau de cette partie du Massif Central, et commencée l'étude des plans d'aménagement des cours d'eau.

Le Service organisé par le ministère de l'Armement n'est évidemment que temporaire ; il disparaîtra avec le ministère, mais il fera place, cela ne fait aucun doute, au service civil qui, dans la région du Massif Central, continuera l'œuvre si utile entreprise aujourd'hui, en vue de l'aménagement des ressources si considérables que contiennent, à l'état potentiel, les cours d'eau importants qui, au sud et au nord, descendent des Massifs montagneux du Plateau Central.

25. Service de l'évaluation des forces hydrauliques en Suisse. — A l'effet de donner une valeur aussi judicieuse que possible aux diverses sections des cours d'eau étudiés, le Bureau hydrométrique fédéral, sous la direction de M. l'ingénieur Epper, a classé ceux-ci en quatre catégories, dont il est question plus loin. En effet, cette valeur dépend d'un grand nombre de facteurs. Ce sont d'abord la pente et la quantité d'eau qui jouent un grand rôle dans l'estimation d'une force hydraulique ; il y a lieu ensuite de connaître le prix de revient des installations par cheval-vapeur ; il faut encore tenir compte des besoins actuels et futurs d'énergie électrique et peser soigneusement sous quel aspect l'emploi commercial

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de cette énergie se présente, spécialement si des débouchés propices ne sont pas trop éloignés de la centrale. Un raccordement direct à une ligne de chemin de fer ou à une voie fluviale est d'une importance essentielle pour la plupart des industries, spécialement pour les industries électrochimiques, qui prennent toujours plus d'importance à cause de l'importation avantageuse des matières premières et de l'exploitation prompte et bon marché des produits. Les considérations sont, par contre, de toute autre nature lorsque la centrale devra fournir la force pour la traction électrique d'une ligne de chemin de fer déjà existante ou à construire. Dans d'autres cas, se présentant très souvent, il y aura aussi à compter avec la concurrence d'autres sources de forces, mais le développement des applications de l'électricité, la création de nouvelles voies de communication et de nouvelles industries peuvent amener, par contre, un tel changement que certains cours d'eau, dont l'exploitation ne paraît pas rémunératrice actuellement, peut prendre une certaine importance à ce moment.

Pour pouvoir déterminer sans contestation possible la capacité productrice d'une usine hydraulique, qu'elle soit déjà en service ou bien qu'elle se trouve seulement en voie d'exécution, il faut avant tout connaître la marche générale de l'écoulement du cours d'eau, c'est-à-dire non seulement la grandeur absolue des différents débits pour une longue suite d'années, mais encore leur durée relative. Seulement alors il est possible, dans une usine à étudier ou en construction, de prendre toutes les dispositions quant au nombre et à la puissance des turbines génératrices, ainsi qu au sujet de l'accumulation hydraulique et de l'usine de réserve à vapeur pour permettre une utilisation complète de la section de cours d'eau dont on dispose.

Le Bureau hydrométrique fédéral a pensé qu'il suffisait provisoirement, pour les besoins pratiques, de déterminer l'écoulement de quelques cours d'eau importants choisis judicieusement dans un bassin pas trop grand et, autant que possible, semblable en ses diverses parties au point de vue hydrologique. Cette façon de faire permet d'obtenir un certain nombre de rapports, qui diffèrent, il est vrai, plus ou moins entre eux, mais pas dans une mesure telle qu'ils ne puissent, en agissant avec prudence, être employés avec une sûreté assez grande aux cours d'eau de bassins similaires.

Le volume publié par le Bureau hydrométrique fédéral (1) contient de nombreux tableaux qui permettent de fixer d'avance et avec une certitude suffisante les forces hydrauliques de toutes les sections principales des cours d'eau du bassin du Rhin dans les Grisons, non seulement pour le

(1) *Régime des eaux en Suisse : Bassin du Rhin depuis ses sources jusqu'à l'embouchure de la Tamina.*

BIBLIOTHEQUE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

temps de l'écoulement minimum, mais aussi pour tout le reste de l'année. Ce travail permet de définir la force hydraulique utilisée actuellement ou bien encore disponible dans la partie du bassin du Rhin, d'une superficie de 4.454$^{km^2}$,5 et s'étendant de ses sources jusqu'à l'embouchure de la Tamina. On a trouvé (année 1908) :

1° Forces hydrauliques des installations avec utilisation incomplète de la force (catégorie A) : 3.728 HP ;

2° Forces hydrauliques des usines avec utilisation rationnelle de la force (catégorie B) : 4.900 HP ;

3° Forces hydrauliques encore disponibles :

Catégorie I (très bonnes forces).....	37.430 HP
Catégorie II (bonnes forces).....	49.370
Catégorie III (forces passables).....	38.610
Catégorie IV (forces médiocres).....	19.460
ENSEMBLE.....	144.870 HP

Si l'on considère uniquement les forces hydrauliques des catégories I et II, c'est-à-dire les très bonnes et les bonnes forces, l'on obtient une somme de 86.800 HP.

Les chiffres ci-dessus représentent des chevaux de force nets par vingt-quatre heures, mesurés sur l'axe de la turbine (avec rendement de 75 0/0 des moteurs). De plus une ample réduction (10 0/0) des pentes disponibles a été faite, et l'on a ensuite supposé que le débit pouvait descendre au-dessous du minimum fixé par les mesures, ou bien que ce minimum pouvait ne pas être employé complètement ; la réduction a été fixée pour cela en général à 10 0/0. Pour augmenter la sûreté des calculs, l'on a fait abstraction dans cette étude de l'accumulation de l'eau certainement possible dans une plus ou moins grande mesure selon le cas. Les nombres indiqués ci-dessus représentent donc bien la plus basse limite des forces hydrauliques réellement utilisées ou bien encore disponibles.

En observant autant que possible ce principe, le Bureau hydrométrique fédéral a pu déterminer approximativement et pour toute la Suisse, non seulement les forces hydrauliques des usines avec utilisation rationnelle, mais aussi les forces disponibles (catégories I et II). Dans les usines en service ou en construction pour lesquelles l'emmagasinage de l'eau dans des bassins naturels ou artificiels est employé ou bien prévu, de telle sorte que l'action de cet emmagasinage n'est pas visible dans les débits minima mesurés, l'on a calculé avec les débits majorés, mais toujours en supposant une utilisation de la force pendant vingt-quatre heures. De même pour les forces hydrauliques disponibles, l'action d'une accumulation n'a été prise en considération que dans le cas où elle se laisse, autant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'on peut prévoir, pratiquement exécuter, soit que des bassins de lacs naturels avec écoulement libre (lac de l'Engstlen, lac de l'Arnen, lac Ritom, lac de Lugano) puissent être mis à contribution, soit que des plus grands bassins puissent être créés artificiellement (lac de Lank, lac du Wäggital, lac de la Silh, lac du Val Piumogna). Enfin, pour les usines qui travaillent temporairement avec l'eau dite de remous, l'on a aussi, comme s'il s'agissait d'une accumulation journalière, introduit dans les calculs la force disponible pendant vingt-quatre heures sans remous.

Sur ces bases, le Bureau hydrométrique fédéral a trouvé à ce moment une puissance de 209.580 HP pour les usines ayant une utilisation rationnelle de la force hydraulique.

Pour ce qui concerne les forces hydrauliques encore disponibles, il ressortait une somme de 513.020 HP. Sous ce nombre, il faut comprendre des chevaux nets, en admettant un service ininterrompu (vingt-quatre heures). Dans ce chiffre ont été rangées uniquement les forces qui, autant qu'on en peut juger aujourd'hui, sont à classer comme très bonnes et bonnes (I^re^ et II^e^ catégories).

Il n'est pas douteux que ce chiffre de 513.020 HP est loin de représenter toute la valeur des forces hydrauliques encore disponibles en Suisse, car seul un petit nombre des accumulations a été pris en considération et, d'autre part, une étude plus serrée pourrait indiquer un grand nombre d'endroits où un emmagasinage de grandes quantités d'eau est pratiquement exécutable (dans la vallée de Muota, dans le bassin de la Linth, de la Sarine, etc.). En outre, par un aménagement rationnel des lacs de Constance et de Wallenstadt, possédant tous deux un émissaire libre ; par un changement de manœuvre de leurs appareils de retenue des grands lacs suisses possédant déjà une régularisation artificielle de leur émissaire (lac de Brienz et de Thoune, lac de Bienne avec les lacs de Neuchâtel et de Morat inclusivement, lac de Zoug, lac de Zurich), on peut arriver à obtenir une forte augmentation de débit au temps de l'écoulement minimum. Enfin, les turbines modernes permettant d'avoir des rendements de 80 et 85 0/0, le montant des forces hydrauliques subira, de ce fait, dans un temps assez rapproché, une augmentation très sensible.

Réunissant ensemble les sommes trouvées pour les forces hydrauliques exploitées et disponibles, on obtient un total de 722.600 HP de vingt-quatre heures, que l'on peut sans exagération, pour les raisons avancées plus haut, porter à 750.000 HP, pendant l'écoulement minimum des eaux.

Les tableaux ci-après montrent à la fois le genre d'opérations effectuées par le Bureau hydrométrique fédéral et les formules utilisées à cet égard.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

I. Modèle de tableau de jaugeages exécutés pendant les très petits débits sur le Rhin (Suisse) dressé par le Bureau hydrométrique fédéral

Numéro du jaugeage	DATE du JAUGEAGE — Année	Mois	Jour	NOM du COURS D'EAU	LIEU du JAUGEAGE	Niveau moyen de l'eau dans le profil du jaugeage	Hauteur limnimétrique correspondante	Largeur superficielle de l'eau dans le profil du jaugeage	Profondeur maximum de l'eau dans le profil du jaugeage	Section d'écoulement	Débit par seconde	Vitesse maximum	Vitesse moyenne : $Vm. = \frac{Q}{F}$	Rapport entre la vitesse moyenne et la vitesse maximum	Moyenne des rapports : $e = \frac{Vm.}{\sqrt{o}} \left(f = \frac{\Sigma (f)}{\Sigma \left(\frac{Vm.}{\sqrt{o}} \right)} \right)$	Périmètre mouillé	Rayon moyen : $R = \frac{F}{p}$
						Hm. m	P m	b m	max. m	F m²	Q m³	Vmax. m	Vm. m	$\frac{Vm.}{Vmax.}$	e	p m	R m

PENTE RELATIVE SUPERFICIELLE DE L'EAU — Rive gauche	Rive droite	Moyenne	Coefficient : $c = \frac{Vm}{\sqrt{RJ}}$	Coefficient de rugosité $n = -\frac{bc - a}{ac\,2} \pm \sqrt{\left(\frac{bc - a}{ac\,2}\right)^2 + \frac{b}{ac}}$	Température moyenne de l'eau pendant le jaugeage	ÉTAT DES RIVES — RIVE GAUCHE — Inclinaison	matériel	RIVE DROITE — Inclinaison	matériel	Etat du fond	Superficie du bassin de réception	Débit par seconde et par Km²	Jaugeage exécuté par M	REMARQUES
Jl	Jr	J	c	n	Te	al		ar			E Km²	q L		

Observations. — Dans les formules figurant dans ce tableau : f = superficie ; Vo = vitesse superficielle des polygones mesurés ; $a = 23 + \frac{0{,}00155}{J}$; $b = \sqrt{R}$; $c = \frac{Vm}{\sqrt{RJ}}$. Lors de l'exécution des jaugeages on place dans la règle des piquets munis d'un clou servant à mesurer la hauteur et la pente superficielle de l'eau. Pour éviter des nivellements étendus, ces points ne sont habituellement ni rattachés au nivellement fédéral de précision, ni repérés. On procède à ces raccords seulement dans le cas où des limnimètres ou repères fédéraux se trouvent à proximité. La cote d'un de ces points est, par conséquent, tout à fait librement d'après le profil 1,2... m. La plupart des valeurs figurant dans la colonne, « niveau moyen dans le profil de jaugeage » n'ont donc qu'une valeur relative. Elles ne servent que pour la comparaison entre le niveau de l'eau lors du jaugeage proprement dit, d'une part, et le niveau lors du débit minimum d'autre part.

II. Modèle de tableau des débits minima déduits de résultats des jaugeages donnés par le tableau I

Numéro du jaugeage	DATE DU MINIMUM de L'EAU — Année	Mois	Jour	NOM du COURS D'EAU	LIEU du JAUGEAGE	Hauteur limnimétrique minimum	Niveau correspondant de l'eau dans le profil du jaugeage	Largeur superficielle de l'eau dans le profil du jaugeage	Section d'écoulement	Périmètre mouillé	Rayon moyen : $R = \frac{F}{p}$
						P. mm. m	H min. m	b m	F m²	p m	R m

PENTE RELATIVE SUPERFICIELLE DE L'EAU — Rive gauche	Rive droite	Moyenne	Coefficient de rugosité déterminé par le jaugeage	Coefficient $c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0{,}00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0{,}00155}{J}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}}$	Vitesse moyenne $Vm. = c\sqrt{RJ}$	Débit minimum par seconde	Superficie du bassin de réception	Débit minimum par seconde et par Km²	REMARQUES
Jl	Jr	J	n	c	Vm. m	Q min. m³	E Km²	q min. L	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. Modèle de tableau des débits minima, des pentes absolues et des forces hydrauliques minima

Numéro de la section	NOM du cours d'eau	LIEU du commencement et de la fin de la section	LONGUEURS : kilométrage au commencement et à la fin de la section	LONGUEURS : longueur de la section	Cotes des basses eaux	PENTES : Brute	PENTES : Déduction (10 0/0)	PENTES : Utilisable	Bassin de réception	DÉBITS MINIMA par seconde : par Km²	DÉBITS MINIMA par seconde : en tout	DÉBITS MINIMA par seconde : déduction	DÉBITS MINIMA par seconde : utilisable	MINIMA DES FORCES HYDRAULIQUES EN HP NETS 75 0/0 de rendement des moteurs : des sections encore disponibles : en tout	MINIMA DES FORCES HYDRAULIQUES EN HP NETS 75 0/0 de rendement des moteurs : des sections encore disponibles : par mètre courant de la section	MINIMA DES FORCES HYDRAULIQUES EN HP NETS 75 0/0 de rendement des moteurs : des installations déjà existantes : catégories : A : anciennes installations hydrauliques avec utilisation imparfaite de la force	MINIMA DES FORCES HYDRAULIQUES EN HP NETS 75 0/0 de rendement des moteurs : des installations déjà existantes : catégories : B : nouvelles installations avec utilisation rationnelle de la force	MINIMA DES FORCES hydrauliques en HP nets classées en catégories d'après la qualité et la situation des sections encore disponibles : catégories : I	II	III	IV	REMARQUES
			Km	L m	C m	G m	ΔG m	G m	E Km²	q L	Q L	ΔQ L	Q L								

OBSERVATIONS. — Les forces hydrauliques sont dans la règle arrondies à 10 HP. Seules les forces de la catégorie A, plus petites que 10 HP., ont été arrondies à 1 HP.

En outre, des planches spéciales donnent : les minima des débits et des forces hydrauliques, les courbes des débits, des vitesses moyennes et des vitesses maxima et enfin les variations des débits par seconde.

En 1914 le Service hydrométrique suisse a été transformé en un Service des eaux, ayant d'après la loi fédérale les attributions suivantes :

1° Le régime des eaux en vue de les utiliser comme force hydraulique et pour la navigation, et de prévenir les dommages qu'elles peuvent causer ;

2° La préparation technique et économique de l'utilisation des eaux ; la préparation et l'exécution des lois et arrêtés sur les forces hydrauliques. L'élaboration des traités internationaux, de concert avec le département politique et la surveillance de leur application ;

3° La préparation et l'exécution des dispositions sur la dérivation des forces motrices à l'étranger.

Parmi les nombreuses études confiées au Service des eaux, on peut citer celles relatives à l'obtention de la concession des forces motrices de la Reuss et de Haute-Levantine pour les chemins de fer fédéraux, puis l'établissement de la statistique des forces hydrauliques utilisées et disponibles de la Suisse. Il a également établi des projets pour la régularisation du niveau des lacs de Constance et de Lugano, après s'être mis d'accord avec les États intéressés; il a aussi fourni les bases techniques et scientifiques pour la régularisation du lac des Quatre-Cantons et perfectionné les méthodes de jaugeage.

Enfin il a eu à s'occuper de la nouvelle loi fédérale sur l'utilisation des forces hydrauliques, qui se propose d'atteindre les buts suivants : 1° une utilisation rationnelle des eaux ; 2° l'aplanissement des difficultés qui peuvent survenir entre cantons en matière de concessions de force motrice; 3° l'utilisation des sections de cours d'eau qui se trouvent à la frontière suisse.

26. Service d'études des forces hydrauliques du Congo belge. — Ce service a été entrepris à l'instigation et sous les auspices de la Compagnie du chemin de fer du Congo et de la Compagnie du Congo pour le commerce et l'industrie. Un intérêt particulier s'attache pour la France à connaître les travaux de la mission technique belge qui avait à sa tête l'ingénieur Robert Thyss, car l'amélioration du régime du fleuve Congo, devant changer radicalement les conditions existantes entre les différentes colonies du centre africain, les gouvernements intéressés auront à intervenir non seulement au point de vue technique, mais aussi financièrement là où les dépenses leur incomberont plus spécialement (1).

(1) M. l'ingénieur Robert Thyss a bien voulu nous informer qu'il s'était aidé dans la création du service d'Études que nous relatons dans ce paragraphe de renseignements puisés dans cet ouvrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La mission belge qui a pris ensuite la dénomination de Service des Études des Forces Hydrauliques du Bas-Congo a opéré ses travaux durant

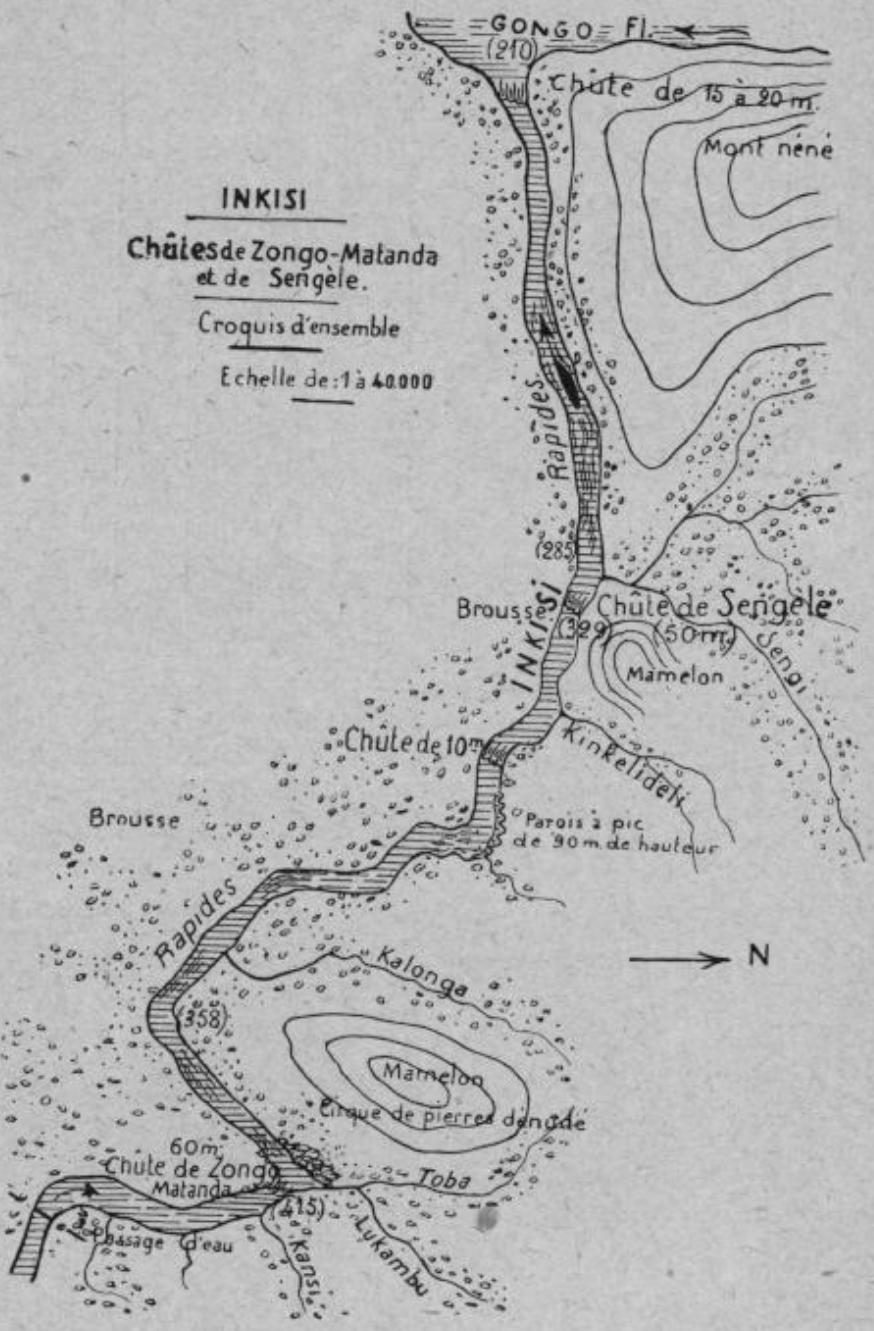


Fig. 55. — Topographie du fleuve Inkisi.

les années 1910, 1911, 1912 et 1913 en vue de l'électrification des chemins de fer du Congo.

Les itinéraires ont été relevés au podomètre et à la boussole carrée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les altitudes ont été déterminées par l'emploi des hypsomètres ou des

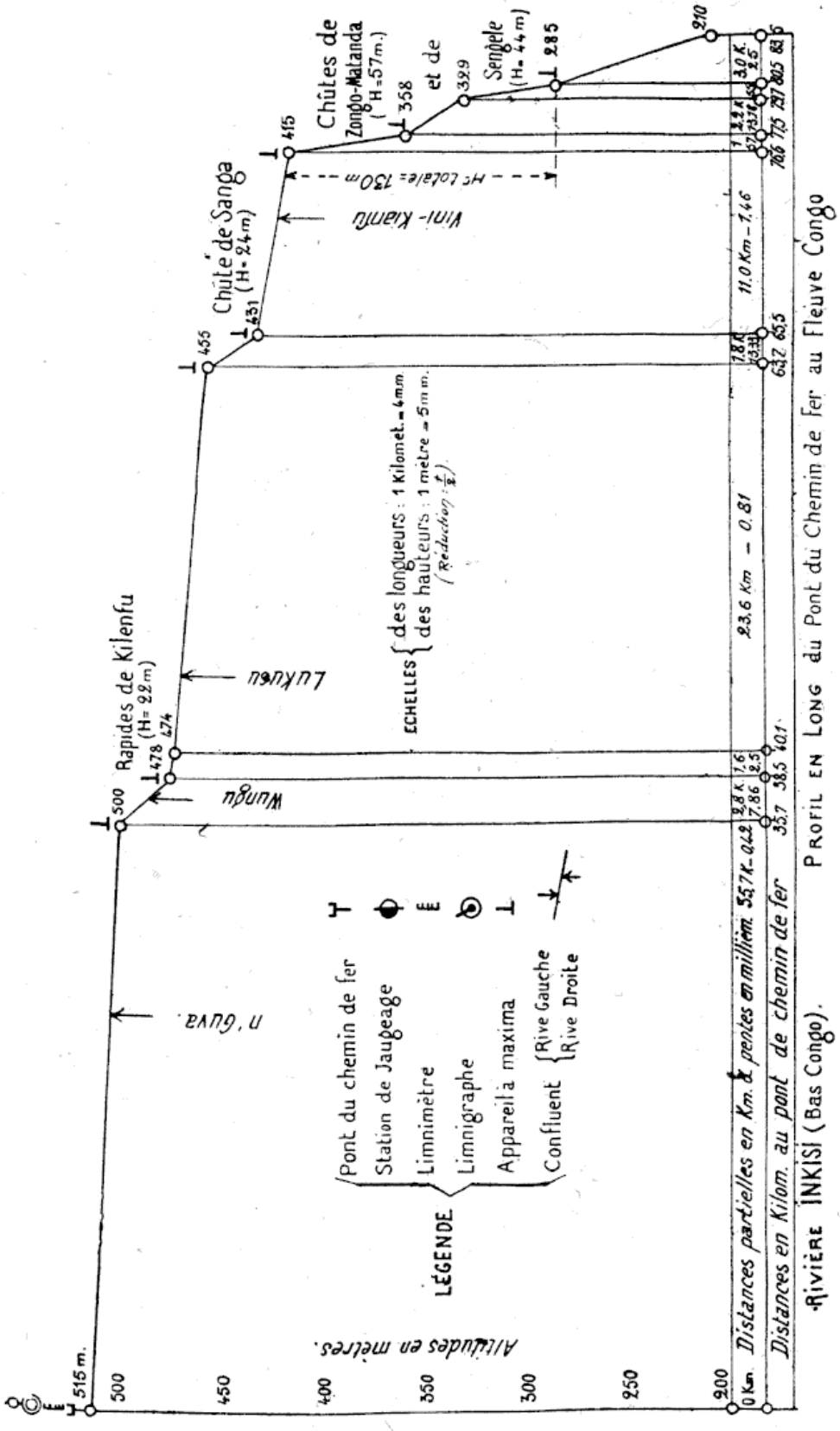


FIG. 56. — Profil en long de la rivière Inkisi.

anéroïdes et hypsomètres combinés. Cette méthode a donné des résultats

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 57. — Emplacement des appareils hydrométriques.

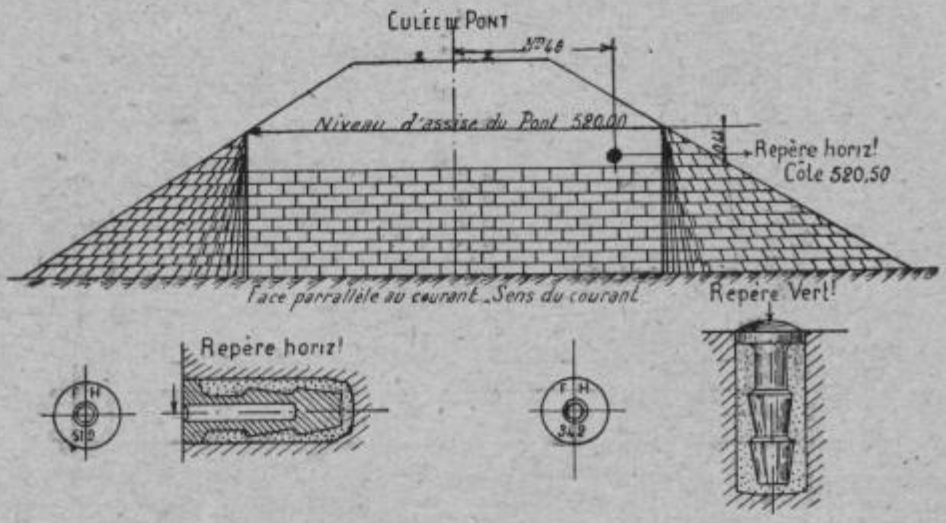


FIG. 58. — Repères de nivellement.

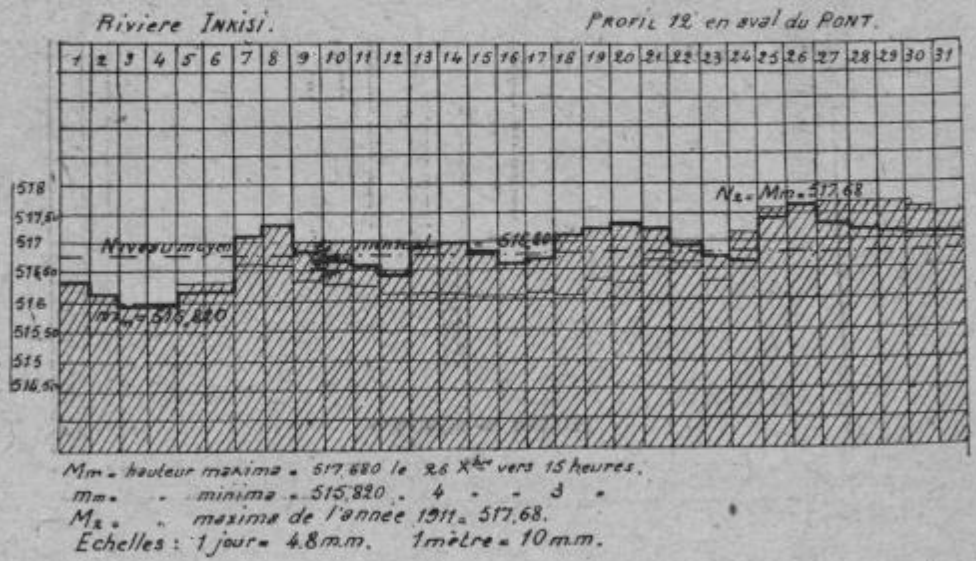


FIG. 59. — Graphique mensuel des hauteurs limnimétriques (Décembre 1911).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

satisfaisants dans les régions où on a reconnu la constance des marées barométriques journalières et annuelles. Les anéroïdes combinés avec les

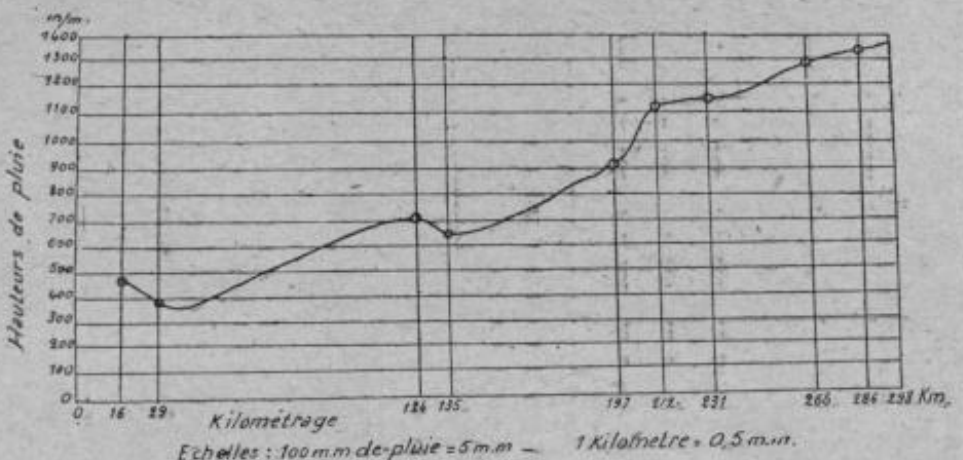


FIG. 60. — Graphique des hauteurs totales de pluies tombées pendant la saison des pluies 1910-1911, aux différentes stations pluviométriques du Congo.

hypsomètres ont permis de relever rapidement des cotes intéressantes au cours des itinéraires selon un programme défini à l'avance. (Les *fig.* 55 à 61) définissent la nature de ces travaux.

Les tableaux I et II ci-après montrent quelle précision on peut atteindre de cette façon d'opérer, en tenant compte que la mission du Congo avait à remplir sa tâche dans un délai relativement court et aussi le plus économiquement possible.

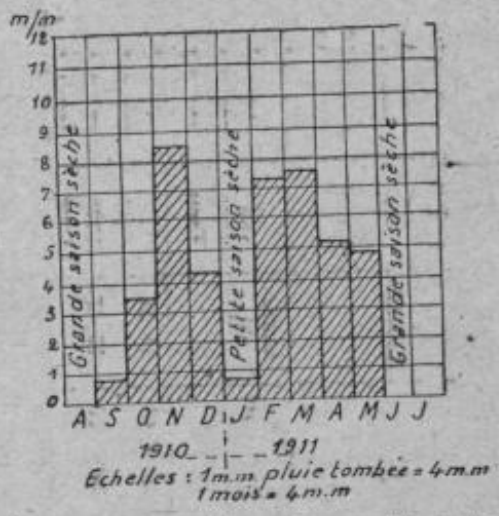


FIG. 61. — Graphique donnant la chute moyenne de pluie pour chaque mois 1910-1911. (Vallée de l'Inkisi).

Les mesures des débits des rivières ont été faites au moyen de limnimètres semblables au type employé par le Bureau hydrométrique fédéral suisse. Les types d'appareils limnigraphes ont consisté en flotteurs maxima appropriés.

La mission technique belge ayant reconnu: 1° que la méthode de jaugeage par déversoirs ne peut être appliquée pour les cours d'eau de quelque importance que s'il existe déjà des barrages convenant parfaitement ; 2° que la méthode par flotteurs exigent un personnel bien entraîné et en nombre suffisant et qu'en outre il est très difficile d'obtenir un nombre de points suffisants vers les bords du cours d'eau pour faire les observations, s'est décidée d'employer la méthode du moulinet électrique qui ne nécessite qu'un observateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

I. Exemple de détermination des altitudes par l'emploi des hypsomètres

LIEU de L'OBSERVATION	DATES	HEURES	NUMÉROS des APPAREILS	LECTURE des APPAREILS	CORRECTIONS de température	CORRECTIONS de gravité	CORRECTIONS MARÉE BAROMÉTRIQUE annuelle	CORRECTIONS MARÉE BAROMÉTRIQUE journalière	CORRECTIONS de graduation	CORRECTIONS TOTALES	LECTURES CORRIGÉES	ALTITUDES RÉSULTANTES	MOYENNES	ALTITUDES ADOPTÉES
		heures										m.	m.	m.
CAMP IX	6 Juillet 1910	10	1325	734,1	+2,35	+1,92	— 1,9	— 1,3	— 0,1	+ 1,0	735,1	346,9		
			1360	732,9	+2,35	+1,92	— 1,9	— 1,3	0	+ 1,1	734	360,2	352,9	353,0
Rivière Pangazi			1369	733,5	+2,35	+1,92	— 1,9	— 1,3	+ 0,1	+ 0,1	734,7	351,7		
CAMP X	7 Juillet 1910	16.30	1325	728,3	+2,35	+1,92	— 1,9	+ 1,6	— 0,1	+ 3,9	732,2	382,0		
Perte du torrent			1369	727,9	+2,35	+1,92	— 1,9	+ 1,6	+ 0,1	+ 4,1	732,0	384,4	392,3	392,0
de Kwilu	8 Juillet 1910	15.45	1325	727,5	+2,35	+1,92	— 1,9	+ 1,6	— 0,1	+ 3,9	731,4	391,7		
			1369	725,7	+2,35	+1,92	— 1,9	+ 1,6	+ 0,1	+ 4,1	729,8	411,0		

II. Exemples de détermination d'altitudes par l'emploi des anéroïdes et des hypsomètres combinés

OBSERVATIONS ANEROÏDES AU CAMP DE LA PANGAZI

Appareil	779	Lecture	732,8
—	800	—	731,2
—	6416	—	730,0
—	7086	—	727,5

DIFFÉRENCES ENTRE LES OBSERVATIONS :

Appareil	779	1,4	moyenne 1,45
—	800	1,4	
—	6416	1,4	
—	7086	1,6	

OBSERVATIONS ANEROÏDES AU CONFLUENT DE LA PANGAZI ET DU KWILU

Appareil	779	Lecture	734,2
—	800	—	732,6
—	6416	—	731,4
—	7086	—	729,1

Différence d'altitude : 17m,5
Altitude au camp IX d'après les hypsomètres : 353
Altitude au confluent de la Pangazi et du Kwilu : 335m,50

OBSERVATIONS ANEROÏDES AU CAMP DE LA PERTE DU KWILU

Appareil	779	Lecture	725,5
—	800	—	724,1
—	6416	—	722,5
—	7086	—	716,1

DIFFÉRENCES ENTRE LES OBSERVATIONS

Appareil	779	4,6	moyenne 4,8
—	800	4,4	
—	6416	4,7	
—	7086	5,6	

OBSERVATIONS DANS LA CREVASSE AU NIVEAU DE L'EAU

Appareil	779	Lecture	730,1
—	800	—	728,5
—	6416	—	727,2
—	7086	—	721,7

Différence d'altitude : 58 mètres
Altitude au camp X d'après les hypsomètres : 392
Altitude de l'eau à la perte du Kwilu : 334 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A cet effet le Service d'études des forces hydrauliques du Bas-Congo a employé le type à hélice protégée. Trois moulinets de ce type ont été en service, tandis qu'un moulinet du type à hélice non protégée restait dans le poste de Thyssille comme moulinet étalon, à l'effet de permettre, par des comparaisons répétées, de s'assurer du bon état des appareils en service et de la constance de leurs coefficients de tarage.

La pente superficielle moyenne des cours d'eau sur chaque rive a été obtenue en calculant par la méthode des moindres carrés l'équation de la droite donnant la relation entre le niveau de l'eau et la pente et, en introduisant dans cette équation la valeur moyenne du niveau de l'eau, on obtenait la pente moyenne correspondante. Pour avoir la pente superficielle moyenne du cours d'eau il a suffi de prendre la moyenne arithmétique des deux pentes superficielles moyennes rive gauche et rive droite ainsi calculées.

Toujours par la méthode des moindres carrés on a pu obtenir la relation existant entre le niveau de l'eau au limnimètre et le niveau de l'eau dans le profil de jaugeage. Le coefficient de rugosité et les constantes se déterminaient par la formule de Ganguillet et Kutter. On vérifiait ainsi dans une certaine mesure l'exactitude du jaugeage, en comparant le coefficient de rugosité trouvé à ceux que l'on connaissait pour des cours d'eau comparatifs.

Les renseignements fournis par les calculs et les tracés des courbes de débit ont permis de construire les graphiques annuels des débits qui ont donné le débit moyen module (moyenne arithmétique des débits), le débit caractéristique moyen, le débit caractéristique d'étiage et les débits maxima et minima. Ces graphiques ont en outre permis de se rendre compte des variations durant les saisons sèches et les saisons de pluies, des particularités du cours d'eau, de l'importance des crues, des périodes d'étiage, etc.

On a complété ces documents par des courbes de fréquence qui renseignaient sur les puissances des cours d'eau et leur caractère plus ou moins torrentiel.

Les levés de terrain aux emplacements de l'usine, du barrage, des voies d'accès, de la dérivation, des bassins de retenue ont été faits à l'aide du tachéomètre. On y a joint des courbes de niveau pour l'étude au cabinet.

Pour les bassins de retenue, on a opéré par cheminement en remontant par l'une des rives jusqu'à la limite du remous pour redescendre par l'autre rive jusqu'à l'emplacement du barrage.

En outre on a recueilli des renseignements géologiques tendant à déterminer la constitution du sol en certains endroits (emplacements des barrages, canaux de dérivation, tunnels, etc.), à rechercher les matériaux de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

construction existant à pied d'œuvre (pierre à bâtir, pierre à chaux, calcaire à ciment, sable, bois de charpente, etc.).

Enfin on a relevé les températures en diverses saisons devant servir au calcul des conducteurs des lignes aériennes.

Les chutes dont l'étude a été poursuivie sont situées sur la M'Pozo, le Kwilu, l'Inkiski, affluents du Congo, entre les villes de Matadi et de Léopoldville. La M'Pozo est une rivière torrentielle dont la vallée encaissée traverse un pays de pierres dénudé et sauvage, tandis que le Kwilu coule dans une vallée plus large, dans un pays moins mouvementé et couvert d'herbages. L'Inkiski est une rivière importante traversant un pays presque entièrement couvert de forêts. Malgré son faible débit la M'Pozo est intéressante en ce sens qu'on peut envisager l'accumulation de l'eau à 400 mètres d'altitude. Sur le Kwilu, on a reconnu la possibilité de créer des chutes dans des points présentant des rapides de 30 à 35 mètres de hauteur. Enfin sur l'Inkiski, on pourrait facilement aménager des chutes de moyenne hauteur aussi.

IV. — RÉGIME DES PRINCIPAUX COURS D'EAU DE FRANCE SUR LESQUELS ONT ÉTÉ CRÉÉES DE GRANDES FORCES HYDRAULIQUES

USINES ÉTABLIES, EN COURS DE CONSTRUCTION OU PROJETÉES

Le régime des eaux est de la plus haute importance pour la Houille blanche au triple point de vue de leur abondance, de leur régularité et de leur clarté. C'est à ce point de vue que nous avons envisagé ici cette modeste monographie de nos principaux cours d'eau se présentant plus facilement à la captation de leur richesse.

Outre une longueur de 13.000 kilomètres de rivières navigables et de canaux de navigation, l'étendue des cours d'eau non navigables ni flottables en France s'élève à 260.000 kilomètres. Les pentes moyennes dans chacun des grands bassins fluviaux sont différentes entre elles ; elles sont d'ailleurs proportionnelles aux altitudes des faîtes où les fleuves prennent leur source. La moyenne générale des pentes pour l'ensemble des bassins français est de $1^m,52$ par kilomètre : $2^m,86$ pour le bassin de la Garonne, $2^m,28$ pour celui du Rhône, $1^m,23$ pour la Loire et $0^m,95$ pour la Seine. Quant aux pentes des cours d'eau eux-mêmes, elles varient de $1^m,65$ à $0^m,02$ pour la Garonne ; $0^m,71$ à $0^m,04$ pour le Rhône ; $1^m,70$ à $0^m,11$ pour la Loire, avec une moyenne de $1^m,44$.

La totalité des bassins de la France représente une superficie de 53 millions d'hectares ; il y tombe $0^m,65$ à $0^m,95$ de pluie par an, ce qui correspond à un volume d'eau de 400 millions de mètres cubes. Les cours d'eau en débitent 180 millions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

27. Le Rhône.—La ceinture du bassin du Rhône, à partir de la plaine

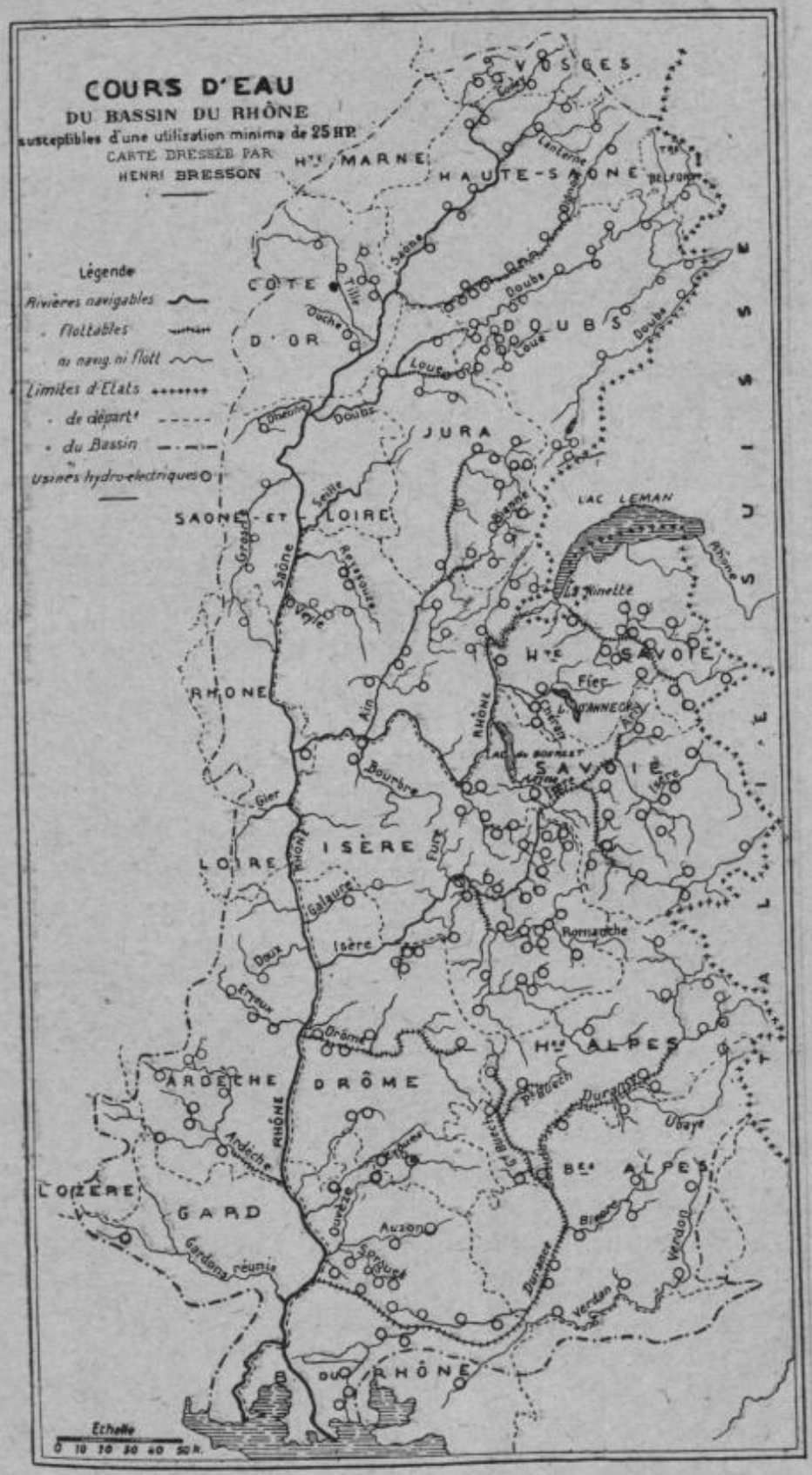


FIG. 62. — Carte des cours d'eau du bassin du Rhône.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tableau des puissances du Rhône dans la partie française de son cours

LIMITES DE LA SECTION CORRESPONDANT A CHAQUE CHUTE	LONGUEUR des SECTIONS en mètres	PENTES TOTALES par section	PENTES MOYENNES par Km	DÉBIT CARACTÉRISTIQUE EN M³ PAR SECONDE d'étiage	DÉBIT CARACTÉRISTIQUE EN M³ PAR SECONDE moyen	PUISSANCES UTILISABLES EN PONCELETS (100 KGM) Par section A l'étiage	Par section En débit moyen	Par kilomètre A l'étiage	Par kilomètre En débit moyen
		Mètres	Mètres						
De la frontière suisse R. D. à la frontière suisse R. G.	6.600	12,30	1,864	120	300	14.760	36.900	2.237	5.592
De la frontière suisse R. G. au château du Parc	27.400	73,73	2,691	120	300	7.380	18.450	1.118	2.796
Du château du Parc au Pont-du-Sault	94.200	64,27	0,681	120	300	88.476	221.190	3.229	8.073
Du Pont-du-Sault à l'origine du canal de Jonage	35.900	14,20	0,396	120	300	77.124	192.810	818	2.046
De l'origine à la sortie du canal de Jonage	16.900	14,80	0,876	120	300	17.040	42.600	475	1.188
Du canal de fuite de Jonage au confluent de la Saône	10.000	6,10	0,610	120	300	17.700	44.400	1.051	2.628
Du confluent de la Saône au confluent de l'Isère	104.300	51,70	0,496	310	795	7.320	18.300	732	1.830
Du confluent de l'Isère au confluent de l'Ardèche	86.700	67,50	0,779	400	1.130	100.720	411.015	1.538	3.943
Du confluent de l'Ardèche au confluent de la Durance	57.250	29,20	0,510	470	1.255	270.000	762.750	3.116	8.803
De la Durance à l'entrée du Petit-Rhône à Arles	30.750	9,00	0,293	500	1.452,5	137.240	366.460	2.397	6.401
D'Arles au canal maritime de Saint-Louis	44.500	1,90	0,013	500	1.452,5	45.000	130.025	1.465	4.256
	532.110	370,20	0,696			9.500	27.598	215	625
						837.110	2.286.298	1.571	4.297

DÉCOMPOSITION DE LA SURFACE DU BASSIN DU RHÔNE	Km²
Bassin du Rhône en amont de l'Arve	6.901
Bassin de l'Arve	1.946
— de l'Ain	3.512
Bassin des petits affluents en amont de Lyon	6.908
Bassin du Rhône à Lyon	10.627
Bassin de la Saône	28.548
— de l'Isère	11.295
— de la Drôme	1.736
— de l'Ardèche	2.429
— de la Durance	14.814
— du Gardon	2.073
Bassin des petits affluents entre Lyon et la mer	1.505
Bassin entre Lyon et la mer	75.947
Surface totale du bassin du Rhône	95.214

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 63. — Perte du Rhône en été.

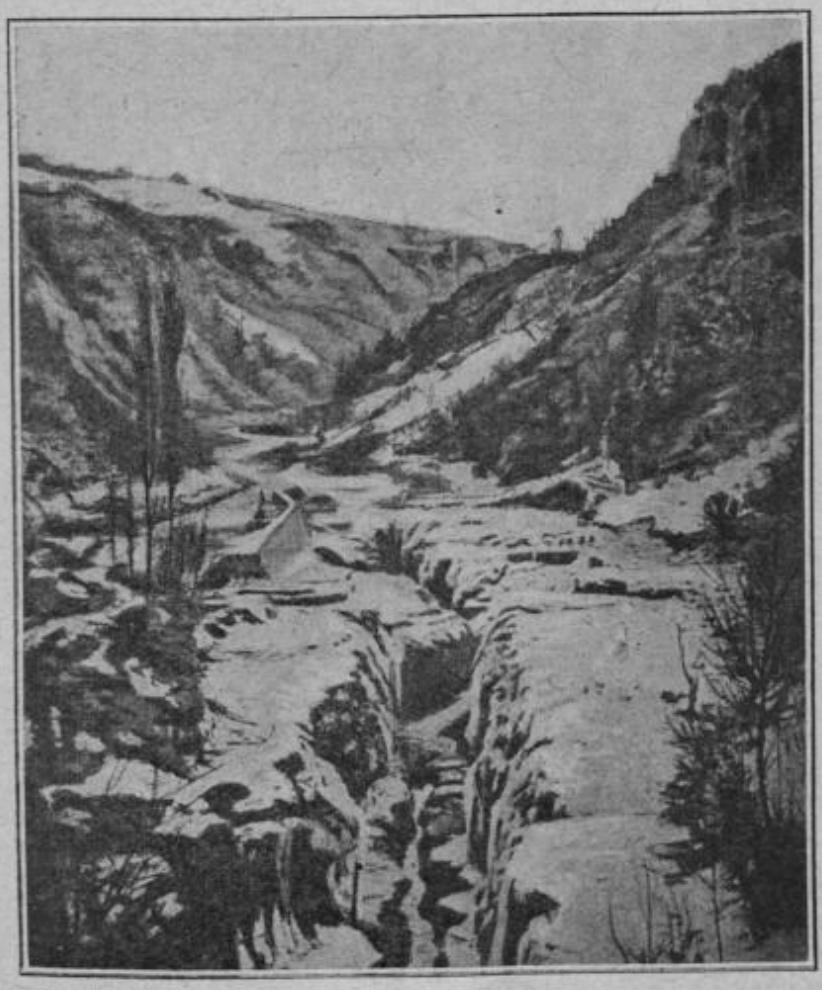


FIG. 64. — Perte du Rhône en hiver.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du Languedoc, aux environs d'Aigues-Mortes, comprend les Cévennes (monts de Gévaudan, du Vivarais, du Lyonnais, du Charolais), la Côte-d'Or, le plateau de Langres, les monts Faucilles, les Vosges méridionales, le Jura, les Alpes Bernoises, les Alpes Pennines, les Alpes Graies, les Alpes

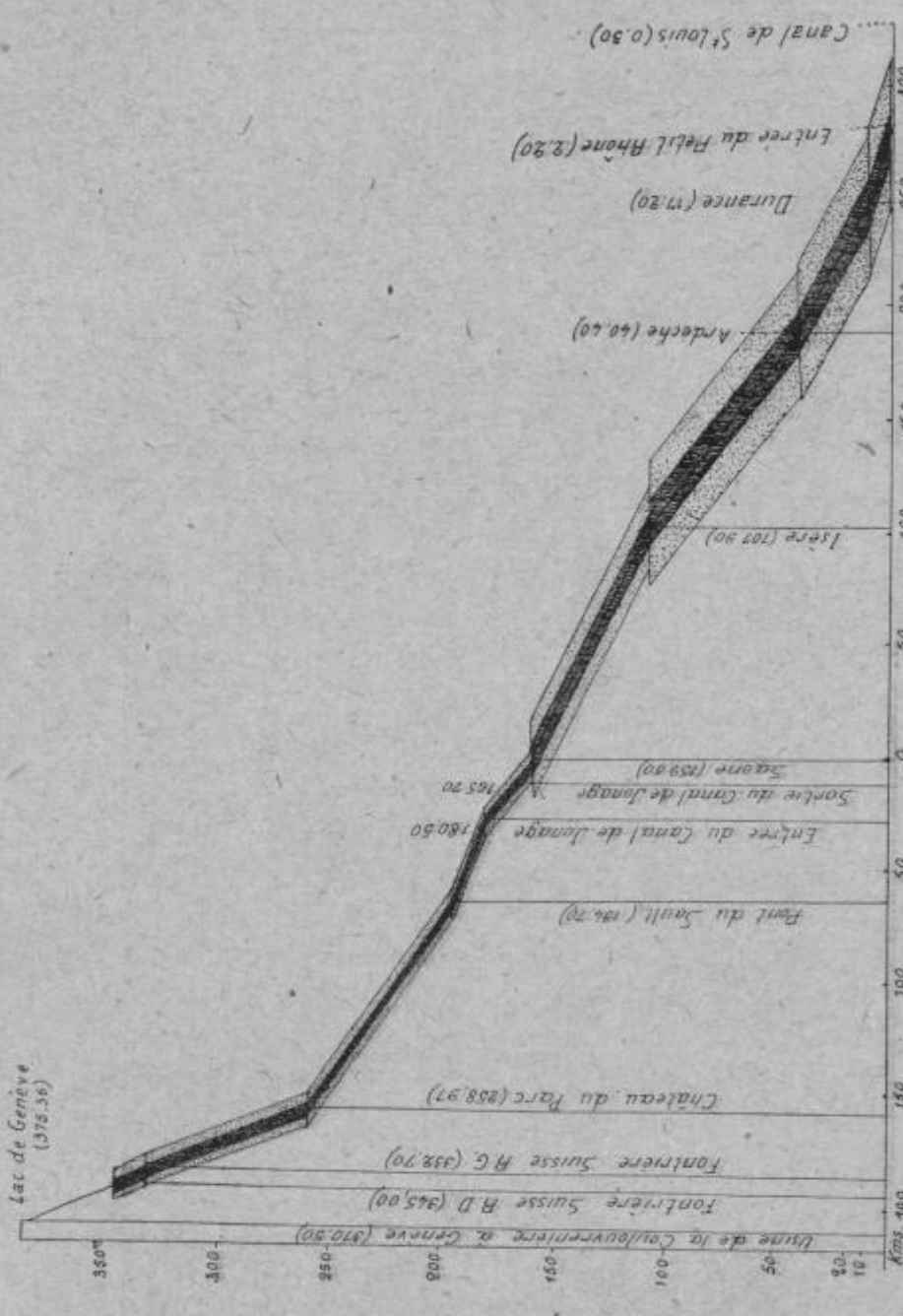


FIG. 65. — Graphique donnant le profil en long du Rhône avec figuration schématique des puissances utilisables. — La partie teintée intérieure correspond au débit d'étiage et celle comprise entre les limites extérieures correspond aux eaux moyennes.

Cottiennes, et les Alpes de Provence, jusqu'à la plaine de Crau. Le bassin alimentaire du Rhône, à son entrée dans le Léman, mesure 5.220 kilomètres carrés, dont 933 kilomètres carrés de glaciers.

Le Rhône a sa source en Suisse, dans le canton du Valais, à l'altitude de 1.735 mètres. Il descend par la vallée du Valais, où il reçoit les eaux de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

103 hectares de glaciers. Il sort du lac Léman, qui régularise son régime, par 375 mètres d'altitude.

Au sortir de la ville de Genève, il reçoit l'Arve (340 mètres d'altitude) et roule 130 mètres cubes à l'étiage ; son débit pendant 300 jours de l'année est presque le double de celui d'étiage, et en temps de crue il atteint 1.250 mètres cubes. Au sortir du défilé de Bellegarde, il se dirige vers Lyon, où il se grossit de la Saône, et, après avoir tourné droit au sud, il garde cette direction jusqu'à la mer. Il verse à celle-ci, dans ses grandes crues, 12.000 mètres cubes, et 1.700 en eaux moyennes.

La longueur du Rhône est de 812 kilomètres et l'étendue de son bassin de 9.780.000 hectares. M. Tavernier, qui a étudié le bassin du Rhône, estime que sa surface est de 4.962 kilomètres carrés, et que le 1/5 de cette surface environ est occupé par des glaciers (ce bassin est donc affecté d'une façon prédominante par la « houille blanche »). A Saint-Maurice, M. Tavernier a constaté : $1^{m},05$ pour la hauteur de pluie annuelle ; débit d'étiage, 25 mètres cubes à la seconde ($5^{lit},3$ par kilomètre carré) ; débit moyen ou module, 143 mètres cubes à la seconde, soit 30 litres par kilomètre carré ; débit des plus grandes crues, 975 mètres cubes ; coefficient de ruissellement (rapport du module au débit pluvial), 91 0/0. La perte de 9 0/0 est bien inférieure aux pertes d'évaporation ou d'absorption.

Franchement glaciaire à son entrée en France, le Rhône voit ce régime s'atténuer par ses affluents de rive droite (l'Ain, la Saône et l'Ardèche) qui ont un régime différent ; le Fier, l'Isère et la Durance (affluents de gauche) ont un régime mixte où les écoulements glaciaires sont de moins en moins accentués.

Les principales usines hydroélectriques établies sur le Rhône sont : l'*usine de Bellegarde*, avec une chute de 8 à 14 mètres, un débit moyen de 60 mètres cubes à la seconde et une puissance installée de 10.800 chevaux ; l'usine de *Jonage* (§ 308), avec une chute de 8 à 14 mètres, un débit moyen de 150 mètres cubes, une puissance installée hydroélectrique de 24.000 chevaux et une usine à vapeur de secours de 21.200 kilowatts. L'usine de *Brigue*, qui assure la traction électrique de la voie ferrée du Simplon a une chute de 55 mètres et une puissance de 2.200 chevaux.

Une nouvelle usine a été installée, pendant la guerre, à Bellegarde pour la fabrication de produits azotés, laquelle produit 30.000 tonnes de cyanamide.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

UTILISATION DE LA FORCE MOTRICE DU RHONE

PROJETS D'USINES HYDROÉLECTRIQUES

L'Office des Transports des Chambres de Commerce du Sud-Est a ouvert en 1910 un concours à l'effet de rechercher la meilleure solution relative à l'aménagement du Rhône par la création d'un canal latéral au fleuve.

L'édification d'usines hydroélectriques entre Lyon et Arles, en employant les chutes qui seraient utilisables par suite de la transformation du Rhône, n'a pas été considérée, par le jury, comme ayant un intérêt immédiat, et dans cet esprit, il a considéré qu'il convenait d'abord de mettre en valeur les grandes chutes des Alpes. Mais le même jury a émis l'avis que la conclusion est toute différente si on considère la production de l'énergie comme n'étant plus que l'accessoire d'une opération dont le principal but est l'amélioration de la navigation entre Lyon et Arles ; dans cet ordre d'idée, on prévoit qu'une partie au moins de la dépense à faire à la création des chutes pourrait être mise au compte de la navigation.

Dans l'hypothèse où on envisagerait que la canalisation du fleuve, les barrages construits à cet effet pourraient donner lieu à des dérivations mixtes (servant à la fois à la navigation et à des usines), et pour ces dernières on disposerait de chutes d'une douzaine de mètres de hauteur. Et c'est entre les embouchures de l'Isère et de l'Ardèche qu'elles seraient le plus avantageuses, soit sur une étendue de 87 kilomètres avec une pente totale de 67 mètres pouvant donner environ 80.000 chevaux. Elles représenteraient une contribution de 4 millions. Le Jury a estimé indispensable la création d'un port de transbordement et port industriel à Lyon même et par suite la création d'une usine hydroélectrique par l'établissement d'un barrage un peu en aval de Lyon, sur la rive gauche du fleuve. Le grand port fluvial serait ainsi le corollaire indispensable de l'ouverture du canal de Marseille à Arles et la transformation du canal du Rhône à Cette.

Le port projeté se raccorderait avec le haut Rhône au moyen d'un canal qui contournerait la ville à l'est pour aboutir au bief supérieur de la dérivation de Jonage, qui a son origine à Jons. La retenue créée mettrait en libre communication le nouveau port, non seulement avec tous ceux de la Saône, mais aussi avec une partie au moins de ceux existant sur le Rhône dans la traversée de la ville.

La dépense afférente au barrage, à la dérivation, au pont à créer sur la rive gauche du fleuve et au canal de raccordement avec la dérivation de Jonage atteindrait 55 millions.

On sait que la vitesse du courant est le principal obstacle à une naviga-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion économique sur le Rhône. La région des rapides, c'est-à-dire des plus fortes pentes ($0^m,77$), se trouve entre le confluent de l'Isère et celui de l'Ardèche. Les dimensions des ouvrages permettraient le passage d'un convoi de quatre barques de 80 mètres de longueur sur 21 mètres de largeur avec leur remorqueur. Cette dépense peut atteindre une centaine de millions.

Sur tout le reste de son parcours, le Rhône, amélioré par les travaux de régularisation complètement terminés, serait utilisé sans modification.

D'après ce programme, les travaux à exécuter aux abords de Lyon seraient à faible distance en aval du confluent de la Saône, établissement d'un barrage dont la retenue serait réglée à un niveau au moins égal à celui du barrage actuel de la Mulatière ; sur la rive gauche du Rhône, aux environs de Ternay, établissement d'une dérivation mixte. A cette usine serait annexée une écluse qui remplacerait celle existante de la Mulatière.

En tête de cette dérivation viendrait le grand port installé à la moderne qui communiquerait avec un avant-port en eau calme constituée par la retenue du barrage. Enfin un canal contournant la ville à l'est serait établi entre le nouveau port et le bief supérieur de la dérivation de Jonage.

Quant aux travaux à exécuter dans la région des rapides, ils comprendraient essentiellement l'exécution de courtes dérivations éclusées, dont certaines pourraient être remplacées par une dérivation mixte de plus grande longueur, ouverte en vue de la création d'une usine hydroélectrique.

A la sortie du lac Léman, le Rhône coule d'abord en territoire suisse, puis est limitrophe entre la France et la Suisse. Au point où ses deux rives sont françaises, il est à la cote 332 mètres. Il traverse ensuite la plaine de Collogny dans les alluvions fluvio-glaciaires, puis, par l'étroit défilé de l'Écluse, franchit le chaînon anticlinal jurassien du Reculet-Vuache. Il rencontre les sables et argiles du Gault, et, à Bellegarde, s'engouffre à la Perte du Rhône, phénomène bien connu aujourd'hui. En aval de ce point et jusqu'à 4 kilomètres en aval de Génissiat, le lit est creusé dans les calcaires urgoniens et forme un cañon aux parois escarpées, avec une largeur maximum de 50 mètres qui descend à moins de 2 mètres au défilé de Malpertuis. A Génissiat, la cote est de 262 mètres, soit une différence de 70 mètres avec le niveau à la frontière suisse, sur une longueur de 23 kilomètres environ.

Cette grande hauteur de chute disponible, jointe à l'importance du débit du fleuve, qui varie de 120 mètres cubes par seconde en temps d'étiage à 1.500 et même 1.800 mètres cubes en temps de crues, permettant de capter une quantité considérable d'énergie, a tout naturellement attiré l'attention des ingénieurs.

Plusieurs projets ont été étudiés pour tirer de l'énergie disponible dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le Haut-Rhône le meilleur parti. Un projet a été déposé par la Société de Bellegarde tendant à utiliser tout le débit du Rhône, au lieu des 60 mètres cubes auxquels elle a droit actuellement, au moyen d'un barrage de 30 mètres de hauteur à élever en amont de la Perte, créant une retenue à la cote 310 mètres, et alimentant, outre l'usine existante, deux autres usines, l'une au pied du barrage, l'autre aux Essertoux. Le Syndicat français des forces hydro-électriques du Pont-de-Grésin et de la Boucle du Rhône a proposé la construction d'un barrage au Pont-de-Grésin en un point où le Rhône n'a que 2 mètres de large, ce qui donnerait une chute de 20 mètres environ et une puissance de quelques 40.000 chevaux. Enfin, la Société des forces hydrauliques de Malpertuis projette un barrage au Pas-de-Malpertuis, à quelques kilomètres en aval de Bellegarde, produisant une retenue dont le remous s'étendrait jusqu'au pied du barrage projeté de Bellegarde et donnant une puissance d'environ 40.000 chevaux. Tous ces projets n'utilisent que partiellement l'énergie disponible sur le Haut-Rhône, et, faute d'emmagasinement des eaux, la puissance totale qu'ils peuvent fournir n'est que de 135.000 chevaux en eaux moyennes.

Tout autres sont les projets déposés par MM. Harlé, Blondel et Mähl. Ces auteurs ont, dès 1902, présenté au ministère des travaux publics un projet comportant un barrage au Pont-de-Grésin relevant les eaux à la cote 332 mètres et deux tunnels amenant les eaux dans une usine projetée à Monthoux, créant une chute de 60 mètres et utilisant ainsi toute la dénivellation comprise entre la frontière et ce point, mais ayant un débit limité par la section des tunnels. Aussi, en 1906, modifiant leur projet primitif, MM. Harlé, Blondel et Mähl ont reporté au lieu même d'utilisation l'emplacement du barrage, supprimant ainsi tout tunnel et utilisant à la fois tout le débit et toute la chute du fleuve, par conséquent recueillant au maximum toute la puissance disponible (1). De plus, le barrage ainsi placé crée à l'amont un grand lac de 23 kilomètres de longueur et de 380 hectares de superficie, emmagasinant 50 millions de mètres cubes d'eau. Par le jeu de l'accumulation de l'eau dans le réservoir, on peut augmenter considérablement le débit utilisé par les turbines aux heures où la consommation de courant est plus grande, et économiser l'eau quand la demande est réduite. C'est ainsi qu'on peut doubler la puissance aux heures de pointes. La retenue sert d'ailleurs également à améliorer le débit dans les périodes d'étiage. M. de la Brosse a calculé que, pour l'année 1905, la plus mauvaise d'une période de 9 ans, on aurait pu, par un emprunt qui aurait fait baisser de $3^m,96$ le niveau de la retenue, avoir toujours un débit moyen de 120 mètres cubes alors que le débit du fleuve

(1) La ville de Paris demande pour elle-même la concession de l'Usine de Genissiat avec l'intention de la rétrocéder à une Société d'Entreprise.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

était descendu fréquemment au-dessous de ce chiffre et s'abaissa un jour jusqu'à 94 mètres cubes par seconde.

Par contre, les variations de débit ainsi créées nécessitent l'établissement d'un barrage compensateur à l'aval pour régulariser le cours du fleuve et annuler les effets de ce flot dont l'amplitude serait de 1m,50 à Seyssel et de 50 centimètres à la Mulatière. Ce barrage compensateur est prévu à Dorches.

Dans ces conditions, avec une hauteur de chute variant de 67 mètres à 69 mètres et en utilisant tout le débit du fleuve jusqu'à un maximum de 500 mètres cubes par seconde, on pourrait, l'usine étant équipée pour 240.000 kilowatts, produire 1.274 millions de kilowatts-heures par an.

Le barrage de Génissiat résout, en outre, d'un seul coup, la question de navigabilité du Haut-Rhône, puisqu'il remplace par un grand lac toute la région des gorges où toute navigation serait toujours impossible, et qu'il suffira d'un ascenseur à bateaux pour faire franchir la dénivellation du barrage.

Enfin, la question des fondations, qui est l'une des plus grosses difficultés dans l'édification d'un grand barrage sur le Rhône, dans ses gorges profondément encaissées, n'est à résoudre qu'une seule fois, avec le barrage unique de Génissiat. L'écoulement des crues, autre question particulièrement importante, ne soulève pas à Génissiat les difficultés très grandes qu'elle rencontrerait ailleurs si, ce qui est conforme à la prudence la plus élémentaire, on n'admet pas que la crête des barrages forme déversoir.

En regard de ce projet de MM. Harlé, Blondel et Mähl, la Société de Bellegarde, conjointement avec la Société des forces hydrauliques de Malpertuis, a présenté, en 1907, un projet comportant la division du Haut-Rhône en deux biefs au moyen de deux barrages, l'un à Bellegarde, l'autre à Malpertuis, le premier relevant les eaux à la cote 332 mètres, comme le projet de Génissiat, le second relevant les eaux à hauteur du canal de fuite de l'usine actuelle de Bellegarde. Mais cette solution à deux biefs est inférieure à celle comportant un bief unique, en particulier au point de vue de l'utilisation de la force et de la navigation du fleuve.

En présence des gros problèmes que soulevait le projet de barrage de Génissiat, notamment au point de vue géologique, et suivant le conseil qu'ils avaient demandé au directeur du service de la carte géologique de la France, à l'époque M. Michel-Lévy, membre de l'Institut, les auteurs du projet et le Comité qui collabore avec eux, confièrent à M. Maurice Lugeon, professeur à l'Université de Lausanne, la mission d'étudier le cañon du Rhône. M. Lugeon, dont les études se sont poursuivies durant plus de deux ans, a résumé, dans un rapport d'ensemble, les résultats de ses recherches.

A partir du défilé de la Perte, le Rhône s'écoule dans la grande dépres-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sion synclinale comprise entre l'anticlinal du Grand-Colombier et celui du Vuache, mais il n'occupe pas l'axe de ce pli synclinal, son lit est taillé dans le flanc occidental du pli. Les couches plongent légèrement vers l'est, c'est-à-dire de la rive droite vers la rive gauche, et se relèvent pour former le flanc occidental d'un anticlinal qui partage en deux la dépression synclinale en question.

Le cañon est une vallée d'érosion ; à une époque antérieure, le Rhône s'écoulait sur une surface dans laquelle le cañon n'était pas entaillé. Le travail d'érosion régressive est encore en pleine activité à la Perte du Rhône qui recule d'environ 70 mètres par siècle. Le fleuve ne suit nullement le tracé d'une cassure préexistante ; il a lui-même creusé son lit. D'ailleurs, en divers points, notamment à Malpertuis, quelques failles ou diaclases coupent le cours du fleuve sans que celui-ci en soit détourné.

Le bassin de la retenue sera imperméable. Sur la rive droite se trouvent diverses sources qui seront simplement refoulées et quelque peu mises en charge. Sur la rive gauche, si l'eau s'échappait par quelque fissure, elle ne pourrait s'enfoncer dans le sol que sur une distance de $2^{km},5$ jusqu'à l'anticlinal du Gros-Faoug.

La société d'Études des forces motrices de la Chautagne projette l'aménagement d'une usine hydroélectrique à Cherrières sous une chute de $15^{m},70$ de hauteur, un débit moyen de 110 mètres cubes, avec installation de sept turbines de 8.000 chevaux (56.000 HP). Il est prévu un réservoir de 2.300.000 mètres cubes qui permettront d'augmenter la puissance de 8.600 chevaux.

28. L'Isère. — Une des plus importantes rivières de France. Elle descend du col d'Iseran (3.640 mètres, Savoie), traverse la vallée du Grésivaudan et se jette dans le Rhône au-dessous de Chatembourg ; son cours est de 290 kilomètres. Cette rivière n'écoule guère que la moitié totale des précipitations atmosphériques, l'autre moitié étant consumée par l'évaporation, la végétation et les infiltrations souterraines. Ses principaux affluents sont l'Arc, le Bréda, le Drac, l'Arly, la Roise, la Morge, le Doron de Bozel, la Fure et la Bourne ; ses eaux sont troubles et grises. L'Isère coule dans la célèbre vallée du Grésivaudan, baigne Romans et tombe dans le Rhône (rive gauche) par 107 mètres d'altitude, entre Tain et Valence. Cette rivière, à Moutiers (usine de Pomblière), a un débit de 8 mètres cubes environ aux basses eaux exceptionnelles et de 150 mètres cubes en hautes eaux d'été. Les grandes crues exceptionnelles peuvent atteindre 250 mètres cubes. Le régime de l'Isère est soutenu par l'abondance des formations neigeuses dans les régions élevées. Cependant l'étiage éprouve d'année en année des variations assez fortes ; il peut descendre à 10 litres par kilomètre carré dans certains cas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A la station de Montmelian, en 1905, le Service d'études des grandes forces hydrauliques a relevé les débits moyens ci-après : janvier, 45 mètres cubes ; février, 82 ; mars, 72 ; avril, 155 ; mai, 199 ; juin, 359 ; juillet, 305 ; août, 248 ; septembre, 218 ; octobre, 129 ; novembre, 116, et décembre, 82. L'étiage, 42 mètres cubes, janvier, février, mars et décembre. C'est dans ce bassin, qui a une superficie de 1.180.000 hectares, que les industries de houille blanche ont jusqu'ici pris le plus grand développement. Mais les industriels sont loin d'en avoir utilisé la majeure partie, et celle-ci sera grandement facilitée par la mise en valeur des lacs des hautes régions, tels que ceux de Tignes, de la Sassière, de Lontel, des Grandes-Rousses et d'Orcières.

Comme grosse usine hydro-électrique établie sur l'Isère nous trou-

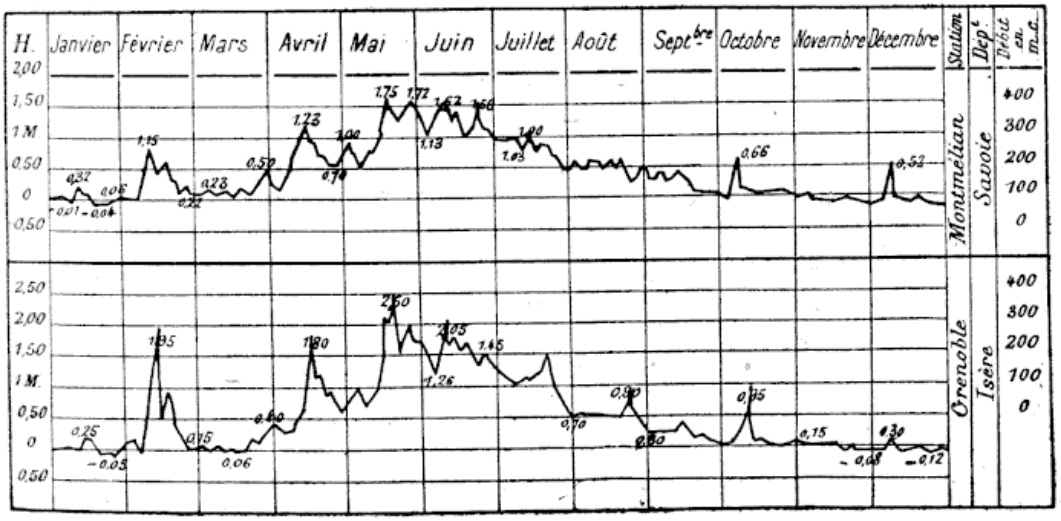


FIG. 66. — Graphiques du régime de l'Isère (année 1904).

vons l'usine de *la Pomblière* (Moutiers) avec une chute de 64 mètres, un débit moyen de 15 mètres et une puissance installée de 13.500 chevaux. Comme usines importantes installées, en cours d'installation ou à l'étude nous citerons : dans la basse Isère une usine avec une chute de 10 mètres, un débit moyen de 150 mètres cubes (Société des grands travaux de Marseille) ; sur la Bourne, nous trouvons : l'usine de *Tencin*, fonctionnant sous une chute de 300 mètres de hauteur, un débit moyen de 1.200 litres et fournissant une puissance de 3.000 chevaux ; l'usine de l'*Ecancière* avec chute de 44 mètres, débit moyen de 4 mètres cubes et puissance installée de 2.800 chevaux ; l'usine de la *Plomblière Saint-Marcel*, chute 75 mètres de hauteur, débit moyen 20 mètres cubes, puissance 13.500 HP. La société d'Électro-chimie à Saint-Marcel (Savoie) dispose en outre d'une chute de 35 mètres de hauteur, au Saut-de la Pucelle (6.000 à 10.000 HP) ; l'usine de *Rencurel*, hauteur de la chute 316 mètres, puissance 9.000 che-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vaux ; l'usine de la *Goule Noire*, 6.250 chevaux, chute 250 mètres. La Société des Forces motrices de la Tarentaise dispose d'une chute de 110 mètres dont le débit moyen est de 40 mètres cubes, pouvant donner 44.000 poncelets.

Entre Saint-Marcel et Moutiers, où le débit varie entre 8 et 30 mètres cubes, une chute avec 21 mètres de hauteur, déterminant une puissance de 5.000 HP est à l'étude. Sur la rivière l'Eau-Rousse, s'élève l'usine

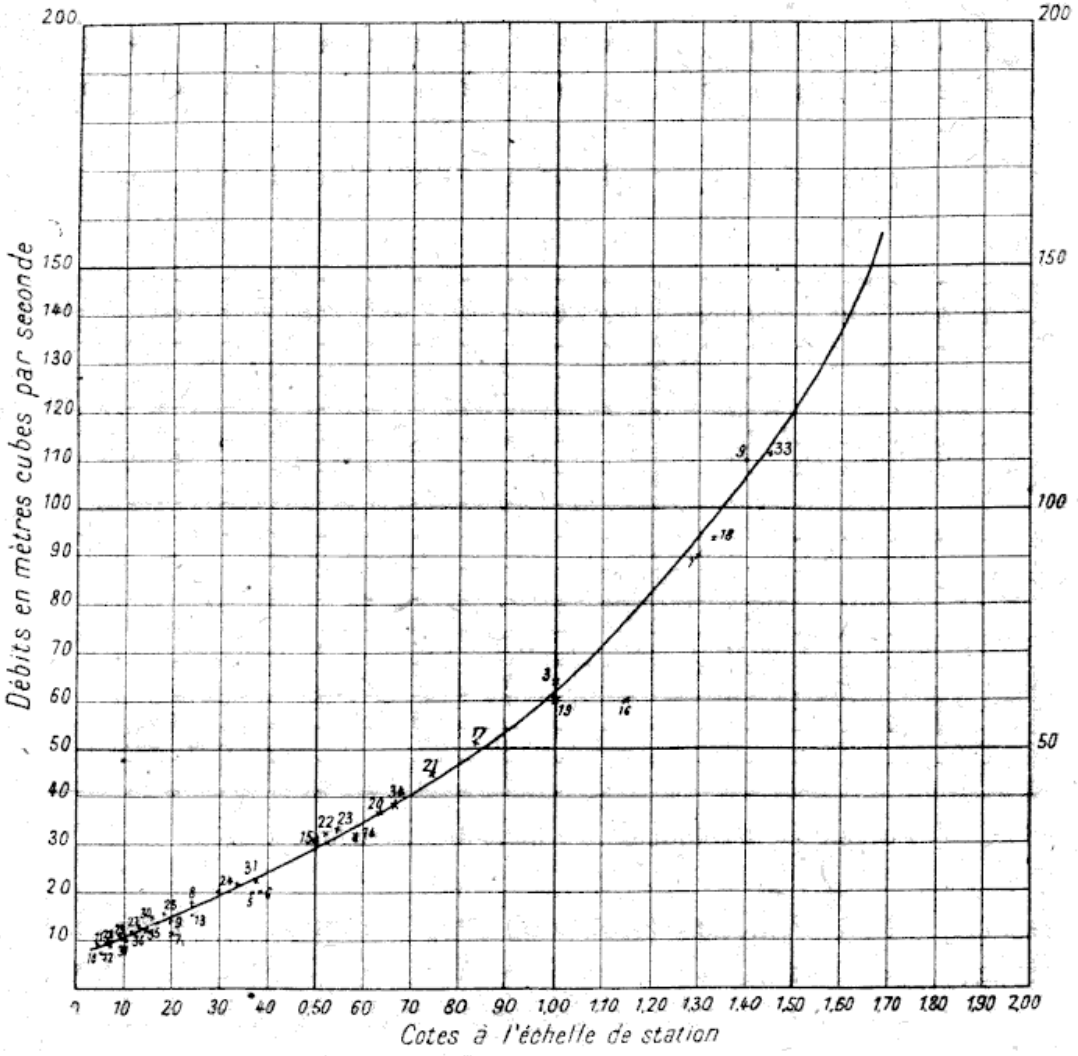


FIG. 67. — Courbe de régime de l'Isère (station de Moutiers).

électro-chimiqus de *N.-D. de Briançon* avec un débit moyen de 2.500 litres, une chute de 230 mètres de hauteur et une puissance de 3.500 chevaux.

La Société des forces motrices du Rhône projette une chute sur la Haute-Isère. Lusine de *Beaumont* sur l'Isère, en construction, disposera de 15.000 à 28.000 chevaux avec une chute de $10^{m},50$. La dérivation comporte un canal à ciel ouvert navigable de 1.620 mètres de longueur, avec un tirant d'eau de $4^{m},50$ et une pente de 0,0002 par mètre. Le canal de fuite de 580 mètres de longueur et de 72 à 80 mètres de largeur sera accessible aux bateaux. On y installe six groupes générateurs et le courant à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

haute tension alimentera Saint-Chamond et les usines de la Société de la Marine. La dépense est évaluée à 18 millions de francs. Sur *l'Arbine*, l'usine de la *Balhie*, avec un débit de 300 à 730 litres et une chute de 415 mètres de hauteur, peut fournir près de 3.000 chevaux.

29. Le Drac. — Ce cours d'eau, dont le bassin a 355.620 hectares, est un des torrents les plus considérables de la France par la longueur de son

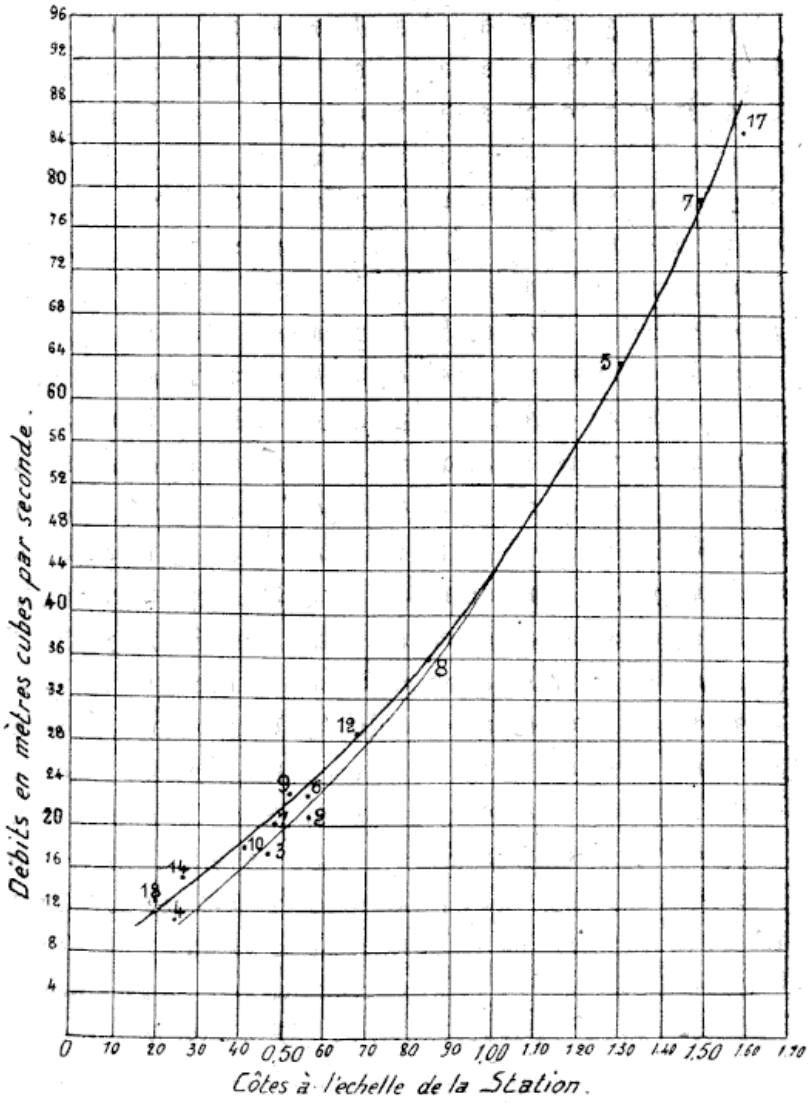


FIG. 68. — Courbe des débits du Drac (station de Ponsonnas).

cours et par l'abondance de ses eaux. Les glaciers qui l'alimentent sont situés à 3.000 et 4.000 mètres d'altitude. Il prend sa source au col des deux Courettes [arrondissement d'Embrun (Hautes-Alpes)] et, après s'être grossi de quelques petites rivières, se jette dans l'Isère à 3 kilomètres et demi en aval de Grenoble. Le Drac débite, en basses eaux, 20 mètres cubes ; en eaux moyennes, 35 mètres cubes, et plus de 1.200 en crues de printemps et pluies d'automne. Il charrie d'énormes matériaux de toutes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dimensions, et les crues sont fréquentes, d'une grande intensité et brusques. Le minimum de débit se produit à la fin de l'été (fin de la fonte des neiges), l'autre en plein hiver, au moment où le froid congèle une partie des sources. Dans les rapides, la pente atteint $0^{m},03$ par mètre. Les rives du torrent sont, dans les parties supérieures (haut Drac), très abruptes, et le lit très étroit, descendant à 5 mètres en certains endroits. Le haut Champsaur dont le tribut aboutit à Aubessagne n'a point de grandes réserves glaciaires et l'ensemble est peu boisé.

Le haut Valjouffrey renferme des glaciers et des névés qui jouent un rôle considérable dans l'écoulement d'été de la Bonne, affluent du Drac ; par contre, les hivers rigoureux, en raison de la grande altitude du bassin, arrivent à tarir à peu près tout écoulement superficiel (torrent de la Navette). Le bassin de la Séveraisse, affluent du Drac, renferme un certain nombre de glaciers. Les affluents de cette rivière sont en outre : le canal du Beaumont, la Roizonne et la Vanne.

Quatre grosses usines hydro-électriques sont actuellement en fonctionnement sur le Drac ce sont : l'usine du *Pont du Loup*, chute 43 mètres, débit moyen 11 mètres cubes, puissance installée 4.500 chevaux ; l'usine d'*Avignonet*, respectivement 23 mètres, 22 mètres cubes et 10.500 chevaux ; l'usine de *Champ*, 31 mètres, 22 mètres cube et 7.300 chevaux (réserve thermique 2.500 chevaux) ; l'usine de *Ponsonnas*, chute 52 mètres, puissance 15.000 chevaux. Par la réunion des lacs Laffrey et Petit Chat pouvant donner 8 millions de chevaux-heures accusant un débit de 500 à 2.500 litres, on a édifié l'usine de la *Loula*, en utilisant une chute de 310 mètres de hauteur fournissant une puissance de 1.000 chevaux. Usines en cours d'installation ou à l'étude : sur le Drac inférieur, usine avec 22 mètres de chute et 40 mètres cubes débit moyen (Société des Forces motrices du Drac inférieur) ; à *Pont-de-Claix*, usine avec 17 mètres de chute et 40 mètres cubes débit moyen ; sa puissance variera de 6.000 à 20.000 HP.

Le canal du Beaumont et la Roizonne possèdent respectivement les usines suivantes : *Beaumont* (chute 260 mètres, débit moyen 2 mètres cubes, puissance installée 3.000 chevaux) ; *Pont-Haut* (chute 208 mètres, débit moyen 2 mètres cubes, 7.300 chevaux installés).

30. L'Arve. — Ce grand torrent savoisien, un des plus accidentés et des plus élevés des Alpes, prend sa source au col des Balmes (Haute-Savoie), traverse la vallée de Chamonix et se jette dans le Rhône près de Genève. Son cours est de 100 kilomètres. Il comprend presque tout le versant français du massif du mont Blanc et la plupart des grands glaciers de ce massif.

L'Arve n'est d'abord qu'un ruisseau avant d'avoir reçu les eaux troubles, impétueuses, qui sortent du grand glacier d'Argentière. Il est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

presque doublé par l'Arveron qui alimente la Mer de Glace. A Servoz, il reçoit la Diosaz, célèbre pour ses gorges plus profondes et plus pittoresques que celles du Trient. Puis, au delà d'un dernier défilé, elle entre dans la vallée de Salanches et se grossit du Bon-Nant (altitude 550 mètres).

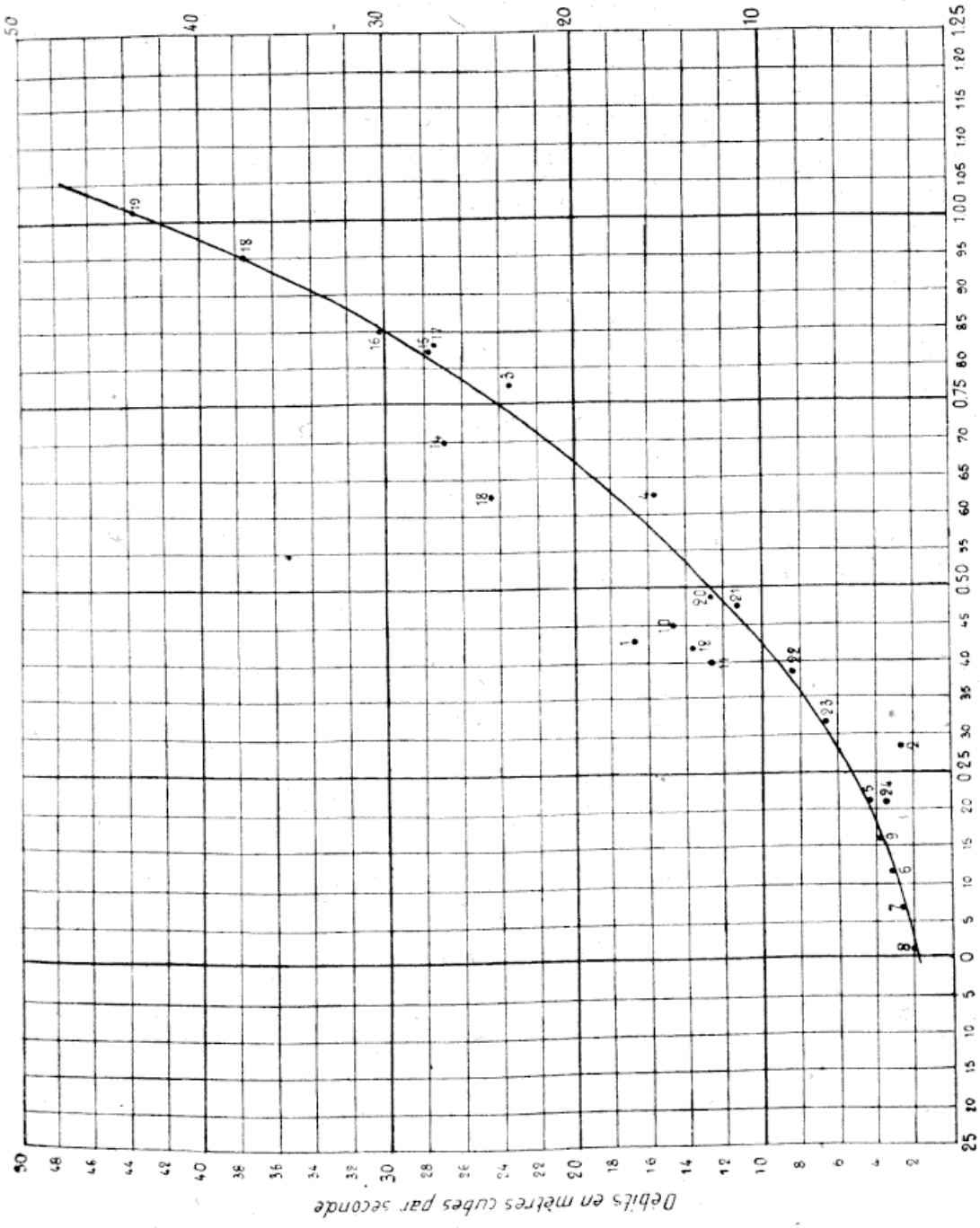


FIG. 69. — Courbe de régime de l'Arve (station de Chamonix).

C'est un de nos cours d'eau torrentiels qui contient les plus importantes réserves d'énergie ; son débit d'étiage est soutenu par une abondante fonte de glaces, sa pente est rapide, et il reçoit le tribut des neiges du mont Blanc. La hauteur de pluie tombant dans le voisinage du mont géant dépasse 2 mètres ; à Cluses (Haute-Savoie), l'Arve s'accroît du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Foron, du Reposoir et du Giffre ; il reçoit en outre les eaux de la Borne, du Foron de la Roche, du Foron de Reignier, du Viaison, de la Ménoge, du Foron d'Annemasse et de l'Aire. Le débit maximum par kilomètre carré du bassin de l'Arve est de 334 litres par seconde, le débit moyen ou module 51, le débit caractéristique moyen 47, le débit caractéristique d'étiage 9 et le débit minimum 5 litres (année 1905). Le rapport du débit le plus fort au débit le plus faible a été de 65. Les superficies des principaux affluents sont : pour le Giffre, 45.260 hectares ; pour la Ménoge, 15.980 ; pour la Borne, 15.500 ; pour le Bon-Nant, 14.800; pour l'Aire, 9.380, et pour la Diosaz, 5.500.

Le débit de l'Arve varie entre 35 mètres cubes à l'étiage extrême et 625 aux crues maxima ; il coule au confluent à peu près la moitié du volume du Rhône lui-même ; son bassin est de 208.000 hectares.

Les usines aménagées sur l'Arve n'utilisent encore qu'une faible fraction des forces hydrauliques existantes, dont la majeure partie est encore disponible.

Les principales usines hydro-électriques établies sur cette rivière sont : *Les Chavants*, chute 94 mètres, débit à l'étiage 2.200 litres, puissance installée 5.500 chevaux ; *Servoz*, respectivement 38 mètres, 3.200 litres et puissance installée 5.000 chevaux (1) ; *Chedde*, 135 mètres, 5 mètres cubes débit moyen et 18.000 chevaux. Sur le Bon Nant, il s'est créé trois usines hydro-électriques importantes : *Bionnay*, chute 44 mètres, débit moyen 4 mètres cubes et 6.300 chevaux installés ; *Les Rateaux*, respectivement, 100 mètres, 3 mètres cubes et 4.500 chevaux ; *Le Fayet*, chute 165 mètres, débit moyen 4 mètres cubes et 15.000 chevaux installés ; de *Roengers*, en cours d'installation, hauteur de chute 75 mètres, puissance installée 6.000 chevaux. Toutes les usines installées sur le Bon Nant appartiennent à la Société électrométallurgique Paul Girod, qui dispose actuellement de 70.000 chevaux. Ces usines envoient à celle d'Ugine du courant électrique à la tension de 45.000 volts ; les usines de Villaret, de Queige et de Venthon sur le Doron de Beaufort produisent du courant à 20.000 volts, envoyé aussi aux aciéries Girod. D'autre part l'usine d'Ugine envoie du courant sous la tension de 40.000 volts à l'usine de *Chedde* et à la tension de 70.000 volts aux usines de *Brassilly* et du *Val de Fier*.

31. L'Arc, un des torrents les plus terribles de la France, sort, à 2.188 mètres d'altitude, d'un glacier qui domine la Lévanna ou Trois-Becs ; il reçoit sur son parcours nombre de cours d'eau issus aussi de glaciers, la Leuta, l'Avérole, le Ribon et le Doron, qui lui apportent le tribut

(1) 2.500 chevaux de l'usine de Servoz et 3.200 de l'usine des Chavants sont employés pour la traction des trains.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de plusieurs glaciers de la Valloise ; un peu plus loin, il reçoit la Valloirette qui lui fournit les eaux du Grand-Galibier, des Trois-Évêchés, des Ai-

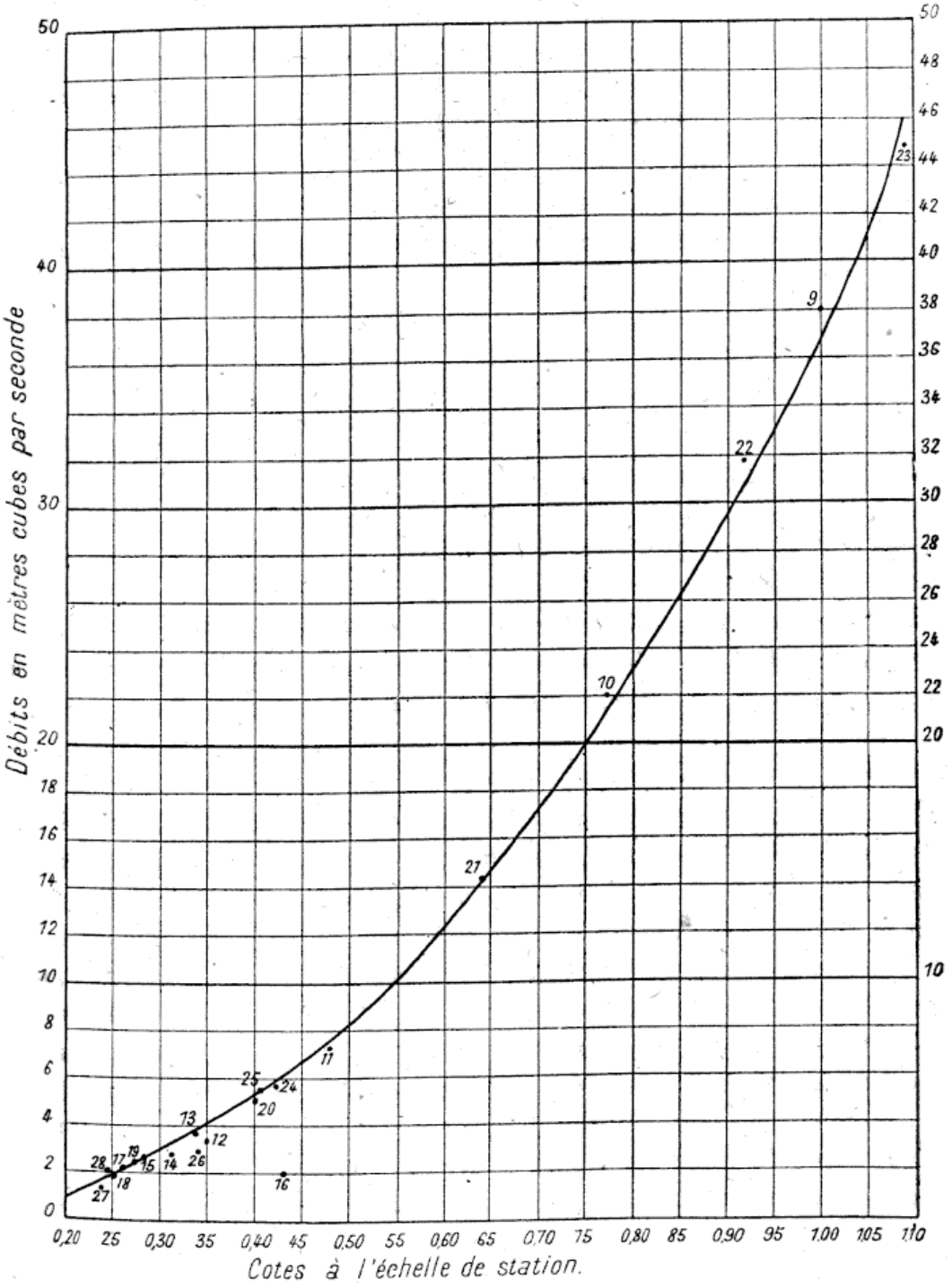


FIG. 70. — Courbe de régime de l'Arc (station de Termignon).

guilles d'Arves et l'Arvan, qui lui versent l'apport des glaciers des Grandes Rousses. Là il n'a plus que 530 mètres d'altitude. De Saint-Jean-de-Maurienne, qu'il baigne, à l'Isère, il reçoit, dans le bassin de la Chambre, à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gauche, le Glandon et à droite, le Bugeon, qui descend du col de la Madeleine.

Enfin il se précipite dans l'Isère par 290 mètres d'altitude après un parcours de 150 kilomètres. Le bassin de l'Arc n'est que de 195.660 hectares.

A Termignon, le débit caractéristique d'étiage est de 1 m³,500 et le débit caractéristique moyen 5 m³,500 et, à Hermillon, ces mêmes débits sont respectivement 14 m³,400 et 23 m³,800. Les débits extrêmes dépassent parfois 600 mètres cubes.

L'Arc est régulièrement alimenté par des précipitations abondantes et soutenu pendant la saison sèche par la fonte des neiges qui garnissent les hautes régions.

Les grosses usines hydro-électriques établies sur cette rivière sont : *La Praz*, chute 68 mètres, débit moyen 9 mètres cubes, puissance installée 11.000 chevaux ; *Prémonl*, respectivement, 75 mètres, 8 mètres cubes et 12.000 chevaux ; *La Saussaz*, respectivement, 69 mètres, 13 mètres cubes et 17.800 chevaux ; *Saint-Félix*, respectivement 18 mètres, 11 mètres cubes et 3.000 chevaux ; *Saint-Julien Montricher*, respectivement, 42 mètres, 15 mètres cubes et 14.400 chevaux ; *Saint-Jean de Maurienne*, respectivement, 67 mètres, 17 mètres cubes et 23.000 chevaux ; *Pontamafrey*, respectivement, 37 mètres, 20 mètres cubes et 10.000 chevaux ; *Avrieux*, 3.500 à 4.000 litres en hiver, 100 mètres de hauteur de chute et 16.000 chevaux, puissance installée (produits électro-chimiques). Le Glandon possède l'usine électro-chimique de *Saint-Arc-la-Chambre* (chute 280 mètres, débit moyen 1.500 litres et puissance installée 5.500 chevaux). Sur l'*Epierre*, l'usine *des Fabriques*, avec un débit moyen de 250 litres, une chute de 723 mètres de hauteur et 2.000 chevaux de puissance a été aménagée pour la production de l'oxyde de zinc (procédé Côte et Pierron). Sur le *Nant Bruant* est située l'usine de *Corbière* qui utilise une chute de 240 mètres de hauteur, avec un débit variant de 80 à 350 litres et une puissance de 2.850 chevaux. La Société Électro-métallurgique de Saint-Jul en-Montricher aménage en ce moment une chute de 248 mètres de hauteur pouvant fournir 1.800 chevaux. Sur l'*Arvan*, à *Fontcouverte*, une chute de 4 m,50 de hauteur pouvant fournir 9.000 chevaux est en voie de réalisation. Sur *le Bens*, l'usine de ce nom, en voie de réalisation, pourra fournir une puissance de 9.000 chevaux, avec un débit variant de 350 à 1.500 litres et une réserve hydraulique de 14.000 mètres cubes.

32. Le Giffre. — Cette rivière torrentielle descend par 746 mètres d'altitude des monts qui séparent la Savoie de la Suisse, et, après avoir reçu les eaux de quelques torrents, se jette dans l'Arve, après un parcours de 48 kilomètres. La superficie de son bassin est de 45.260 hectares. Elle a un débit de 7 mètres cubes pendant huit mois de l'année et atteint 13 mètres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cubes lors des hautes eaux. Son régime d'étiage est de 5 mètres cubes. Ses eaux sont généralement très claires.

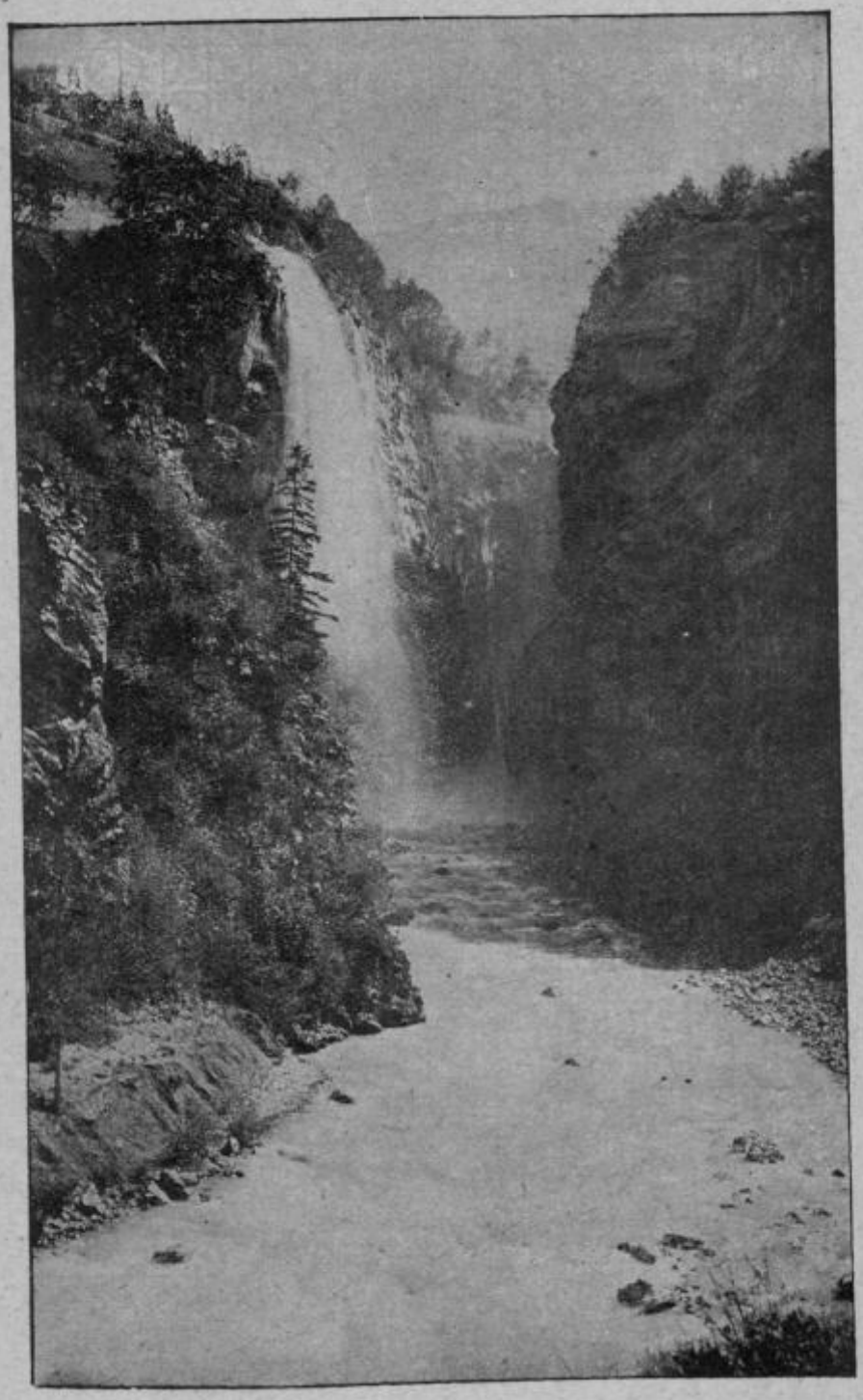


Fig. 71. — Gorges du Giffre.

Les nombreuses cascades qui alimentent le Giffre sont très impressionnantes, celle du Dard ou Jordane a près de 400 mètres de hauteur. Le Giffre reçoit les eaux du Foron de Taninges et de la Risse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

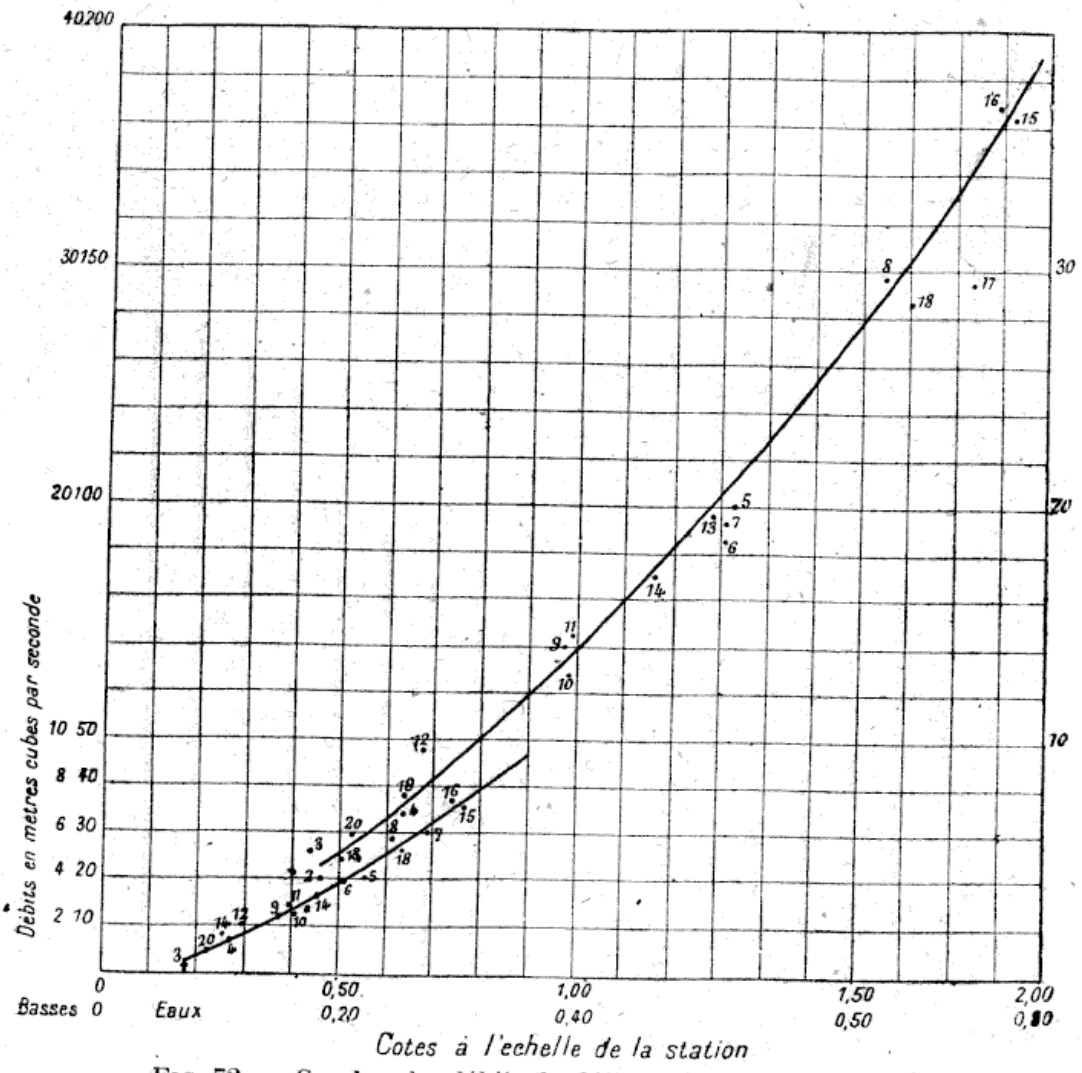


FIG. 72. — Courbes des débits du Giffre (station de Marignier).

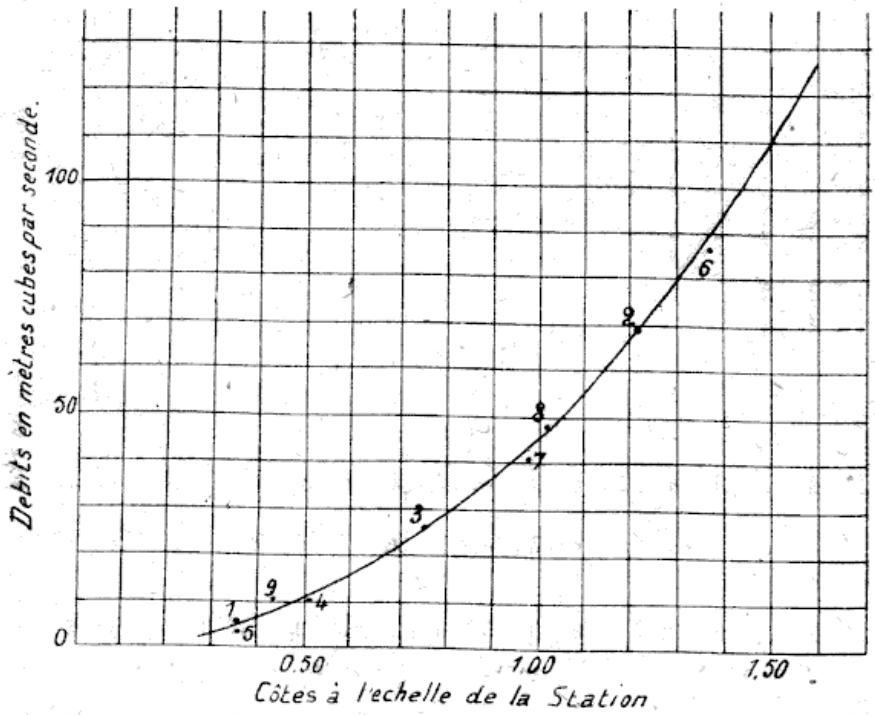


FIG. 73. — Courbe des débits de la Romanche (station de Bourg-d'Oisans).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'usine hydro-électrique du *Pont du Giffre* a 68 mètres de chute, un débit moyen de $9^{m3},4$ et une puissance installée de 11.500 chevaux.

La Société Électro-chimique du Giffre dispose en outre d'une chute de 58 mètres de hauteur sur le Foron qui débite 10 mètres cubes (eaux moyennes) pouvant fournir 5.000 chevaux.

33. La Romanche. — Cette rivière torrentielle prend sa source dans les glaciers situés au sud-ouest de Villers-d'Arène, vis-à-vis du col de Lautaret (Hautes-Alpes), pour se jeter dans le Drac après un parcours de 85 kilomètres. La partie inférieure est parsemée de rochers et d'îlots. Cette rivière, en raison de son origine glaciaire, présente le grand avantage de ne pas être sujette aux variations de débit qui caractérisent les cours d'eau prenant naissance à de moyennes altitudes et alimentés par les pluies et les neiges temporaires. Le bassin de la Romanche profite d'abondantes condensations dont le produit s'ajoute à celui des précipitations ordinaires, pour augmenter d'autant le débit de l'émissaire. Elle a ses eaux basses, moyennes et grosses chaque année, aux mêmes époques, ce qui est à considérer pour la régularité de marche des usines. Les affluents de cette rivière sont : la Sarenne, l'Eau d'Olle ; le ruisseau de Laffrey et le Vernon.

A Bourg-d'Oisans, les débits caractéristiques d'étiage et moyens ont été pendant la période de 1904 à 1907, $3^{m3},460$ et $12^{m3},980$.

Les principales usines hydroélectriques établies sur cette rivière sont : *Livet*, 58 mètres de chute, débit moyen 16 mètres cubes, puissance installée 21.000 chevaux ; *Les Roberts*, chute $38^{m},50$, débit moyen 16 mètres cubes, puissance installée 11.500 chevaux ; *Rioupeyroux*, chute 68 mètres, débit moyen 23 mètres cubes, puissance installée 23.000 chevaux ; *Les Clavaux*, chutes 29 mètres et 42 mètres, débit moyen 18 mètres cubes, puissance installée 5.000 chevaux ; *Pierre-Ebeysse*, chute $41^{m},50$, débit moyen 10 mètres cubes, puissance installée 4.300 chevaux ; *Gavet*, chute 57 mètres, débit moyen $10^{m3},500$, puissance installée 12.000 chevaux ; *Séchillienne* respectivement, 9 mètres, $14^{m3},500$ et 1.300 chevaux.

Une seconde usine a été installée sur le canal de fuite de l'usine de carbure de calcium. La hauteur de la chute est de 23 mètres, et la puissance installée 3.000 chevaux utilisés par les Sociétés de produits chimiques de Jarrie-Vizille et de Thaon. M. D. Nier a étudié une chute pouvant fournir sur 150 mètres de hauteur une puissance de 6.000 chevaux.

Sur l'Eau d'Olle on a édifié deux usines importantes : *Le Rivier d'Allemont*, chute 302 mètres, débit moyen $2^{m3},300$, puissance installée 15.900 chevaux ; *Le Verney d'Allemont*, chute 350 mètres, débit moyen $3^{m3},900$ et puissance installée 19.500 chevaux. Sur le ruisseau de Laffrey, les usines de *Loulla* et de *Jouchy*, la première avec chute de 360 mètres,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débit moyen de 150 litres et puissance installée de 1.800 chevaux, la seconde avec chute de 550 mètres, débit moyen 400 litres et puissance installée 3.000 chevaux. Sur le *Ferrand*, affluent de la Romanche, M. D. Nier a étudié la chute de *Pisse*, qui sous une hauteur de chute de 750 mètres, un débit de 160 à 300 litres, peut donner 1.800 chevaux, et une autre chute, qui avec un débit de 400 à 1.000 litres et 400 mètres de hauteur, fournirait 3.000 chevaux.

34. Le Bréda. Le Cernon. — *Le Bréda*, affluent important de la rive gauche de l'Isère, est un cours d'eau torrentiel dont les eaux proviennent d'un massif montagneux très étendu, à hauts sommets, conte-

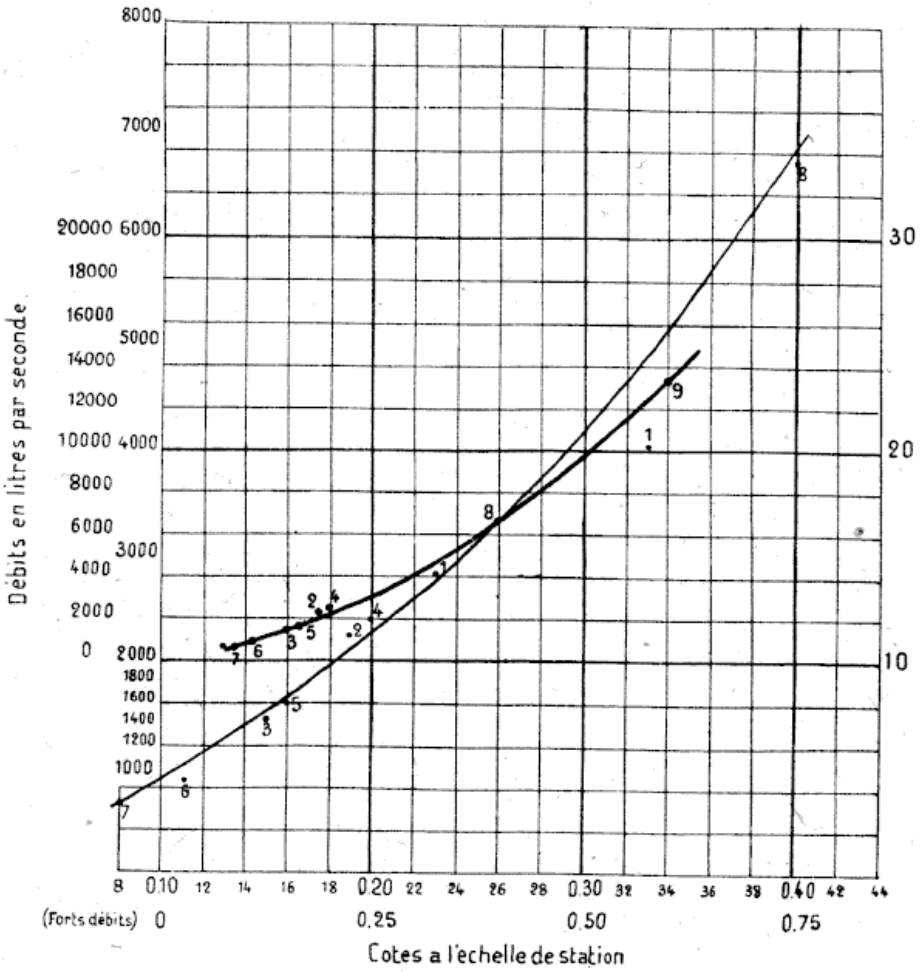


FIG. 74. — Courbes du régime du Bréda (station d'Allevard).

nant des glaciers et des lacs qui constituent des bassins d'alimentation de premier ordre. Le Bréda a un débit qui ne descend pas au-dessous de 3.000 litres aux faibles étiages qui n'ont lieu que dans les hivers froids, rigoureux et persistants. Son cours est régularisé par le lac Carré, d'où il sort en pente très rapide.

Le *Cernon*, affluent de la rive droite de l'Isère, a un débit qui varie de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

30 litres à 150 ou 200 litres en eaux moyennes, pour atteindre 2.000 ou 3.000 en très hautes eaux. Il prend sa source à l'altitude de 1.000 mètres dans la forêt des Eparres, et son régime est des plus réguliers. Sur cette rivière est installée l'usine de *Chapareillan* fournissant une puissance de 900 chevaux sous une chute de 612 mètres avec un débit de 250 litres et une réserve journalière de 3.000 mètres cubes.

Les principales usines hydro-électriques établies sur le Bréda sont : *Fond de France*, chute 1.000 mètres, débit moyen 450 litres, puissance installée 8.000 chevaux; *Grande Valloire*, respectivement, 120 mètres, 2 mètres cubes, 4.400 chevaux ; *La Ferrière-Rondet*, respectivement 80 mètres, 1.800 litres et 1.500 chevaux ; *Riondel Pinsot*, respectivement, 96m,50, 2.200 litres et 5.200 chevaux ; *Parc*, respectivement, 47 mètres, étiage 900 litres et 1.350 chevaux ; de *la Gorge*, respectivement, 32 mètres et 380 chevaux ; *Arvillard*, chute 500 mètres, débit moyen 600 litres et 11.000 chevaux ; *Pontcharra*, respectivement, 42 m,50, 3m,500 et 3.000 chevaux et une réserve thermique de 450 kilowatts. La Société des Forces motrices du Bréda et de la Grande Valloire dispose de trois chutes non aménagées, une de 600 chevaux et deux de 300 chevaux en basses eaux.

35. Le Doron de Bozel. — Cet affluent gauche de l'Isère, n'a que 45 kilomètres de cours, mais il roule une grande masse d'eau qu'il reçoit de torrents de grands et nombreux glaciers. Il naît près du col de Chanrie (2.806 mètres) ouvert entre les glaciers de Péclet et ceux de la Dent Parrachée. A Pralogran (1.424 mètres), il reçoit la Glière (venant du massif de la Vanoise) ; il se grossit, au-dessus de Bozel (895 mètres), du torrent de Prémou, où on voit la magnifique gorge de Champigny. A Brides-les-Bains, il prend le torrent des Allues qui lui apporte les eaux du grand glacier de Gébroulaz ; enfin, en amont de Salins, il se grossit du Nant de Belleville, son plus long affluent, qui lui verse le tribut de plusieurs nants ou torrents (nants de Saint-Martin, des Encombres, de Nantbrun, etc.). Le Doron de Bozel tombe dans l'Isère, en aval de Moutiers, à 475 mètres d'altitude ; la superficie de son bassin est de 66.790 hectares.

A la station de Moutiers, pendant l'année 1907, on a relevé pour le débit caractéristique d'étiage, 5m3,650 et pour le débit caractéristique moyen 12m3,242. Le régime de ce torrent est franchement glaciaire.

Sur cette rivière il existe actuellement trois grosses usines hydro-électriques : *Villard de Bozel* (chute 546 mètres, débit moyen 1.500 litres, puissance installée totale 13.900 chevaux) ; *Bozel* (chute 677 mètres, débit moyen 1.200 litres et puissance installée 12.000 chevaux) ; *La Rageal* (chute 180 mètres, débit moyen 2 mètres cubes, puissance installée 11.000 chevaux). La Société Générale d'Électricité de Bozel possède, sur le *Doron de Pralognan*, la chute de *Ballandaz*, qui a un débit variant de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

700 à 1.700 litres, sous 230 mètres de hauteur, représentant 4.600 chevaux et sur le *Doron de Champagny*, une chute de 546 mètres de hauteur avec

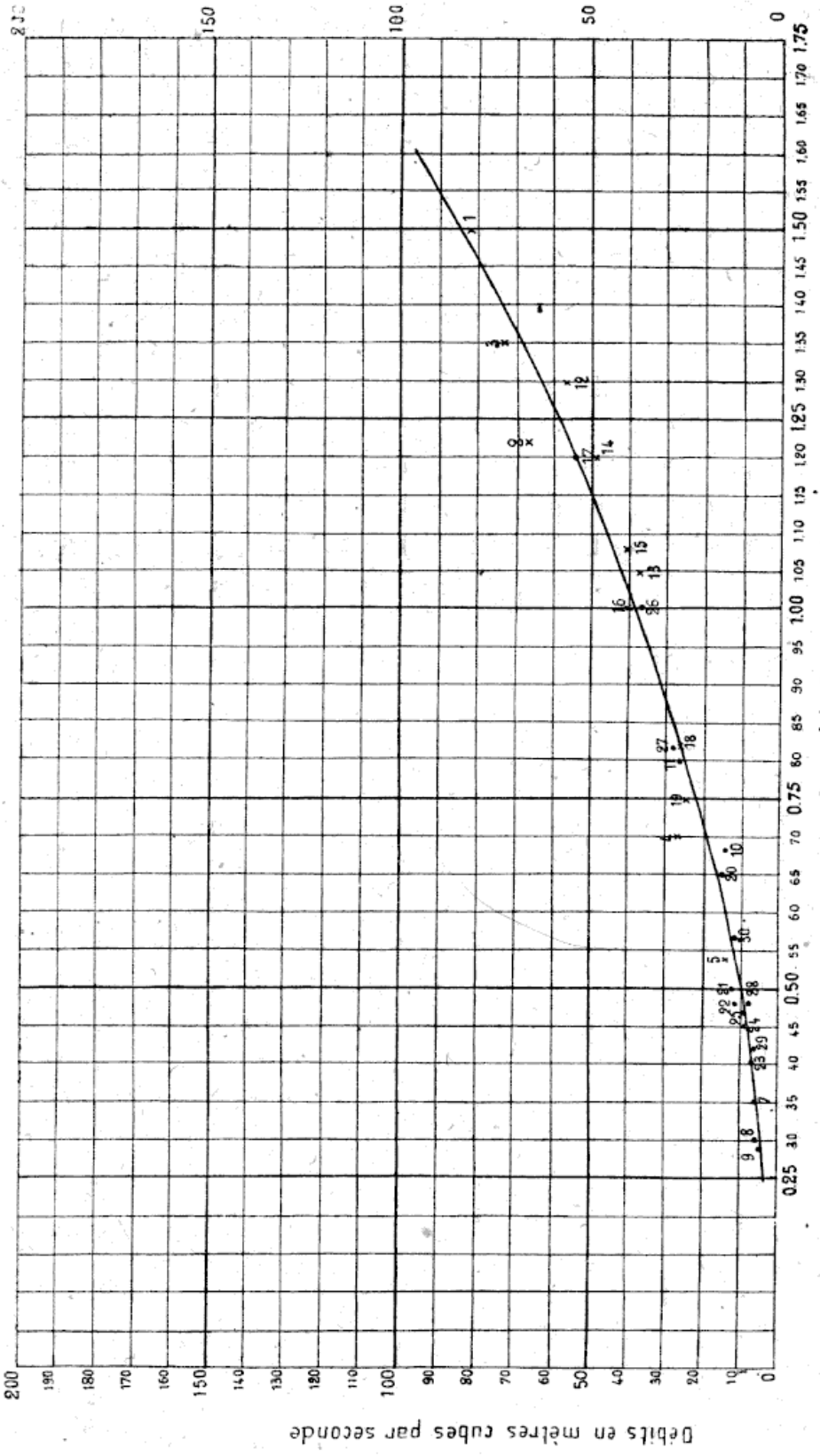


FIG. 75. — Courbe de régime du Doron de Bozel (Station de Moutiers).

un débit de 500 à 2.500 litres, pouvant fournir 9.000 chevaux. Il lui est adjoint une installation de secours de 3.000 chevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

36. L'Arly. Cet affluent de droite de l'Isère, est un torrent de 45 kilomètres de longueur. Il a sa source au mont Joli et son cours supérieur dans la vallée de Mégève (Haute-Savoie) dont le chef-lieu est à 1.125 mètres d'altitude. Il reçoit dans son cours inférieur la Chaise et le Doron de Beaufort. Ce dernier réunit dans le val de Beaufort (758 mètres) les trois branches supérieures qui le composent : le Doron, l'Argentine et le Dorinet.

Il n'y a pas de glacier dans le bassin de l'Arly. Le régime de ce torrent comporte deux étiages, en hiver par les grands froids, et à la fin de l'été lorsque les réserves d'humidité ont disparu.

Le débit du bassin par kilomètre carré est de 7l,5 pour l'étiage et 23l,6 pour le régime moyen.

Cette rivière a été utilisée par l'importante usine électro-métallurgique d'*Ugine*, sous une chute de 122 mètres, un débit moyen de 5,6 mètres cubes donnant une puissance de 9.000 chevaux. Deux usines hydroélectriques importantes ont été créées sur le Doron de Beaufort, savoir : *Queige* (chute 89 mètres, débit moyen 4m3,500, puissance installée 4.500 chevaux) ; *Venthon* (chute 91 mètres,

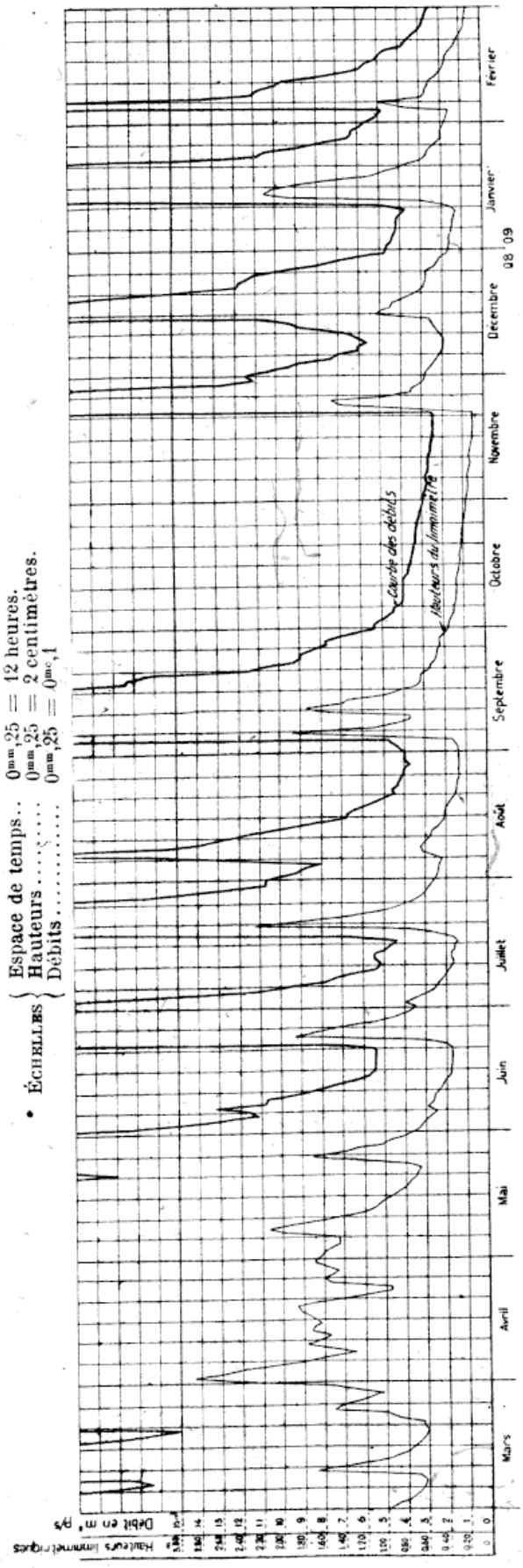


FIG. 76. — Diagramme de débit du Doubs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débit moyen $4^{m3},500$ et 7.000 chevaux installés). L'usine de *Villarel* est installée avec une chute de 10 mètres de hauteur ; sur l'*Argentine* l'usine de *Monlarlier* utilise une chute de 740 mètres de hauteur, avec un débit de 90 à 270 litres, donnant une puissance de 2.000 chevaux.

37. Le Guiers (affluent du Rhône) est un beau torrent, de plus de 50 kilomètres de longueur. Il est formé par la réunion de deux autres torrents du massif de la Grande-Chartreuse, le Guiers-Mort et le Guiers-Vif, également d'allure rapide. Il se jette dans le Rhône par 212 mètres d'altitude. Il reçoit le Thers, déversoir du lac d'Aiguebelette, à 376 mètres d'altitude.

Le bassin du Guiers n'est alimenté par aucun glacier ; les précipitations atmosphériques y atteignent une hauteur de $1^{m},72$, en raison des nombreuses forêts qui le couvrent.

A la station d'Entre-Deux-Guiers, pendant les années 1906 et 1907, on a relevé pour le débit caractéristique d'étiage $0^{m3},250$ et pour le débit caractéristique moyen $2^{m3},850$.

Cette rivière a été aménagée pour l'établissement de l'importante usine de *Chailles* construite en 1898 et appartenant à la Société Électrométallurgique de Saint-Béron qui utilise une chute de 86 mètres, avec un étiage de 1.000 litres et une puissance installée de 20.000 chevaux recueillis par 6 groupes électrogènes de 3.000 HP, 1 de 1.000 HP, 4 de rechange de 500 HP et 3 excitatrices de 200 HP. Sur ce nombre, 1.000 HP sont envoyés à la Société hydroélectrique du Guiers pour une distribution d'énergie dans la région.

La Société de Saint-Béron procède en ce moment à la construction d'une nouvelle dérivation de 1.000 chevaux de puissance. Cette société produit des ferros-alliages, ferros-chrome, ferros-molydène, ferros-manganèse, etc. Avant la guerre, elle livrait 1.500 tonnes environ ; depuis, sa production a plus que doublé.

Sur le Thiers, affluent du Guiers, on a installé l'usine de *La Bridoire*, avec une chute brute de 120 mètres, un débit maximum de 7 mètres cubes. La puissance installée est de 8.720 chevaux. La Société hydro-électrique de la Bridoire projette l'établissement d'une chute de 120 mètres de hauteur sur le Thiers aussi, émissaire du lac d'Aiguebellette.

38. Le Doubs, la Valoirette, le Furon, l'Ain. — Rivières de l'Aveyron. — *Le Doubs.* — Cette rivière prend naissance près de Mouthe, dans le flanc du mont Risoux, à l'altitude de 937 mètres. Elle n'a pas moins de 430 kilomètres de longueur, de sa source à la réunion à la Saône. Le Doubs alimente les lacs de Romaray, de Saint-Point, de Chaillexon ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des Brettets, de Maison-Monsieur ; il a peu d'affluents, mais le volume de ses eaux augmente sensiblement par l'appoint de plusieurs sources vauclusiennes. Dans la partie supérieure de son cours, en dessous du fort de Joux et aux gorges de Remonot, le Doubs subit des pertes assez importantes.

En dehors des ruisseaux de Biaufond, de Vautenaivre et de Combe Malrang, le Doubs reçoit le Drugeon, en aval de Pontarlier, le Bied-du-Locle, le Dessoubre, l'Allaine, la Loue et le Linon.

En son cours moyen, il constitue la frontière entre la France et la Suisse sur 45 kilomètres de longueur, c'est-à-dire des Brenets, canton de Neufchâtel, jusqu'à Clairbief, en aval de Goumois.

Les fluctuations de niveau de cette rivière sont très fortes ; le débit d'étiage peut baisser jusqu'à 3 mètres cubes à la seconde. La (*fig.* 76) montre le régime de cette rivière pendant le cours de l'année 1908-1909, à la station de jaugeage de l'usine du Refrain (§ 350).

FIG. 77. — Saut du Doubs.

Sur le Doubs, nous trouvons trois importantes usines : celle du *Refrain* utilisant une chute de 60 mètres avec un débit moyen de 20 mètres cubes et une puissance de 11.500 chevaux, de *Montjoie* avec 12.000 chevaux et de *Mordane*, actuellement en construction. Cette dernière utilise une chute de 60 mètres de hauteur, sous un débit de 8 mètres cubes pouvant fournir 4.800 chevaux. L'usine du Refrain reçoit du courant des mines de Ronchamps, à la tension de 55.000 volts, et de la Suisse (courant triphasé, 9.000 volts). Enfin la Société des forces motrices du Refrain installe dans son usine un groupe de puissance équivalent à celui en fonctionnement. En outre elle établit une usine thermique de secours à l'aide de trois moteurs Diesel de 1.500 chevaux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaque. Des travaux de régularisation du Doubs sont commencés en collaboration avec la Société du lac Saint-Point. La Société de Belchamp exploite une chute de 450 mètres de hauteur représentant 500 chevaux, plus une installation de secours de 200 chevaux. Elle installe en outre une usine de 2.000 chevaux, sous une chute de 5m,70 de hauteur.

Sur la rivière La Loue on vient d'édifier : l'usine de *Moulhier* qui a une puissance de 12.500 chevaux sous une chute de 130 mètres ; l'usine de la *Source* avec 1.150 chevaux sous une chute de 19 mètres de hauteur ; enfin l'usine de *Champagne* qui utilise une chute de 1m,90 de hauteur, produisant 100 chevaux.

La puissance de l'ancienne usine qui existait sur la rivière La Loue a été portée à 1.750 chevaux.

La *Valloirette*, affluent de la rive gauche de l'Arc, est un cours d'eau extrêmement rapide, car la pente y dépasse parfois 15 0/0. Les eaux y entraînent fort peu de sable et de gravier, mais charrient en hiver beaucoup de neige provenant des avalanches.

L'usine de *Calypso* édifiée sur cette rivière a une puissance installée de 21.000 chevaux sous deux chutes de 600 mètres et 135 mètres de hauteur et un débit de 1m3,750.

Le *Furon*, affluent de la rive gauche de l'Isère, a un débit moyen de 600 litres pendant six mois de l'année. De juillet à septembre, le débit reste inférieur à 400 litres pendant les étés secs. Les deux périodes d'étiage (janvier et septembre) donnent une moyenne de 250 litres pour la première et de 200 pour la seconde.

Le Furon alimente : l'usine d'*Engins* d'une puissance de 1.600 chevaux avec un débit de 300 litres et une chute de 282 mètres de hauteur et l'usine *des Côtes*, avec une chute de 140 mètres de hauteur représentant une puissance de 350 chevaux. La Société de Grenoble et Voiron a en projet une chute importante sur le bas Furon.

L'*Ain* prend sa source sur le versant occidental du Jura et l'allure de ses eaux est torrentielle, son volume varie entre 24 et 560 mètres cubes ; mais il se produit généralement chaque année deux périodes d'étiage, une en hiver et une en été. Pendant l'étiage d'été le débit de l'Ain s'abaisse à 4 mètres cubes par seconde. Après une période de grande sécheresse, il descend même au-dessous de ce chiffre.

L'Ain reçoit la Bienne, l'Oignin, la Valouse, le Veyron, le Suran, l'Albarine et le Toison. La Bienne est un beau torrent et l'Oignin forme les cascades de Charmine et recueille le Bras du Lac qui est l'écoulement du lac de Nantua. L'Albarine, à partir de l'Entrepont, tombe par une série de cascades remarquables dont les principales sont celles de Charabotte et des Aibruants.

Sur cette rivière nous trouvons l'usine du *Saul-Morlier* d'une puissance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 7.000 chevaux avec une chute de 18m,40 de hauteur ; l'usine de *Marigny*, chute de 20 mètres de hauteur, puissance 1.300 chevaux, avec deux usines thermiques de secours, l'une à Vescles (1.100 chevaux), et l'autre à Pont-de-Vaux (200 chevaux).

Rivières de l'Aveyron. — Les rivières qui descendent de l'arête des Cévennes apportent à la Garonne 32 0/0 de son volume et charrient d'énormes quantités de matériaux détritiques qui vont encombrer le lit du fleuve. Le régime de ces rivières est éminemment torrentiel ; leur volume en temps de crue s'élève à 200, 300, 400 et 500 fois le débit d'étiage.

Sur la *Moselle*, nous avons à signaler l'importante usine hydroélectrique de *Millery* dont les caractéristiques sont : hauteur de chute 1m,80, puissance hydraulique 600 chevaux et installation à vapeur de 6.000 chevaux.

39. Le Fier, Les Dranses (Haute-Savoie).— Le Fier sort, à l'altitude de 2.020 mètres, du mont Charvin et a une longueur de 75 kilomètres. Il débouche dans le bassin d'Annecy, passe aux célèbres abîmes du Fier, à Rumilly, où il reçoit le Chéran (50 kilomètres) puis, peu après les Portes du Fier, il se jette dans le Rhône par 250 mètres d'altitude. Le Fier, qui a un débit de 2 mètres cubes aux plus basses eaux, atteint 400 mètres cubes dans les fortes crues. Il reçoit le Nom, la Filière (30 kilomètres), le Thioux, en outre du Chéran. Les basses eaux de ce dernier se produisent en général vers la fin de l'été et elles ne sont pas soutenues par aucune réserve glaciaire. L'étiage descend fort bas à cause de la perméabilité des roches calcaires.

Il existe à ce jour deux usines hydro-électriques importantes établies sur cette rivière, savoir : *Brassilly*, chute 19 mètres, débit d'étiage 5 mètres cubes et puissance installée 2.600 chevaux ; *Val-de-Fier*, chute 35 mètres, débit d'étiage 4.500 litres et puissance installée 2.500 actuellement, appartenant à la Société hydroélectrique de Lyon. Mais l'aménagement de cette usine est entrepris pour une puissance totale de 22.000 chevaux. Cette Société a en outre édifié des usines à *Hauteville* et à *Vallière*. L'usine du Val-de-Fier comporte comme travaux principaux un bassin régulateur de 9 à 10 kilomètres, un barrage de 32 mètres de hauteur libre, des galeries d'évacuation pour les crues et six conduites forcées. Les turbines ont une puissance unitaire de 5.000 chevaux. La Société générale de Force et Lumière a étudié sur le Chéran une chute, en voie de mise en valeur.

La Société anonyme des Forces du Fier a agrandi en 1915 son usine de Brassilly en vue de la fabrication du phosphore pour la guerre. En 1916, elle a commencé les études et les acquisitions pour deux usines à installer l'une sur le *Thiou* et l'autre à *Chavaroche*, cette dernière en voie de cons-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

truction. L'aménagement de la chute du Thiou, fait en commun par la Société des Forces du Fier et par la Société hydroélectrique de Lyon, a

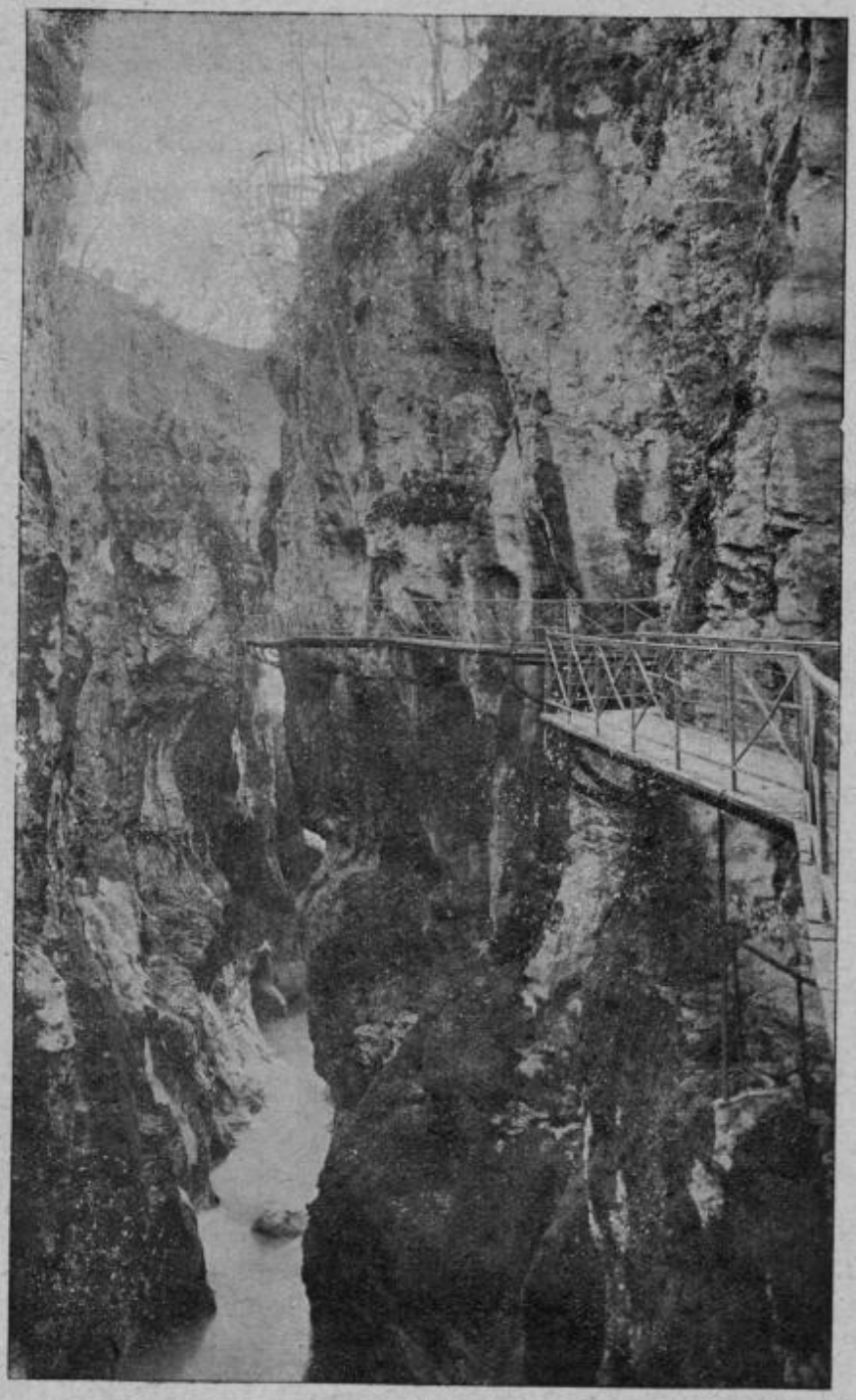


FIG. 78. — Gorges du Fier.

pour but d'améliorer l'utilisation du lac régulateur d'Annecy (§ 206). L'usine génératrice fonctionne avec un débit de 20 à 25 mètres cubes et sous une chute de 34 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les *Dranses*. La rivière principale de ce nom prend sa source au col de Coux (1.927 mètres), frontière de la Haute-Savoie et de la Suisse. Elle verse ses eaux dans le lac Léman. Dans sa partie supérieure, cette rivière reçoit le déversoir du lac Montriond, d'une superficie de 25 hectares.

La Dranse principale se fortifie de deux affluents, la Dranse d'Abondance et la Dranse de Brévon.

Le régime de ces rivières se caractérise de la façon suivante : basses eaux, de décembre à la mi-février ; eaux moyennes, de la mi-février à la mi-juin et de la mi-août à décembre ; grandes eaux, de la mi-juin à la mi-août.

Les usines actuellement installées sur cette rivière sont les suivantes : *Bonnevaux*, débit moyen 2.500 litres, chute 95 mètres de hauteur, puissance installée 3.000 chevaux ; *Chevenoz*, chute de 55 mètres de hauteur, débit variant de 600 à 2.250 litres, puissance installée 1.720 chevaux. Une réserve hydraulique de 10.250 mètres cubes est obtenue à l'aide de pompes qui y refoulent les eaux d'une hauteur de 400 mètres.

40. La Durance. — Cette grande rivière, qui peut être citée comme un type de cours d'eau torrentiel, est formée de trois parties distinctes. La haute Durance, qui descend des Hautes-Alpes du Briançonnais, se termine au confluent du Buech ; elle coule dans une vallée très étroite et sa pente varie de 9 mètres à $3^{m},50$ par kilomètre. La moyenne Durance prend fin au pont de Mirabeau ; dans cette partie, la vallée commence à s'élargir et la pente descend jusqu'à $2^{m},30$. La basse Durance traverse la plaine de Pertuis et Cavaillon ; nulle part la pente n'y est inférieure à $1^{m},93$ et la vitesse dépasse dans la partie inférieure 3 mètres en crue moyenne.

La Durance, quand elle se jette dans le Rhône, par 13 mètres d'altitude, en aval d'Avignon, a parcouru environ 300 kilomètres. Son bassin en son entier couvre 1.422.646 hectares, dont 630.000 en amont de Sisteron. D'après les relevés de la station de jaugeage du pont de la Beaume à Sisteron, et après le confluent de la Durance avec le Buech, le débit minimum (35 mètres cubes) s'est produit en février et en mars 1907 et le maximum (plus de 900 mètres cubes) en novembre 1907. La moyenne, pour l'ensemble des quatre années 1904 à 1907, donne un débit d'étiage à Sisteron de $36^{m3},4$ et un débit moyen de 92 mètres cubes.

La Durance à Sisteron présente deux périodes bien distinctes de faibles débits : l'une en hiver (de janvier à mars), quand le froid sévit sur les hauteurs et ralentit la fonte des neiges ; l'autre vers la fin de l'été (octobre), quand les sécheresses longues ont tari les affluents des régions moins élevées.

Les affluents supérieurs de la Durance, la Clairée et la Guisanne, ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont encore utilisés que pour l'irrigation et quelques modestes usines locales ; la Cerveyrette, la Gyronde, la Biausse, le Buech, l'Asse et la Bléone ont déjà plus d'importance, enfin le Guil, l'Ubaye et le Verdon attirent plus spécialement l'attention par l'abondance de leurs eaux, la

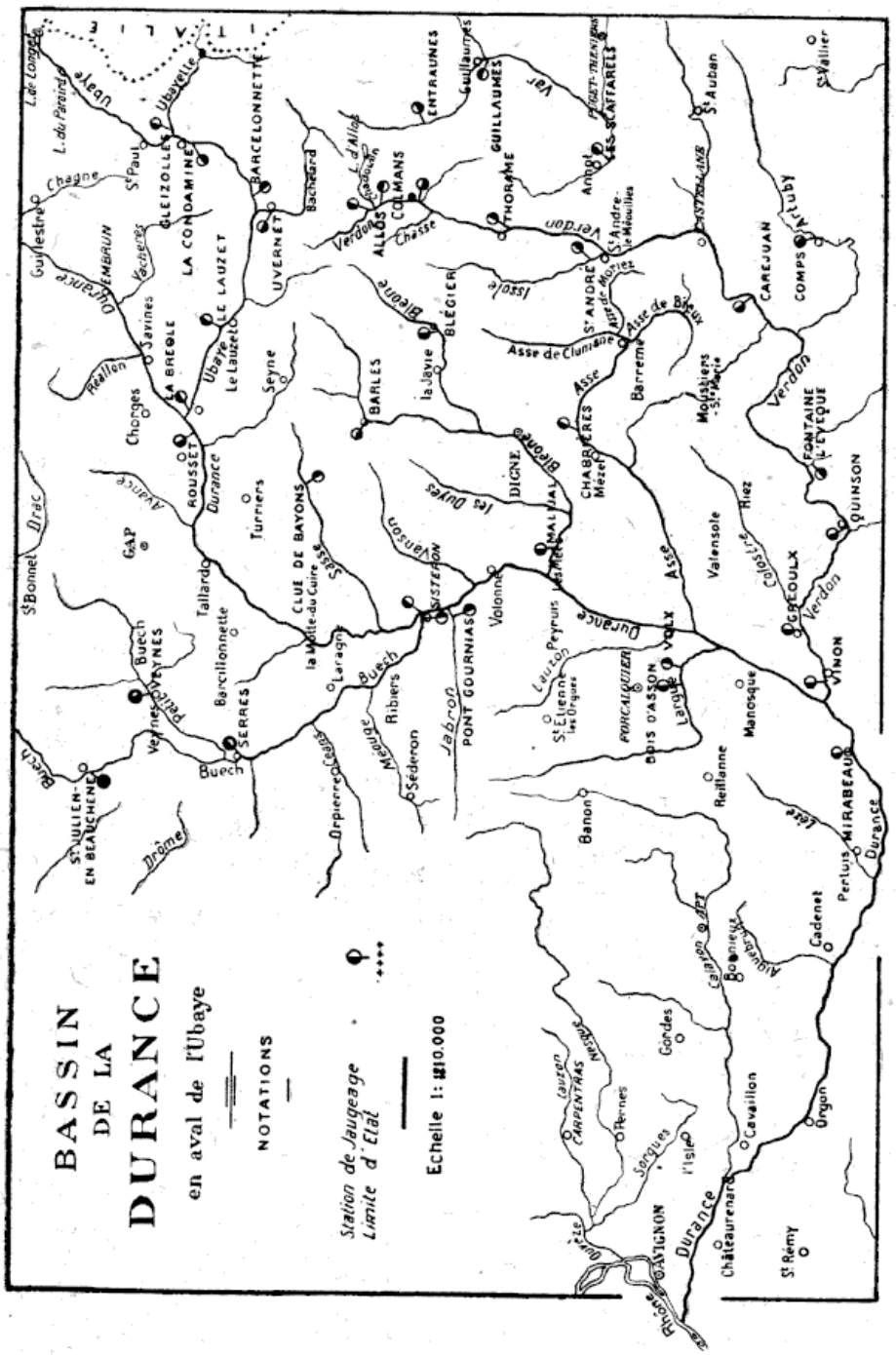


FIG. 79. — Carte du bassin de la Durance.

rapidité de leurs chutes et l'ensemble de leur puissance hydraulique. Si réduits que soient les écoulements glaciaires et surtout ceux dus à la fonte des neiges dans l'alimentation de la Durance et de ses principaux affluents, ils jouent un rôle qui met en évidence l'importance relative des crues sai-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sonnières et des crues journalières du printemps. Les sources ne jouent pas un rôle régulateur important dans la partie haute du bassin, dont le

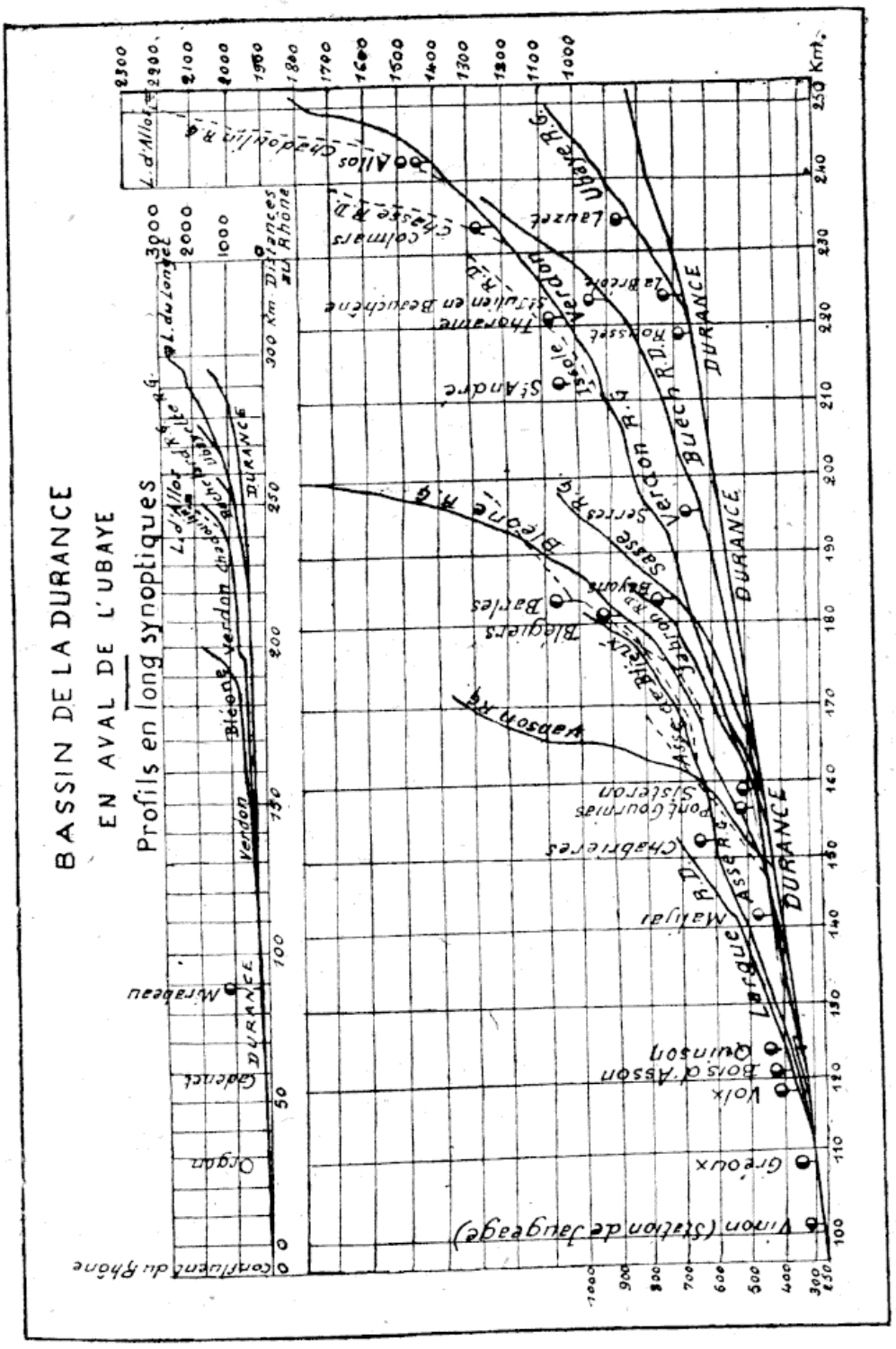


FIG. 80. — Profils en long synoptiques des rivières du bassin de la Durance.

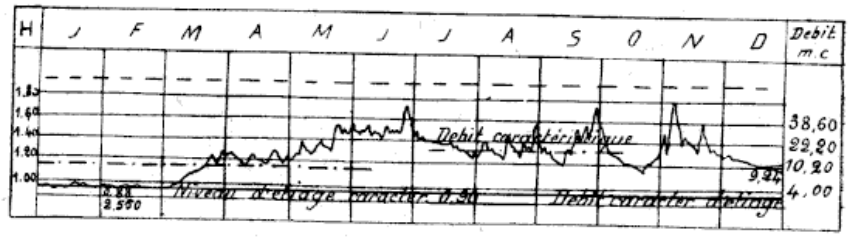
sol est dénudé et imperméable. Les neiges et les glaciers dans cette région paraissent en décroissance et expliquent les pénuries de certaines années.

La Durance depuis son embouchure dans le Rhône jusqu'à l'Ubaye offre les particularités suivantes.

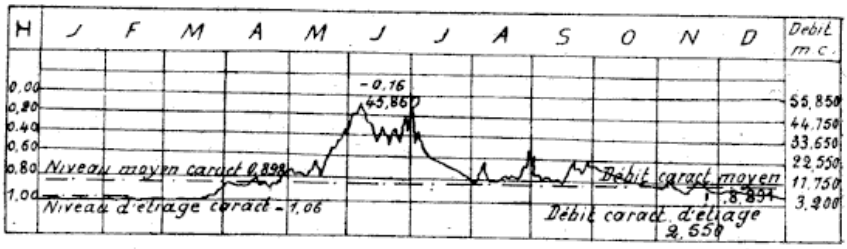
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PLANCHE I

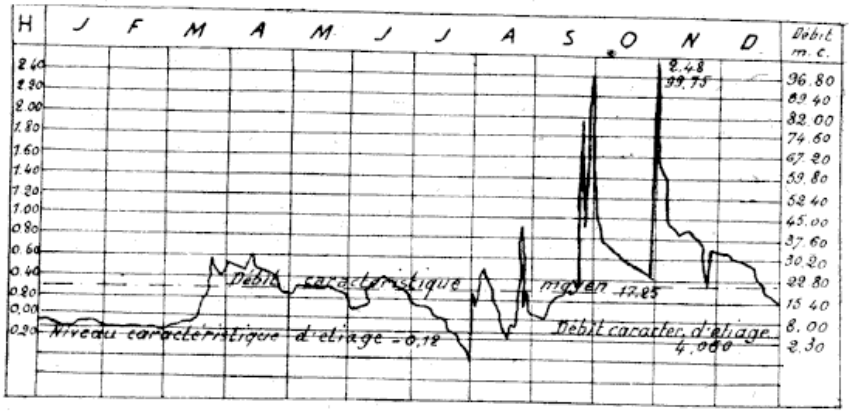
Graphiques de régime de rivières du bassin de la Durance.



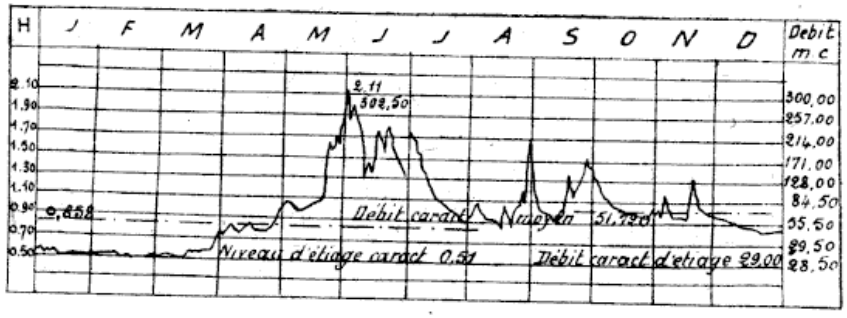
Le Verdon (année 1905).



Le Guil (station de Montdauphin, année 1905).



Le Grand-Buech (station de Sisteron, année 1905).

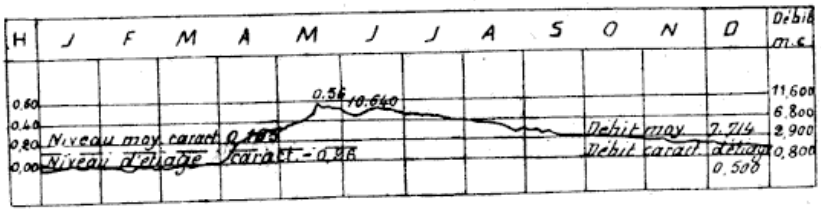


La Durance (station de Rousset, année 1905).

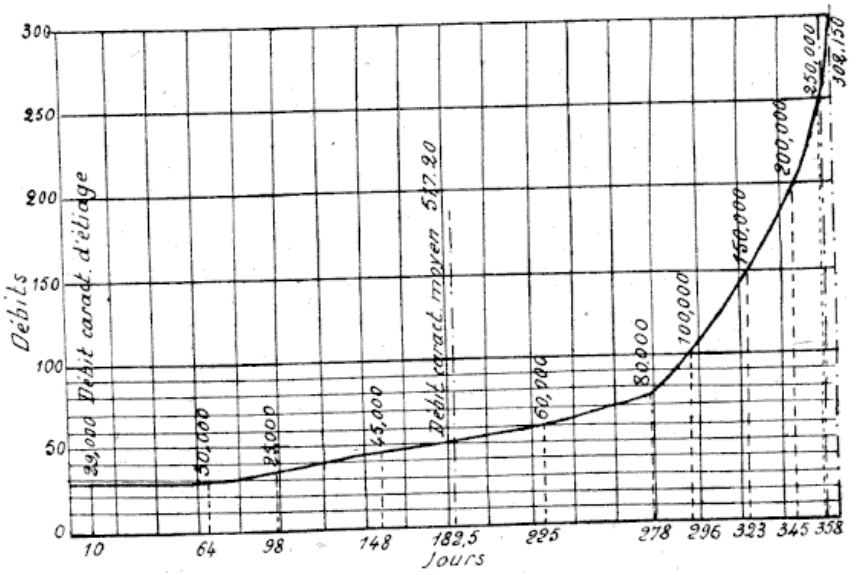
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PLANCHE I (*Suite*)

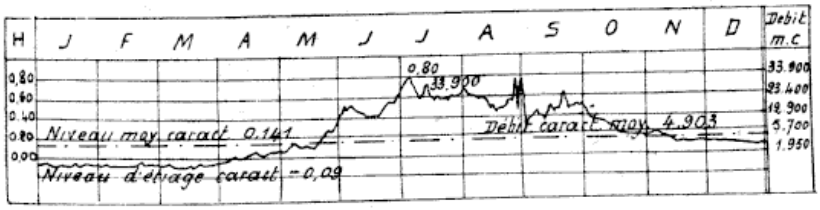
Graphiques de régime de rivières du bassin de la Durance



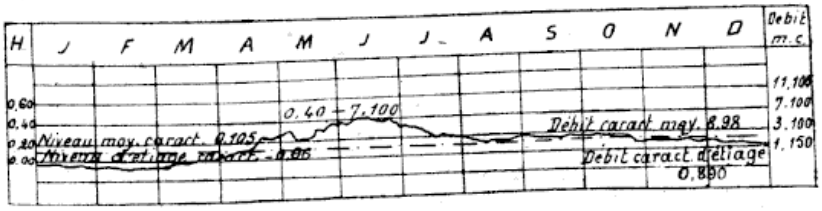
La Guisanne (station de Monetier, année 1904).



Courbes de régime de la Durance (station de Rousset, année 1905).



La Gyronde (station de la Bessée, année 1905).



La Clairée (station de Plampinet, année 1905).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Entre Mirabeau et le Rhône, il n'y a aucune station de jaugeage ni usine hydraulique, cette partie du cours d'eau étant surtout utilisée pour les irrigations qui ont donné naissance à de nombreux et importants canaux.

Entre le pont de Mirabeau (229 mètres) et le confluent du Largue (313 mètres), la chute totale est de 75 mètres, laquelle a fait l'objet de projets considérables dont le principal dit de la « Basse Durance » irait du Largue au Verdon, et utiliserait 50.000 chevaux.

Au pont de Mirabeau où existe une station de jaugeage, la Durance reçoit le Verdon.

Du confluent du Largue à celui de la Brione (404 mètres), dont la distance est, comme entre le pont de Mirabeau et le confluent du Largue, de 26 kilomètres, la chute est de 91 mètres. Elle est aménagée depuis le Largue jusqu'à la Brillanne en deux gradins inégaux, dont celui d'amont aboutit à l'usine de la *Brillanne* (chute 22m,50, débit moyen 50 mètres cubes et 17.500 chevaux installés) et celui d'aval à celle dite du *Largue* (chute 8 mètres et 9.000 chevaux installés). La chute comprise entre la Brillanne et le confluent de la Brione est à l'étude, et sa réalisation prochaine est très probable.

Ces usines hydroélectriques sont appuyées d'usines thermiques à vapeur savoir : à Arles (300 kilowatts), à Monte-Carlo (1.200 kilowatts), à Toulon (4.260 kilowatts), à Saint-Gimiez (12.000 kilowatts), à Arenc (7.000 kilowatts), au cap Pinède (4.000 kilowatts).

De la Bléone au Sasse (475 mètres), parcours long de 11 kilomètres, la chute est de 71 mètres, aucune utilisation n'a encore été faite. De grands aménagements hydrauliques sont projetés sur toute cette section. L'un d'eux dont la prise d'eau doit se faire sur la commune de Peipin fournira l'énergie électrique à l'usine électro-chimique de Saint-Auban, appartenant à la Compagnie des produits chimiques d'Alais et de la Camargue.

Entre le Sasse et le torrent de Rousure (576 mètres), sur une longueur de 32 kilomètres la chute est d'environ 100 mètres. Sur la moitié supérieure est située l'usine de *Ventavon*, chute 50 mètres, débit moyen 45 mètres cubes et puissance installée, 31.000 chevaux.

Les travaux en cours de construction permettront de porter le débit à 66 mètres cubes, augmentant d'autant la puissance de l'usine. Une ligne à 55.000 volts transportera l'énergie électrique jusqu'au Teil.

La portion de la rivière qui va du torrent de Beynon au confluent du Buech, longue de 22 kilomètres, a fait l'objet de projets intéressants. L'administration a autorisé l'établissement vers le Poët (kilomètre 170) d'une usine de 28 mètres de chute pour la Défense nationale.

La partie entre la Rousure et l'Ubaye (677 mètres), un peu supérieure à 26 kilomètres, la chute est d'environ 100 mètres. C'est vers l'origine supérieure de ce tronçon (kilomètres 221) que l'on se propose d'établir le bar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rage de *Serre Ponçon*, de 85 mètres de hauteur, devant emmagasiner 600 millions de mètres cubes pour former une puissance de 80.000 chevaux correspondant à un bassin houillier de 800.000 tonnes de charbon.

Sur le cours inférieur de l'Ubaye, dans la région facilement accessible du Lauzet, il existe une section à pente assez forte où l'on se propose d'aménager une installation de 40.000 chevaux environ. Il y a des stations de jaugeage en service sur l'Ubaye à la Bréole, le Lauzet, Barcelonnette et la Condamine. Il est en outre envisagé trois autres chutes sur l'Ubaye : 115 mètres de hauteur et 9 mètres cubes ; 160 mètres de hauteur et 9 mètres cubes et 55 mètres de hauteur et 10 mètres cubes.

Indépendamment des usines installées, celles en cours de construction ou projetées, citées ci-avant, nous avons à signaler deux usines importantes d'électrochimie, savoir : *Le Poët*, chute 25 mètres, débit moyen 40 mètres cubes et puissance installée 15.000 chevaux ; *Château-Arnoux*, chute 32 mètres, débit moyen 50 mètres cubes, puissance 15.000 chevaux. A cheval sur la Durance et la Gyronde est l'*Argentière*, avec une chute de 148 mètres, un débit moyen de $17^{m3},500$ et 40.000 chevaux de puissance installée. Sur la Biaisse, nous trouvons l'usine électrochimique de la *Roche de Rame* avec une chute de 197 mètres, un débit moyen de 1.500 litres et une puissance installée de 8.000 chevaux.

Il nous faut citer encore comme chutes étudiées et en voie de projet : une chute près d'Embrun (chute 70 mètres et 7.000 chevaux) ; chute de Sauvines (chute 45 mètres et 5.400 chevaux); chute de Fontbéton (chute 50 mètres et 87.500 chevaux, § 277) ; chute de la Saulce (27 mètres et 5.000 à 24.000 chevaux) ; chute sur le canal de Ventavon (25 mètres et 20.000 chevaux, débit 30 mètres cubes) ; chute sur le canal de Manosque (58 mètres et 64.000 chevaux). Sur la Basse-Durance nous citerons la chute de Mirabeau (19 mètres et 28.500 chevaux), la chute de Mayrargues (35 mètres et 51.000 chevaux), la chute de Mallemont (25 mètres et 32.500 chevaux).

41. Le Var, l'Argens, le Verdon, la Roya. — Le *Var* coule pendant ses crues beaucoup plus d'eau que l'Argens et la longueur de son cours est de 101 kilomètres. La superficie des bassins versants est de 2.279 kilomètres carrés. Les caractéristiques de son régime sont : portée de crue par seconde, 4.000 mètres cubes ; portée moyenne, 43 mètres cubes ; basses eaux, 28 mètres cubes ; écart de débit, 1 : 143 ; chute de pluie moyenne, $0^{m},90$.

Il n'est qu'un torrent jusqu'à son issue même à la Méditerranée. Dans son cours d'eau supérieur, le Var est une eau fuyante ; en aval, c'est alternativement un cours d'eau impétueux que des digues, distantes l'une de l'autre de 800 mètres, ne réussissent pas toujours à contenir, puis une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

étroite rivière dont on cherche du regard les sinuosités au milieu des cailloux emplissant l'énorme lit.

L'*Argens* a tout son cours et tout son bassin dans le département du Var. Il naît à 270 mètres d'altitude. Il reçoit un grand nombre de petites rivières (dont les principales sont : l'Eau-Salée, la Ribeirotte, l'Issole, la Bresque, l'Aille, la Naturbie, l'Indre et le Reyran) qui, malgré la brièveté de leur cours, roulent constamment une grande quantité d'eau.

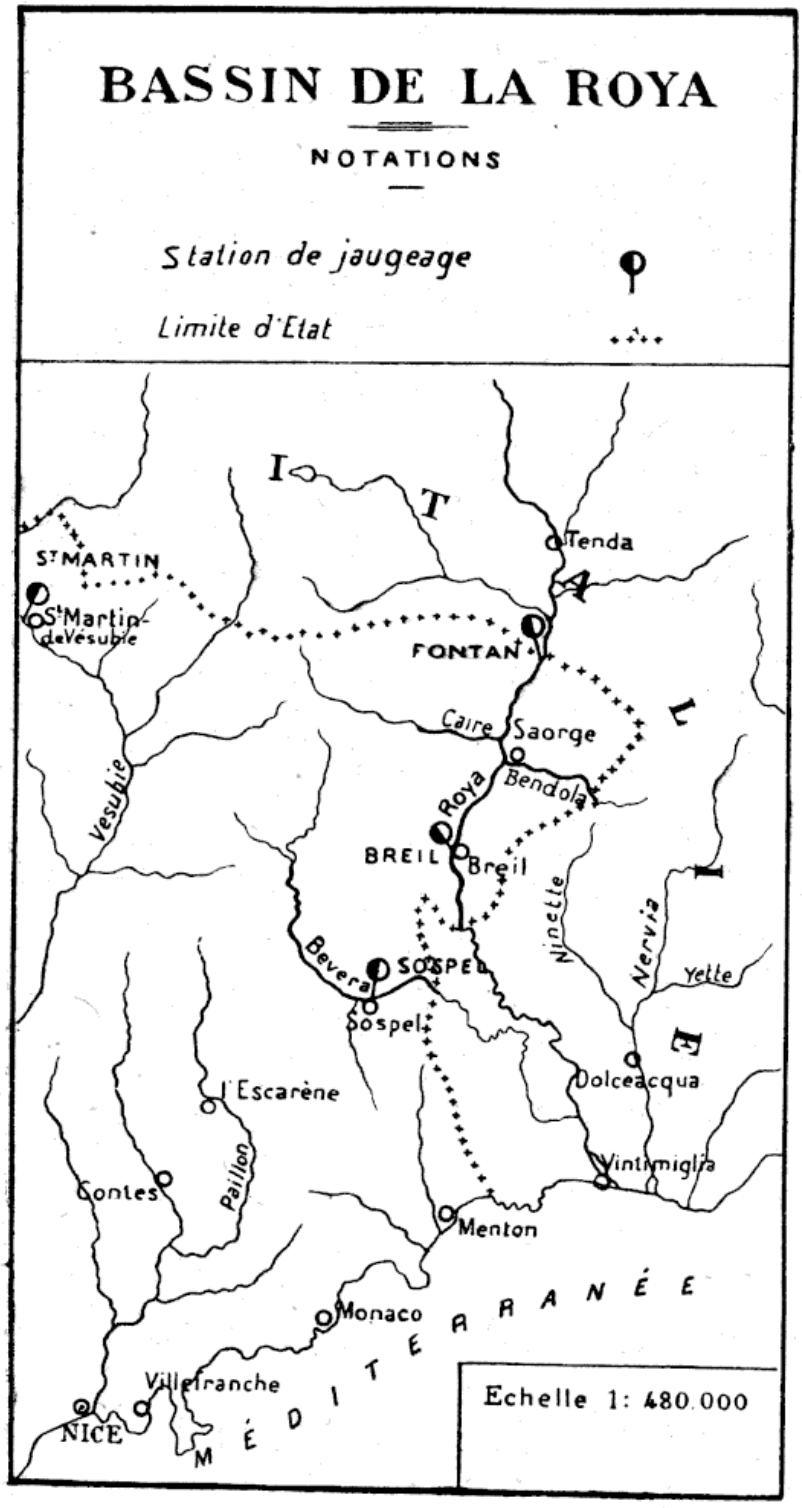


FIG. 81. — Carte du bassin de la Roya.

Son cours est d'environ 117 kilomètres et la superficie de son bassin, 267.822 hectares. Le débit d'étiage est de 3.110 litres à la seconde.

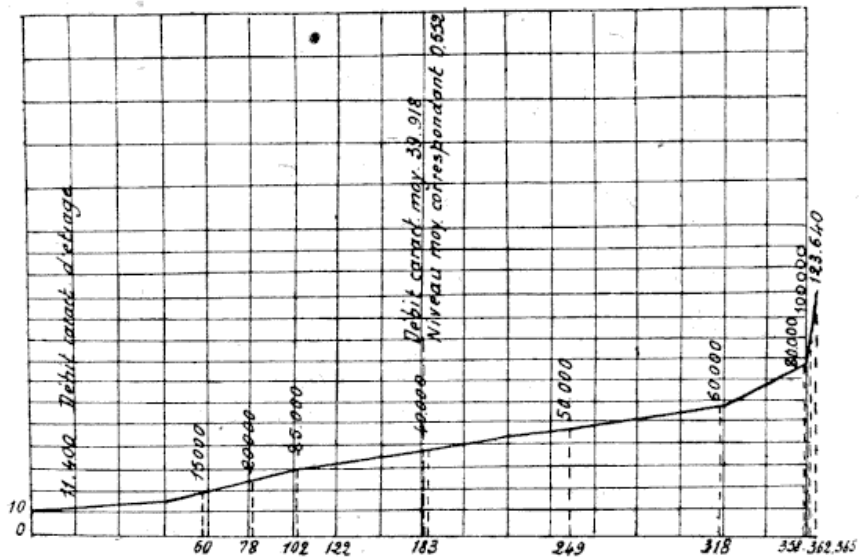
Sur l'Argens, nous trouvons l'usine d'*Entraygues* avec une chute de 19 mètres, un débit moyen de 7 mètres cubes et une puissance installée de 3.000 chevaux. L'usine de *Pont d'Argens* utilise une chute de 5 mètres de hauteur.

Le *Verdon* a la plus grande partie de son bassin dans le département

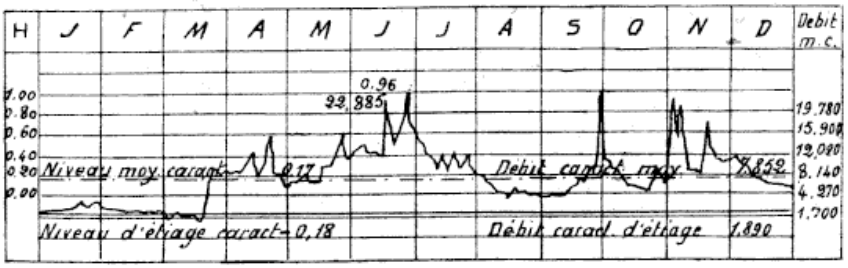
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PLANCHE II

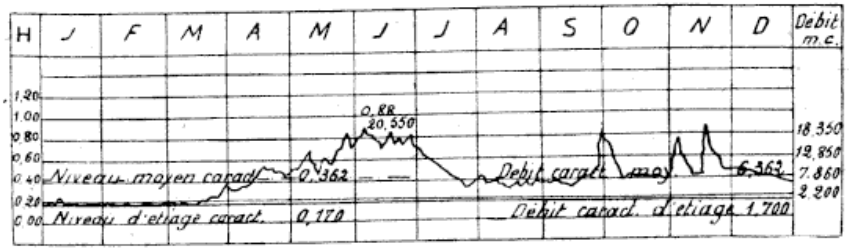
Graphiques de régime de rivières du bassin du Var



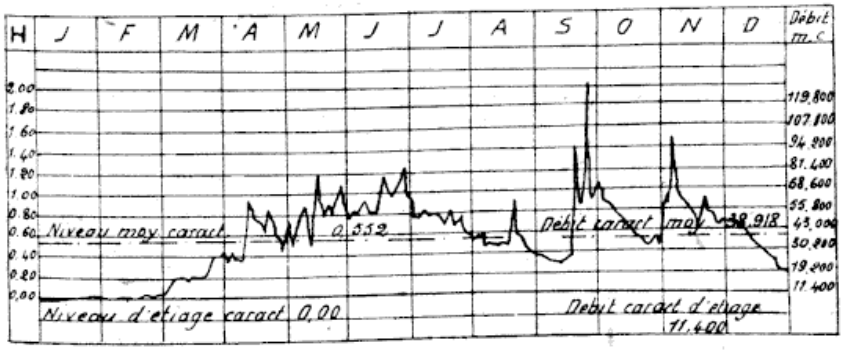
Le Var (station de la Mescla, année 1905.)



La Vésubie (station de la Chiuse-de-Saint-Jean, année 1905).



La Tinée (station de Saint-Honorat, année 1905).



Le Var (station de la Mescla, année 1905).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des Basses-Alpes, d'où il prend ses sources dans des montagnes de 2.590 à 3.000 mètres d'altitude. C'est un grand torrent dont le parcours est d'environ 175 kilomètres. Il se jette, au-dessous de Vinon, par 260 mètres d'altitude, dans la Durance. Son débit d'étiage est d'environ 10 mètres cubes à la seconde.

Les pentes sur le Verdon ne deviennent un peu fortes qu'en amont d'Allos, c'est-à-dire à plus de 150 kilomètres de son embouchure. Cette rivière peut fournir des forces hydrauliques importantes parce que son lit, encaissé sur beaucoup de points entre des escarpements rocheux très élevés se prête particulièrement à la création de grands barrages. Ainsi un barrage créé au confluent du Colostre, haut de 53 mètres, pourrait fournir une réserve d'une centaine de millions de mètres cubes ; aux gorges du Rougon, on a étudié le projet d'un barrage de 70 mètres de hauteur permettant de former un réservoir de 140 millions de mètres cubes.

La chute *de Breil*, avec un débit de 7.500 à 11.300 litres et une hauteur de chute de 62 mètres, pourra fournir 6.000 chevaux.

La *Roya*, dans la partie française de son cours, qui commence vers l'altitude 530 et se termine à la côte 210, a une longueur de 26 kilomètres. L'usine hydro-électrique de *Fonlan* établie sur cette rivière a une chute de 100 mètres avec un débit moyen de $5^{m3},500$ et 10.000 chevaux installés. A la frontière inférieure, on dispose de 70 mètres de chute dont l'aménagement est en voie de réalisation. Sur le canal du Verdon, on trouve l'usine hydro-électrique d'*Aix* (Saint-Eutrope) avec 80 mètres de chute, 1.300 litres débit moyen et 2.200 chevaux installés.

La *Siagne*, rivière torrentielle, prend sa source au mont La Chens et est alimentée par des sources vauclusiennes. Son débit moyen est de 2.200 à 2.400 litres. L'usine de la *Siagne* utilise une chute de 250 mètres de hauteur qui fournit une puissance de 6.000 kilowatts. L'usine de *Mougins*, avec un débit de 525 litres et une chute de 51 mètres, accuse une puissance de 220 kilowatts, renforcée d'une réserve à vapeur de 600 chevaux. L'usine de *Saint-Cézaire* a une chute de 350 mètres, un débit moyen de 1.500 litres et une puissance installée de 13.500 chevaux.

Sur le *Loup*, est l'usine de *Palaras*, avec une chute de 260 mètres, un débit moyen de 800 litres et une puissance installée de 4.000 chevaux.

Sur le Var, les usines de la *Mescla* et de *Plan du Var*, la première ayant une chute de 10 mètres, un débit moyen de 16 mètres cubes et une puissance installée de 2.200 chevaux ; la seconde, une chute de 27 mètres, un débit moyen de 16 mètres cubes et une puissance installée de 6.000 chevaux.

La Société anonyme des chutes du Var projette une chute entre les ponts du Puget-Théniers et de la Mescla. La Société d'endiguement et des chutes de Var inférieur a étudié la dérivation d'une partie des eaux du Var comportant une chute dans l'Esteron et l'endiguement du fleuve dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la partie inférieure pour l'irrigation des terres ; une chute à la *Baronne* de 77 mètres de hauteur pouvant fournir 22.000 chevaux, une autre à Pont du Var (32 mètres de hauteur de chute et 8.000 chevaux). D'autres chutes sont envisagées sur les communes de Gillette, le Broc, Gattières, Saint-Jeaunet, la Gaude et Saint-Laurent-du-Var.

Enfin la Société d'Électro-chimie de Bozel va établir sur le Var près de Guillannes une chute de 300 mètres devant donner 15.000 chevaux.

Sur le Haut-Var, il est projeté une chute de 343 mètres de hauteur avec un débit variant de 1.600 à 5.000 litres (17.000 chevaux).

42. La Loire. — La ceinture du bassin de la Loire, à partir de Saint-Nazaire, comprend les collines du Maine, de la Normandie et du Perche,

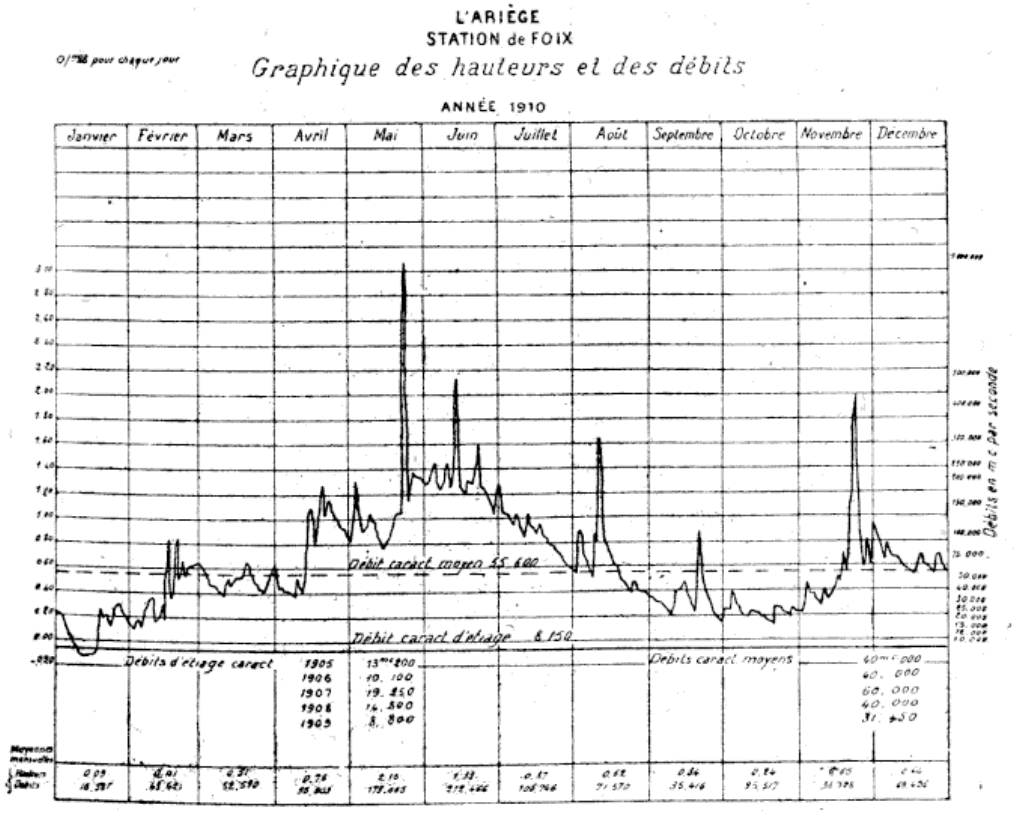


FIG. 82. — Régime de la rivière l'Ariège.

le plateau d'Orléans, les collines du Nivernais, le Morvan, la Côte-d'Or, les Cévennes (monts du Charolais, du Lyonnais, du Vivarais), les monts de la Margeride, les monts d'Auvergne, les collines du Limousin, du Poitou et le plateau de Gâtine, pour finir près de Paimbœuf en face de Saint-Nazaire.

Ce cours d'eau, d'abord torrentiel, est tranquille vers la fin de son cours ; il conserve le premier caractère jusqu'au delà des monts de la Madeleine (Allier), où il devient un fleuve large et peu profond ; au delà du bec d'Al-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lier, les pentes deviennent très faibles et descendent jusqu'à 0m,11 par kilomètre. Il prend sa source sur le flanc du mont Gerbier, à 1.562 mètres d'altitude. Les principaux affluents sont la Coise, la Thoranche, la Loise, le Rhins et le Sornin. Les crues y présentent les mêmes caractères que sur les cours d'eau torrentiels, tandis que le débit d'étiage est des plus faibles. A Orléans, où ce dernier débit est de 35 mètres cubes à la seconde, il s'est élevé jusqu'à 8.035 mètres cubes lors des crues exceptionnelles de 1856 et 1866, soit un rapport de 1/230.

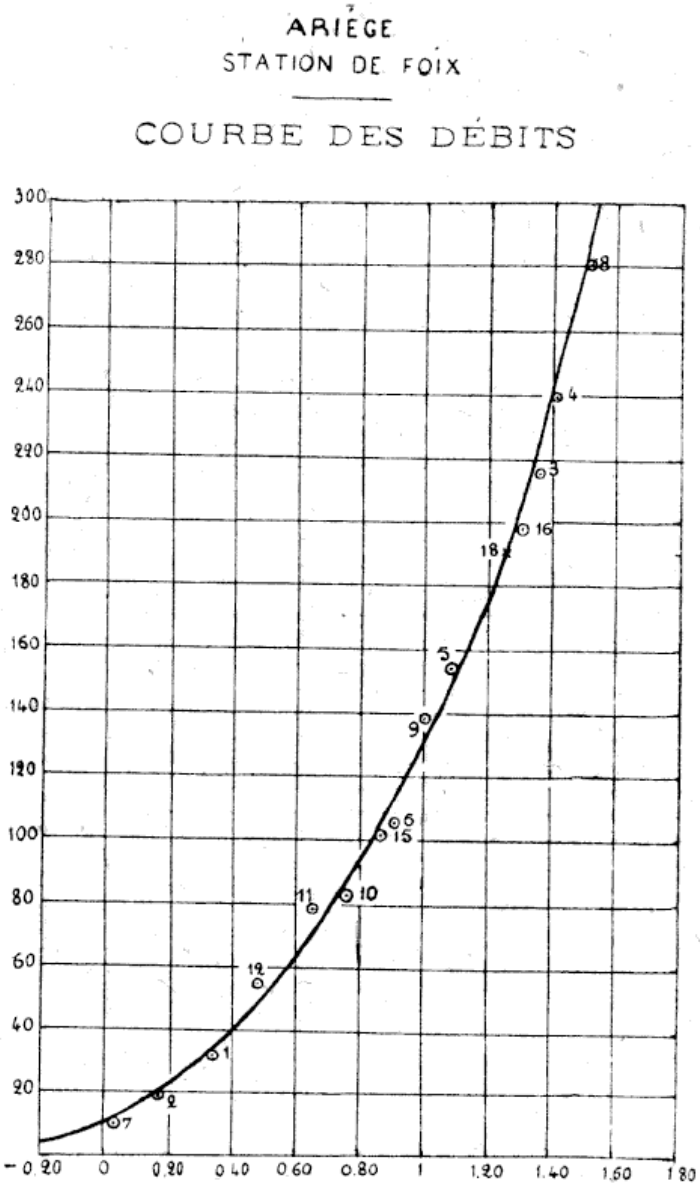


FIG. 83. — Régime de la rivière l'Ariège.

43. L'Ariège. — Cette rivière, qui prend sa source au pied du pic Nègre, à 2.812 mètres d'altitude, est, sur une grande partie de son parcours, encaissée ou bordée de montagnes assez élevées. D'allure torrentielle dans cette région elle devient navigable à partir de Cintegabelle jusqu'à son embouchure, soit sur le cinquième environ de la longueur de son cours. Elle est alimentée par de nombreux torrents et ruisseaux ; parmi les premiers, les plus importants sont : le Vicdessos, l'Orlu ou Oriège, l'Hers, le Nagear, l'Aston et l'Ascou.

La moyenne annuelle des jours de pluie dans le bassin de l'Ariège est de 128 jours et la hauteur annuelle des pluies est de 1m,20 vers les sources de l'Ariège.

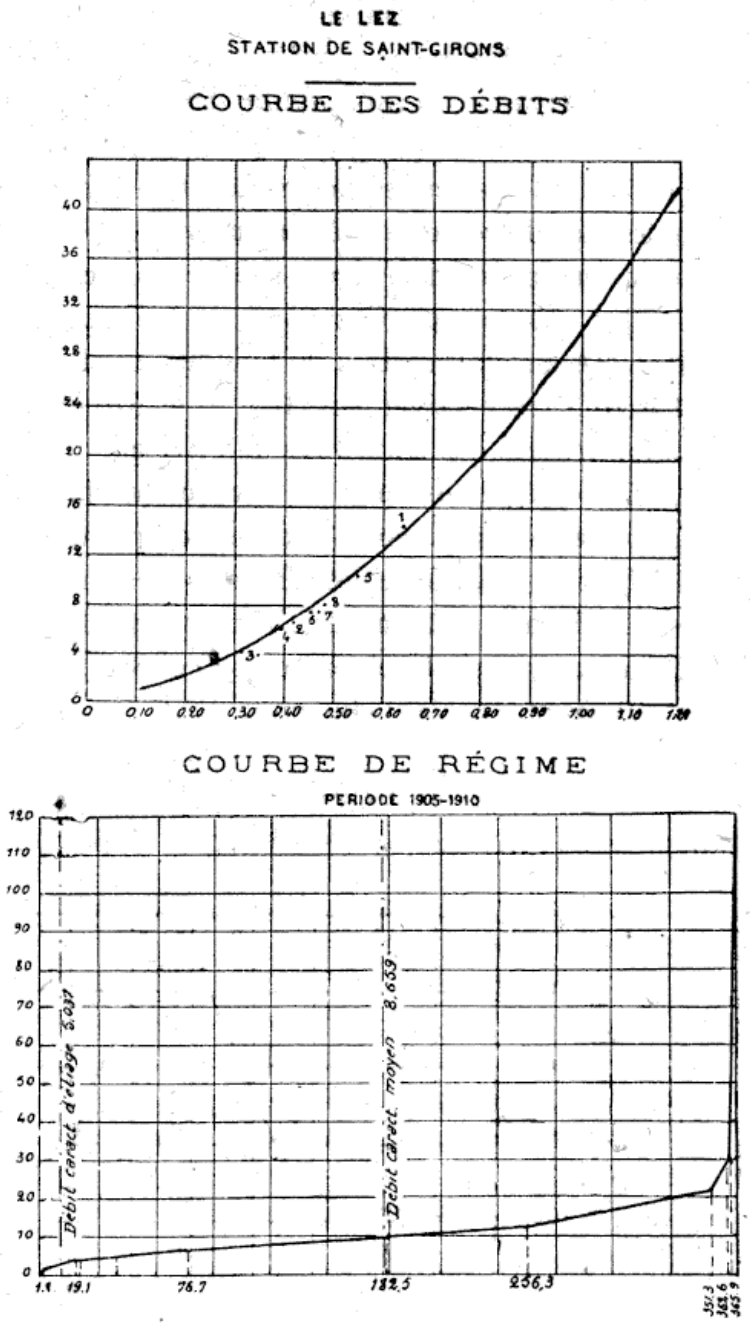
Le débit d'étiage de cette rivière a été, à la station de Las Rivas près Pamiers, en 1907, année spécialement pluvieuse, de 13 mètres cubes ; le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débit moyen, de 72 mètres cubes et le débit maximum, de 390 mètres cubes. Le débit moyen de l'année par kilomètre carré du bassin versant a été de 46l,5.

L'année 1908, année exceptionnellement sèche, a donné comme débit moyen 36l,3 au lieu de 46l,5 pour l'année 1907. Les plus basses eaux se présentent en hiver et au commencement de l'automne et il y a deux périodes de crues, au printemps et vers la fin de l'automne.

Les usines établies sur l'Ariège, sont les suivantes : usine de *Mercus*, chute 17 mètres de hauteur et 4.000 chevaux de puissance pour la fabrication des ferros-silicium et des abrasifs; les usines de la Société métallurgique de



F.G. 84. — Régime du cours d'eau Le Lez.

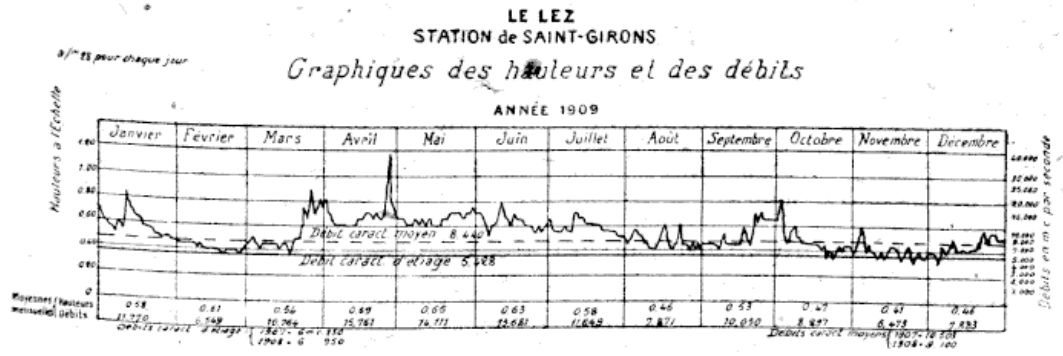


FIG. 85. — Régime du cours d'eau Le Lez.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'Ariège : *Las-Rives*, chute 6 mètres, puissance 1.240 chevaux ; *Crampagna*, respectivement, 6 mètres et 1.000 chevaux; *Guilhol*, 10 mètres et 3.000 chevaux ; *Saint-Antoine*, 10 mètres et 2.000 chevaux ; *Mijones*, 5 mètres et 2.500 chevaux ; usine *du Castelet*, hauteur de chute 30 mètres, débit 5 à 6 mètres cubes, puissance 3.000 chevaux (carbure de calcium) ; la puissance de cette dernière usine va être augmentée d'autant par l'utilisation du torrent du Nagéar (hauteur de chute 369 mètres).

Sur les affluents du Garbet et de la Bouigane, nous avons à citer les chutes d'Aoust (50 mètres de hauteur de chute, puissance 700 chevaux) et d'Arrout (respectivement, 18m,25 et 970 chevaux), énergie destinée au fonctionnement des tramways de l'Ariège.

Le *Carol*, régularisé par un réservoir au lac Lanoux, est utilisé pour le fonctionnement de l'usine hydroélectrique de *Porté*, pour l'électrification de la ligne de Foix à Ax-les-Thermes (réseau du Midi).

Sur le *Siguer*, affluent de l'Ariège, les chutes étudiées de *Brouquenal* et de *Gnoure*, respectivement de 640 et 830 mètres de hauteur, fourniront une puissance de 7.000 chevaux.

44. Le Vicdessos, l'Orlu. — Le premier de ces torrents, qui sont des affluents de l'Ariège, sort de l'étang de Médecourbe, sur la frontière d'Es-

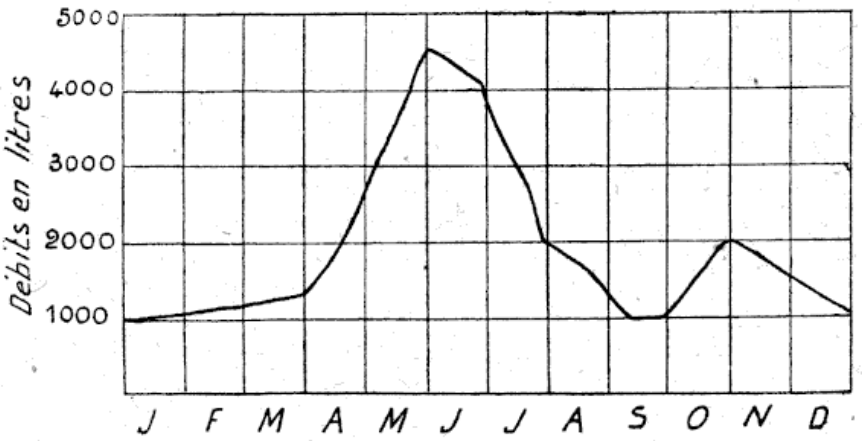


FIG. 86. — Régime de la rivière le Vicdessos.

pagne (2.849 mètres). Il est lui-même alimenté par un certain nombre de torrents, dont le Lartigue, qui descend du Montcalm, le Bassiés, le Siguer, dominé par la belle montagne frontière de Rialp (2.903 mètres) et le grand étang Blanc, toujours glacé. La superficie du bassin du Vicdessos est de 205 kilomètres carrés.

Le débit minimum minimorum du Vicdessos est de 750 litres. Comme l'Ariège, il donne lieu à de fortes crues en été et à une crue de moindre importance en automne. La (*fig.* 86) montre le régime de ce cours d'eau, pour l'année 1907, graphique établi à l'aide de relevés faits à l'importante

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usine d'électrochimie d'Auzat, qui a été installée pour un débit de 4.000 litres. Elle utilise une puissance de 30.000 chevaux avec deux chutes de 100 mètres et 420 mètres de hauteur, régularisées par les étangs de Bassiés et de Gargueros. L'aménagement du lac de Fourcat fournit une réserve de 12 millions de mètres cubes. L'aménagement des chutes d'Artiès et de Maunicou donnera en plus une puissance de 5.000 chevaux.

L'Orlu ou l'Oriège part du pied du pic d'Étang-Fauzy (2.709 mètres), traverse l'étang d'En Beys et forme une belle cascade aux forges d'Orlu. Il reçoit à gauche le torrent de Gnoles descendu de l'étang de Naguilhe, puis la rivière d'Orgeix et se jette dans l'Ariège à l'altitude de 716 mètres (1).

L'Orlu a été capté pour la création de l'importante *usine d'Orlu* dont la puissance est actuellement de 25.000 chevaux, en utilisant une chute de 940 mètres. L'établissement d'une galerie, qui doit relier le lac de Naguilhes à celui d'En Beys, donnera un supplément de 5.000 chevaux.

45. Le Cher, La Garonne, La Dordogne, La Vézère, L'Allier, Le Lot et La Creuse. — Le régime du Cher, qui est d'ordre torrentiel comme toutes les rivières du Plateau Central, est caractérisé par les chiffres suivants relevés sur le canal du Berry ; moyenne des débits mensuels, 5.425.000 mètres cubes en août à 74.400.000 mètres cubes en février, soit un débit moyen de 2.086 à 26.720 litres à la seconde.

---

(1) Le service des Grandes Forces hydrauliques a joint à son tome VII, une liste des principales usines établies jusqu'à l'année 1916, qui renseigne sur les hauteurs de chute, les débits et les puissances des usines hydrauliques installées dans les régions des Alpes, y compris les bassins côtiers méditerranéens.

Le regretté M. Bresson a fait paraître dans la *Revue électrique* des Lexiques des usines hydrauliques existant en France ; c'est un travail intéressant à consulter et qui fait grand honneur à son auteur, qui a donné l'exemple d'un désintéressement et d'un labeur particulièrement remarquables. Nous ne pouvons que donner l'énumération de ces lexiques auxquels le lecteur pourra se reporter le cas échéant, selon les indications ci-après :

15 février 1908. — Lexique du bassin de la Loire.
15 janvier 1908. — Lexique du bassin de la Seine.
30 avril 1910. — Premiers tableaux du bassin du Rhône.
10 mars 1910. — Premiers tableaux du bassin de la Garonne.
12 mai 1911. — Tableaux supplémentaires du bassin du Rhône.
23 juin 1911. — Tableaux du bassin de la Loire.
25 août 1911. — Tableaux du bassin de la Seine.
8 décembre 1911. — Lexique du bassin du Rhône.
26 janvier 1912. — Tableaux supplémentaires du bassin de la Garonne.
22 mars 1912. — Premiers tableaux des bassins côtiers ou frontières.
24 mai 1912. — Lexique du bassin de la Garonne.
22 novembre 1912. — Tableaux supplémentaires des bassins côtiers ou frontières.
6 décembre 1912. — Lexique des bassins cotiers ou frontières.
18 janvier 1914. — Tableau d'usines, divers départements.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quant au débit journalier, il varie depuis quelques centaines de litres jusqu'à plus de 1.000 mètres cubes. Les réservoirs régulateurs jouent donc dans ces conditions une influence capitale pour parer aux époques de sécheresse.

Sur le *Cher*, la Société Électrique du Centre et de la Loire a créé l'usine

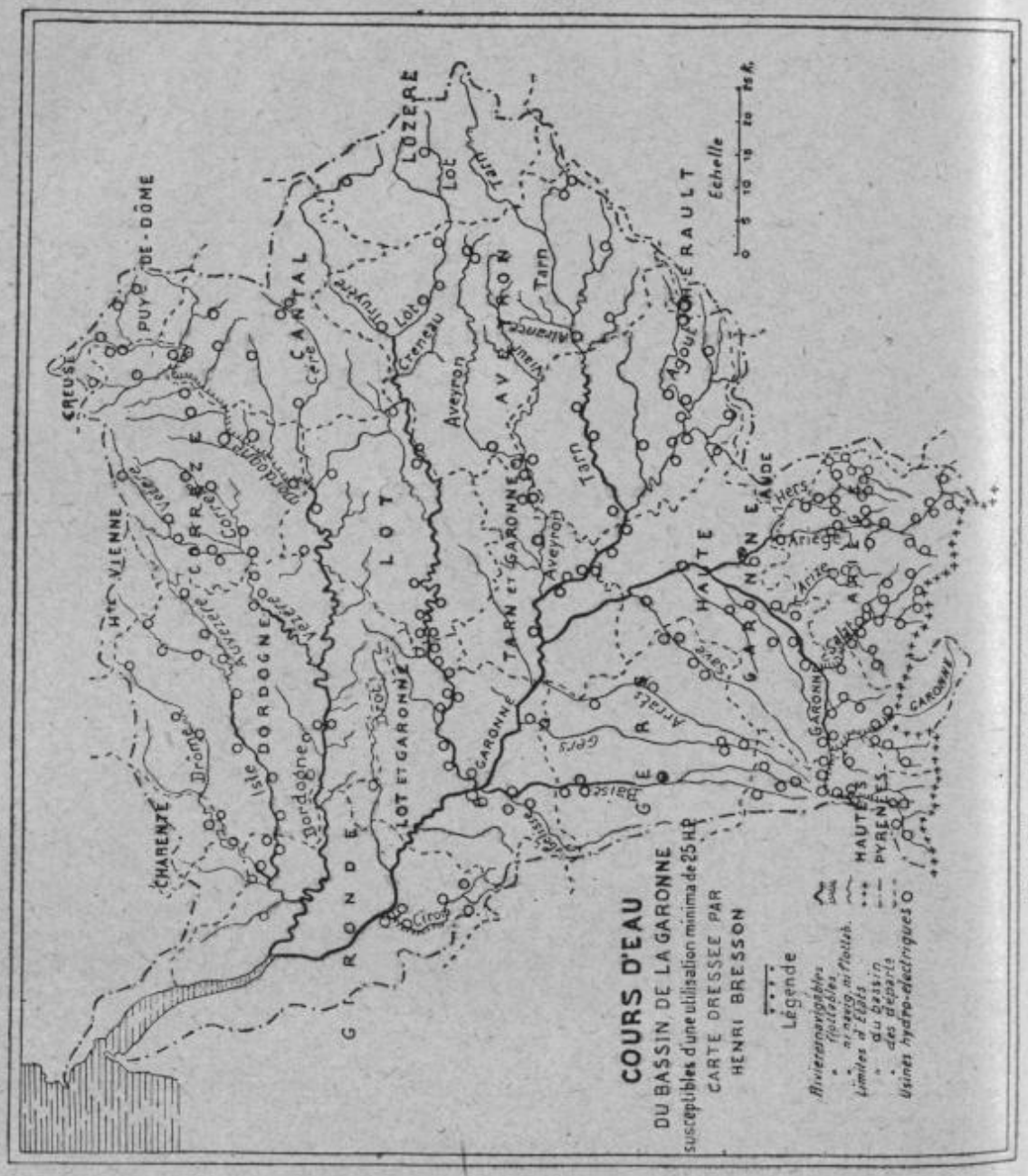


Fig. 87. — Carte des cours d'eau du bassin de la Garonne.

de *Teillet-Argenty* qui dispose de 6.000 chevaux sous une chute de 45 mètres de hauteur, ainsi que les usines de *La Vourdial* (1.200 chevaux et chute de $4^{m},50$), de *Château-Lignon* (4.200 chevaux et chute de 38 mètres), de *l'Ance* (16.000 chevaux, chute de 140 mètres).

Cette dernière usine est la plus importante du Massif Central. Elle est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appuyée des usines thermiques à vapeur suivantes : Montluçon (4.500 chevaux) ; Rives (800 chevaux) ; Trois-Meules (1.600 chevaux) ; Montaud

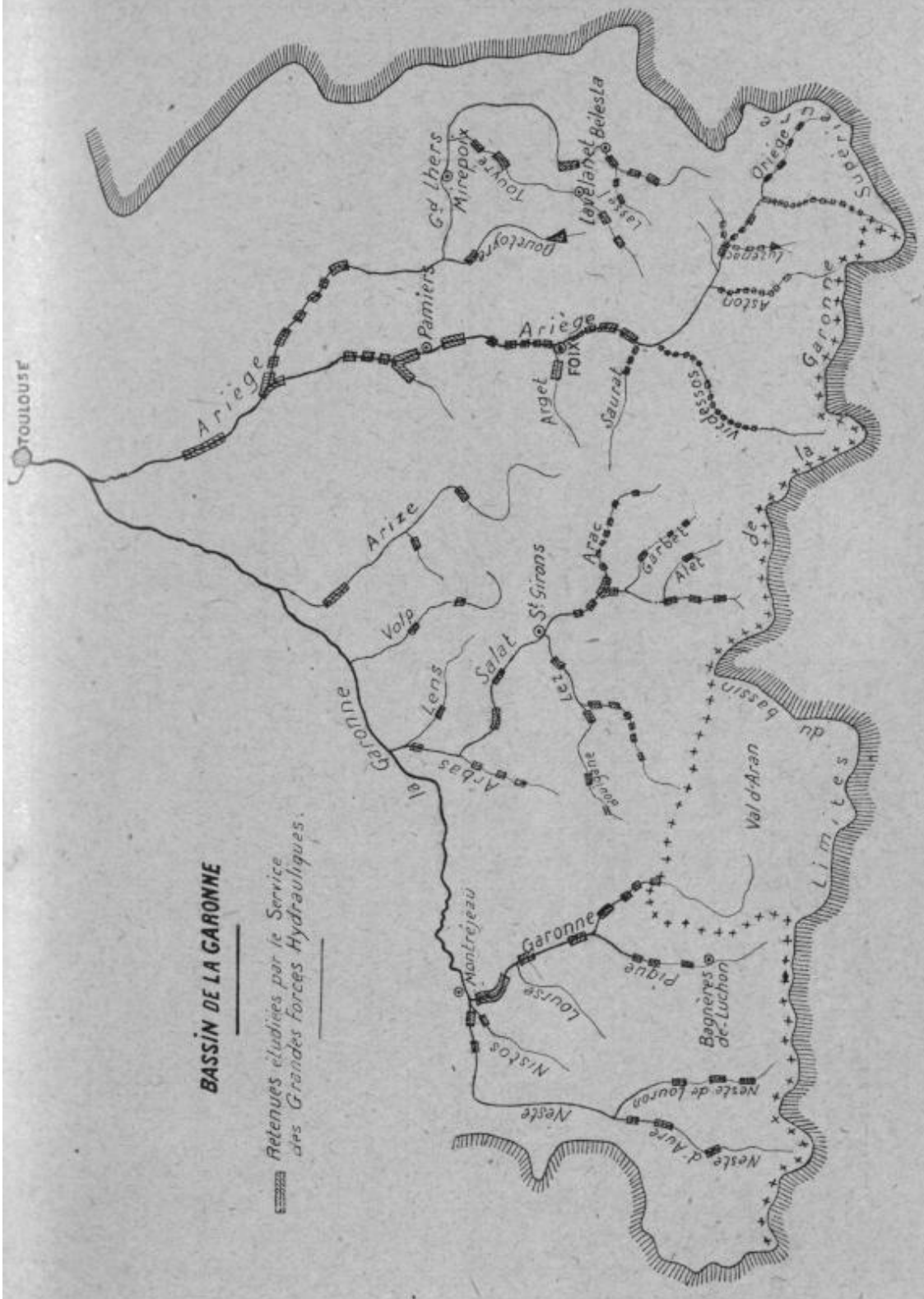


Fig. 88. — Retenues du bassin de la Garonne.

(26.500 chevaux) ; Saint-Chamond (3.000 chevaux). Les usines hydro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électriques de cette région compensent la diminution de la production des usines hydroélectriques des Alpes pendant l'hiver, et les réserves thermiques que nous venons d'énumérer ne sont utilisées que pour le minimum d'énergie strictement nécessaire.

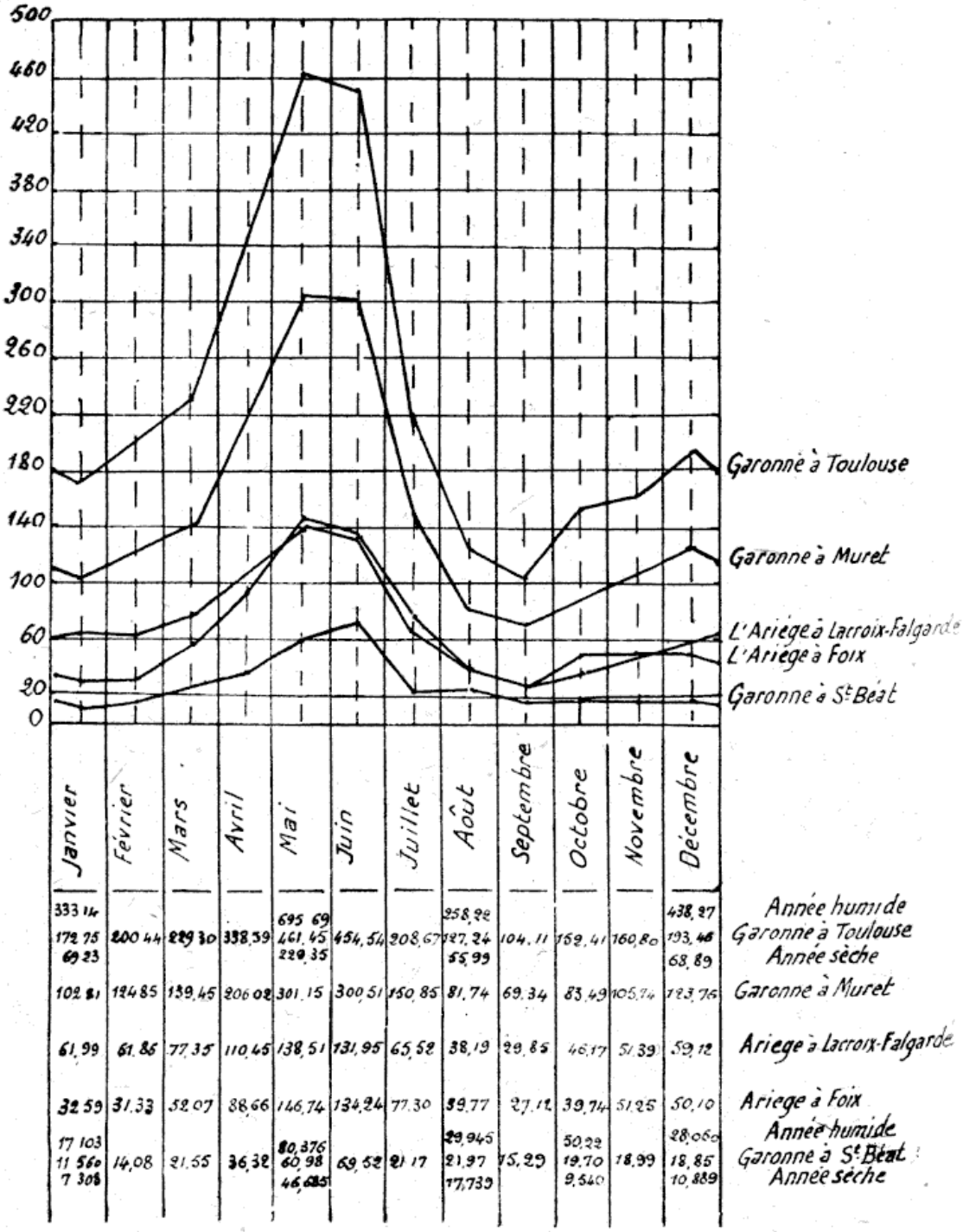


FIG. 89. — Régimes de la Garonne et de l'Ariège.

Sur le Lignon, à 14 kilomètres en aval de Tence, on projette d'utiliser deux chutes, une de 37m,50, débit 1.000 litres moyens, réserve hydrau-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lique de 1 million de mètres cubes, 400 chevaux de puissance, l'autre de 8m,40 hauteur de chute et 400 chevaux de puissance.

La *Garonne* prend sa source au val d'Aran, dans un cercle de montagnes qui s'appuient aux deux pics de la Maladetta et du mont Vallier (2.883 mètres) ; son lit est sans profondeur et varie souvent à cause du peu d'élévation de ses rives ; ses débordements sont fréquents et dévastateurs. Au bec d'Ambez la Garonne se réunit à la Dordogne et forme une masse embarrassée d'îles et de bancs de sable.

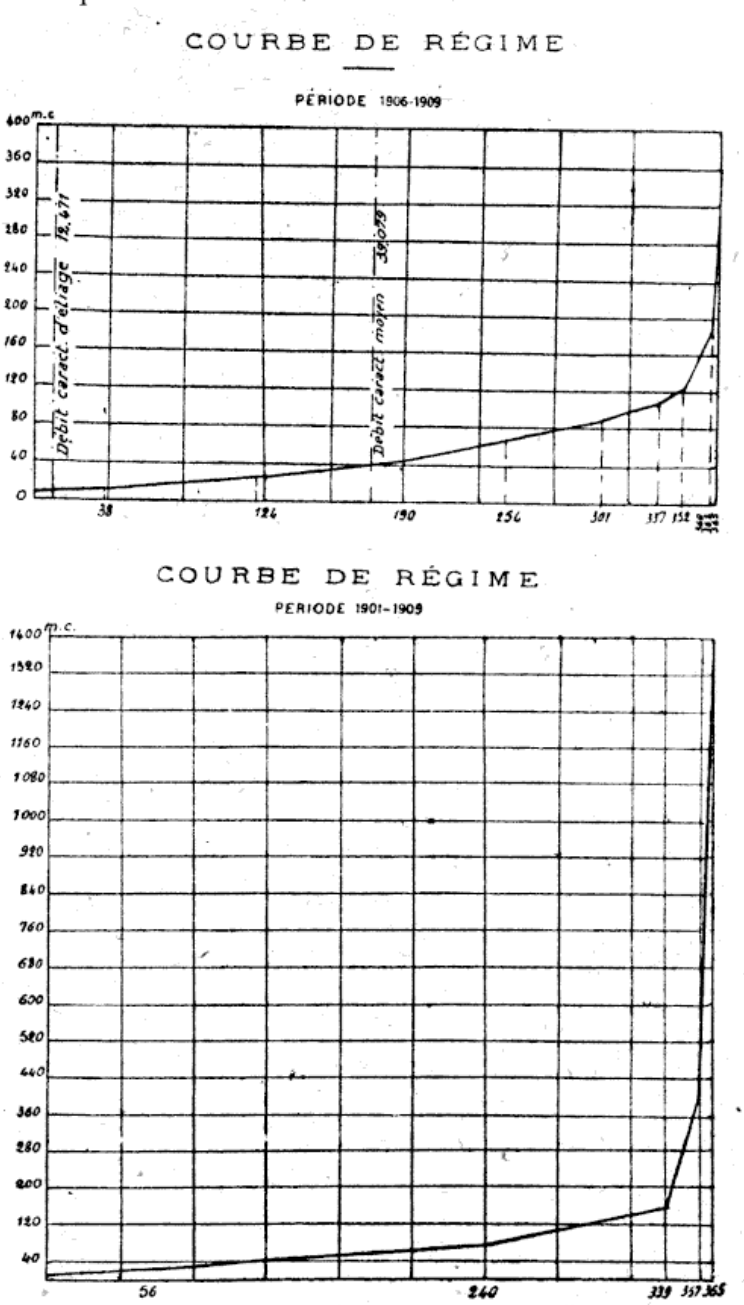


FIG. 90. — Régime du cours d'eau Le Salat.

La prédominance des hautes eaux de printemps accuse dans cette région l'importance du produit de la fonte des neiges dans les Pyrénées. On constate aussi une décroissance régulière de mai à septembre des écoulements dus à la fonte des neiges. Mais si les neiges jouent un rôle important dans l'alimentation des cours d'eau, les glaciers ont par contre moins d'importance que dans les Alpes. De ce fait les variations de débit aux différentes heures de la journée paraissent peu accentuées. L'étiage d'été a lieu en août et septembre et l'étiage d'hiver en janvier et février et entre ces deux périodes d'étiage il y a deux périodes de hautes eaux qui diffèrent comme les deux premiers également par leur importance. Les hautes eaux de printemps (en mai) sont partout beaucoup plus accentuées que les hautes eaux d'automne qui ont lieu en décembre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La *Dordogne* qui descend du Mont-Dore, où le pic de Sancy domine la France centrale, reçoit un assez grand nombre d'affluents dont les principaux sont la Rue, la Sumène, l'Auze, la Maroune, la Cère avec ses merveilleuses gorges et l'Isle avec son principal affluent la Dronne.

La *Rue* est une rivière importante alimentée par la Santoire, la Rue de Cheylade et par plusieurs ruisseaux descendant du mont Cézallier. A partir du confluent, la double Rue poursuit sa direction à l'ouest grossie de l'Arteuse, de la Tarentaine et du Soulou qui vient de Saint-Étienne. Elle forme près de Rochemont la belle cascade du saut de la Saule.

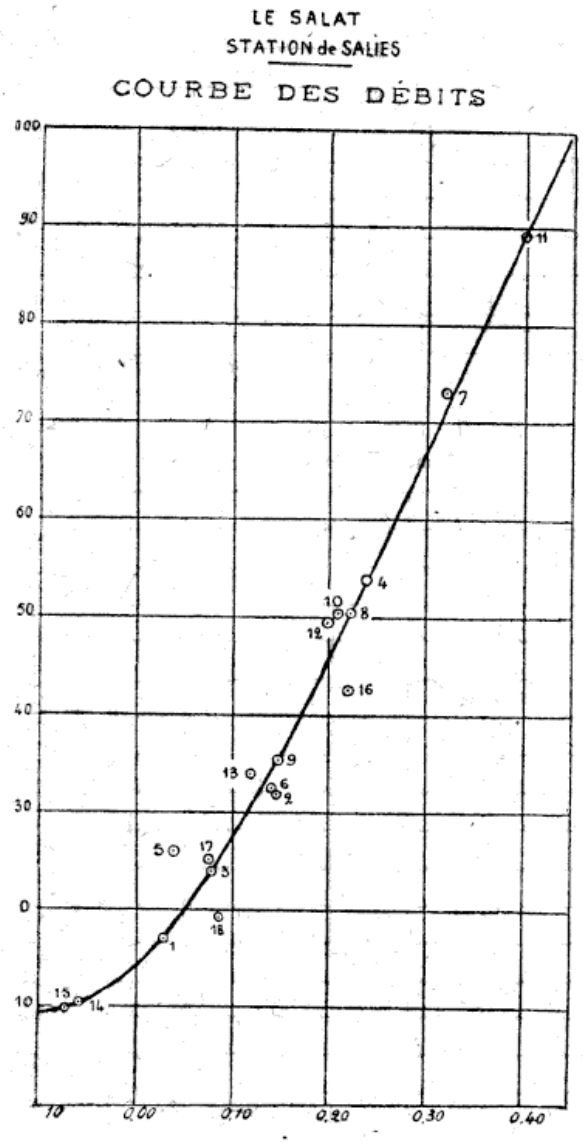


FIG. 91. — Régime au cours d'eau Le Salat.

La Sumène est alimentée par le torrent du Marliou et la rivière Mars qui vient du Puy Maury.

L'Auze qui prend sa source au col de Néronze après avoir formé la magnifique cascade de Salins s'enfonce dans des gorges profondes garnies de forêts qui séparent le plateau de Mauriac du plateau de Pleaux.

La Maroune apporte à la Dordogne les eaux du versant occidental de la chaîne cantalienne. Ses affluents de gauche sont : le Malrieu, l'Aspre et la Beltrande ; l'Incon est son unique affluent de droite.

La Cère, qui prend sa source au col du Lioran, gagne à travers des gorges profondes Laroquebrou pour se jeter dans la Dordogne. Ses principaux affluents de droite sont : la Jordanne et l'Authre et ceux de gauche les rivières de Roannes et d'Escamels.

Sur la Dordogne a été aménagée la puissante usine de *Tuilière* (§ 304) qui dispose actuellement de 24.300 chevaux, fortifiée d'une grosse usine de secours à vapeur d'une puissance égale. L'usine de *Maurac* (13.200 chevaux) en cours d'aménagement, est destinée à remplacer l'usine thermique, avec une autre chute projetée entre Tuilière et le barrage de Mauzac.

L'usine de la *Bourboule*, régularisée par l'accumulation du lac de Guéry,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut fournir 600 chevaux sous une chute de 20 mètres de hauteur ; enfin l'usine de *Campissade*, en profitant de la même régularisation, accuse une puissance de 700 chevaux à l'aide d'une chute de 42 mètres de hauteur. Sur le ruisseau *d'Enfer*, dont le débit est de 515 litres, on projette l'établissement d'une usine pouvant fournir 1.000 chevaux avec une chute de 270 mètres de hauteur.

Sur la Garonne l'usine du *Bazacle* apporte ses 3.000 kilowatts sous une chute de 4m,70 avec deux usines thermiques à vapeur formant ensemble 600 chevaux. En amont de l'usine du Bazacle, on vient d'installer pour les besoins de la Défense nationale, l'usine du *Ramier du Château*, sous une chute de 3m,25 de hauteur, et d'une puissance égale à celle du Bazacle. Une usine électro-chimique vient d'être créée à *Mancioux*, avec une chute de 7m,50 de hauteur et une puissance aménagée de 3.000 chevaux.

Sur l'*Agout*, affluent de la Garonne, se trouve l'usine de *Luzières*, hauteur de chute 116 mètres, puissance 22.500 chevaux. Une usine ther-

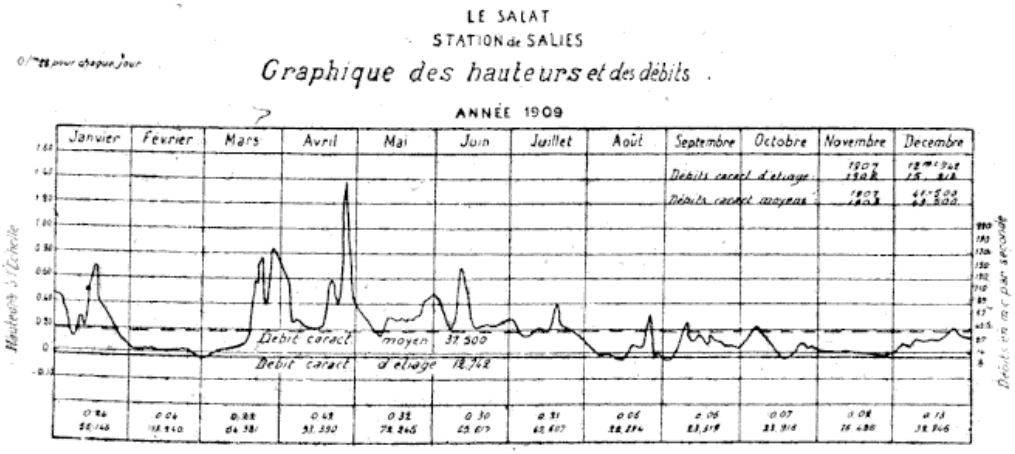


FIG. 92. — Régime du cours d'eau Le Salat.

mique de secours de 1.500 chevaux a été installée à Béziers. On projette l'établissement, en aval de l'usine de Luzières, d'une installation à la *Paraygrie*, sous une chute de 67 mètres de hauteur.

L'*Allier*. Le bassin de l'Allier est séparé du bassin du Lot par le chaînon de la Margeride. L'Allagnon lui apporte un tribut important constitué par les rivières d'Allanche, de Peyrusse et de la Sionne à gauche, et à droite par divers ruisseaux que lui envoie la Margeride.

La *Dore*, affluent de l'Allier, comporte l'usine de *Sauvial*, débit 5 à 15 mètres cubes, hauteur de chute 25 mètres, puissance 5.000 chevaux, réserve hydraulique 1 million de mètres cubes. Les chutes de *Durolle* et de *Credagne* pourront fournir une puissance complémentaire de 1.500 chevaux.

La Dore a pendant dix mois un débit de 20 mètres cubes et 5 mètres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cubes à l'étiage. Les crues y sont brusques et parfois considérables (jusqu'à 800 mètres cubes).

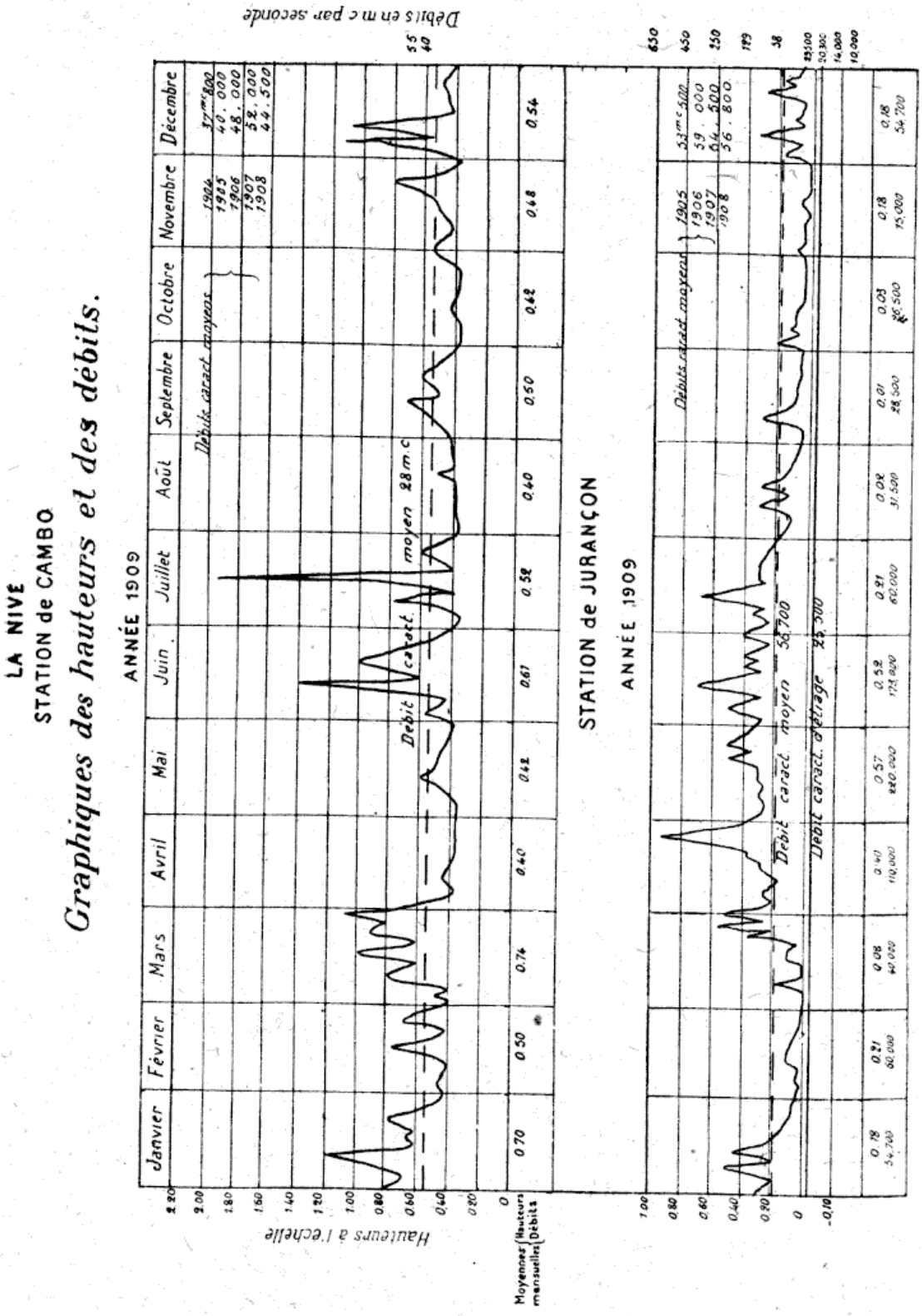


Fig. 93. — Régime du cours d'eau la Nive.

La *Sioule*, affluent de l'Allier, prend sa source aux monts Dore. Son débit, qui est de 4.500 litres en basses eaux, peut aller jusqu'à 42.000 litres dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des crues qui se présentent assez fréquemment. Sur cette rivière a été édifiée l'usine de *Queille* dont les caractéristiques sont les suivantes : hauteur de chute, 24 mètres, débit aménagé 30 mètres cubes, puissance installée, 7.500 chevaux, réserve hydraulique 7 millions de mètres cubes. En amont de cette usine, est celle dite des *Fades*, d'une puissance égale. Une usine thermique de secours est installée à Clermont disposant d'une puissance de 10.000 kilowatts. On projette une chute avec $7^{m},80$ de hauteur, à Pontgibaud.

Le *Lot* reçoit deux affluents importants : la Truyère et le Celé.

La Truyère, qui a un parcours de 175 kilomètres, se jette dans le Lot à Entraygues, coulant toujours dans des gorges profondes et sinueuses. Ses principaux affluents de droite sont le Jurol, la Près, l'Andes avec sa remarquable cascade du Saillant, la rivière de Brezons et le Goul grossi de la Bromme. Les affluents de gauche sont : l'Arcomy, la rivière du Bès, le Remontalou et le Lebon.

Passé la Truyère, trois petites rivières, le Combat, le Comberousse et le Lauze aboutissent directement au Lot, par sa rive droite.

Sur la Truyère est édifiée l'usine hydroélectrique de *Bremmal*, dont le bassin versant est de 2.400 kilomètres carrés. Cette usine est réalisée au moyen d'une chute de 240 mètres de hauteur avec un débit moyen de 15 mètres cubes représentant 36.000 chevaux. Une réserve hydraulique constituée à l'aide de deux barrages, de 50 mètres de hauteur, l'un à Sarran, l'autre à Pradel (200 millions de mètres cubes) permet de relever à 40 mètres cubes le débit de la rivière.

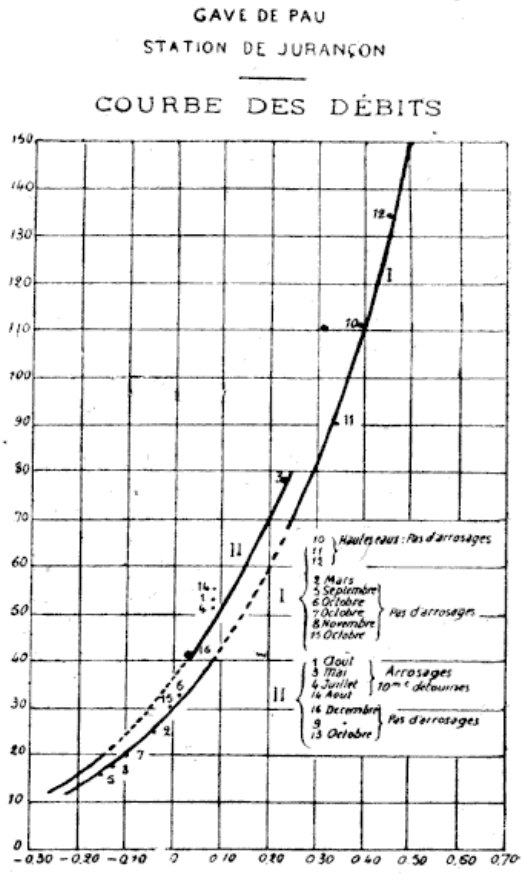


FIG. 94. — Régime du Gave de Pau.

Sur le Bès, affluent de la Truyère, en vue de la Défense nationale, on a construit l'usine de *Maurines*, qui utilise un débit de 12 mètres cubes, avec une chute de 140 mètres de hauteur et 4.400 chevaux installés.

Sur la *Creuse*, nous signalerons l'usine de *la Roche Bal l'Aigre* avec 625 chevaux hydrauliques et 150 chevaux thermiques. Cette usine est en outre fortifiée des usines à vapeur suivantes : Vierzon (1.450 chevaux), Chatellerault (460 chevaux).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'usine du *Bar* a été nouvellement créée pour les besoins de la Défense nationale, sur la Vezère.

46. L'Adour, la Têt, l'Orb, l'Aude, le Tarn et l'Hérault. Région des Gaves. — L'*Adour* prend sa source au mont-Tournalet à une hauteur de 1.930 mètres ; il est sujet à de nombreux débordements. Les affluents de gauche de l'Adour courent dans des vallées étroites et peu fertiles. Les plus remarquables sont : les deux Luy, de nature torrentielle ; le Gave de Pau, qui descend de la belle cascade de Gavarnie (2.331 mètres) et se grossit du Bastan, du Gave d'Oloron lequel reçoit lui-même l'Aspre qui vient du col de Canfranc ; la Bidouze, la

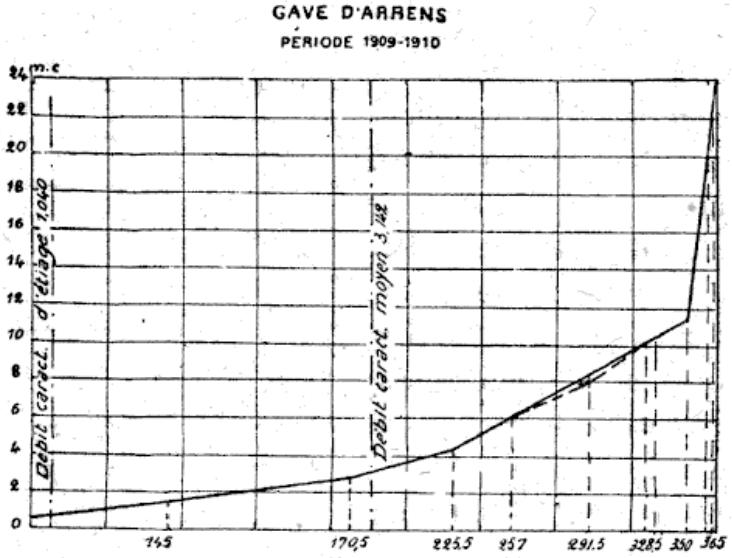


FIG. 95. — Régime du Gave d'Arrens.

Joyeuse et enfin la Nive qui descend du mont Orcullo, grossie de la Bayunze. Les affluents de droite de l'Adour n'ont que peu d'importance ; le plus remarquable est la Midouze.

Sur la *Têt*, régularisée par le réservoir des Bouillouses (13 millions de mètres cubes, chute 430 mètres) s'élève l'usine hydroélectrique de la *Cassagne* (§ 402) desservant la ligne de Villefranche-de-Confluent à Bourg-Madame (réseau du Midi).

Sur cette rivière on trouve en outre les usines : de *Fonlpedrouse* (hauteur de chute 175 mètres, débit maximum 1.500 litres, puissance aménagée 3.300 chevaux ; de *Villefranche-de-Confluent* (hauteurs de chute 16 mètres et 21 mètres, débits minimum 1.200 litres).

Les *gaves de Gavarnie et de Caulerels* sont utilisés par l'usine hydroélectrique de *Soulom* (18.500 à 21.500 HP) (§ 394) pour l'électrification de la ligne de Montréjeau, Tarbes, Pau et embranchements (réseau du Midi).

Cette même ligne reçoit l'énergie de l'usine hydroélectrique *d'Egel*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(10.000 à 18.000 HP), établie sur l'*Oule*, régularisée par un réservoir de 6.500.000 mètres cubes (chute 750 mètres) (§ 423).

Le *Gave de Caulerels* possède en outre l'usine de *Limaçon*, débit moyen 2.000 litres, hauteur de chute 62 mètres, puissance aménagée 1.200 chevaux.

Le *Gave de Soussoueou*, régularisé par un réservoir au lac d'Arbouste, donnera lieu à la création d'une usine hydroélectrique dite des *Eaux-Chaudes*, laquelle apportera son énergie qui sera utilisée pour le fonctionnement des tronçons Pau-Hagetmau et Auch à Lannemezan.

Les *gaves de Saint-Engrave et de Holcarlé* sont mis à contribution pour l'établissement de l'usine hydroélectrique de *Licq*, débit moyen 6 mètres cubes, hauteur de chute 150 mètres, puissance installée 9.000 chevaux,

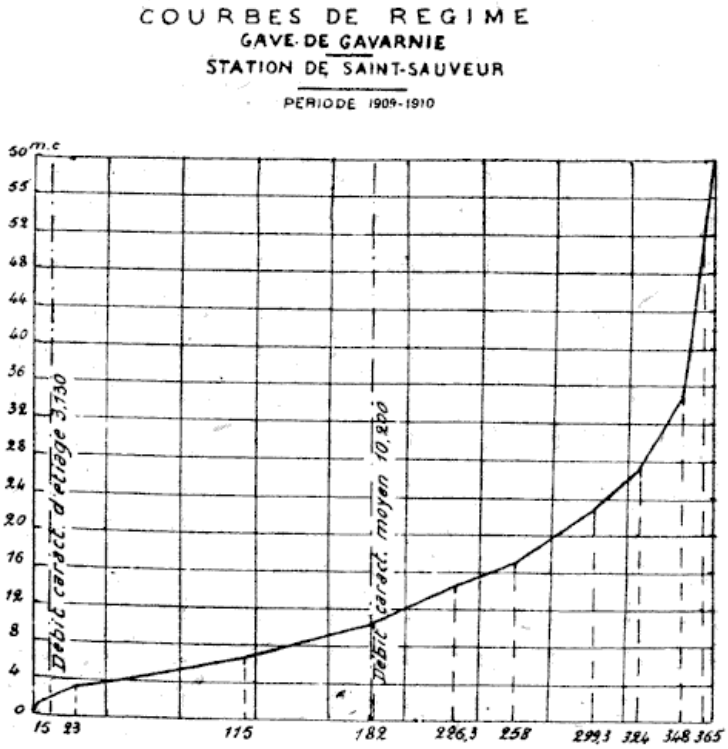


FIG. 96. — Régime du Gave de Gaoernie.

dans la vallée du Saison pour la traction électrique des chemins de fer pyrénéens.

Sur le *Gave de Pau* on trouve : l'usine de *Pont de la Reine* avec 16m,80 de hauteur de chute, et 1.050 chevaux de puissance, l'usine *d'Eget-Peñaroya* avec 350 mètres de hauteur de chute et 15.400 poncelets de puissance.

La *Neste d'Aure* a donné naissance à l'usine de *Saint-Lary*, dont la hauteur de chute est de 172 mètres et la puissance 18.500 poncelets ; aux usines *d'Arreau* qui ont respectivement : hauteurs de chute 66 mètres et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

105 mètres, débit moyen 11 mètres cubes, puissances 14.000 et 16.000 chevaux.

Sur la *Nive des Aldudes*, on trouve l'usine de *Banca* avec une chute de 100m., 2.000 à 4.000 litres débit, et une puissance de 3.500 chevaux ; cette usine a en outre une réserve thermique de 1.350 chevaux.

La *Neste du Louron*, affluent de la Neste d'Aure, s'est enrichie des usines de *Loudenvielle* et de *Bordères*, créées pour les besoins de la Défense nationale et dont l'aménagement a été confié à la maison Thévenot fils. L'usine de Loudenvielle a une puissance aménagée de 8.000 kilowatts et est installée pour 5.800 kilowatts. La hauteur de la chute est de 235 mètres. L'usine de Bordères est aménagée pour 7.000 kilowatts et est installée pour 4.200 kilowatts. La hauteur de la chute est de 165 mètres.

Sur *l'Orb*, l'usine de *Truscat* fonctionne avec une hauteur de chute de 46 mètres, un débit de 2.000 litres moyen fournissant avec la réserve thermique 2.000 chevaux.

Sur le *Tech*, en amont de l'usine de *Pas de Loup*, on installe une usine avec 65 mètres de hauteur de chute, un débit de 1.100 litres et avec un bassin de retenue de 9.000 mètres cubes ; on procède en outre à l'aménagement de l'usine de *Olette*, sous une chute de 200 mètres de hauteur, avec un débit variant de 2.500 à 6.000 litres ; puissance aménagée 6.000 chevaux.

L'*Adour* possède les usines hydroélectriques de *Luchon*, de *Marignac* et de *Campan*. Cette dernière, aménagée avec deux chutes, une de 120 mètres de hauteur fournit 1.400 chevaux, et l'autre de 50 mètres de hauteur, aménagée pour 1.000 chevaux. Une chute de 92 mètres de hauteur, avec un débit variant de 340 à 1.300 litres et devant fournir 1.200 chevaux est en voie de réalisation.

L'aménagement du *lac Bleu* a donné naissance à l'usine de *Cheroulet* avec une hauteur de chute de 200 mètres, un débit variant de 162 à 140 litres et une puissance moyenne de 1.000 chevaux.

Sur l'*Ardalos*, on prévoit l'aménagement d'une usine qui utilisera une chute de 300 mètres de hauteur, avec un débit de 95 à 100 litres, pouvant fournir 1.000 chevaux.

Sur les *Nestes d'One et d'Oo*, l'usine de la *Picadère* utilise une chute de 830 mètres de hauteur, régularisée par le lac de Séculèze et par le lac d'Oo (réserve de 24 millions de mètres cubes). La puissance que pourra fournir cette installation est estimée à 30.000 chevaux, avec des turbines de 6.000 chevaux. L'aménagement du lac d'Espurgou est prévu pour l'alimentation des usines de Luchon et de Marignac.

L'usine dite *l'One*, dont la hauteur de chute est de 100 mètres et le débit moyen de 1.800 litres, fournit une puissance de 2.900 chevaux. Une usine thermique à vapeur de 150 chevaux lui est adjointe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les usines du *Pic supérieur* et du *Pic inférieur* ont respectivement : hauteurs de chute, 210 mètres et 165 mètres, puissances installées, 9.100 et 13.210 chevaux.

Sur *l'Isaby*, l'usine de *Villelongue*, avec un débit de 400 à 2.000 litres, une chute de 532 mètres, peut fournir une puissance de 3.930 chevaux. Une installation thermique à vapeur donne en outre une puissance de 1.400 chevaux.

Sur la *Vézère*, l'usine de ce nom fonctionne sous une chute de 43 mètres de hauteur, un débit moyen de 10 mètres cubes, fournissant une puissance de 4.000 chevaux.

Sur la *Vienne*, l'usine *d'Eymouliers* se présente avec une chute de 50 mètres de hauteur et une force de 2.400 chevaux.

La Société des Forces motrices de la Vienne dispose de trois chutes présentant une hauteur totale de 30 mètres pouvant fournir 8.000 chevaux et une chute de 1.000 chevaux à Bonneuil, en construction.

Sur le *Tarn*, on trouve : les usines de *Saint-Juery* n° 1 et n° 2 qui ont respectivement 1.500 et 2.000 chevaux de puissance, en utilisant des chutes de 7 et 10 mètres de hauteur et un débit variant de 20 à 40 mètres cubes ; l'usine des *Avalals*, hauteur de chute $3^{m},50$, puissance 900 chevaux ; de *Truel*, hauteur de chute 18 mètres, puissance 5.400 chevaux avec réserve à vapeur de 300 chevaux. La chute de *Sauby* à Saint-Victor et Melvieux, en voie de réalisation, pourra fournir 20.000 chevaux sous une chute de 32 mètres de hauteur.

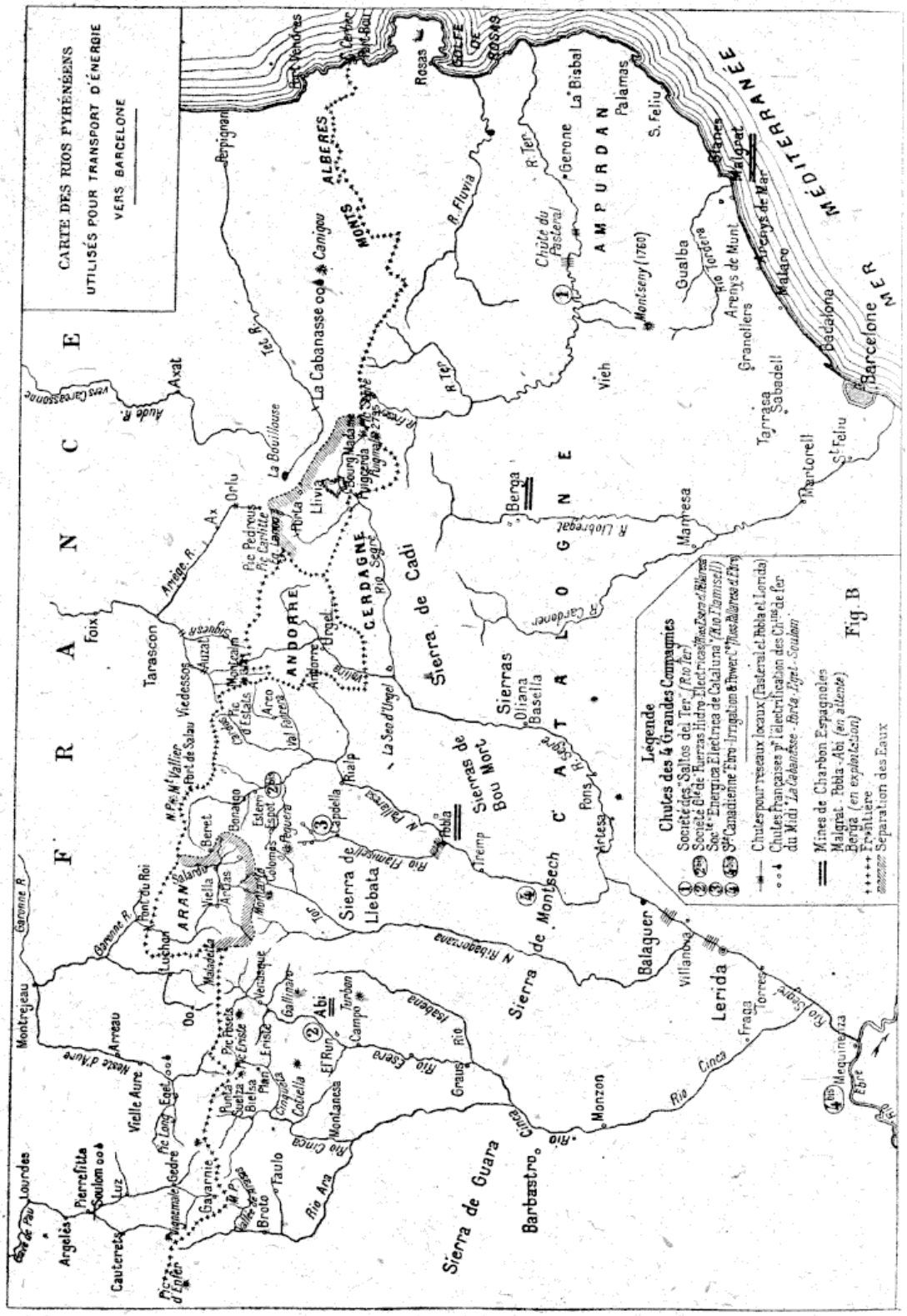
Sur l'*Aude* sont les usines de la Compagnie Méridionale d'Électricité, savoir : l'usine *Saint-Georges*, hauteur de chute $101^{m},40$, débit 6 mètres cubes, puissance installée 4.500 chevaux ; l'usine de *Gesse*, hauteur de chute 185 mètres, puissance installée 6.000 kilowatts ; l'usine d'*Escoulobre*, hauteur de chute 300 mètres, puissance installée 9.000 chevaux, avec réserve hydraulique de 8 millions de mètres cubes. Des réserves thermiques à vapeur sont installées à Narbonne (1.500 chevaux) et à Carcassonne (3.600 chevaux).

La *Vis*, affluent de l'Hérault, prend sa source au mont de l'Aveyron. Son débit d'étiage est de 2 mètres cubes ; elle coule une eau très pure. L'usine de *La Vis* ou de Madières a une chute de 107 mètres de hauteur et fournit une puissance de 5.000 chevaux.

47. L'utilisation du Rhin entre Schaffouse et Bâle. — Le Rhin, entre ces deux régions, sur un parcours de 120 kilomètres, forme frontière entre le grand-duché de Bade et cinq cantons suisses. Une douzaine de chutes d'eau variant de 4 à 24 mètres et d'un débit de 100 à 280 mètres cubes à la seconde donneront, quand elles seront toutes aménagées, une puissance de 200.000 chevaux utiles. Il existe actuellement sur cette par-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tie du fleuve trois usines hydroélectriques, celle de ***Schaffouse*** et celle de ***Rheinfelden*** dont nous donnons la description au (§ 297) et l'usine électro-


CARTE DES RIOS PYRÉNÉENS
UTILISÉS POUR TRANSPORT D'ÉNERGIE
VERS BARCELONE
FRANCE
ESPAGNE
CATALOGNE
MÉDITERRANÉE
MER
Légende
Chutes des 4 Grandes Compagnies
Chutes pour réseaux locaux (Pastera et Bbat et Lorida)
Chutes Françaises et Electrification des Chemins de fer du Midi
Mines de Charbon Espagnoles
Malgrat - Tobla - Abi (en allemte)
Berga (en exploitation)
Frontière
Séparation des Eaux
Fig. B
Perpignan
Rosas
Les Vendres
Canigou
ALBERES
MONTS
R. Fluvia
R. Ter
La Bisbal
Palamos
S. Feliu
Gerone
Chûte du Pasteral
AMPURDAN
Montseny (1760)
Gualba
Tordera
Arenys de Munt
Malgrat
Arenys de Mar
Granollers
Mataro
Badalona
Barcelone
Vich
Tarrasa
Sabadell
Martorell
St Feliu
Berga
Manresa
R. Llobregat
R. Cardoner
Sierra de Cadi
Sierras Oliana Basella
Sierras de Bou Mort
Sierra de Montsech
Sierra de Llebata
Sierra de Guara
Balaguer
Villanova
Lerida
Fraga
Torres
Mequinenza
Ebre
Monzon
Barbastro
Rio Cinca
Rio Isabena
Rio Esera
Rio Ara
Rio Gallego
Rio Aragon
Rio Subordan
Rio Flumisell
Rio Palleresa
Rio Segre
Rio Noguera
Rio Pallaresa
Rio Noguera Ribagorzana
Rio Noguera Tor
Rio Tor
Rio Segre
Rio Ter
Rio Llobregat
Rio Cardoner
Rio Ebre

L'usine de Schaffouse, dont la puissance est de 2.400 chevaux, fournit l'énergie électrique pour les tramways et l'éclairage de la région avoisinante.

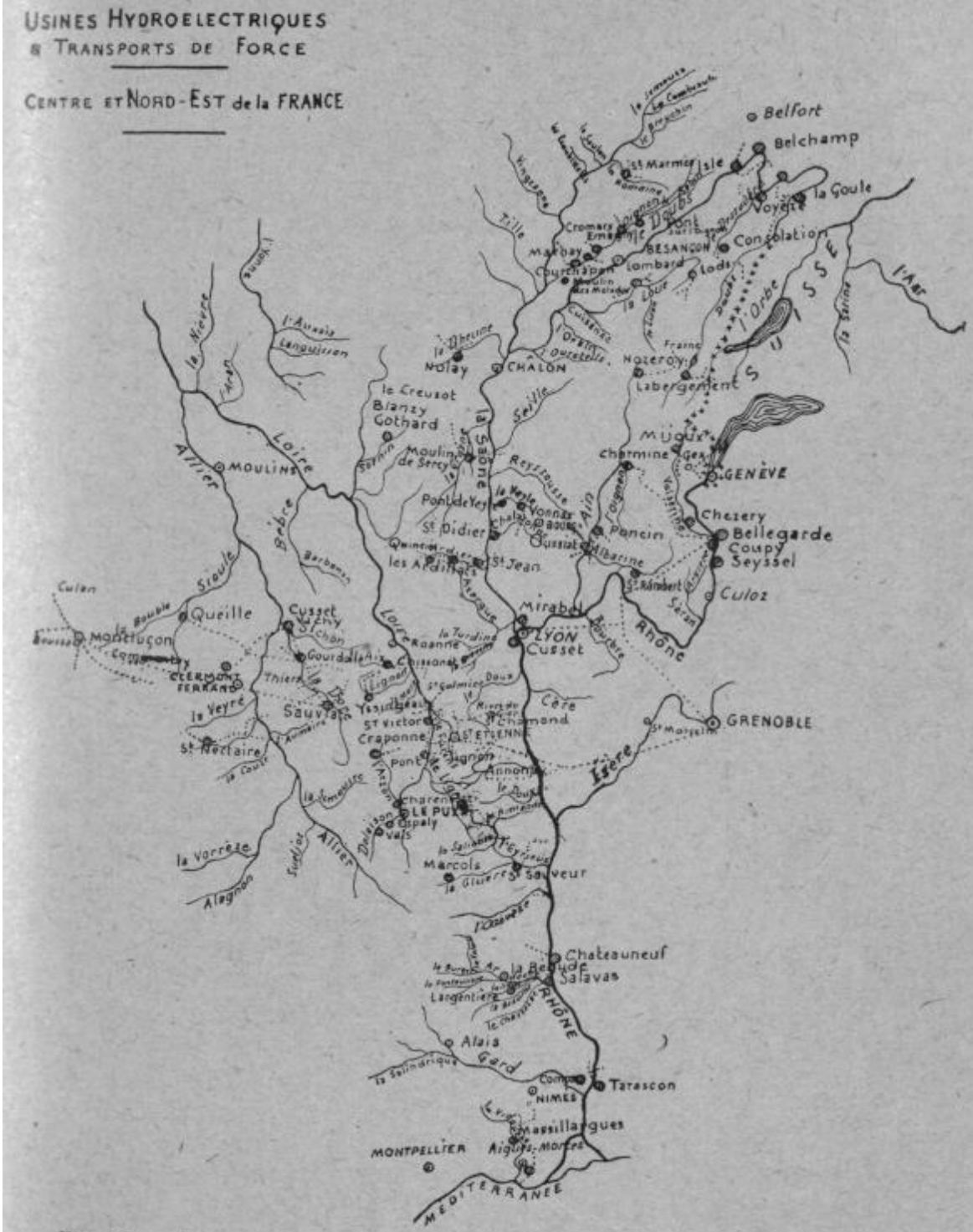


FIG. 98. — Carte des usines hydroélectriques et des transports d'énergie du centre et du Nord de la France.

Entre Rheinfelden et Augst (rive suisse) et Wyklen (rive allemande),

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le gouvernement de Bâle-Ville et la Société de Rheinfelden, concessionnaires en commun de l'entreprise, ont édifié deux usines fournissant chacune 15 à 20.000 HP, en utilisant une chute de 8 à 9 mètres à l'aide d'un barrage de 200 mètres de long : la totalité de la force est utilisée par moitié sur territoire suisse et territoire badois. Ces usines permettent notamment l'électrification du réseau des chemins de fer

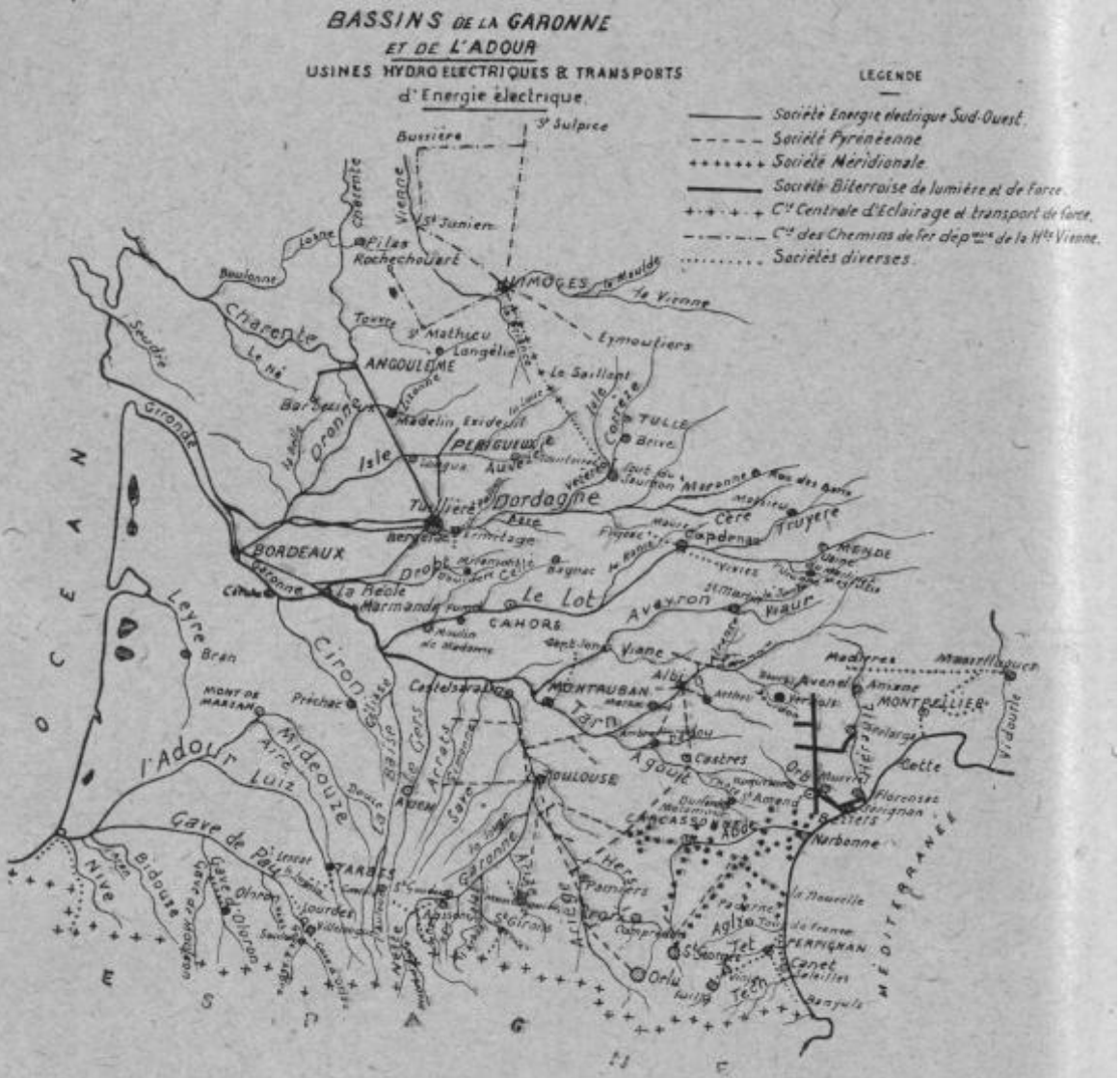


Fig. 99. — Carte des usines hydroélectriques et transports d'énergie des bassins de la Garonne et de l'Adour.

badois du Wiesenthal. Le canton de Bâle-Campagne s'est assuré par contrat une force de 4.000 HP, qui sera principalement absorbée par l'industrie à domicile.

A Laufembourg, commune argovienne située sur le Rhin, à 25 kilomètres environ de Angst, en amont, le fleuve resserré entre les contreforts du Jura et de la Forêt Noire forme une chute de 13 mètres. On y a édifié des travaux analogues à ceux en cours à Angst ; ils com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prennent : un barrage du côté de la rive badoise à la sortie du défilé formé par le Rhin, qui donne une retenue aux basses eaux de 11 mètres, aux eaux moyennes de 9 mètres et en temps de crue $3^{m},50$; une installation de turbines sur la rive gauche du fleuve peut fournir immédiatement une force constante de 30.000 chevaux, pour être portée plus tard à 50.000 chevaux ; enfin l'élargissement du Rhin en amont du barrage. La navigation est assurée par un canal à écluses de 9 mètres

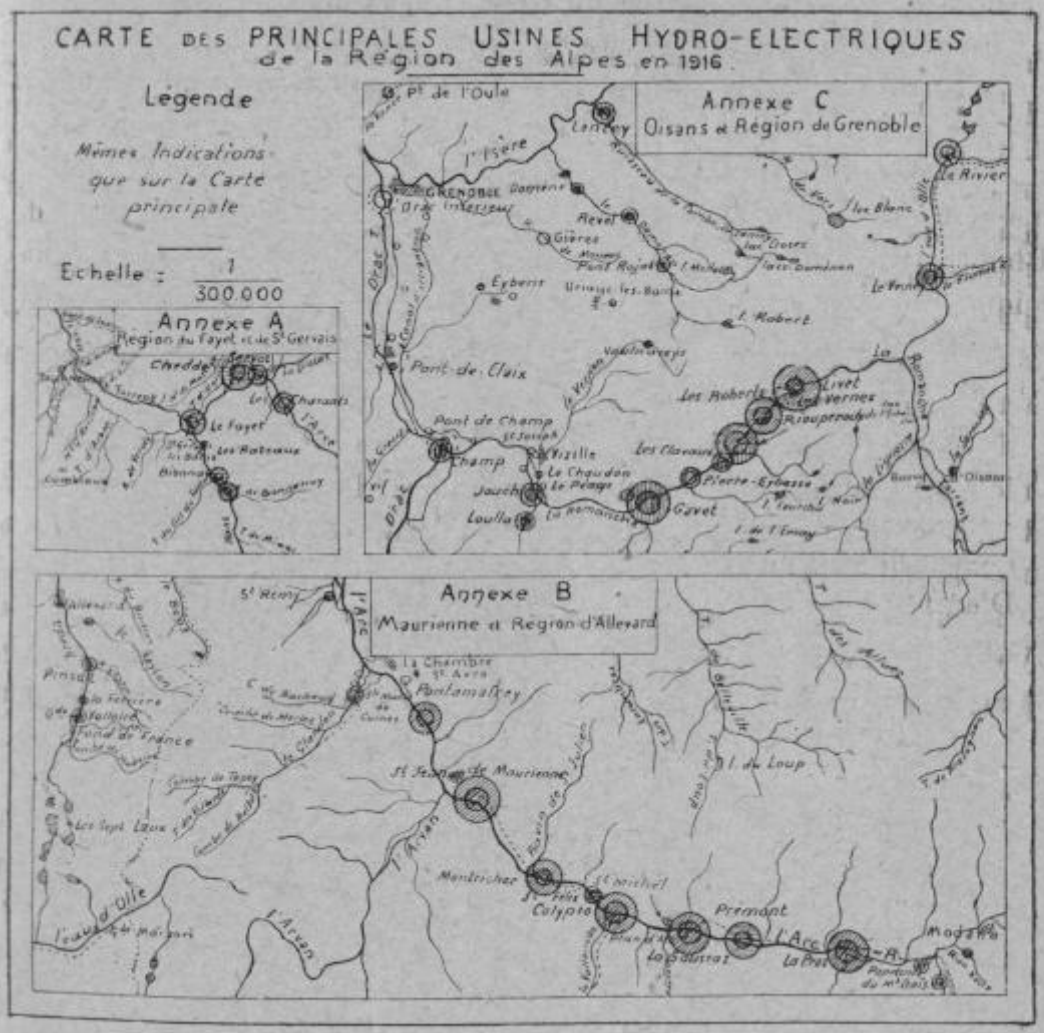


FIG. 100. — Carte des principales usines hydroélectriques de la région des Alpes (Annexes).

de largeur, contre la rive badoise. Comme à Angst-Wyhlem, la force obtenue est répartie par moitié entre la Suisse et le grand-duché de Bade.

Des projets concernant la création de deux autres usines sont à l'étude depuis quelques années. Le premier consiste à aménager la chute de Rheinan, à quelques kilomètres en aval de Schaffouse et dans une boucle formée par le Rhin ; on utiliserait les eaux du Rhin sur un parcours de 11 kilomètres qui donnerait une chute de 11 mètres et la force escomptée serait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 43.000 chevaux. La seconde serait située à 20 kilomètres en aval de Rheinan, où les deux rives du fleuve appartiennent au canton de Zurich. La force utilisable est de 32.000 chevaux.

On a aussi envisagé l'aménagement de chutes à Schowörstadt, entre Schaffouse et Bâle où la force recueillie atteindrait 30.000 chevaux, à Birofelden, un peu en amont de Bâle, et à Petit-Huningue.

Enfin un autre projet qui intéresserait, en outre de la Suisse et du grand-duché de Bade, l'Alsace et en particulier Mulhouse, comporterait l'utilisation de la force motrice du Rhin en deux installations successives, la première comprenant la chute du fleuve depuis la frontière suisse jusqu'à Kembs sur la rive gauche, la seconde depuis Kembs jusqu'à Petit-Landau à 10 kilomètres environ en aval. Le barrage de la première usine se composerait de six travées de 30 mètres de portée, et serait établi de manière à relever de $2^{m},50$ au-dessus du niveau actuel le niveau d'eau du Rhin et il disparaîtrait entièrement en temps de crues. La puissance dynamique du fleuve serait recueillie par des turbines de 5.000 chevaux chacune et pour une force de 60.000 chevaux. L'écluse pour la navigation aurait une largeur de 25 mètres.

La seconde installation, qui ne doit être construite que lorsque la première usine aura été installée, sera réalisée par le prolongement du canal de fuite de la première usine formant ainsi le canal d'amenée d'eau au bâtiment des turbines.

D'autre part, on créerait des réservoirs sur les premiers contreforts des Vosges, où l'eau serait refoulée pendant la nuit pour utiliser sa chute, de jour, aux heures de forte consommation, sous forme d'énergie électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE III

CANAUX

Dans un canal, le mouvement de l'eau est *uniforme* ou *varié*. Pour réaliser la première condition, on donne au canal une forme rectiligne, une section transversale et une pente longitudinale uniformes ; par suite, la vitesse est constante tout le long d'un même filet. Dans le second cas, la section et la pente sont variables, cette dernière pouvant être nulle ou même en contre-pente.

Pour que, dans un mouvement uniforme, l'accélération de la vitesse soit détruite, il faut concevoir que des résistances, croissant avec la vitesse, fassent équilibre à l'action accélératrice de la pesanteur. Ces résistances (adhérence et cohésion des molécules), sont indépendantes de la pression à laquelle elles sont soumises.

Même dans le mouvement varié, on suppose toujours que le régime permanent est établi lorsque les molécules qui passent successivement par un même point y circulent avec la même vitesse, la même densité et la même pression. On parvient à l'équation du mouvement varié en appliquant le théorème des forces vives du système matériel formé par les molécules liquides comprises entre deux sections perpendiculaires à l'axe du courant et infiniment voisines.

48. Équations des mouvements varié et uniforme. — L'équation d'équilibre dynamique du mouvement varié de l'eau dans un canal de grande section est :

$$(1) \qquad I = bU^2 \frac{\chi}{\Omega} + \alpha \frac{dU^2}{dx 2g} + \beta \frac{1}{g} \frac{dU}{dt}.$$

Et l'équation de la conservation des volumes :

$$(2) \qquad \frac{d\Omega}{dt} + \frac{dU}{dx} = 0.$$

Dans ces formules, x est la distance, prise le long du canal, d'une section

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

droite quelconque à une section prise pour origine, χ le périmètre mouillé ($ab + bc + cd$) (*fig.* 101), pour un canal à section trapézoïdale, Ω la section mouillée ($abcd$), U la vitesse moyenne du courant que l'on obtient en divisant le débit par la section, q le débit ($= \Omega U$), et enfin I la pente superficielle.

Les deux seules variables sont x et t (le temps considéré), les autres quantités étant des fonctions de ces variables, fonctions dont la recherche constitue la solution du problème à résoudre. Si on connaît la hauteur d'eau h, on peut tout exprimer en fonctions connues de U, h, t et x, et, en substituant dans les équations (1) et (2), transformer celles-ci en deux équations aux dérivées partielles où les variables sont x, t, et les fonctions h et U.

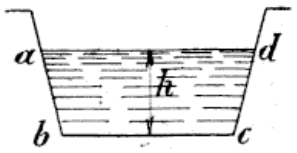


FIG. 101.

Dans la formule (1), le terme $\left(b U^2 \frac{\chi}{\Omega}\right)$ représente la résistance du frottement, $\left(\alpha \frac{dU^2}{dx 2g}\right)$ l'accélération correspondant à ce que le mouvement est varié, et $\left(\beta \frac{1}{g}\frac{dU}{dt}\right)$ l'accélération correspondant à ce que le mouvement est non permanent. Les coefficients α et β sont peu différents de l'unité.

Avec le mouvement varié (canaux à profils et pentes irréguliers), par suite des variations de sections et de pentes du lit (variations qui se produisent progressivement et d'une manière presque insensible) sur les points consécutifs du parcours, la différence des niveaux dans deux sections transversales très voisines n'est plus celle qui résulterait de la pente du lit entre ces deux sections, comme cela a lieu pour le mouvement uniforme, mais elle peut être plus faible ou plus forte, suivant les circonstances.

Si on appelle h l'augmentation de niveau de l'eau quand on passe d'un point à un autre très voisin situé à la distance x du premier, $\frac{h}{x}$ représente l'augmentation du niveau de l'eau par unité de longueur dans cette section, et, par suite, la pente de la dénivellation par rapport au fond du lit sur lequel se comptent les hauteurs d'eau.

Dans cet ordre d'idées, si on désigne par Q′ le débit spécifique, ou débit par seconde et par mètre de longueur, par H la hauteur d'eau du côté aval de la section, on aura pour la section voisine : $(H + h)$, et la valeur de h est donnée par l'expression :

$$h = \frac{\frac{b_1 \times Q'^2}{H^3}}{1 - \frac{Q'^2}{gH^3}} x.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour que h soit nul, ce qui détermine le mouvement uniforme, il faut que :

$$H_1^3 = \frac{b_1 Q'^2}{I}.$$

Lorsque pour une surélévation h, la distance x est nulle, on est en présence d'un *ressaut*, c'est-à-dire que l'eau s'élève verticalement au point considéré. Alors :

$$H_2^3 = \frac{Q'^2}{g}.$$

La signification et la valeur du coefficient b_1 sont celles dont il sera question au paragraphe suivant.

Pour les cours d'eau à faible pente, H_1 est plus grand que H_2, c'est-à-dire que la hauteur d'eau pour laquelle le mouvement est uniforme, sur un parcours déterminé, est supérieure à celle qui donne lieu au ressaut superficiel, et la hauteur d'eau correspondant au ressaut superficiel est plus grande que celle qui détermine le mouvement uniforme si on est en présence de cours d'eau torrentiels.

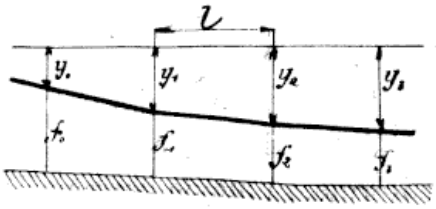


FIG. 102.

Proposons-nous de déterminer la dénivellation existant entre deux sections d'un parcours plus ou moins étendu d'un cours d'eau, et soient (*fig.* 102) : S_1 et S_2 ces sections, y_1 et y_2 les ordonnées du plan d'eau à chacun de ces points par rapport à une ligne de comparaison horizontale, on aura :

$$y_2 - y_1 = \frac{Q^2}{2g}\left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2}\right) + \frac{Q^2 b_1}{2}\left(\frac{\chi_1}{S_1^3} + \left(\frac{\chi_2}{S_2^3}\right) \times l.\right.$$

Dans cette formule, b_1 est une valeur moyenne correspondant aux deux sections S_1 et S_2 ; on connaît Q, le débit d'eau, que l'on peut déterminer directement par jaugeage, le profil en long et les profils transversaux, qui peuvent être relevés aussi directement, enfin l'on se donne la côte de l'eau dans l'une des sections, par exemple y_1. On calcule donc y_2 afin d'obtenir la différence des côtes de la surface de l'eau entre les deux sections, l étant la distance entre les deux sections considérées.

Si la partie du cours d'eau que l'on considère a une certaine étendue, on la divise en plusieurs sections S_0, S_1, S_2, S_3, et l'on procède, comme nous l'avons fait pour une section, en calculant les dénivellations successives : $y_1 - y_0$, $y_2 - y_1$, $y_3 - y_2$ et l'on obtient la dénivellation totale $y_3 - y_0$.

Supposons que l'on veuille établir un barrage en y_3 à l'effet de déterminer une chute. Ce barrage fera refluer l'eau à une certaine distance en amont ; alors il faut s'imposer que ce reflux ne se fasse pas sentir plus loin

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que la section S_0, au delà de laquelle le régime de la chute de l'usine située en amont serait défavorablement influencé.

La cote y_0 de ladite section ne devant pas changer après l'établissement du barrage, on calcule la cote y_3 pour qu'il ne se produise aucune surélévation du niveau en S_0, ni remous nuisibles à l'usine placée en amont de celle que l'on veut créer.

Pour le *mouvement uniforme*, la formule de Bazin applicable au régime permanent et uniforme est :

$$I = \frac{bU^2}{R}, \qquad \text{avec} \qquad \sqrt{b} = 0{,}0115\left(1 + \frac{\gamma}{R}\right);$$

R, rayon moyen ou rapport $\left(\frac{\Omega}{\chi}\right)$ de la section mouillée au périmètre mouillé, qui prend aussi le nom de rayon hydraulique, et γ est un coefficient qui dépend de la rugosité du lit.

Pour calculer U au moyen de cette formule, il faut d'abord y introduire pour R et I des valeurs déterminées d'après une section assez longue du lit de la rivière.

Cette formule est inapplicable aux rivières torrentielles ; il convient de lui faire subir des corrections résultant de ce que le mouvement n'y est ni uniforme, ni même permanent pendant les jaugeages.

La formule complète dans ce cas est :

$$I = \frac{bU^2}{R} + \frac{1}{2g}\,\alpha\,\frac{\Delta U^2}{\Delta x} + \frac{1}{g}\,\beta\,\frac{dU}{dt};$$

Δx, longueur de la *section* expérimentée, et ΔU^2 la variation de U^2 dans cette section.

Si z représente la différence des côtes de la surface libre pour deux sections situées à une distance l l'une de l'autre, ω la section du lit, v la vitesse moyenne de l'eau au milieu du courant (égale aux $\frac{8}{10}$ de la vitesse superficielle), on a :

$$z = 0{,}00038v^2\,\frac{l\chi}{\omega} \text{ (formule Eytelwein).}$$

Lorsque la profondeur h du lit est négligeable devant la largeur, la formule précédente se transforme en la suivante :

$$v = 51\sqrt{5\frac{h}{l}} \text{ (formule Tadini).}$$

49. Influence des parois. — Dans les canaux, il convient que la vitesse d'écoulement reste entre certaines limites, déduites d'observations expérimentales. Une vitesse trop faible entraîne la production de dépôts,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une vitesse par trop considérable affouille ou dégrade les parois du canal.

On sait qu'un liquide, pour se mouvoir, a à vaincre une résistance due au déplacement relatif des molécules les unes par rapport aux autres, qui est le frottement intérieur, et une résistance due au frottement le long des parois. Sous la réserve de certaines hypothèses, on peut dans quelques cas particuliers déterminer analytiquement la valeur du frottement intérieur, mais il est d'usage, dans les formules fondamentales du mouvement de l'eau, de ne parler que de la résistance qu'éprouve le fluide le long des parois, et on admet implicitement que dans tous les cas l'influence de ce frottement intérieur est exprimé par le terme correctif indiqué par les résultats d'expériences.

La formule fondamentale qui lie la vitesse moyenne avec la pente de la surface et la section transversale est :

$$\frac{RI}{U^2} = \alpha + \frac{\beta}{R}, \qquad \text{où :} \qquad RI = \alpha U^2 + \frac{\beta U^2}{R} = \left(\alpha + \frac{\beta}{R}\right) U^2$$

dans laquelle :

$$\alpha = 0{,}00015 \; ; \; \beta = 0{,}0000045, \text{ pour parois cimentées, et } U = \frac{Q}{\Omega}.$$

Si dans cette formule on fait $C = \dfrac{1}{\sqrt{\alpha + \dfrac{R}{\beta}}}$, on obtient :

$$U = C\sqrt{RI} \qquad \text{et} \qquad I = \frac{U^2}{C^2 \times R}.$$

Darcy et Bazin ont trouvé la formule ci-après, qui tient compte de la nature des parois et du développement de ces parois par rapport à la section :

$$RI = b_1 U^2,$$

dans laquelle les valeurs de b_1 sont celles ci-après :

$0{,}00015\left(1 + \dfrac{0{,}03}{R}\right)$ pour parois très unies (ciment lisse, bois raboté, etc.) ;

$0{,}00019\left(1 + \dfrac{0{,}07}{R}\right)$ pour parois unies (pierres de taille, briques, planches) ;

$0{,}00024\left(1 + \dfrac{0{,}25}{R}\right)$ pour parois peu unies (maçonnerie de moellons) ;

et $0{,}00028\left(1 + \dfrac{1{,}25}{R}\right)$ pour parois en terre [1].

---

[1] A titre documentaire, nous signalerons la formule préconisée par un ingénieur américain, M. Merril (*Engineering Record*, 28 décembre 1907) :

$$U = CI^{\alpha} R^{\beta} ;$$

R, rayon moyen ; I, pente ; C, coefficient de rugosité spécial à chaque paroi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Bazin a en outre établi que le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse maximum $\left(\frac{U}{V}\right)$ décroît en même temps que la résistance de la paroi augmente, résistance qui est mesurée dans chaque cas par la relation : $\frac{RI}{U^2}$.

Les traités d'hydraulique contiennent les tables de Bazin pour les valeurs de $\frac{RI}{U^2}$ et de $\frac{R\sqrt{I}}{U}$

On met aussi la formule de Bazin sous la forme :

$$U = \frac{87\sqrt{RI}}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$$

où les valeurs de γ sont : 0,06 pour parois très unies, 0,16 pour parois unies, 0,46 pour maçonnerie de moellons, 0,85 pour parois de nature mixte, 0,130 pour canaux en terre dans des conditions ordinaires et 1,75 pour canaux en terre présentant une résistance exceptionnelle.

Les formules suivantes permettent de se rendre compte des rapports qui existent entre la vitesse moyenne (U), la vitesse maximum (V) et la vitesse minimum (W) :

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{1 + 14\sqrt{\alpha + \frac{\beta}{R}}}; \quad V = U + 14\sqrt{RI} \quad \text{(Bazin)};$$

$$U = \frac{V(V + 2{,}37)}{V + 3{,}15} \text{ (de Prony)} \qquad \text{et} \qquad U = \frac{2V + W}{3} \text{ (Sonnet)}.$$

Darcy et Bazin ont aussi fait connaître la répartition des vitesses dans la section d un canal (*fig.* 103); dans les cas les plus ordinaires, on prend : U = 0,80V et U = 1,33W (V, vitesse maxima, et W, vitesse minima).

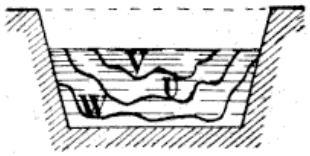


FIG. 105.

La longueur d'un canal étant une dimension définie, on ne peut agir que sur sa section pour réduire au minimum le cube de déblais à effectuer ; mais alors la dimi-

---

L'auteur indique pour les coefficients *a*, *y*, et C les valeurs suivantes :

1° Canaux de section courante : $a = 0{,}43$, $y = 0{,}869\ V^{-0{,}25}$ et C = 78 pour parois en planches non rabotées, 94 pour ciment pur, 56 pour béton de gravier fin, 45 pour béton de gros gravier, 75 pour des briques, 77 pour maçonneries rejointoyées, et 22 à 32 pour la terre ;

2° Canaux de section semi-circulaire : $a = 0{,}46$, $y = 0{,}929\ V^{-0{,}25}$ et C = 97 pour parois en planches rabotées, 114 pour ciment, 104 pour mortier de (1 : 3), 74 pour béton de petit gravier ;

3° Rivières et canaux à grande section : $a = 0{,}76$, $y = 1{,}562\ V^{0{,}25}$ et C = 174 à 248.

L'unité de longueur est le pied = 0m,304795.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nution de section déterminant un accroissement de la vitesse, la valeur de celle-ci doit néanmoins être compatible avec la conservation des berges.

Les *vitesses de fond*, c'est-à-dire celles pour lesquelles les divers terrains où sont creusés les canaux commencent à être entraînés, sont celles ci-après (en mètres à la seconde) :

Terres détrempées.....	0,076	Cailloux.....	0,900
Terres ordinaires.....	0,080	Pierres cassées, silex.	1,200
Argiles tendres.....	0,152	Schistes, poudingues.	1,500
Sables.....	0,300	Roche stratifiée.....	1,800
Gravier.....	0,600	Roche dure.....	3,000

Les vitesses pratiques pour éviter un dépôt de limon ou un dépôt de sable sont respectivement de $0^m,21$ par seconde et $0^m,42$ par seconde.

La *perte de charge* totale produite par l'écoulement de l'eau dans un canal de longueur l en mètres, de section s en mètres carrés, de vitesse v en mètres par seconde, a pour expression :

$$h = \frac{b_1 v^2}{\mathrm{R}} \times ls \text{ mètres};$$

R, rayon moyen hydraulique en mètres ; b_1, coefficient qui dépend de la nature des parois et dont la valeur est indiquée plus haut.

Lorsque la section du canal est constante, on obtient un mouvement uniforme quand la pente est telle que :

$$\frac{h}{l} = \frac{b_1 v^2}{\mathrm{R}}.$$

Les pentes moyennes des canaux, en millièmes, sont les suivantes : canal de prise, 0,4 à 0,5 ; canal de décharge, 1 à 2 ; grands canaux d'irrigation, 0,2 à 0,5 ; petits canaux d'irrigation, 0,6 à 0,8 ; canaux de navigation, 0,1 à 0,25.

Pour les petits canaux ou caniveaux, M. Ringelmann indique la formule :

$$\mathrm{V} = \mathrm{KRI}$$

V, Vitesse moyenne d'écoulement, I pente par mètre, R rayon moyen, K coefficient calculé d'après les expériences auxquelles s'est livré l'auteur.

Le coefficient K varie de 0,3336 à 0,3694, soit en nombre rond 0,35.

50. Profils des canaux. — L'inclinaison des parois varie suivant la nature des matériaux employés à leur confection. Pour les parois maçonnées, on prend 90° ; pour la pierre sèche, 63° environ ; pour la terre compacte, 45° ; pour le sable et la terre légère, 26° à 27°.

On cherche un profil qui satisfasse à la surface cherchée S en tenant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

compte de l'inclinaison des talus, puis on calcule la pente par mètre, laquelle est donnée par la relation (Prony) :

$$I = \frac{S}{P_m}(aU + bU^2) ;$$

P_m, périmètre mouillé ; S, surface de la lame d'eau ; a, coefficient numérique $= 0{,}000044$ et $b = 0{,}000309$.

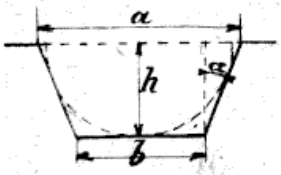


Fig. 104.

Le minimum de P_m a lieu pour la section circulaire et, dans un canal de section rectangulaire, P_m est minimum pour $L = 2h$ (L largeur et h hauteur de l'eau dans le canal). Pour une section trapézoïdale, le minimum de P_m a lieu pour le trapèze circonscrit à un cercle.

Dans le trapèze représenté par la (*fig.* 104) la surface mouillée S et le périmètre mouillé P_m sont :

$$S = bh + h^2 \operatorname{tang} \alpha \quad \text{et} \quad P_m = b + \frac{2h}{\cos \alpha}.$$

Pour que le débit soit maximum, il faut que le rayon hydraulique le soit également ; or, pour que $\frac{S}{P_m}$ ait une valeur maximum, il faut que P_m soit minimum.

Dans un trapèze à débit maximum, pour une section d'écoulement donnée, le rayon hydraulique est égal à la moitié de la profondeur d'eau h. Pour des talus $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{1}, \frac{2}{1}$, la hauteur h est à la largeur du plafond comme les nombres 2,12 ; 1,65 ; 1,21 et 0,81.

Lorsqu'un canal a une section circulaire complète, la position de la ligne d'eau correspondant au débit maximum, ou autrement dit, la profondeur h à l'aplomb du centre est donnée par l'expression $h = 1{,}90r$, et le rayon moyen $R = 1{,}1462\frac{r}{2}$ (r, rayon du canal). Quant à la vitesse maximum elle correspond au cas où la ligne d'eau, qui peut être considérée comme une corde, sous-tend un arc de 120° environ.

Dans un demi-cercle, si la ligne d'eau est supposée coïncider avec le diamètre, le rayon moyen est égal à $\frac{r}{2}$, c'est-à-dire à la moitié de la profondeur d'eau sur l'axe.

Il n'est pas indispensable de donner à un canal une pente uniforme ; elle peut varier dans les différentes parties du tracé. Le débit augmentant avec la pente longitudinale, plus celle-ci est grande, plus la section qui correspond à un volume donné est faible et plus le cube des terrassements

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est réduit, quand le canal est en déblais. Le débit et par suite la section croissent comme le carré de la pente. Mais la valeur admissible est limitée par la nécessité d'éviter un abaissement trop rapide du plan d'eau. D'autre part, la vitesse augmente et elle aussi a ses limites, dont nous avons donné les raisons plus haut. Dans les tunnels néanmoins, on peut atteindre une grande vitesse, la cuvette n'étant pas susceptible d'être corrodée, mais elle doit avoir une valeur telle que les matériaux en suspension ne se déposent pas, pour éviter les curages. On empêche les dépôts en ne descendant pas la pente au-dessous de $0^m,15$ par kilomètre : les vitesses de $0^m,50$ à $0^m,80$ conviennent bien dans ce cas.

Dans un canal maçonné, la vitesse de 2 mètres par seconde peut être considérée comme un maximum si les parois du canal ne sont pas revêtues

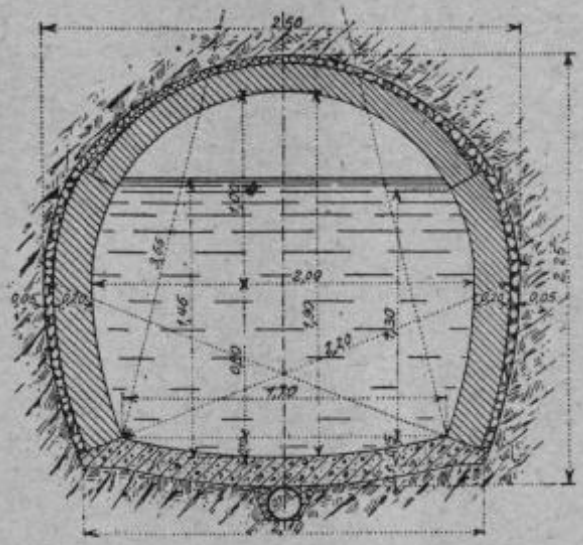


FIG. 105. — Tunnel-canal de l'usine de Kubel (Suisse).

d'un ciment ; au cas où celles-ci sont lisses, on peut porter cette vitesse à 3 mètres ou même $3^m,50$ si elles sont parfaitement lisses et s'il doit en résulter une économie importante dans le coût de l'ouvrage.

D'autre part, il y a intérêt à réduire la pente, pour ne pas diminuer la hauteur de chute, si l'augmentation de section n'entraîne pas à des dépenses exagérées. On doit donc combiner les trois éléments, section, vitesse et pente, de manière à obtenir le débit que l'on désire, dans les conditions les plus favorables eu égard à celles dans lesquelles on se trouve.

On est le plus souvent obligé de suivre un tracé sinueux, pour n'avoir pas trop de déblais à faire, et de franchir les vallées dans les parties hautes, pour diminuer le cube des remblais ou l'importance des travaux qui les remplacent.

Les (*fig.* 105 à 107) montrent des types de profils des canaux d'amenée des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usines hydroélectriques de Kubel, de la Brillanne et de Cellina, décrites dans le Tome II de cet ouvrage.

Pour déterminer la section d'un canal devant fournir un débit donné à l'avance, il y a lieu de considérer, d'une part, la pente dont on peut dis-

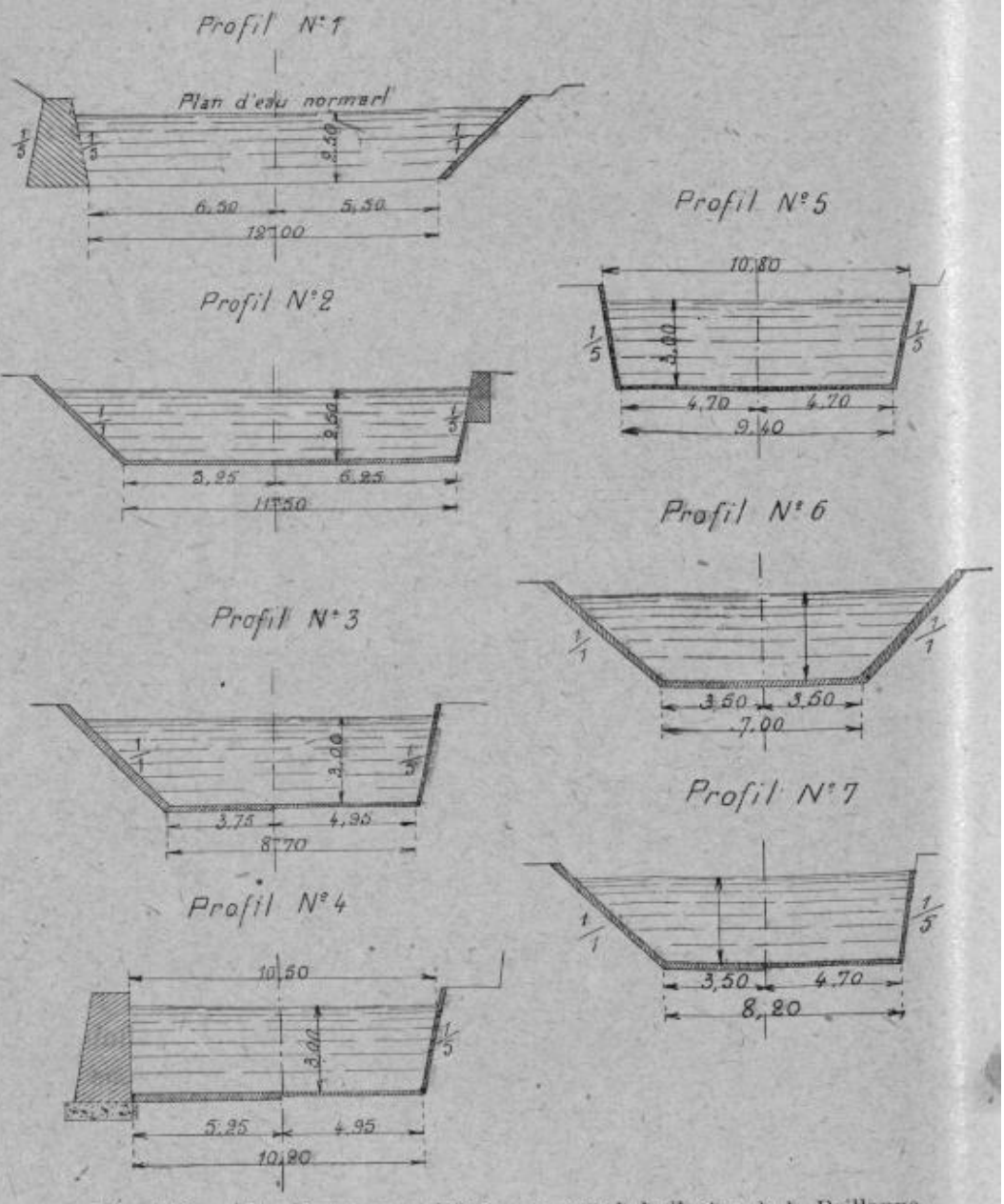


FIG. 106. — Profils types en travers du canal de l'usine de la Brillanne.

poser, la forme de la section et la rugosité des parois et, d'autre part, la nature des terrains traversés.

Au point de vue économique, on est conduit à choisir la plus petite section possible pour le canal, ce qui oblige à augmenter la vitesse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

USINE HYDRO ELECTRIQUE DE CELLINA (ITALIE)

Canaux de dérivation et de charge

FIG. 107. — Types de canaux de l'usine de Cellina (Italie).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moyenne du liquide ; au point de vue pratique, on est limité dans la vitesse au fond par la résistance à l'affouillement qu'offre le terrain traversé. Enfin l'inclinaison des talus internes formant parois du canal dépend aussi de la résistance que ces terrains opposent au glissement transversal.

Il faut, dans la détermination du problème, tenir compte des relations qui existent entre la vitesse moyenne que donne le calcul et

$\gamma_1 = 0{,}16$: Parois unies (planches, briques, pierre de taille, etc.).

$\gamma_2 = 0{,}46$; Parois en maçonnerie de moellons.

$\gamma_3 = 0{,}85$: Parois de nature mixte (sections en terre très régulières, rigoles revêtues de perrés, etc.).

$\gamma_4 = 1{,}30$: Canaux en terre dans des conditions ordinaires.

$\gamma_5 = 1{,}75$: Canaux en terre présentant une résistance exceptionnelle (fonds de galets, parois herbées).

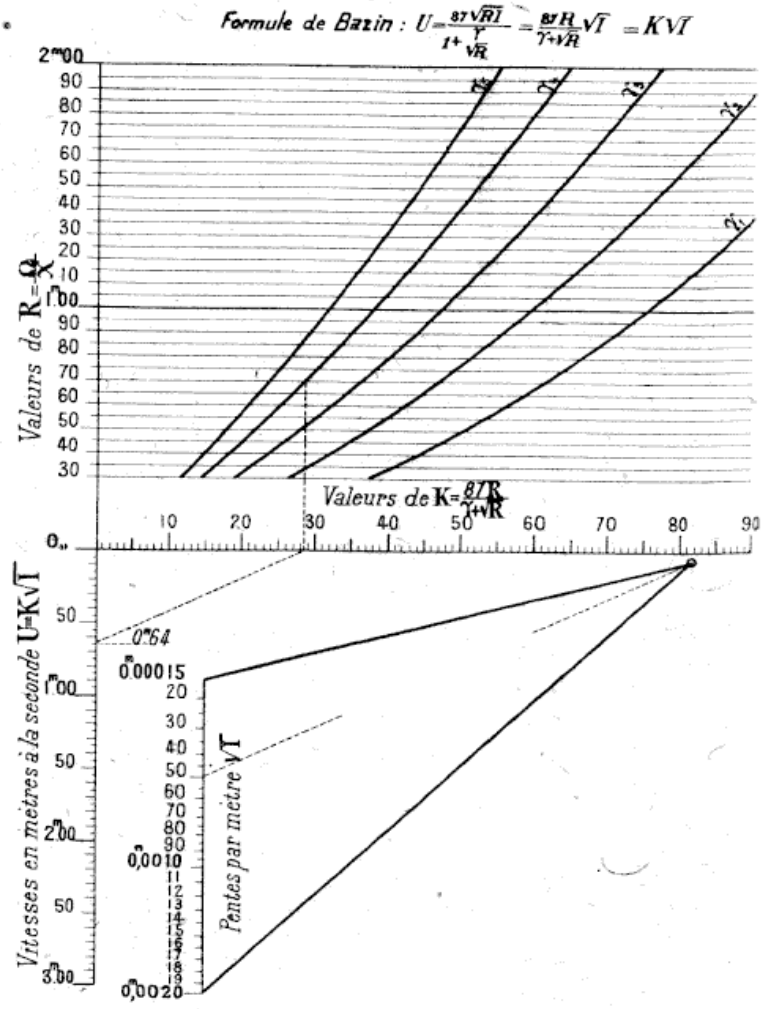


FIG. 108.

la vitesse au fond, limitée comme il vient d'être dit. S'il s'agit de vérifier le volume débité dans un canal creusé, on est amené à connaître les relations entre les vitesses précédentes et celles à la surface de l'eau.

La solution exige d'assez laborieux tâtonnements pour avoir une section satisfaisant aussi bien que possible à toutes les conditions qu'imposent les données, les relations de calcul et les circonstances.

Les graphiques des (*fig.* 108 et 109) établis par M. Tordu, ingénieur des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ponts et Chaussées, permettent d'opérer rapidement les calculs relatifs aux canaux découverts pour les cas ordinaires (1).

Soit à déterminer le débit du canal ci-contre en terre ordinaire dont la pente I = 0m,0005 soit 0m,50 par kilomètre et pour lequel $\gamma = 1^m,30$; comme $\Omega = 3^m,59$ et $\chi = 5^m,13$, $R = \frac{\Omega}{\chi} = 0,70$. Sur l'épure, à R = 0m,70, correspond K = 28,50 ; en menant par ce point une parallèle à la ligne

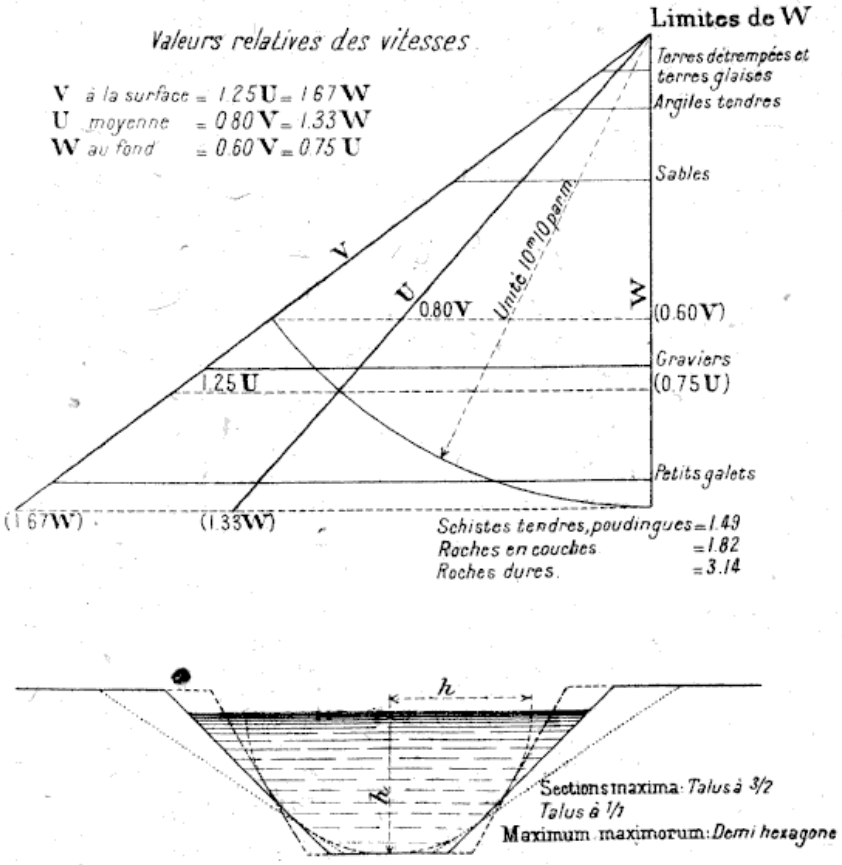


FIG. 109.

correspondant à la pente de 0m,0005 sur l'échelle des pentes, on trouve, sur l'échelle des vitesses, U = 0m,64 ;

$$\text{donc } Q = \Omega U = 3,59 \times 0,64 = 2^{m3},30 \text{ à la seconde.}$$

Dans l'établissement des canaux d'amenée ou de dérivation on cherche à diminuer la pente le plus possible pour ne pas réduire la hauteur de chute. La section répondant le mieux est le demi-cercle, à défaut le demi-hexagone régulier, le rectangle ayant une base double de la hauteur.

Le chapitre X renseigne sur l'établissement, la construction et l'amé-

(1) Journal *les Travaux Publics*, mars 1909.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nagement général des canaux d'amenée et de fuite des usines hydrauliques.

51. Remous. — Lorsque l'eau franchit une section étranglée d'un canal ou d'une rivière (tel que le passage de l'eau sous un pont), il se produit en amont de cette section un remous d'exhaussement ou une chute d'aval en raison de ce que la vitesse moyenne, dans la section étranglée, est brusquement supérieure à celle dans la section avant le rétrécissement.

Soient l et h les dimensions du cours d'eau en amont et $l_1 h_1$ les dimensions en aval, on a :

$$h_1 = h\left(\sqrt[3]{\frac{l^2}{l_1^2}} - 1\right)$$

Appelons z hauteur du remous, qui égale $h_1 - h$, on a :

$$z = h\left(\sqrt[3]{\frac{l^2}{l_1^2}} - 1\right)$$

Si le remous est occasionné par un accroissement du débit, l étant la largeur constante du fleuve, h et h_1 correspondant aux débits Q et Q_1, on peut écrire :

$$z = h_1 - h = h\left[\sqrt[3]{\frac{Q^2}{Q_1^2}} - 1\right]$$

M. le commandant Hoc, qui s'est livré à de nombreuses expériences sur les remous de gonflement et de dépression en canaux découverts, lesquels dans les profils en long donnent lieu à des « courbes de remous », a successivement appliqué à leur réalisation les formules classiques de Flamant, de Poirée, de Bresse et enfin la table de Dupuit. Les conclusions suggestives de son travail sont que les tables de Dupuit fournissent les niveaux à une approximation très suffisante, c'est-à-dire à quelques centimètres près, dans les circonstances de remous les plus variées. La table de Dupuit, pour le calcul des hauteurs de remous, serait donc le meilleur procédé à recommander. Nous en donnons un abrégé suffisant pour les cas qui se produisent dans la pratique. La première colonne représente les hauteurs de remous y, divisées par la hauteur de régime uniforme H. La deuxième représente les distances au point arbitraire pris pour origine de la table, multipliées par la pente et divisées par H.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

HAUTEUR DU REMOUS au-dessus du régime uniforme $\frac{y}{H}$	DISTANCE à l'origine de la table $\frac{is}{H}$	HAUTEUR DU REMOUS au-dessus du régime uniforme $\frac{y}{H}$	DISTANCE à l'origine de la table $\frac{is}{H}$	ABAISSEMENT au-dessous de la hauteur du régime uniforme $\frac{y}{H}$	DISTANCE à l'origine de la table $\frac{is}{H}$	ABAISSEMENT au-dessous de la hauteur du régime uniforme $\frac{y}{H}$	DISTANCE à l'origine de la table $\frac{is}{H}$
mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres
0.01	0.0067	0.46	1.6032	0.01	0.0067	0.60	1.0140
0 02	0.2444	0.48	1.6324	0.02	0.2287	0.70	1.0176
0.03	0.3863	0.50	1.6611	0.03	0.3463	0.80	1.0199
0.04	0.4889	0.55	1.7307	0.04	0.4356	0.90	1.0203
0.05	0.5701	0.60	1.7980	0.05	0.5034	1.00	1.0203
0.06	0.6376	0.65	1.8631	0.06	0.5577		
0.07	0.6958	0.70	1.9266	0.07	0.6025		
0.08	0.7472	0.75	1.9887	0.08	0.6405		
0.09	0.7933	0.80	2.0496	0.09	0.6733		
0.10	0.8353	0.85	2.1095	0.10	0.7020		
0.12	0.9098	0.90	2.1684	0.15	0.8053		
0.14	0.9751	0.95	2.2265	0.20	0.8709		
0.16	1.0335	1.00	2.2840	0.25	0.9138		
0.18	1.0868	1.10	2.3971	0.30	0.9448		
0.20	1.1361	1.20	2.5083	0.35	0.9671		
0.22	1.1820	1.30	2.6179	0.40	0.9833		
0.24	1.2253	1.40	2.7264	0.45	0.9951		
0.26	1.2663	1.50	2.8337	0.50	1.0037		
0.28	1.3053	1.60	2.9401	0.55	1.0097		
0.30	1.3428	1.70	3.0458				
0.32	1.3788	1.80	3.1508				
0.34	1.4136	1.90	3.2553				
0.36	1.4473	2.00	3.3594				
0.38	1.4801	2 30	3.6694				
0.40	1.5119	2.60	3.9768				
0.42	1.5430	2.80	4.1008				
0.44	1.5734	2.90	4.2826				
		3.00	4.3843				

M. Bresse a donné pour la valeur de la hauteur de l'exhaussement du niveau d'amont la formule suivante :

$$Z = 1{,}1\,\frac{Q^2}{2g}\left(\frac{1}{y^2 l^2 h^2} - \frac{1}{L^2\,(h + z')^2}\right);$$

l, largeur dans la partie rétrécie ; L, distance d'axe en axe des deux piles (dans le cas d'un pont) ; Q, débit du cours d'eau rapporté à la largeur de L ; y, coefficient de contraction ; z', chute superficielle produite par le remous ; h, profondeur de l'eau à l'endroit de la dépression. On prend $y = 0{,}85$ pour des avant-becs carrés et 0,95 pour des avant-becs triangulaires.

La formule Bresse, pour le remous qui se produit à la traversée d'un pont, donne :

$$Z = \alpha\,\frac{U^2}{2g}\left(\frac{1}{m^2}\,\frac{\omega^2}{\omega_1{}^2} - 1\right)$$

dans laquelle : $\alpha = 1{,}1$; $m = 0{,}80$; U, vitesse de régime en amont dans la section ; ω et ω_1 section rétrécie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Applications. — I. Si on se propose de déterminer le remous occasionné par un accroissement de débit d'un cours d'eau, connaissant la largeur l constante de la rivière, h et h_1 les profondeurs correspondant aux débits Q et Q_1, on a :

$$z = h\left[\sqrt[3]{\frac{Q_1^2}{Q^2}} - 1\right]$$

Si l'on considère les remous z et z_1, en deux points où les hauteurs primitives étaient h et h_1, on a :

$$\frac{z}{z_1} = \frac{h}{h_1}.$$

Le remous négatif dû à une réduction du débit se calcule par la formule suivante :

$$z = h\left[1 - \sqrt[3]{\frac{Q_1^2}{Q^2}}\right]$$

Pour une réduction de moitié, $Q_1 = 0{,}50\ Q$, on obtient $z = 0{,}62\ h$; pour une réduction de un tiers, $z = 0{,}234\ h$.

II. — Si on a en vue de calculer le remous occasionné pour un rétrécissement du lit du cours d'eau sur une grande longueur on prend, connaissant le débit et la pente, l et h étant les dimensions du cours d'eau en amont et l_1 et h_1, celles d'aval :

$$z = h_1 - h = h\left(\sqrt[3]{\frac{l^2}{l_1^2}} - 1\right)$$

III. — Enfin, pour calculer le remous à la traversée d'un pont, la surélévation se calcule par la formule de Bresse :

$$z = \alpha\,\frac{U_1^2 - U^2}{2g};$$

U_1, vitesse sous le pont dans la section rétrécie d'aire ω_1, U la vitesse en amont dans la section ω. On fait $\alpha = 1{,}1$.

Alors on peut écrire :

$$z = 1{,}1\ \frac{U^2}{19{,}62}\left(\frac{1}{m^2}\,\frac{\omega^2}{\omega_1^2} - 1\right);$$

D'après Eytelwein, $m = 0{,}80$; d'où $\frac{1}{m^2} = 1{,}56$.

Dans ces formules, les dimensions sont exprimées en mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

52. Calcul des canaux d'amenée. Applications numériques. — I. Déterminer la section et la pente d'un canal d'amenée de manière à permettre un débit normal de 3.400 litres ($3^{mc},400$).

On applique la formule de Bazin :

$$\frac{R\sqrt{I}}{U} = 0{,}0115\sqrt{R} + \gamma,$$

dans laquelle on prend $\gamma = 0{,}60$, valeur correspondant à la nature des parements (maçonnerie de moellons peu unie), et $R = \frac{h}{2}$, valeur qui correspond au maximum de débit par unité de section, comme nous l'avons indiqué plus haut.

Pour une section trapézoïdale, on peut écrire :

$$h^3\sqrt{I}\,\frac{(1 + \cos\alpha - \sin\alpha)}{2q\cos\alpha} = 0{,}0115\sqrt{\frac{h}{2}} + 0{,}60.$$

Il est aisé de voir que, pour une pente donnée, le débit diminue avec l'angle α. Pour l'exécution, il convient d'adopter des parements se rapprochant le plus possible de la verticale, tout en satisfaisant aux conditions de résistance et de stabilité que comporte la hauteur des murs de soutènement.

Adoptons un fruit de 10 centimètres par mètre, ce qui correspond à $\alpha = 5^o\ 60'$; faisons de plus $I = 0^m,0012$ et $q = 3^{mc},4$, l'équation (1) devient :

$$h^3 - 0{,}838h^{\frac{1}{2}} - 0{,}711 = 0; \qquad \text{d'où :} \qquad h = 1^m,167.$$

On en déduit pour les largeurs supérieure et inférieure de la section mouillée :

$$B = 2^m,142 \qquad \text{et} \qquad b = 2^m,167.$$

Pratiquement on adoptera les cotes indiquées sur la (*fig.* 110).

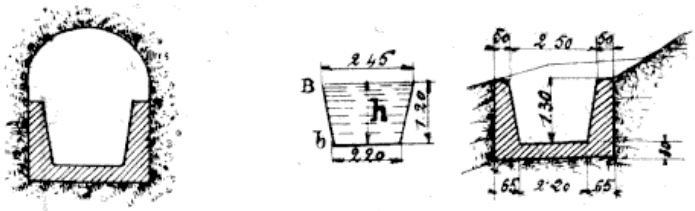


FIG. 110.

II. On peut déterminer les dimensions d'un canal à l'aide d'une des quatre formules de Bazin citées plus haut. Soit par exemple une section

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trapézoïdale dont $S = 2^{m2},5$; $P_m = 4,605$; $R = 0^m,54$, et le débit $q = 3^{mc},500$ à la seconde.

On trouve dans les tables, pour $R = 0^m,54$ et parois unies :

$$A = 0,000215.$$

On posera donc :

$$\frac{RI}{U^2} = A = 0,000215 ;$$

mais :

$$U = \frac{3,500}{2,5} = 1,40.$$

Par suite :

$$\frac{0,54 \times I}{1,400^2} = 0,000215.$$

En effectuant, on trouve : $I = 0,0008$, en nombre rond.

III. Donnons-nous la profondeur h de l'eau et λ l'inclinaison des talus des berges sur l'horizontale (*fig.* 111). Nous aurons à déterminer la largeur l au plafond.

On a :

$$\chi = l + \frac{2h}{\sin \lambda} ; \qquad \Omega = (l + h \cot \lambda) h ;$$

$$R = \frac{\Omega}{\chi} = \frac{(l + h \cot \lambda) h}{l + 2 \frac{h}{\sin \lambda}} = \frac{(l \sin \lambda + h \cot \lambda) h}{l \sin \lambda + 2 h}.$$

En remplaçant R et Ω par leurs valeurs connues, on n'a plus comme inconnues que l et la vitesse U, que l'on calcule. Si la valeur à laquelle on arrive pour U est compatible, la solution convient et l est déterminée.

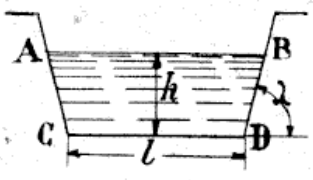


FIG. 111.

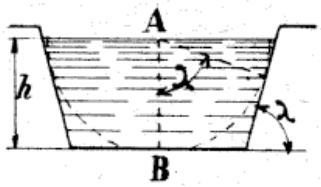


FIG. 112.

Nous avons dit que la section théorique la plus avantageuse, au point de vue de la dépense, est celle où les côtés inclinés ou les berges sont tangentiels à la circonférence tracée du milieu A de la ligne d'eau (*fig.* 112) avec un rayon AB égal à la profondeur h. Il y aurait donc intérêt, toutes choses égales d'ailleurs, à choisir h de telle sorte que cette condition soit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

réalisée. En général, dans les souterrains, puits, aqueducs, on donne à la pente une valeur de 1 mètre à $1^m,10$ par kilomètre. Avec un tirant d'eau peu profond et canaux à ciel ouvert et larges, il faut tenir compte de l'évaporation. Nous avons déjà dit que, pour les talus en terre, on pouvait prendre 1 à 1 1/2 de base pour 1 de hauteur, pour le rocher jusqu'à 1/5 de base pour 1 de hauteur. En dehors de la cuvette, on peut conserver les mêmes conditions. Enfin, dans les passages escarpés, on raidit, à l'effet d'éviter des déblais considérables, l'inclinaison des talus, et on les maintient par des revêtements.

IV. Soit λ le rapport de la base à la hauteur du talus.

On a : $Q = \Omega R \sqrt{\dfrac{I}{0{,}00028\ (R + 1{,}25)}}$, pour parois en terre ;

$$\chi = a + 2h\sqrt{1 + h\lambda} \qquad \text{et} \qquad R = \frac{\Omega}{\chi}.$$

Prenons : $h = 1^m,50$; une pente de 0,060 par kilomètre ; une largeur au plafond ou $a = 3$ mètres, et des talus réglés à 1,5 de base pour 1 de hauteur, il vient :

$$\Omega = 1{,}50\ (3 + 1{,}50 \times 1{,}5) = 7^{m2},87 ;$$
$$\chi = 3 + 2 \times 1{,}50\sqrt{1 + 1{,}50 \times 1{,}5} = 7{,}80 ;$$
$$R = \frac{7{,}87}{7{,}80} = 1{,}008 ;$$

Et :

$$Q = 7{,}87 \times 1{,}008\sqrt{\frac{6}{28 \times 2{,}25}} = 2^{m3},350.$$

V. Soit un canal de 150 mètres de longueur où l'eau en régime normal a une hauteur de $2^m,50$ et auquel on peut donner une largeur de 8 mètres.

La pente nécessaire pour assurer une vitesse de 2 mètres se tire de la formule :

$$\frac{RI}{U^2} = \alpha + \frac{\beta}{R}.$$

Or : $R = \dfrac{S}{p^m} = \dfrac{8 \times 2{,}5}{8 + 2{,}50 + 2{,}50} = \dfrac{20}{13} = 1{,}54$, dans le cas d'une section rectangulaire, c'est-à-dire avec parois verticales.

D'où :

$$\frac{RI}{U^2} = 0{,}00015 + \frac{0{,}0000045}{1{,}54} = 0{,}000153 ;$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Et :

$$I = \frac{0{,}000153\ U^2}{1{,}54} = 0^m{,}0004.$$

Soit pour 150 mètres, un dénivellement de $0^m{,}060$.

Le débit du canal est égal à : $8 \times 2{,}5 \times 2 = 40$ mètres cubes.

Si on a 40 mètres de chute, avec un rendement de 0,75 pour les turbines, la puissance sera :

$$\frac{1.000 \times 40 \times 40 \times 0{,}75}{75} = 16.000 \text{ HP.}$$

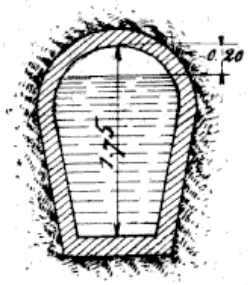


FIG. 113.

VI. Supposons une galerie maçonnée de la forme représentée par la (*fig.* 113), devant débiter 6.000 mètres cubes à l'heure ou 1.667 litres par seconde, la section utile étant de $1^{m2}{,}40$ et le périmètre mouillé de $4^m{,}10$.

Le rayon hydraulique a pour valeur : $R = \frac{S}{P} = \frac{1^{m2}{,}40}{4{,}10} = 0^m{,}34$.

La vitesse moyenne de l'eau : $U = \frac{1{,}667}{1{,}40} = 1{,}19$.

Cette vitesse est aussi donnée par la formule : $U = C\sqrt{RI}$;

Mais :

$$C = \sqrt{0{,}00015 + \frac{0{,}0000045}{0{,}34}} = 77{,}5.$$

Par suite :

$$U = 1{,}19 = 77{,}5\sqrt{0{,}34I}.$$

D'où l'on tire :

$$I = \frac{U^2}{C^2 \times R} = \frac{\overline{1{,}19}^2}{\overline{77{,}5}^2 \times 0{,}34} = 0{,}0007 \text{ par mètre.}$$

VII. On peut se proposer, dans l'établissement d'une dérivation au moyen d'un canal d'amenée, de répartir la dénivellation H (*fig.* 114) entre

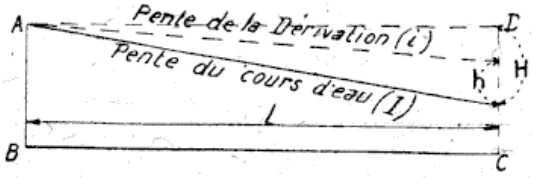


FIG. 114.

la chute utilisable h et la pente i de la dérivation, de manière à obtenir la meilleure utilisation possible de la différence de niveau dont on dispose.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On observera que $h = l\,(\mathrm{I} - i)$, et soit Q le débit de la dérivation, on peut poser :

$$Qh = \mathrm{K}\Omega l\,(\mathrm{I}\sqrt{i} - i\sqrt{i}).$$

Le maximum de cette expression a lieu quand la dérivée par rapport à i est nulle, c'est-à-dire quand $i = \frac{\mathrm{I}}{3}$, qui est ainsi la valeur à donner à i pour obtenir le maximum d'effet d'utile. Tant que le rapport $\frac{i}{\mathrm{I}}$ reste entre 0,30 et 0,60, la force motrice obtenue n'est pas inférieure à $\frac{1}{12}$ de la force maximum.

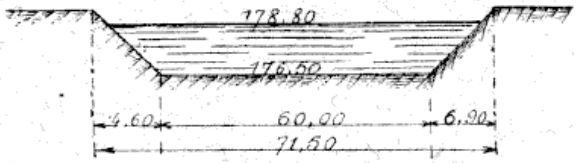


FIG. 115.

VIII. *Calcul du canal de dérivation de l'usine de Jonage* (*fig.* 115).
Section d'écoulement :

$$\Omega = \left(\frac{71{,}50 + 60{,}00}{2}\right) 2{,}30 = 151^{\mathrm{m}2}{,}22.$$

Périmètre mouillé :

$$\chi = 60{,}00 + 5{,}14 + 7{,}29 = 72{,}41.$$

Rayon moyen :

$$\mathrm{R} = \frac{\Omega}{\chi} = \frac{151{,}22}{72{,}41} = 2{,}09.$$

Coefficient donné par les tables de Bazin :

$$\mathrm{A} = 0{,}000447.$$

Vitesse d'écoulement :

$$\mathrm{U} = \sqrt{\frac{\mathrm{RI}}{\mathrm{A}}} = \sqrt{\frac{2{,}09 \times 0{,}0001}{0{,}000447}} = 0{,}68$$

et :

$$\mathrm{Q} = 151{,}22 \times 0{,}68 = 102{,}83 \text{ mètres cubes.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La section type du canal, entre l'origine et le réservoir, a été établie de façon à débiter 120 mètres cubes par seconde avec la pente de $0^m,10$ par kilomètre et la hauteur d'eau de $2^m,50$; entre le réservoir et l'usine, elle a été calculée de façon à débiter 208 mètres cubes dans les mêmes conditions.

En appliquant les lois du mouvement varié on a, en appelant h la hauteur d'eau en un point du canal, s la distance de ce point à l'origine :

$$s - s_0 = \int_{h_0}^{h} \frac{1 - \frac{au^2 l}{9{,}808\Omega}}{i - \frac{Au^2}{R}}\, dh,$$

où : l représente la largeur du profil transversal à la surface de l'eau, i la pente du fond et a le coefficient de correction égal à $1 + 210$ A.

Adoptant pour l des valeurs moyennes, faisant varier h et construisant la courbe :

$$y = \frac{1 - \frac{au^2 l}{9{,}808\Omega}}{i - \frac{Au^2}{R}}$$

et mesurant les aires qui représentent $s - s_0$, on trouve pour les pertes de charge :

Dans le canal d'amenée, depuis l'origine jusqu'à l'usine :

A l'étiage (179,00 à l'origine).....	$0^m,40$
En hautes eaux ordinaires (181,30, à l'origine, débit du Rhône 600 mètres cubes).....	$0^m,22$

Dans le canal de fuite :

A l'étiage (166,00 à l'embouchure du canal, débit maximum à l'usine 175 mètres cubes).....	$0^m,61$
En hautes eaux ordinaires (168,00 à l'embouchure du canal, débit maximum à l'usine 208 mètres cubes)...	$0^m,13$

En tenant compte de ces pertes de charge, on a pour les hauteurs de chute :

A l'étiage (au moment du minimum de consommation à l'usine) 179,00 — 166,00.....	$13^m,00$
A l'étiage (au commencement de la consommation maxima à l'usine) (179,00 — 0,40) — (166,00 + 0,61)..	$11^m,99$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A l'étiage (à la fin de la consommation maxima à l'usine) (11,99 — 0,75). Ce chiffre de 0,75 représente l'abaissement du plan d'eau en amont de l'usine, après 4 heures de consommation maxima.

En hautes eaux ordinaires (au moment du minimum de consommation à l'usine), (180,00 — 168,00)..... $12^m,00$

En hautes eaux ordinaires (au commencement de la consommation maxima à l'usine) :

(180,00 — 0,22) — (168,00 + 0,13). $11^m,65$

En hautes eaux ordinaires (à la fin de la consommation maxima à l'usine) (11,65 — 0,60)..... $11^m,05$

IX. Enfin, pour des calculs approximatifs et rapides, la formule de Chezy ou des ingénieurs italiens : $RI = 0,0004U^2$ ou $U = 50\sqrt{RI}$, peut être employée utilement.

D'autres applications numériques sont traitées au chapitre XV, au sujet des projets d'aménagement d'usines hydroélectriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IV

JAUGEAGE DES COURS D'EAU, DES CANAUX ET DES TURBINES

Le jaugeage d'un cours d'eau est une opération, ou plutôt une suite d'opérations fort délicates, qui demandent de grands soins et surtout une certaine pratique pour arriver au degré de précision convenable. Le jaugeage du volume d'eau qui entre dans une turbine doit être fait aussi avec la plus grande exactitude possible. Pour un cours d'eau, le degré de précision de $\frac{1}{10}$ dans les opérations paraît suffisant, alors que, pour les turbines, il n'est pas exagéré de le porter au 1/100e.

Les moyens de jaugeage employés sont les suivants : 1° les flotteurs ; 2° les appareils hydrométriques ; 3° les orifices ; 4° les déversoirs ; 5° les capacités définies.

I. — JAUGEAGE PAR LA MESURE DES VITESSES

53. Jaugeage par flotteurs (1). — Les rivières principales, dans les grandes vallées, permettent l'usage des *flotteurs de surface* qui donnent la vitesse de l'eau à la surface et des *flotteurs lestés* qui fournissent la vitesse moyenne. Avec les premiers, on déduit la vitesse moyenne d'après les données que nous avons indiquées (§ 49). Connaissant la section transversale de la rivière, il suffit de multiplier celle-ci par la vitesse pour obtenir le débit. On choisit une partie de la rivière qui soit droite, régulière en largeur et en profondeur, et on procède au relevé de ses dimensions. On fait les sondages à des intervalles égaux a, b, c, d, e (*fig.* 116), perpendicu-

(1) Le moyen le plus simple de déterminer la vitesse de l'eau dans les canaux découverts est le mesurage au flotteur. Mais à cause de l'inégalité de vitesse des divers filets d'eau, cette méthode ne donne pas des résultats très exacts. Il en serait tout autrement si, au lieu d'un flotteur, on employait un écran, occupant toute la section du canal, et par conséquent influencé par tous les filets fluides. L'inventeur du jaugeage par écran est M. le professeur Erick Anderson, de l'École polytechnique de Stockholm, qui emploie couramment cette méthode pour fixer le rendement des turbines. Cette méthode se répand en Allemagne et en Suède ; nous en donnons la description au § 55.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lairement à la direction du courant, puis on calcule à l'aide de ces mesures la surface de la section totale de la rivière. On place ensuite deux cordes en travers de la rivière à une certaine distance de chaque côté de la ligne de sondage et on relève la vitesse de l'eau, à l'aide des flotteurs, entre les deux cordes. Il convient autant que possible d'opérer dans le voisinage d'une passerelle, ce qui facilite la surveillance et la division du profil transversal en intervalles réguliers.

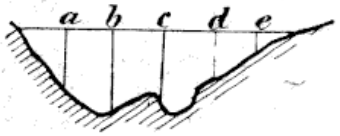


FIG. 116.

On utilise comme flotteurs un système de sphères creuses en cuivre mince que l'on peut lester à volonté. A cet effet, chacune des deux sphères de l'appareil est munie d'un bouchon à vis qui permet de la lester par l'introduction d'une certaine quantité d'eau. Pour déterminer la vitesse à la surface, on immerge une sphère à moitié dans l'eau. Quand on veut obtenir la vitesse moyenne, on attache les deux sphères par une corde plus ou moins longue ; on en leste une pour qu'elle plonge tandis que l'autre reste à la surface à moitié immergée. On donne aux flotteurs lestés une longueur égale aux $\frac{9}{10}$ de la profondeur du cours d'eau, ce qui permet d'avoir d'un seul coup la vitesse moyenne, si on a eu le soin de faire choix d'une portion du cours d'eau à lit régulier et sensiblement rectiligne.

Les flotteurs ne donnant que les vitesses, il faut donc passer aux débits. Connaissant les vitesses aux droits des lignes de sondage, on planimètre les aires comprises entre deux verticales successives et en totalisant ces surfaces on obtient celle du profil.

La méthode de jaugeage par flotteurs, en raison des nombreux facteurs qui concourent à en altérer le résultat, n'est guère employée que pour les gros débits et les crues.

La détermination directe de la pente de surface permet d'établir expérimentalement la relation qui existe entre elle et la vitesse moyenne ou le débit par l'application de la formule Bazin :

$$b + \frac{a}{R} = \frac{Ri}{U^2}.$$

CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

On a un moyen facile de trouver les coefficients a et b, pour le cas spécial du lit que l'on considère, lorsqu'on a mesuré pour divers états du cours d'eau les pentes i et les vitesses moyennes U.

L étant la largeur d'un cours d'eau, P_m sa profondeur moyenne, Ω sa section mouillée, χ son paramètre mouillé, pour les cours d'eau beaucoup plus larges que profonds, on peut en admettant $\chi = L$, $R = P_m$, écrire :

$$U = 50\sqrt{i}\,P_m^{\frac{1}{2}};\ \Omega = LP_m \text{ et } Q = 50L\sqrt{i}\,P_m^{\frac{1}{2}}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces mêmes formules, en fonction de la profondeur p maximum mesurée au point le plus bas de la section mouillée, deviennent :

$$U = Kp^{\frac{1}{2}}; \ \Omega = Cp^{m}; \ Q = KCp^{\frac{2m+1}{2}},$$

lesquelles sont traduites graphiquement par les courbes de la (*fig.* 117).

Dans ces formules K et C sont des constantes et m un exposant qui peut, suivant l'inclinaison des rives, être égal à 1 (rives verticales), comprises entre 1 et 2 (rives concaves), à 2 (rives rectilignes), supérieur à 2 (rives convexes). Enfin ces formules supposent que la pente superficielle i de l'eau est constante quelle que soit la profondeur p de l'eau, c'est-à-dire lorsque la pente du lit est elle-même constante.

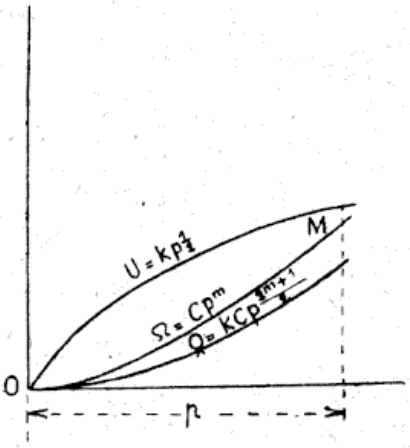


FIG. 117.

Dans une opération de jaugeage on relève la section transversale du lit jusqu'au niveau de l'eau et même au-dessus. Ce relevé donne la valeur de p ; en même temps on lit, à l'échelle de la station, une certaine hauteur h au-dessus d'un zéro correspondant au débit d'étiage et situé à une certaine hauteur p_0 au-dessus du fond du lit. Alors :

$$p = h + p_0.$$

On peut calculer pour une série de hauteurs d'eau successives inférieures ou supérieures à p la section mouillée correspondante et construire ainsi la courbe Ω jusqu'au point M du jaugeage et au delà. L'opération du jaugeage détermine les valeurs de U et de Q (en mètres cubes par seconde) correspondantes à la valeur d'eau $h = p - p_0$, lue à l'échelle au moment du jaugeage.

Le type de limnimètre employé par le service d'études des Forces Hydrauliques du Bas-Congo était exactement semblable à celui du Bureau hydrométrique fédéral Suisse (*fig.* 120 et 121). Cette échelle extrêmement robuste et ne présentant aucune inscription en couleur qui puisse disparaître à la longue est parfaite à tous les points de vue.

Le type d'appareil limnigraphe utilisé consistait en un flotteur qui montait et descendait avec le niveau de la rivière, lequel faisait, par l'intermédiaire d'un jeu de poulies réductrices, mouvoir un index suivant une génératrice verticale d'un tambour qui tournait à raison d'un tour en huit jours. L'index piquait un point dans le papier du tambour toutes les demi-heures ; un cadran d'horloge indiquait l'heure à l'opérateur qui vérifiait la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

marche régulière du limnigraphe. Pour protéger l'appareil des effets de

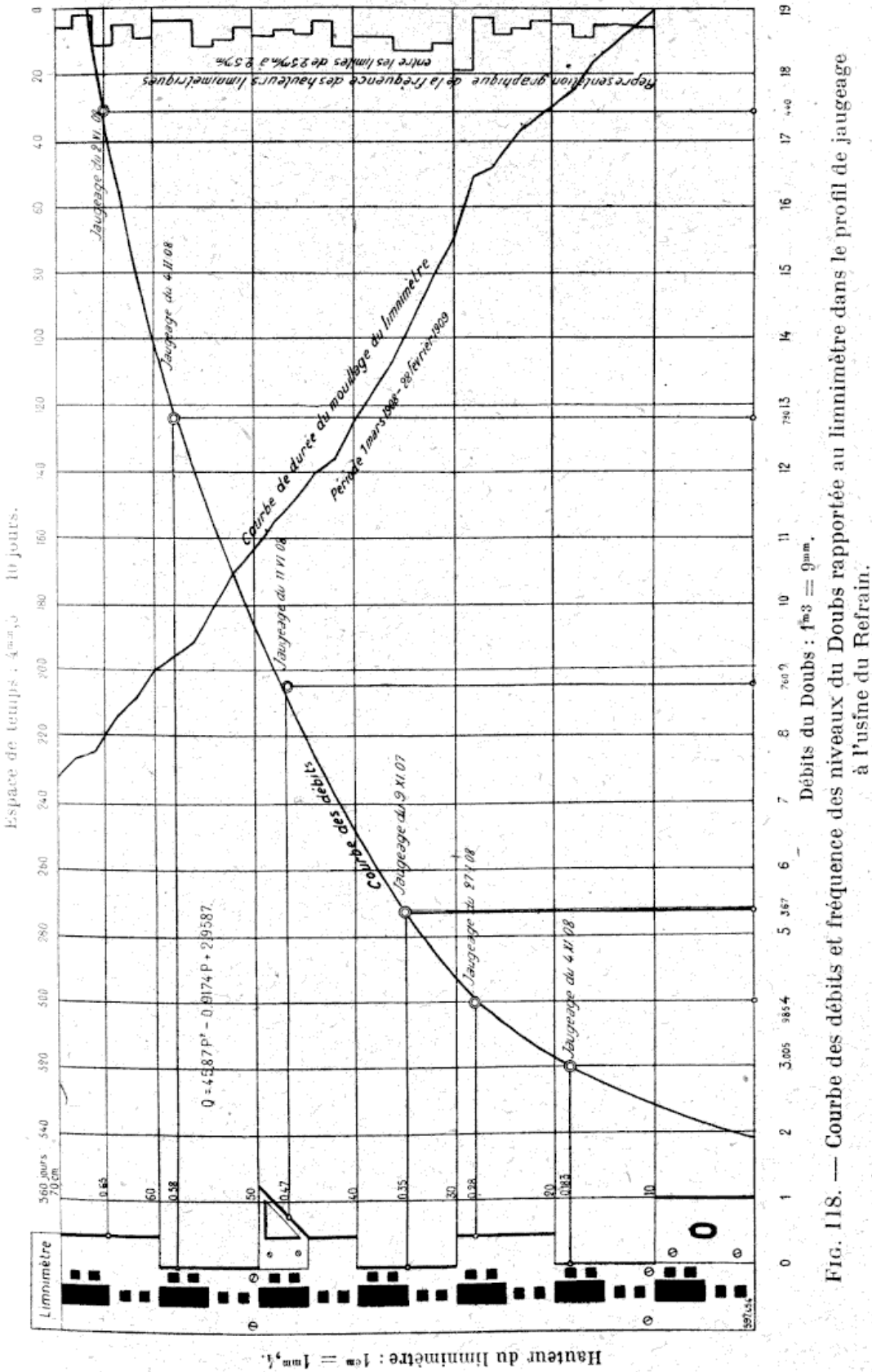


FIG. 118. — Courbe des débits et fréquence des niveaux du Doubs rapportée au limnimètre dans le profil de jaugeage à l'usine du Refrain.

l'humidité, des hautes températures, des insectes, on a dû le placer dans une forte cabine en fer, à fermeture hermétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le service des Forces Hydrauliques du Bas-Congo a fait construire un nouvel appareil à maxima (*fig.* 119), lequel présente, à l'intérieur d'une

FIG. 120.

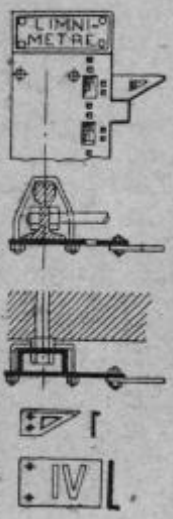


FIG. 121.

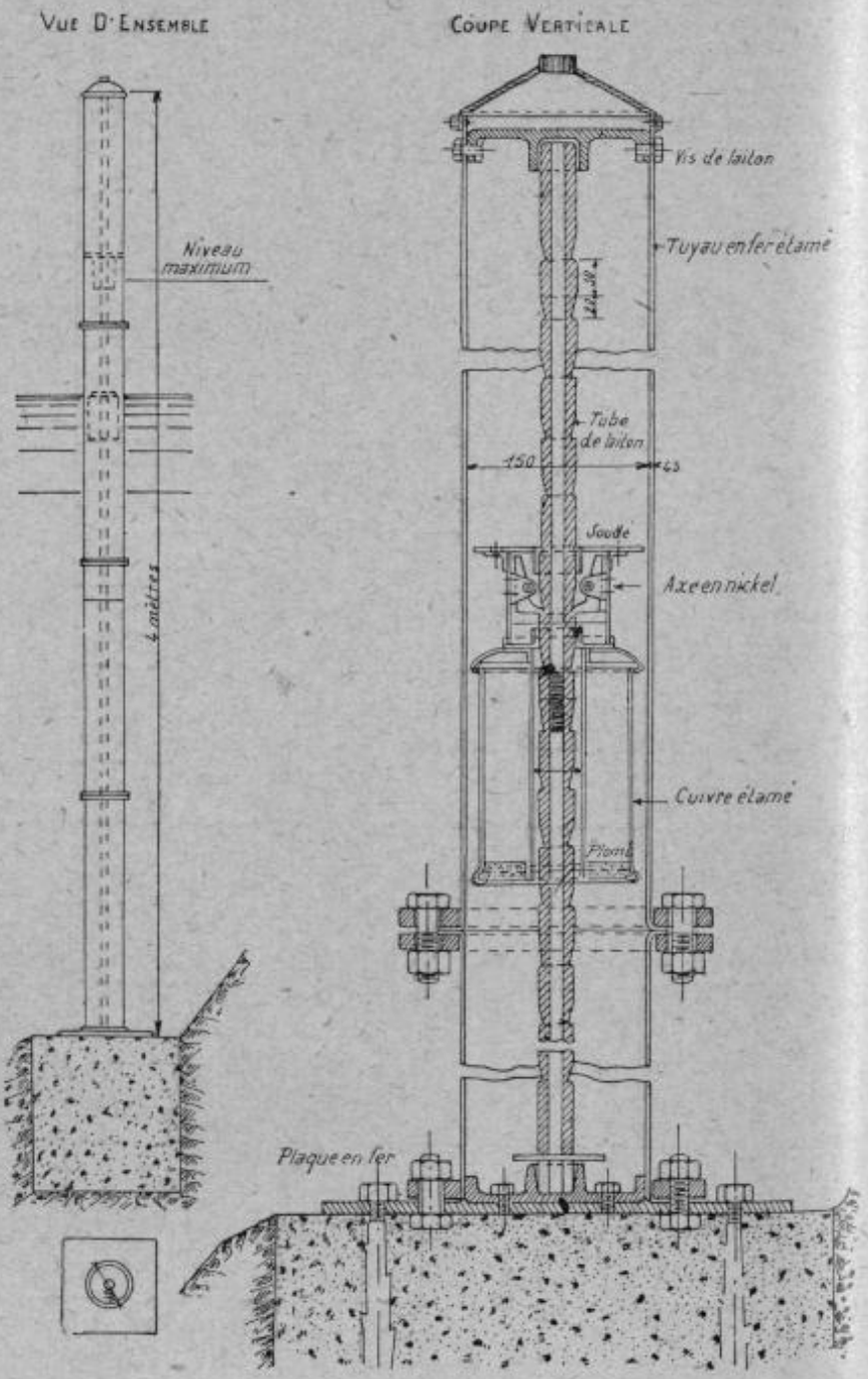


FIG. 119.

colonne tubulaire, un flotteur qui fait monter, sur une crémaillère en bronze, un indicateur de niveau sans que celui-ci puisse redescendre au moment de la baisse des eaux. Il suffit d'aller, au cours de la saison sèche de chaque année, mesurer le niveau de l'indicateur pour obtenir le niveau maximum atteint par les eaux durant la saison des pluies précédentes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le placement des limnimètres, qui peut se faire par parties, et des appareils à maxima, qui peuvent être situés en dehors du lit habituel de la rivière, dans les parties inondées, n'a donné lieu à aucune difficulté spéciale.

54. Jaugeage au moyen des hydromètres. — Ces appareils donnent des indications plus exactes que les flotteurs et permettent de mesurer la

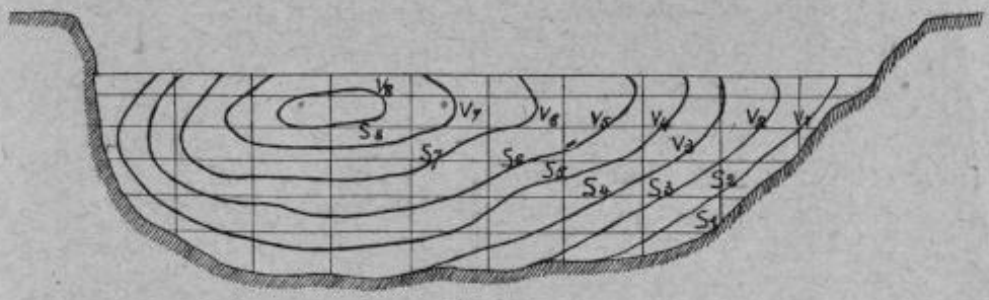


FIG. 120.

vitesse à la profondeur que l'on se détermine. On relève la section transversale du cours d'eau et on la divise en divers compartiments dont on détermine les aires et au centre desquels on vient plonger successivement l'appareil, qui donne la vitesse en ce point.

On peut diviser la section ou aire du profil du cours d'eau en coordonnées verticales et horizontales (*fig.* 120), mesurer la vitesse à chaque intersection des coordonnées et réunir par des courbes isodronnes les points d'égale vitesse dans toute l'étendue du profil. On planimètre ensuite les aires S_1, S_2, ..., S_n comprises entre deux courbes voisines et l'on multiplie chacune par la vitesse moyenne U des vitesses correspondantes. Le débit cherché a pour expression :

$$Q = S_1U_1 + S_2U_2 + \dots S_nU_n.$$

Les instruments de jaugeage sont : le loch de Tremelin, le moulinet de Woltmann, perfectionné par Harlacher et Baumgarten, les moulinets électriques, le tachomètre de Brunings, le tube de Pitot perfectionné par Darcy et Ritter ou tube piézométrique dit aussi tube jaugeur.

Le *tube de Pitot* (*fig.* 121) tel qu'il se construit de nos jours se compose essentiellement de deux tubes de verre verticaux fixés sur une planchette de bois et communiquant entre eux à leurs parties supérieures par un tube métallique. Leurs parties inférieures, également métalliques, sont recourbées à 90° et terminées l'une par un ajutage statique, l'autre par un ajutage dynamique. L'instrument peut librement s'orienter parallèlement au courant, de sorte que les orifices inférieurs *a* et *a'* se présentent toujours face au fil de l'eau. L'un d'eux est ouvert perpendiculairement à la direc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion du courant, l'autre placé au milieu d'un petit manchon spécial assez long pour forcer les filets d'eau à passer parallèlement à l'orifice. Cette addition, due à Ritter, a pour effet d'éliminer les actions des filets obliques et par ce moyen de mesurer exactement la pression statique. La pression dynamique est donnée par l'ajutage qui reçoit directement le courant.

Le tube de Pitot se plonge verticalement dans le courant, en ayant soin de diriger la branche horizontale du coude placé à la partie inférieure à l'encontre du sens du courant. L'ascension de l'eau dans le tube est d'autant plus élevée que la vitesse du

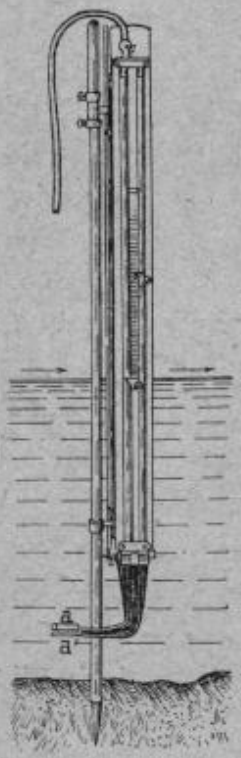


Fig. 121. — Tube Pitot-Darcy modifié par M. de la Brosse.

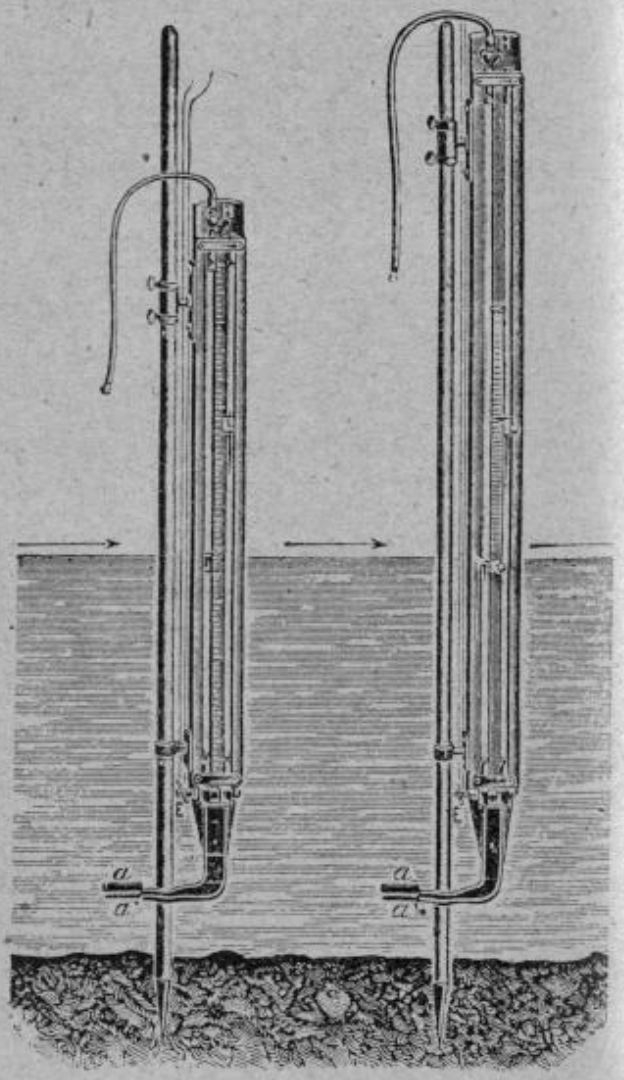


Fig. 122. — Tube de Pitot, modifié par Darcy et par l'ajutage de Ritter (H. Morin, constructeur).

courant est plus grande. La hauteur mesure ainsi la force vive de l'eau, qui est proportionnelle au carré de la vitesse.

Le tarage se fait en relevant les diverses hauteurs de la colonne pour différentes vitesses.

Dans le tube en forme d'U, l'eau s'élève dans une branche et s'abaisse dans l'autre par rapport au niveau de la surface liquide. La différence des hauteurs des deux colonnes, une fois l'instrument taré, permet d'apprécier la vitesse du courant, et on en déduit la vitesse moyenne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce genre d'instrument, qui ne convient pas à la mesure des faibles vitesses, n'est réellement pratique que pour les cours d'eau peu profonds et lorsque la vitesse est assez considérable.

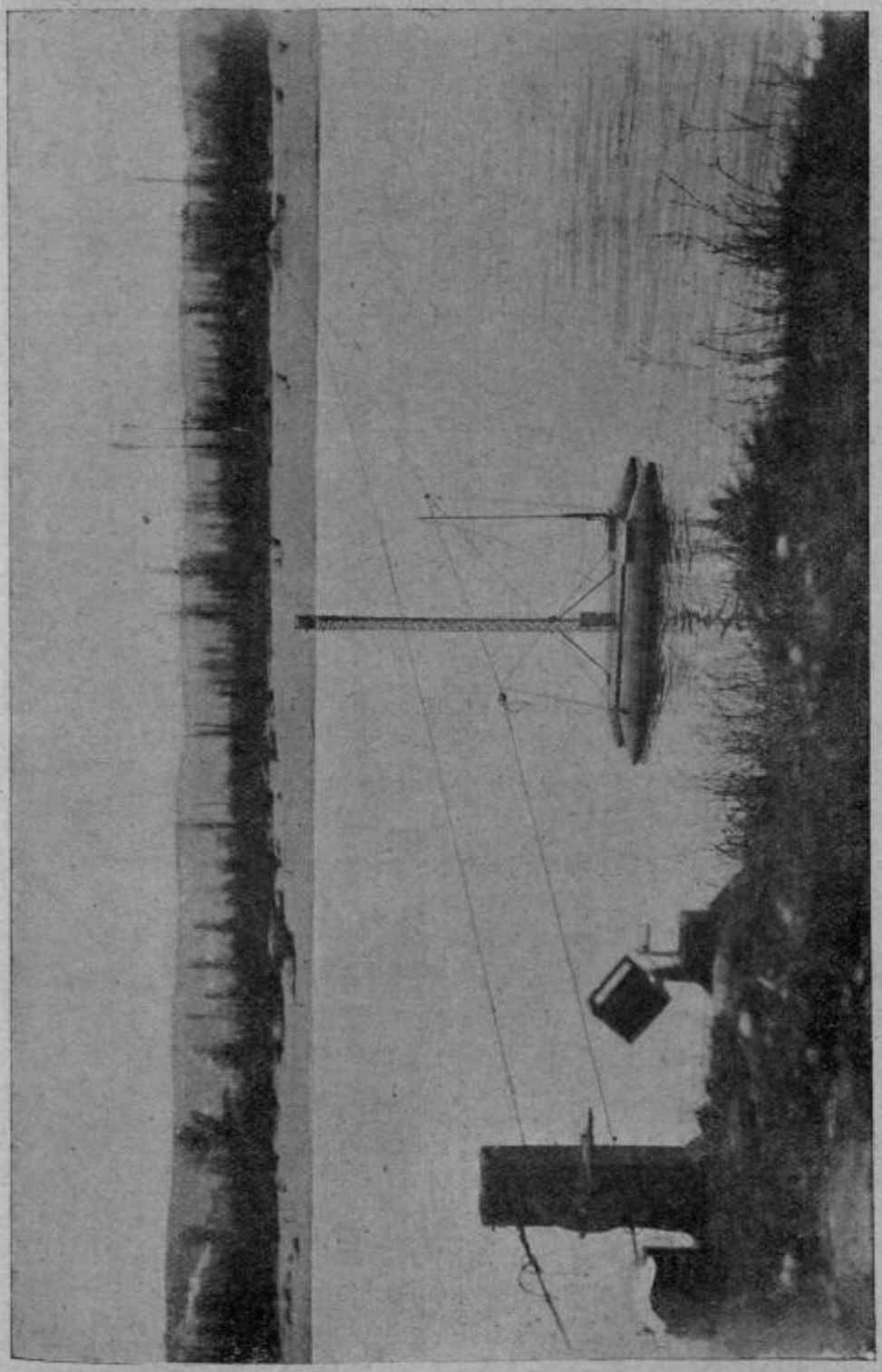


Fig. 123. — Moulinet de M. R. Tavernier.

M. de la Brosse a apporté à cet appareil (*fig.* 122) quelques modifications, telles qu'addition d'un talon d'appui permettant de le faire reposer sur un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

corps dur, de tiges rigides pour la manœuvre à distance des divers robinets et enfin d'une échelle mobile dont le zéro peut venir effleurer le niveau statique ; cette échelle est graduée, non en divisions métriques, mais bien en valeurs de v déduites de la formule : $v = \sqrt{2gh}$, ce qui permet d'obtenir directement la vitesse sur la règle par une simple lecture sans exiger aucun calcul.

La manutention des tubes de Pitot ordinaires étant difficile en temps de crues, la maison H. Morin construit, sous le nom d'hydrotachymètre, un instrument similaire où les tubes manométriques sont séparés des ajutages et communiquent respectivement avec eux par des raccords en caoutchouc de longueur quelconque, protégés par une monture télescopique. On peut alors opérer du haut d'une passerelle, en ayant sous les yeux le manomètre et son échelle graduée, et en déplaçant la partie inférieure de l'instrument en divers points de la section transversale du cours d'eau.

Les moulinets hydrométriques sont utilisés pour la mesure des faibles vitesses. En principe, le moulinet se compose d'une roue à ailettes actionnant un compteur et d'un gouvernail plongé dans l'eau ; il s'oriente dans la direction du courant et donne sous l'action de celui-ci la vitesse rotative proportionnelle à la vitesse du courant. Dans les appareils à compteur mécanique on observe le nombre de tours que la roue à ailettes a fait pendant un temps donné. Dans les appareils à signal électrique on compte le temps écoulé entre deux signaux, c'est-à-dire le temps nécessaire pour un nombre fixe de tours de la roue à ailettes. Dans les deux cas on obtient la vitesse du courant en reportant les chiffres obtenus dans une formule simple donnée avec chaque appareil. La vitesse du courant ainsi obtenue est la moyenne des vitesses pendant le temps de l'observation.

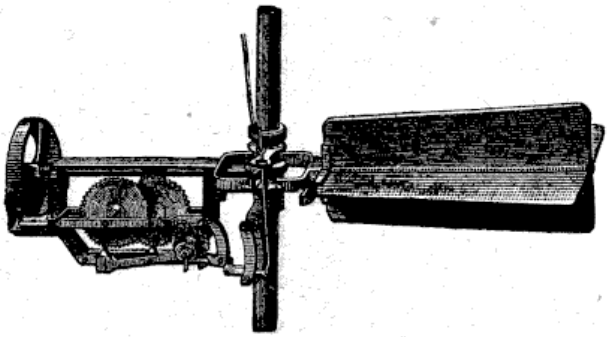


FIG. 124. — Moulinet de Woltmann, perfectionné par Baumgarten (H. Morin, constructeur.)

Le *moulinet de Woltmann* sert principalement pour le jaugeage des grands et moyens cours d'eau. Les modifications apportées par M. Harlacher à cet appareil, — adjonction d'un compteur électrique placé à distance et relié par des conducteurs à l'axe, — permettent de faire des lectures à chaque instant, sans qu'il soit nécessaire de retirer l'instrument hors de l'eau.

Baumgarten a substitué aux ailes planes et inclinées, employées primitivement, des ailes hélicoïdales au nombre de quatre, qui utilisent toute la circonférence (*fig.* 124). De cette façon, à égalité de vitesse, la surface

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pressée étant beaucoup plus grande, la force motrice, capable de vaincre les frottements, est considérablement accrue.

Le *moulinet électrique de Riller* est à contact électrique et à sonnerie, et est renfermé dans un manchon qui soustrait les hélices de Baumgarten aux courants latéraux. De plus, l'entrée du manchon est formée par un cône qui dirige tous les filets liquides sur les hélices pour en déterminer le mouvement. L'appareil s'installe sur un bâti qui supporte un treuil servant à l'enroulement d'un câble de suspension à l'aide duquel on descend l'instrument à une plus ou moins grande profondeur. L'instrument est complété par un appareil de tarage qui consiste en un ajutage statique et un ajutage dynamique de Ritter, reliés à un manomètre à deux colonnes.

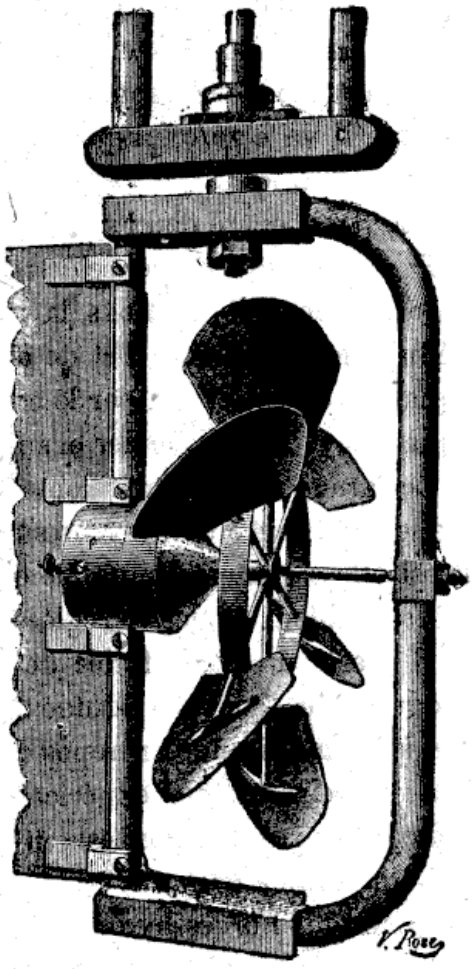


FIG. 125. — Moulinet Richard pour la mesure de la vitesse de l'eau.

Un appareil dont on a fait très usage est le *moulinet électrique de Ott*. On utilise avec cet instrument, un type spécial de support qui consiste en un étui vertical en fer forgé muni, sur le devant, d'une porte à verrou par laquelle on introduit le tube porte-moulinet, qui est ensuite maintenu par un serrage au moyen d'un ressort placé sur l'autre face de l'appareil. Pour libérer le tube, il suffit d'appuyer sur une poignée qui annule la pression du ressort et permet de déplacer à volonté le tube dans son support. L'expérience ayant démontré que, dans les courants rapides et profonds, la pression de l'eau sur le tube coïnce celui-ci dans sa gaine et en rend la manœuvre difficile, on a fait ajouter un organe de levage à manivelle, grâce auquel on opère facilement, quelle que soit la pression du courant. Pour les courants très rapides et chargés de sable, on emploie des appareils dont la tige, au lieu d'être circulaire, est ovalisée avec pointes en avant et en arrière. De cette façon le moulinet Ott, monté sur une passerelle ou sur une barque, peut se manœuvrer commodément à toute profondeur et résister à la flexion, même dans les couranst violents.

L'appareil n'est pas muni d'un compteur gradué et n'a pas besoin d'être retiré hors de l'eau pour une lecture de nombre de tours. Il porte un cir-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cuit électrique qui se ferme au contact d'une broche en saillie sur le plan de la roue dentée commandée par l'arbre horizontal du moulinet, toutes les fois qu'il a décrit 25 ou 50 révolutions. Le courant qui se forme fait retentir une sonnerie ou imprime sa trace sur la bande de papier d'un chronographe. C'est en somme, un appareil intégrateur qui donne, non pas la vitesse instantanée du courant en un seul point comme le tube Pitot-Darcy, mais bien une vitesse moyenne dans la région qui fait face à l'hélice, pour un temps donné. Cette vitesse moyenne v est calculée par la formule linéaire :

$$v = a + bn,$$

dans laquelle a et b sont des coefficients qu'on détermine par le tarage, comme il va être expliqué, et n est le nombre de tours par seconde de l'hélice mobile. Ce dernier s'obtient en comptant, par exemple, le temps qui se passe entre deux sonneries successives.

Pour chaque expérience de tarage on obtient une équation ; on applique à ce système d'équations la méthode des « moindres carrés » pour en déduire les valeurs de a et de b, méthode qui consiste à multiplier chaque équation de condition par le coefficient de l'inconnue cherchée dans cette équation et à additionner ensuite membre à membre.

Le tarage se fait généralement par un déplacement de l'appareil en eau tranquille, faute de moyens sûrs pour réaliser l'inverse, c'est-à-dire pour laisser l'instrument immobile dans un ensemble de filets liquides dont les vitesses soient égales et réglées avec certitude.

Il y a là un point faible de la méthode, attendu que les actions réciproques d'un courant liquide sur une paroi fixe ou de cette paroi mobile sur le même liquide en repos ne sont pas absolument égales. Néanmoins il a été reconnu par expérience que l'instrument ainsi taré fournit des indications très suffisantes.

Le moulinet *Richard*, établi avec le concours de M. de Folin, ingénieur des Grandes Forces hydrauliques du centre et du sud-ouest, a été créé en vue d'éliminer le type Ott.

Cet appareil comporte 6 ailes découpées dans une hélice au pas de 1 mètre. Les rais portant ces ailettes sont réunis par un cercle assurant l'invariabilité et la solidité du système. Il est disposé de telle façon que son axe se trouve toujours horizontalement dans la direction du courant. Sur ce même axe est monté un système de contact électrique qui a l'avantage de n'introduire que des résistances négligeables.

Le moulinet qui est en aluminium ne pèse que 438 grammes.

Les enregistreurs le plus souvent employés avec ce modèle de moulinet sont le chronographe totalisateur, le chronographe universel et l'électrocinémographe. Ce dernier appareil est commandé par les contacts émis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le moulinet, soit à raison de 1 contact par tour ou par mètre, soit à raison de 20 contacts par tour.

L'enregistreur donne ainsi par une simple lecture la vitesse relative de l'eau par seconde, ou le chemin parcouru ou la vitesse moyenne.

Le moulinet *Price* diffère essentiellement du moulinet Ott en ce que la tige rigide peut être remplacée par un câble métallique de longueur indéterminée. En outre, quelques dispositions particulières rendent l'appareil plus apte à être utilisé ainsi.

Tout d'abord, à l'hélice du moulinet Ott on a substitué une couronne de cônes C (*fig.* 126). Le plan contenant les sommets de ces cônes est horizontal et au centre de la couronne est fixé un axe vertical *a* ; l'extrémité inférieure de cet axe repose sur un pivot réglable *p* ; l'extrémité supérieure se termine par une vis sans fin qui engrène avec une roue dentée *i*

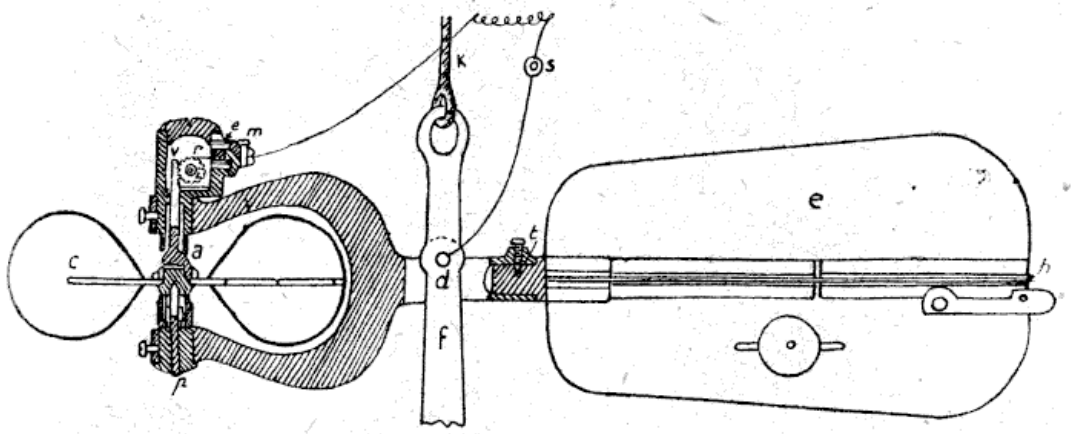


FIG. 126.

portant quatre ergots également distants. Les ergots peuvent, par suite de la rotation de la roue *i*, venir en contact l'un après l'autre avec un ressort *r* et fermer ainsi le circuit d'une sonnerie *s* ou d'un microphone. Entre deux contacts successifs, la couronne fait cinq tours ; un barème établi à la suite d'un tarage donne les vitesses de l'eau correspondantes aux divers intervalles de temps pendant lesquels se produisent des nombres déterminés de sonneries. Une tige horizontale *t* prolonge l'appareil et porte deux gouvernails, l'un vertical *e* et l'autre horizontal *h*.

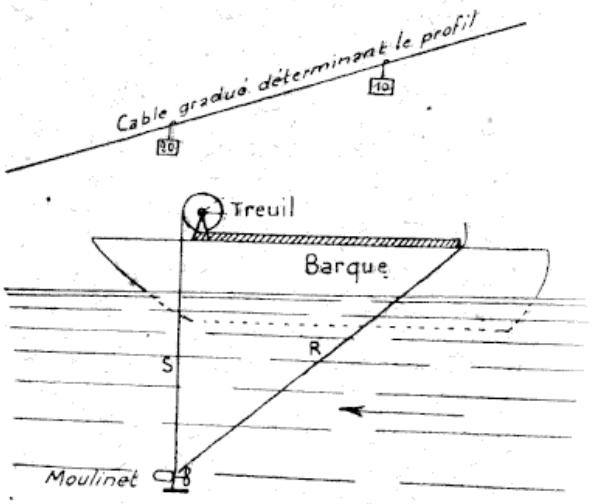
Le moulinet est fixé par une vis *d* à une lame d'acier *f* terminée à sa partie supérieure par un anneau auquel on attache le câble de suspension *K*. Sur la partie inférieure de la lame, on peut fixer un ou plusieurs saumons de plomb en forme de torpilles. Ces saumons, du poids de 7 kilog. environ, ont leur pointe tournée vers la couronne de cônes ; ils portent deux gouvernails en arrière, et tout en lestant l'appareil, ils tendent à l'orienter par leur forme dans le sens du courant.

Le câble de suspension *K* s'enroule sur le tambour d'un treuil porté par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une potence en bois ou en fer. Un double fil électrique, attaché d'une part au ressort isolé *r*, et d'autre part à la roue *i*, par l'intermédiaire de la masse métallique de l'appareil, vient se fixer aux bornes de la sonnerie ou de la pile microphone qui reste sur le pont.

Pour opérer on accroche la potence (*fig.* 127 et 128) au parapet d'un pont, par exemple au point correspondant à l'ordonnée choisie et l'on descend l'appareil jusqu'à la surface de l'eau et dès qu'elle est immergée la couronne de cônes se met à tourner. L'opérateur chronomètre alors le temps mis pour entendre un certain nombre de sonneries et le barème lui donne la vitesse. On descend ensuite l'appareil d'une quantité déterminée, d'autant plus petite que la profondeur est plus faible et qu'on désire plus de précision dans l'opération. On mesure la vitesse en ce point et on continue ainsi



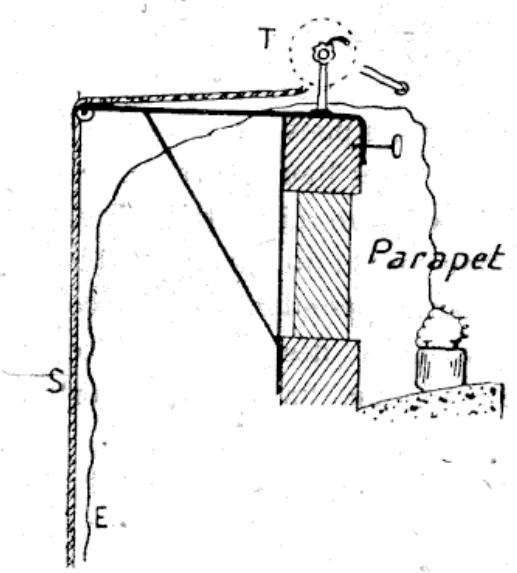


FIG. 127.

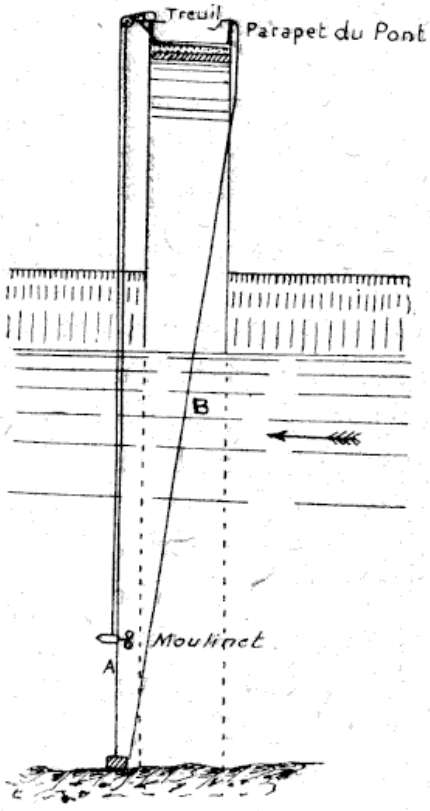


FIG. 128.

jusqu'au fond pour toutes les ordonnées successivement.

Le moulinet suspendu est destiné à être employé surtout du haut des ponts, de façon à éviter l'établissement d'une passerelle ou d'une autre installation coûteuse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il convient pour obtenir rapidement une première notion des débits des cours d'eau d'un bassin en divers points sans la moindre installation accessoire et aussi particulièrement pour l'étude des vitesses de surface des eaux de crues.

Pour procéder à une opération de tarage on fait mouvoir le moulinet avec une vitesse uniforme à une certaine profondeur dans l'eau ; on lui fait parcourir une distance déterminée plusieurs fois, tant en avant qu'en arrière pour éliminer les effets de la vitesse dans chacune des deux directions, et avec une vitesse dont la valeur se rapproche autant que possible de celles qu'on a en vue de mesurer. On doit pouvoir évaluer le temps d'expérience à un dixième de seconde et la vitesse à un dixième des tours, au moyen d'un chronographe enregistreur.

Avec les résultats d'un certain nombre d'expériences, on établit, une fois pour toutes, la relation entre la vitesse, c'est-à-dire ici l'espace parcouru en une seconde par l'appareil, et le nombre de tours du moulinet.

Les résultats des opérations peuvent conduire à l'obtention d'une droite ou d'une courbe.

Dans le cas d'une courbe on a :

$$v = a + bn + cn^2.$$

Deux procédés peuvent être employés pour préparer le tableau des tarages ; le premier consiste à tracer aussi exactement que possible la droite ou la courbe passant par ou près les points déterminés par les expériences directes ; cette courbe permet de trouver ensuite toute vitesse correspondant à un nombre déterminé de tours par seconde du moulinet. L'autre procédé, plus long mais plus exact, surtout pour les faibles vitesses, consiste à établir d'abord l'équation de la courbe et à tracer ensuite cette dernière au moyen de son équation. On recommande parfois de prendre comme abscisses, au lieu des valeurs de n et de v, les valeurs de n et de $\frac{v}{n}$, parce que ce dernier rapport varie rapidement quand n augmente, ce qui rend les lectures plus exactes que dans le cas d'une ligne presque droite. D'après le principe de la méthode des moindres carrés, les meilleures valeurs à donner aux constantes inconnues a, b et c sont celles pour lesquelles la somme des carrés des erreurs résiduelles est minimum.

Il convient de procéder à la fois graphiquement et algébriquement. On établit d'abord les polygones verticaux des vitesses à l'aide des renseignements recueillis dans les carnets de jaugeage, en ayant soin, pour le dessin de ces polygones, de répartir entre les verticales la différence entre le niveau de l'eau au commencement du jaugeage rive gauche et le niveau de l'eau à la fin du jaugeage rive droite. Pour chaque verticale, on détermine, dans ces conditions, la vitesse moyenne (V_m) en surfaçant au plani-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètre (1) chacun des polygones et en divisant la surface (*f*) ainsi obtenue par la hauteur (*l*) correspondante (*fig.* 129).

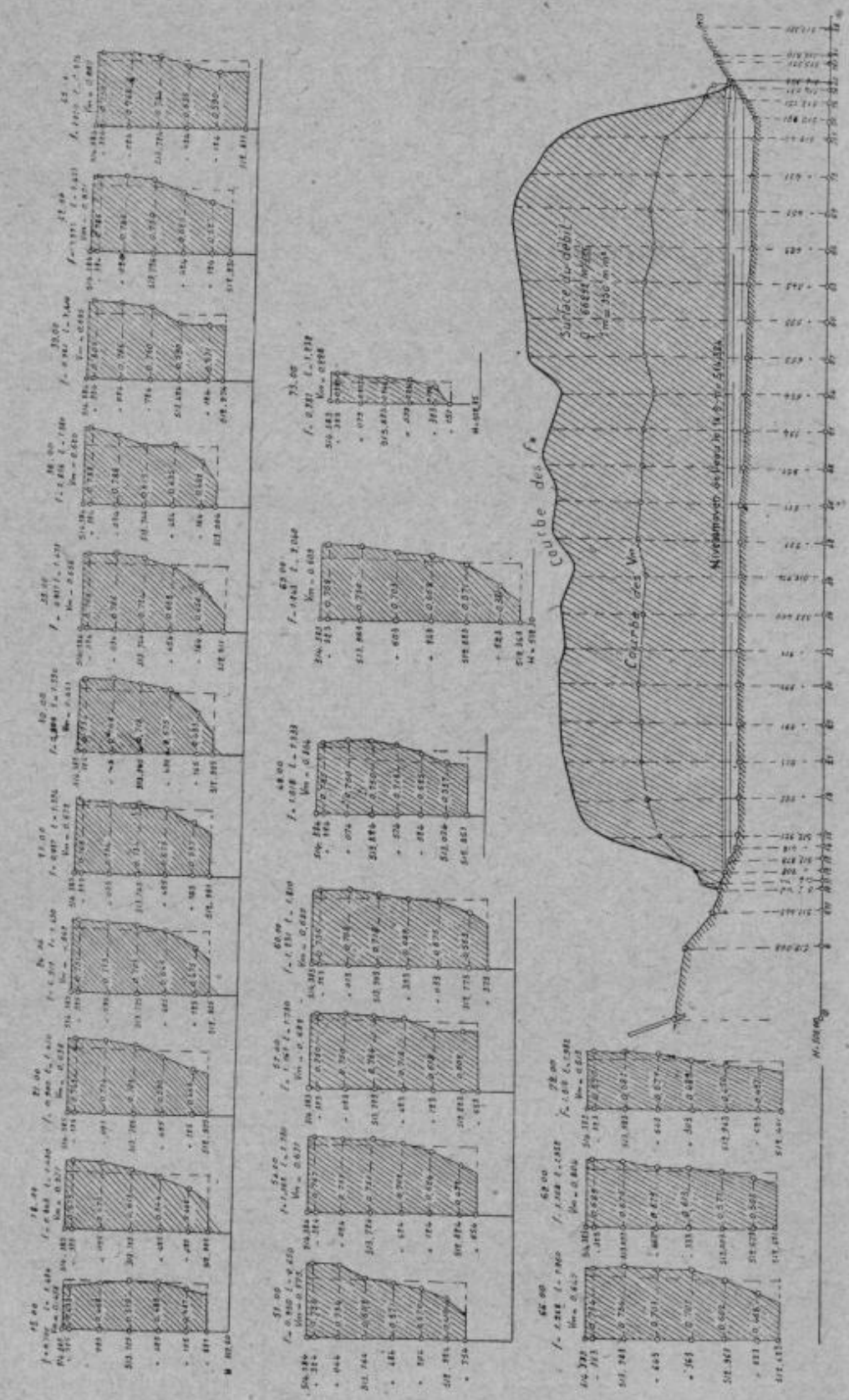


FIG. 129.

(1) On peut utilement se servir à cet effet de la machine à calculer « Perlees » et du planimètre Amsler-Laffont.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On relève ensuite sur chaque polygone la vitesse superficielle (V_0) et on calcule le produit $\left(f\frac{V_m}{V_0}\right)$. Pour obtenir la valeur moyenne du rapport $\left(\frac{V_m}{V_0}\right)$, on divise la somme des $\left(f\frac{V_m}{V_0}\right)$ par la somme des (f) et on trouve ainsi $\left(e=\frac{\Sigma\left(f\frac{V_m}{V_0}\right)}{\Sigma f}\right)$. Ce rapport $\left(\frac{V_m}{V_0}\right)$ moyen, qui reste sensiblement constantpour chaque rivière, permet de déterminer les vitesses moyennes si l'on connaît les vitesses superficielles par la méthode des flotteurs ou par des observations au moulinet.

On trace ensuite, à une échelle convenablement choisie, le profil de la section du cours d'eau et le plan moyen de l'eau durant le jaugeage. Le niveau de ce plan est obtenu en prenant la moyenne entre les deux niveaux moyens établis pour chaque rive. Il est, en effet, à remarquer que le niveau de l'eau sur l'une des rives peut être plus élevé que sur l'autre, et que sur chacune des deux rives les niveaux peuvent changer au cours du jaugeage.

On peut alors construire la courbe des (V_m) en prenant la trace du plan d'eau ainsi déterminée comme axe des abscisses, une verticale comme axe des coordonnées, et en portant des longueurs proportionnelles aux vitesses moyennes calculées par les polygones verticaux des vitesses. Puis on calcule les profondeurs (l^*) en répartissant cette fois, entre les verticales, la différence entre le niveau moyen de la rive gauche et le niveau moyen de la rive droite, profondeurs calculées qui sont identiques à celles dessinées quand il ne survient aucun mouvement de crue au cours du jaugeage, les différences à répartir entre les verticales pour le dessin et le calcul étant les mêmes. Pour chaque verticale on calcule l'*élément* (l), égal à la somme des moitiés des distances entre cette verticale et les voisines et on obtient le produit (ll^*) qui est un des éléments de la section d'écoulement. Enfin la somme des (ll^*) est égale à (F^*) la surface totale d'écoulement.

Pour contrôler le calcul de (F^*), on calcule les distances (l_1) entre les points du profil de la section et un plan horizontal de comparaison et l'on établit la valeur de la surface ($F_1 = ll_1$). La somme ($F_1 + F^*$) doit être sensiblement égale à la surface du rectangle $L\ (l^* + l_1)$.

On calcule alors la valeur de ($f^* = V_m l$) et des produits ($f^* l$). La somme de ces produits donne le *débit calculé* ($Q = f^* l$). (Voir tableaux I, II ci-après) et (*fig.* 130).

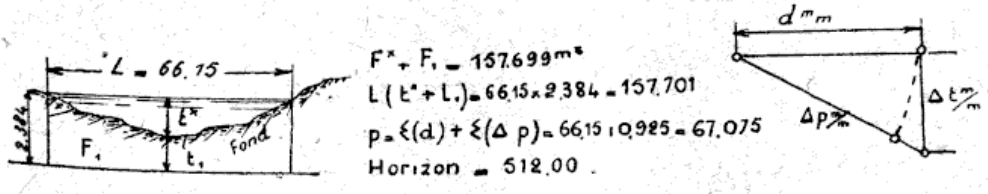


FIG. 130.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU I

Calcul des coefficients e, n et c.

R. INKISI. , Jaugeage : 25 48 m. en amont du pont.

VERTICALE	HAUTEUR DE L'EAU	HAUTEUR DU FOND	f	t	V_m	V_0	$\frac{V_m}{V_0}$	$f\frac{V_m}{V_0}$
15.0	514.385	512.921	0.700	1.464	0.478	0.433	1.104	0.7728
18.0	»	925	0.843	1.460	0.577	0.675	0.854	0.7196
21.0	»	975	0.900	1.410	0.638	0.742	0.859	0.7731
24.0	»	955	0.919	1.430	0.642	0.734	0.874	0.8032
27.0	»	991	0.937	1.394	0.672	0.768	0.875	0.8198
30.0	»	995	0.906	1.390	0.651	0.700	0.930	0.8426
33.0	514.384	512.911	0.937	1.473	0.636	0.768	0.828	0.7758
36.0	»	513.004	0.856	1.380	0.620	0.786	0.788	0.8466
39.0	»	512.974	0.981	1.410	0.695	0.805	0.863	0.8317
42.0	»	931	0.975	1.453	0.671	0.786	0.853	0.9334
45.0	»	811	1.050	1.573	0.667	0.750	0.889	0.9314
48.0	»	851	1.018	1.533	0.664	0.725	0.915	0.7533
51.0	»	734	0.950	1.650	0.575	0.725	0.793	1.0135
54.0	»	654	1.162	1.730	0.671	0.767	0.874	1.0735
57.0	514.383	653	1.181	1.730	0.682	0.750	0.909	1.1300
60.0	»	573	1.231	1.810	0.680	0.740	0.918	0.9969
63.0	»	343	1.243	2.040	0.609	0.759	0.802	1.1234
66.0	»	423	1.268	1.960	0.647	0.730	0.886	1.0603
69.0	»	451	1.168	1.932	0.604	0.665	0.908	0.8846
72.0	»	512.401	1.018	1.982	0.513	0.590	0.869	0.2489
75.0	514.383	513.151	0.281	1.232	0.228	0.290	0.886	
			20.524					18.0114

CALCUL DE C et N

V_m	0.613
R	1.514
J	0.000195
RJ	0.000295230
$\sqrt{RJ}$	0.017180
23	23.0
$\frac{0.00155}{J}$	8.072917
$a = 23 + \frac{0.00155}{J}$	31.072917
$c = \frac{V_m}{\sqrt{RJ}}$	35.681024
$c - a$	4.608107
$\frac{c-a}{2}$	2.304054
ac	1108.713497
$b = \sqrt{R}$	1.230446
$\frac{b}{ac}$	0.0011097
$\left(\frac{b}{ac} \times \frac{c-a}{2}\right)^2$	0.0000065372
$\left(\frac{b}{ac} \times \frac{c-a}{2}\right)^2 + \frac{b}{ac}$	0.0011162372
$\sqrt{\left(\frac{b}{ac} \times \frac{c-a}{2}\right)^2 + \frac{b}{ac}}$	0.0334101
$-\frac{b}{ac}\frac{c-a}{2}$	0.0025568
n	0.0308533

VÉRIFICATION

$23 + \frac{0.00155}{J}$	31.072917
$\frac{1}{n}$	32.411443
$23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{J}$	63.484360
$\frac{n}{\sqrt{R}}$	0.025075
$\left(23 + \frac{0.00155}{J}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}$	0.779453
c	35.68235

RÉSULTATS

$$e = \frac{\Sigma\left(f\frac{V_m}{V_0}\right)}{\Sigma(f)} = 0.877$$

$$n = -\frac{b}{ca}\frac{c-a}{2} + \sqrt{\left(\frac{b}{ac}\frac{c-a}{2}\right)^2 + \frac{b}{ac}} = 0.0308533$$

$$c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{J}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}} = 35.68235$$

OBSERVATION

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU II

Calcul de la section F' du débit Q et du périmètre mouillé p

R. INKISI — Jaugeage 25

POINT	DISTANCE	HAUTEUR DE L'EAU	HAUTEUR DU FOND	t'	l	$F' = \Sigma(t' \times l)$	t_1	$F_1 = \Sigma(t_1 \times l)$	N_0	Vm	$f' = Vm \times t'$	$Q = \Sigma(f' \times l)$	$\Delta t'$	Δp
10.5		514.385	514.385	0.000	0.25	0.000	2.385	0.596		0.000	0.000	0.000		
11.0	0.5	»	208	0.177	0.75	0.133	2.208	1.656	0.178	0.156	0.027	0.020	0.177	0.030
12.0	1.0	»	513.878	0.507	1.00	0.507	1.878	1.878	0.250	0.219	0.111	0.111	0.330	0.048
13.0	1.0	»	418	0.967	1.00	0.967	1.418	1.418		0.320	0.309	0.309	0.460	0.103
14.0	1.0	»	051	1.334	1.00	1.334	1.051	1.051		0.420	0.560	0.560	0.367	0.065
15.0	1.0	»	512.921	1.464	2.00	2.928	0.921	1.842		0.478	0.700	1.400	0.130	0.008
18.0	3.0	»	925	1.460	3.00	4.380	0.925	2.775		0.577	0.842	2.526	0.004	0.000
21.0	3.0	»	975	1.410	3.00	4.230	0.975	2.925		0.638	0.899	2.697	0.005	0.000
24.0	3.0	»	955	1.430	3.00	4.290	0.955	2.865		0.642	0.918	2.754	0.020	0.000
27.0	3.0	»	991	1.394	3.00	4.182	0.991	2.973		0.672	0.937	2.811	0.036	0.000
30.0	3.0	»	995	1.390	3.00	4.170	0.995	2.985		0.651	0.905	2.715	0.004	0.000
33.0	3.0	514.384	512.911	1.473	3.00	4.419	0.911	2.733		0.636	0.937	2.811	0.083	0.001
36.0	3.0	»	513.004	1.380	3.00	4.140	1.004	3.012		0.620	0.855	2.565	0.093	0.001
39.0	3.0	»	512.974	1.410	3.00	4.230	0.974	2.922		0.695	0.980	2.940	0.030	0.000
42.0	3.0	»	931	1.453	3.00	4.359	0.931	2.793		0.671	0.975	2.925	0.043	0.000
45.0	3.0	»	811	1.573	3.00	4.719	0.811	2.433		0.667	1.049	3.147	0.120	0.002
48.0	3.0	»	851	1.533	3.00	4.599	0.851	2.553		0.664	1.018	3.054	0.040	0.000
51.0	3.0	»	734	1.650	3.00	4.950	0.734	2.202		0.575	0.949	2.847	0.117	0.002
54.0	3.0	»	654	1.730	3.00	5.190	0.654	1.962		0.671	1.160	3.480	0.080	0.001
57.0	3.0	514.383	653	1.730	3.00	5.190	0.653	1.959		0.682	1.180	3.540	0.000	0.000
60.0	3.0	»	573	1.810	3.00	5.430	0.573	1.719		0.680	1.230	3.690	0.080	0.001
63.0	3.0	»	343	2.040	3.00	6.120	0.343	1.029		0.609	1.243	3.729	0.232	0.008
66.0	3.0	»	423	1.960	3.00	5.880	0.423	1.269		0.647	1.268	3.804	0.080	0.001
69.0	3.0	»	451	1.932	3.00	5.796	0.451	1.353		0.604	1.167	3.501	0.028	0.000
72.0	3.0	»	512.401	1.982	2.25	4.459	0.401	0.902		0.513	1.017	2.288	0.050	0.000
73.5	1.5	»	291	2.092	1.50	3.138	0.291	0.436		0.370	0.774	1.161	0.110	0.004
75.0	1.5	»	513.151	1.232	1.25	1.540	1.151	1.439		0.228	0.280	0.850	0.860	0.229
76.0	1.0	»	514.031	0.352	0.825	0.290	2.031	1.675		0.200	0.070	0.057	0.880	0.332
76.65	0.65	514.383	514.383	0.000	0.325	0.000	2.383	0.774		0.000	0.000	0.000	0.352	0.089
66.15	66.15				66.15	101.570		56.129				62.292		0.925

En portant sur chaque verticale des longueurs proportionnelles aux valeurs de f^* calculées et en planimétrant la surface comprise entre le plan d'eau et la courbe des f^* ainsi obtenue, on trouve *graphiquement* une valeur du débit, qui doit correspondre à la valeur calculée (*fig.* 131).

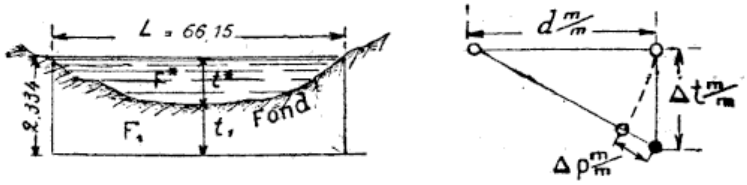


FIG. 131.

Moulinets intégrateurs (1). — On a vu qu'avec les moulinets ordinaires,

(1) *L'énergie hydroélectrique*, par Paul LÉVY-SALVADOR. H. Dunod et E. Pinat, éditeurs, 1907.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour mesurer la vitesse de l'eau courante dans un profil en travers, on doit opérer sur un certain nombre de verticales et que, pour donner la vitesse moyenne au droit de chacune d'elles, il est nécessaire de relever des mesures en plusieurs points : à la surface, près du fond, à mi-profondeur, ainsi que vers les 3/10 et les 6/10 de la profondeur, ces deux points correspondant l'un à la vitesse maximum sur la verticale considérée et l'autre, à la vitesse moyenne.

La méthode par intégration, qui consiste à faire mouvoir le moulinet avec une vitesse uniforme connue, évite les nombreux déplacements de l'appareil, comme avec les moulinets ordinaires. La vitesse qu'on obtient de cette façon est la résultante des vitesses de l'eau et de l'appareil ; elle est ainsi plus grande que la valeur réelle. On peut, soit faire descendre plusieurs fois l'appareil de la ligne d'eau au fond suivant certaines verticales, soit l'immerger à une profondeur donnée et lui faire descendre le courant, soit enfin lui donner un double mouvement en diagonale d'une rive à l'autre, en même temps qu'on le fait descendre plusieurs fois de la surface au fond. Pour lui donner une vitesse uniforme le long d'une même verticale, on peut employer un appareil inventé par Harlacher.

Ce moulinet monte ou descend le long d'un tube vertical en fer, son mouvement étant guidé par un fil enroulé autour d'un tambour et d'une poulie supportée par une console ; le moulinet ainsi guidé prend de lui-même la direction du courant au point où on l'immerge. Le tambour est supporté par un bras et la profondeur est enregistrée sur un cadran. Des ailettes et un engrenage régularisent le mouvement du moulinet, lequel peut être relevé par une manivelle ou arrêté dans son mouvement par une roue à rochet. L'appareil est complété par une batterie de piles et par un appareil enregistreur.

Il existe actuellement à Grenoble une station de tarage pour les moulinets. L'installation consiste en un manège électrique disposé sur une plate-forme en charpente, mis en rotation par un moteur électrique de 5 HP, pouvant recevoir des vitesses angulaires déterminées par un jeu d'engrenages interchangeables, de façon à réaliser sur la circonférence d'un cercle de 5 mètres de diamètre toute la série des vitesses tangentielles depuis 5 centimètres jusqu'à 5 mètres par seconde. La plate-forme circulaire porte sur quatre pieux entretoisés. L'arbre vertical du manège repose sur son centre ; il porte une série de contacts électriques destinés à l'enregistrement sur un même graphique des nombres de tours du manège, du moulinet expérimenté et des secondes. Le bras mobile, cintré de façon à dégager la plate-forme, passe au-dessus d'elle, en laissant la place libre aux opérateurs ; il est muni de douilles à vis destinées à recevoir la tige de l'instrument. Cette petite installation, combinée et exécutée par M. de la Brosse, fonctionne d'une façon très satisfaisante. La (*fig.* 132) présente des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courbes de tarage de moulinets, effectuées à la station de Grenoble par le Service d'études des grandes forces hydrauliques.

L'usage des moulinets est assez indiqué pour les jaugeages des canaux d'amenée, de dérivation et de fuite, quand ces ouvrages ne sont pas d'un

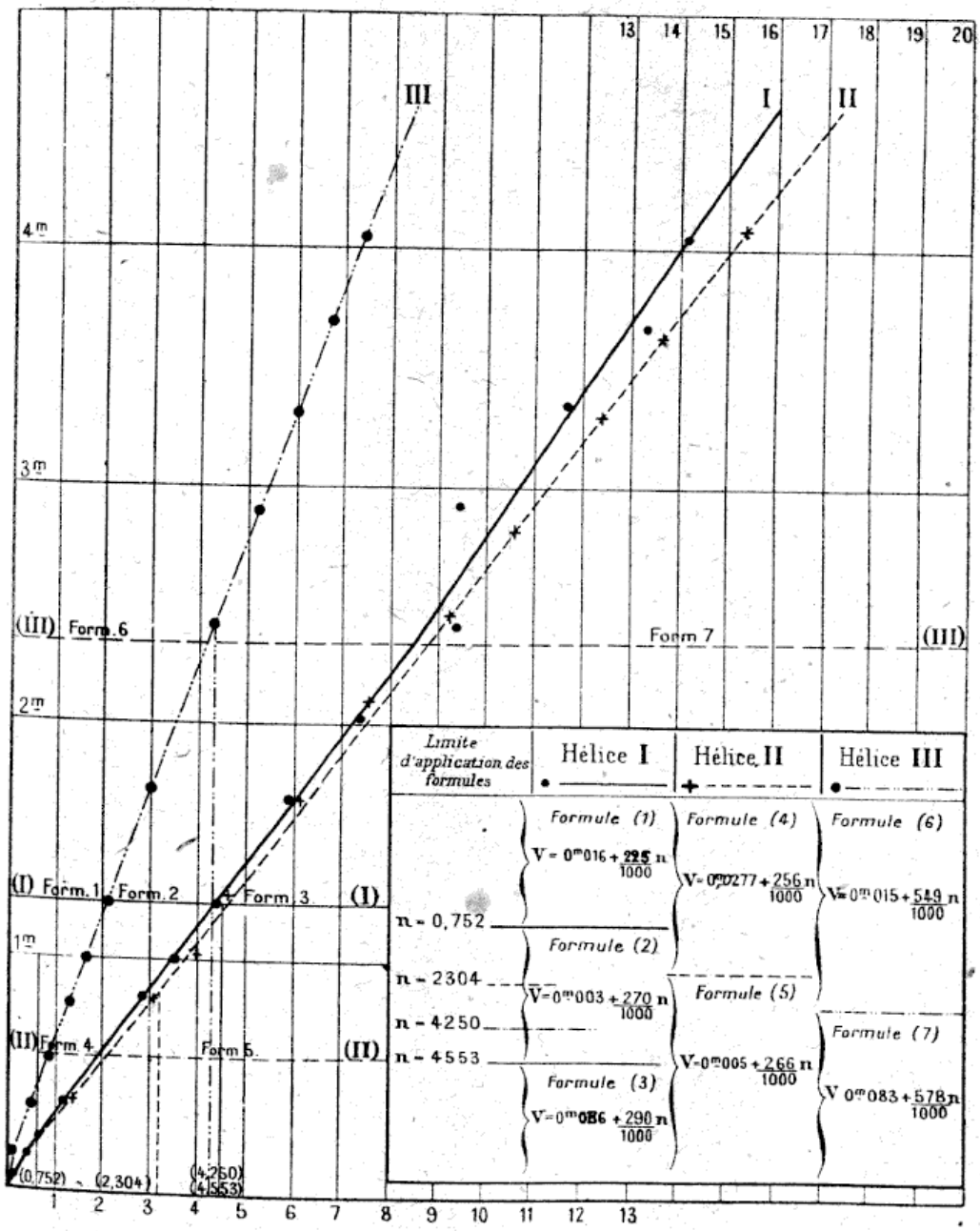


FIG. 132. — Courbes de tarage de moulinets à la station de Grenoble.

accès facile pour permettre de relever les hauteurs d'eau sur un déversoir. Mais, pour arriver à un résultat convenable, il faut réaliser un grand nombre de mesures et que l'appareil soit bien taré. D'après les expériences de M. Rateau, le moulinet donne des résultats légèrement trop forts.

HYDROMÈTRE IZART. — C'est un appareil à amplification directe enre-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gistrant immédiatement sur le diagramme la hauteur h d'écoulement au-dessus d'un orifice ou d'un déversoir sans aucun organe intermédiaire entre le niveau à enregistrer et la plume enregistreuse (*fig.* 133). Le zéro du diagramme est réglé en faisant affleurer l'eau au niveau du seuil du déversoir ; le flotteur, en s'élevant ou s'abaissant, enregistre les hauteurs de h.

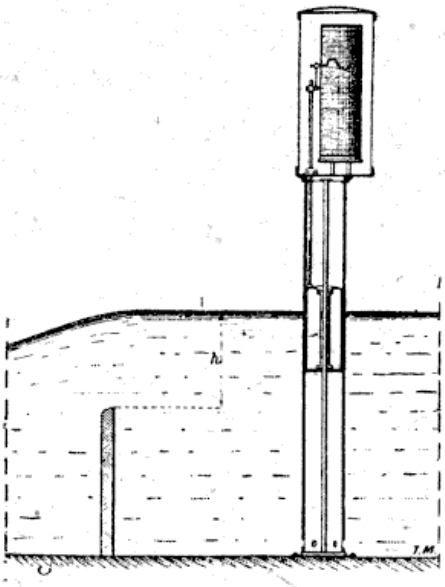


FIG. 133.

Pour obtenir l'inscription sur le diagramme directement, les débits en mètres cubes par seconde, on emploie des flotteurs paraboloïdes dont le volume déplacé est proportionnel à $\sqrt{h}$.

Cet appareil permet de se rendre compte aussi de la variation du débit en fonction du temps.

55. Installation et contrôle des appareils de jaugeage. — Le temps disponible pour le relevé des débits minima est dans la règle très court. Il faut souvent avoir en vue d'effectuer les mesurages, dans un bassin étendu, en l'espace de quelques semaines, ce qui nécessite l'emploi d'un grand nombre de personnes occupées à ce

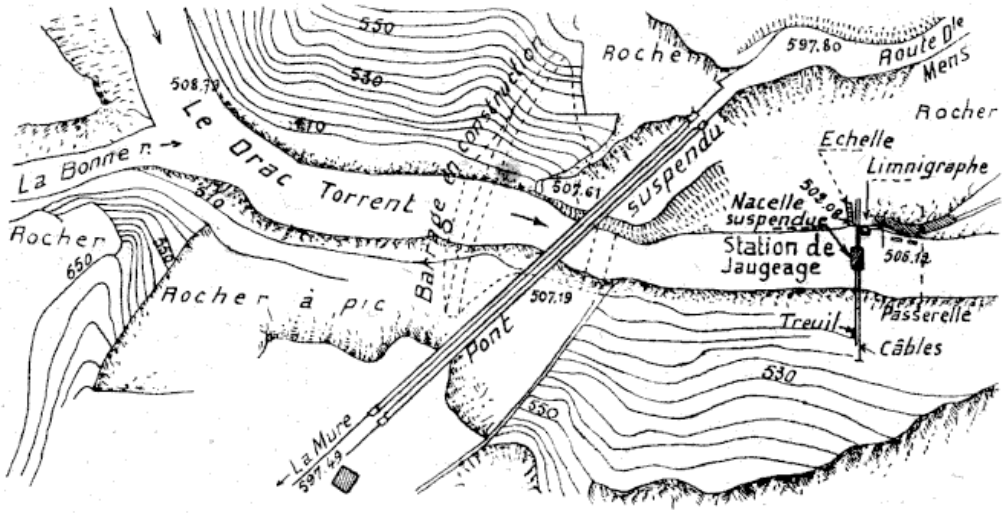


FIG. 134. — Plan de situation de la station de jaugeage de Ponsonnas.

travail. A part quelques rares exceptions, l'exécution des jaugeages minima des cours d'eau qui se trouvent dans la région des hautes montagnes est particulièrement difficile. Non seulement la recherche d'un emplacement propice, mais aussi la préparation du profil de jaugeage proprement dit demandent beaucoup de peine et de temps. Il faut encore

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ajouter à cela les rigueurs et les dangers de l'hiver, les longues distances à parcourir par la neige dans les vallées sans chemins, ce qui rentre d'autant plus en ligne de compte que les jours sont courts.

Pour obtenir des résultats rigoureusement sûrs et absolument indiscutables, on étend les observations et les mesures de la marche de l'écoulement minimum d'un cours d'eau sur une longue suite d'années. Cela n'est pas, dans la plupart des cas, une opération commode, et un pareil travail ne va pas sans de grands frais. Le but poursuivi est atteint par des mesures limnimétriques sûres et continues, mais il faut compter avec cette circonstance fâcheuse que le profil en travers correspondant reste très rarement pendant longtemps dans le même état.

Sur les rivières à faible courant les hydromètres peuvent être portés par des barques. Mais sur les cours d'eau torrentiels et impétueux, où il est impossible d'opérer dans des embarcations, il faut recourir à des dispo-

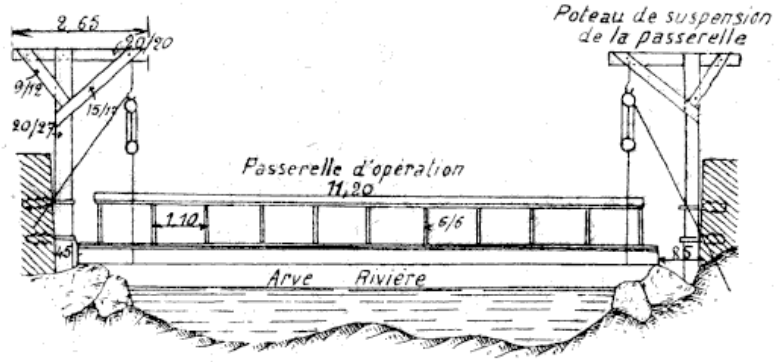


FIG. 135. — Passerelle de la station de jaugeage de Chamonix (Haute-Savoie).

sitions spéciales, et à cet égard, les moyens utilisés par le Service d'études des grandes forces hydrauliques sont d'un enseignement bien suggestif. Ainsi à la *station de Ponsonnas*, installée dans la gorge profonde où coule le Drac, immédiatement après le confluent de la Boune (Isère) (*fig.* 137 et 138), on a installé une nacelle où plusieurs personnes peuvent prendre place, et qui est soutenue par deux chaînes à palans différentiels partant d'un chariot porté par le câble principal. On peut, de l'intérieur même de la nacelle, l'amener au niveau qui convient pour les opérations, niveau variable avec celui de la rivière.

Le chariot reçoit, d'ailleurs, d'un autre câble, mû par un treuil fixé à la rive, les mouvements nécessaires dans le sens normal à la direction du courant: Cette installation a été complétée par la pose d'un limnigraphe ou enregistreur automatique des variations du niveau de la rivière. Une installation de ce genre entraîne à une dépense d'environ 2.000 francs. Dans certains cas, on a pu profiter de l'existence d'un pont pour y suspendre un échafaudage qu'on descend à fleur d'eau lors des opérations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A la *station de Pont-Haut*, sur le torrent de la Boune, à 3 kilomètres en amont de son confluent avec le Drac, on a eu recours à une passerelle rustique en charpente fixe, placée au-dessus du niveau des crues ordinaires. A *Chamonix*, sur la rivière l'Arve, dont le courant est rapide et les crues violentes et soudaines, on a suspendu une passerelle par des chevalets mouflés à deux potences installées sur les rives. On abaisse celle-ci au niveau convenable pour jauger et on relève une fois l'opération déterminée. Enfin on s'est contenté parfois d'amarrer le bateau porte-hydromètre à une corde tendue d'une rive à l'autre comme c'est le cas pour la *station de Sisteron* sur la Durance (1).

Lorsque la section de lit dans laquelle on opère est fixe, les dimensions du profil en travers de la rivière n'ont besoin d'être déterminées qu'une

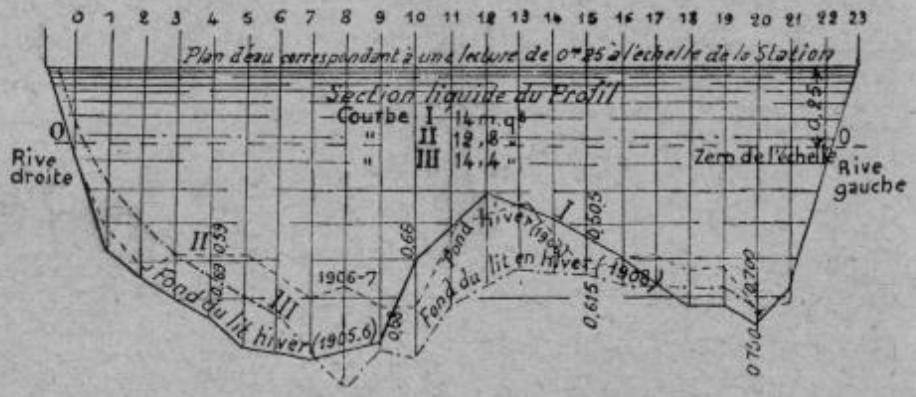


Fig. 136. — Variations du fond du lit de l'Isère à Montignon.
(L'échelle des hauteurs est décuple de celle des largeurs.)

fois pour toutes; mais, dans les rivières à lit mobile (*fig.* 136) il faut relever ces données à chaque série de jaugeages. M. R. Tavernier a combiné un appareil qui permet d'effectuer de la rive toutes les mesures de vitesses et de profondeurs, dans les cours d'eau larges et rapides, où il est souvent difficile d'opérer en barques. Le tube du moulinet, à cet effet, est fixé à l'avant d'un radeau amarré à une corde tendue d'une rive à l'autre et normalement au courant.

Un treuil à main placé sur l'une des rives permet de manœuvrer le radeau, et grâce à des repères fixés à la corde, de l'arrêter à des distances de la rive croissant de 10 mètres en 10 mètres. Au moyen d'un fil de commande, on peut, dans chaque station, faire descendre le tube porte-moulinet dans son support, de manière à mesurer la vitesse à une profondeur

(1) Parmi les stations les plus importantes installées à ce jour, on peut citer celles de Marignier sur le Giffre (affluent de l'Arve), Montmélian sur l'Isère, Briançon, Embrun, Sisteron et Mirabeau sur la Durance, Sisteron sur le Buech, Allos sur le Verdon, etc. Les cours d'eau sur lesuqels on compte le plus grand nombre de stations sont : l'Arc, le Drac, la Durance et la Romanche.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quelconque. Les mouvements du moulinet sont enregistrés par un chronographe Richard établi sur des données spéciales. Le cylindre sur lequel est enroulée la bande de papier quadrillé présente un développement circonférentiel de $0^m,30$ et accomplit une révolution en trente minutes. La bande de papier comporte 300 divisions de 1 millimètre, 10 divisions correspondant à une minute. Le moulinet est établi de façon qu'il y ait tous les soixante tours un contact entre la pointe du stylet et le papier ; les marques du stylet sont séparées par 10 divisions de la feuille lorsque la vitesse est de 1 mètre par seconde. Il est facile de construire une table donnant immédiatement la vitesse en fonction de l'écartement des marques du stylet. L'hélice sur laquelle est monté le stylet lui permet de tracer, sans échapper la feuille de papier, 12 révolutions hélicoïdales complètes, de manière qu'une même feuille peut durer six heures. Des piles placées sous le chronographe permettent les transmissions à plus de 100 mètres.

Une sonde, munie d'un contrepoids qui se déplace le long d'une mire graduée verticale, permet de relever préalablement la profondeur de l'eau à chaque station. On commence par faire descendre la sonde jusqu'à ce qu'elle atteigne le fond et une simple lecture donne la profondeur en ce point. Cet appareil qui a été utilisé sur la Durance, notamment, a donné de bons résultats ; les différentes opérations que comporte un jaugeage s'exécutent avec une célérité remarquable.

Pendant le printemps et l'été, au moment de la fonte des neiges et des glaciers, les débits des torrents alimentés principalement par cette fonte subissent des variations rapides et relativement considérables. Pour pouvoir suivre ces variations qui doivent entrer dans la détermination du débit moyen journalier des cours d'eau, on a reconnu la nécessité d'employer, aux stations les plus importantes, des enregistreurs automatiques des variations de niveau.

Les appareils en service sont des enregistreurs Richard avec câbles, poulies et engrenages réducteurs, tambours hebdomadaires et ordonnées verticales. Dans la plupart des cas, le flotteur est logé dans une gaine tubulaire verticale où il se meut à la surface d'une nappe dont les ondulations sont atténuées par l'interposition d'une crépine inférieure à orifices étroits. Le câble qui part du flotteur transforme les mouvements verticaux en déplacements angulaires, qu'un train d'engrenages réduit dans la proportion voulue ; une seconde poulie le transforme de nouveau en mouvements verticaux qui s'enregistrent sur la feuille d'un tambour auquel un mouvement d'horlogerie fait décrire sa révolution en une semaine.

A Berne, le laboratoire pour l'essai des moulinets, installé par le Bureau hydrométrique fédéral suisse, fonctionne depuis l'année 1906.

Cette installation consiste en un canal en béton de 130 mètres de lon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gueur, 1m,20 de largeur et 1m,40 de profondeur ; celui-ci est rempli d'eau dormante jusqu'à une hauteur de 1m,20 du fond. Les murs latéraux sont surmontés d'une voie posée sur des longrines et dont l'écartement est de 1m,435. Sur cette voie peut être déplacé, sur des distances plus ou moins grandes, un wagonnet pourvu d'un appareil moteur que l'on fait fonctionner à la main et qui imprime à volonté au véhicule des vitesses différentes, mais dont la constance n'est malheureusement pas toujours absolue.

Les vitesses imprimées au wagonnet peuvent varier elles-mêmes de 3 centimètres à 5 mètres par seconde. La tige du moulinet est fixée à un support placé à la partie antérieure du wagonnet, de telle façon que l'axe

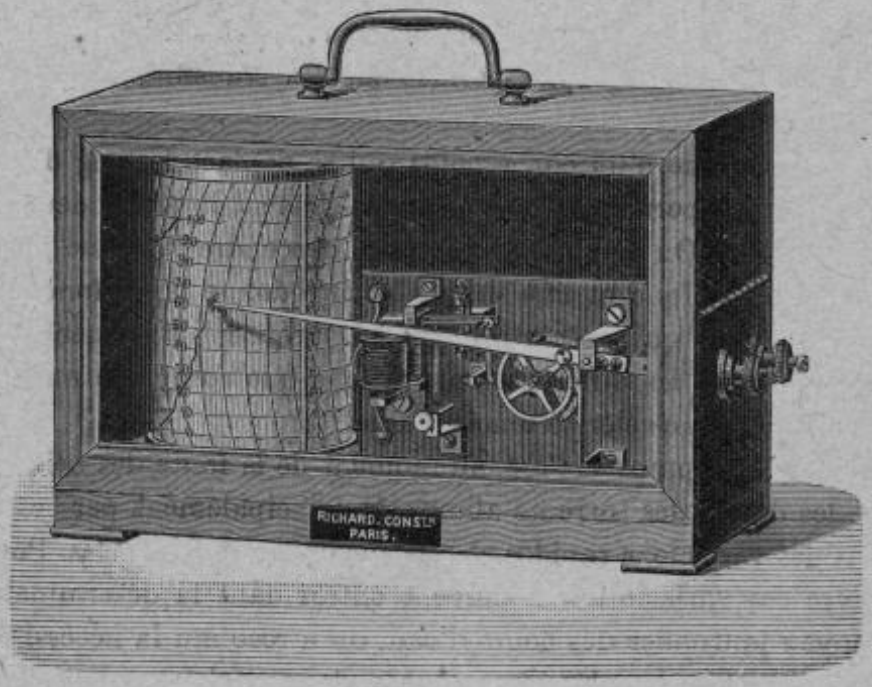


FIG. 137. — Chronographe totalisateur enregistreur J. Richard.

du moulinet se trouve au milieu du canal et généralement à une profondeur d'environ 40 centimètres au-dessous du niveau de l'eau. Mais il importe de veiller avec soin à ce que l'appareil soit exactement taré dans les mêmes conditions que lorsqu'on l'emploie pour les jaugeages ; en aucun cas la tige utilisée pour le tarage ne doit avoir un diamètre différent de celui de la tige employée dans les jaugeages.

L'une des parois latérales de la longrine à proximité immédiate du trottoir est pourvue d'une division métrique continue, à côté de laquelle se trouve encore une planche étroite ou lame de sapin posée horizontalement sur toute la longueur de la voie. Au côté longitudinal du wagonnet qui correspond à la division métrique, deux fusils à air comprimé peuvent être placés sur une table verticale, de façon que leurs bouches ne soient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

éloignées que de quelques centimètres de la lame de sapin. Les axes des canons des deux fusils convergent de manière que, le wagonnet étant arrêté, les projectiles (deux flèches empennées) frappent exactement au même point. Il existe en outre un mécanisme dont l'agencement permet de décharger les armes par une simple pression sur un bouton. Le moulinet qu'il s'agit de tarer est relié par un fil conducteur à un électro-aimant dont l'ancre fait mouvoir un signal optique, lequel signal est composé d'un petit disque qui apparaît dans l'ouverture circulaire d'une boîte ou cage, dès que l'armature est attirée par l'électro, et qui disparaît quand l'ancre n'est plus actionnée. Au moment même où le wagonnet étant en marche, la pointe du compteur denté dont est pourvu le moulinet vient toucher le ressort de contact, l'ancre est attirée ; celle-ci redevient libre dès que le ressort n'est plus en contact avec la pointe.

Supposons maintenant que l'on procède au tarage d'un moulinet qui donne un signal électrique à chaque centaine de tours ; la course expérimentale s'effectue de la manière suivante : quand le wagonnet a atteint la vitesse voulue, qui doit demeurer constante dans la mesure du possible, on presse, d'une main, à l'instant où l'ancre est attirée, sur le bouton du fusil I et l'on met en marche, de l'autre main, un chronoscope dont l'aiguille des secondes est à zéro ; aussitôt que l'ancre est attirée une seconde fois, on presse, d'une part, sur le bouton de fusil II et, d'autre part, au même moment, l'on arrête l'aiguille des seconde du chronoscope. La montre indique la durée de la marche ; la différence des longueurs marquée par la division métrique entre les points atteints par les flèches représente la distance parcourue. Ces deux données permettent alors de déterminer sans peine les résultats qu'il importe habituellement de faire connaître dans le tarage des moulinets. Pour augmenter le degré d'exactitude des expériences dans les vitesses plus grandes, c'est-à-dire celles correspondant à 200, 300 ou même 400 tours, on ajuste l'appareil de telle sorte qu'un nombre correspondant de contacts soit sauté durant la course d'essai.

Dès qu'une expérience est terminée, les résultats en sont portés tout d'abord sur un formulaire *ad hoc*. On calcule ensuite, à l'aide de la règle à calcul, la vitesse en mètres par secondes, ainsi que le nombre de tours du moulinet par mètre de parcours, puis les valeurs respectives sont portées dans un système de coordonnées où on prend les vitesses pour abscisses et les nombres de tours du moulinet pour ordonnées. Ce procédé permet de découvrir rapidement les erreurs éventuelles d'observation et leurs causes, et il a en même temps l'avantage de pourvoir à une répartition régulière des expériences entre la plus petite et la plus grande des vitesses dont on a fait usage. Les points ainsi obtenus (*fig.* 138) forment une courbe d'allure hyperbolique, dont la branche de gauche, qui correspond aux petites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vitesses, monte rapidement, tandis que l'autre est d'ordinaire à peu près horizontale. Considérée au point de vue purement théorique, cette seconde branche devrait être absolument horizontale quand le moulinet est bien construit ; en conséquence, à partir d'une certaine vitesse où le frottement des parties mobiles du moulinet et la force d'inertie de celui-ci n'exercent plus qu'une influence insignifiante, le nombre de tours du moulinet pour un parcours donné devrait demeurer constant, quelle que soit la vitesse imprimée au wagonnet.

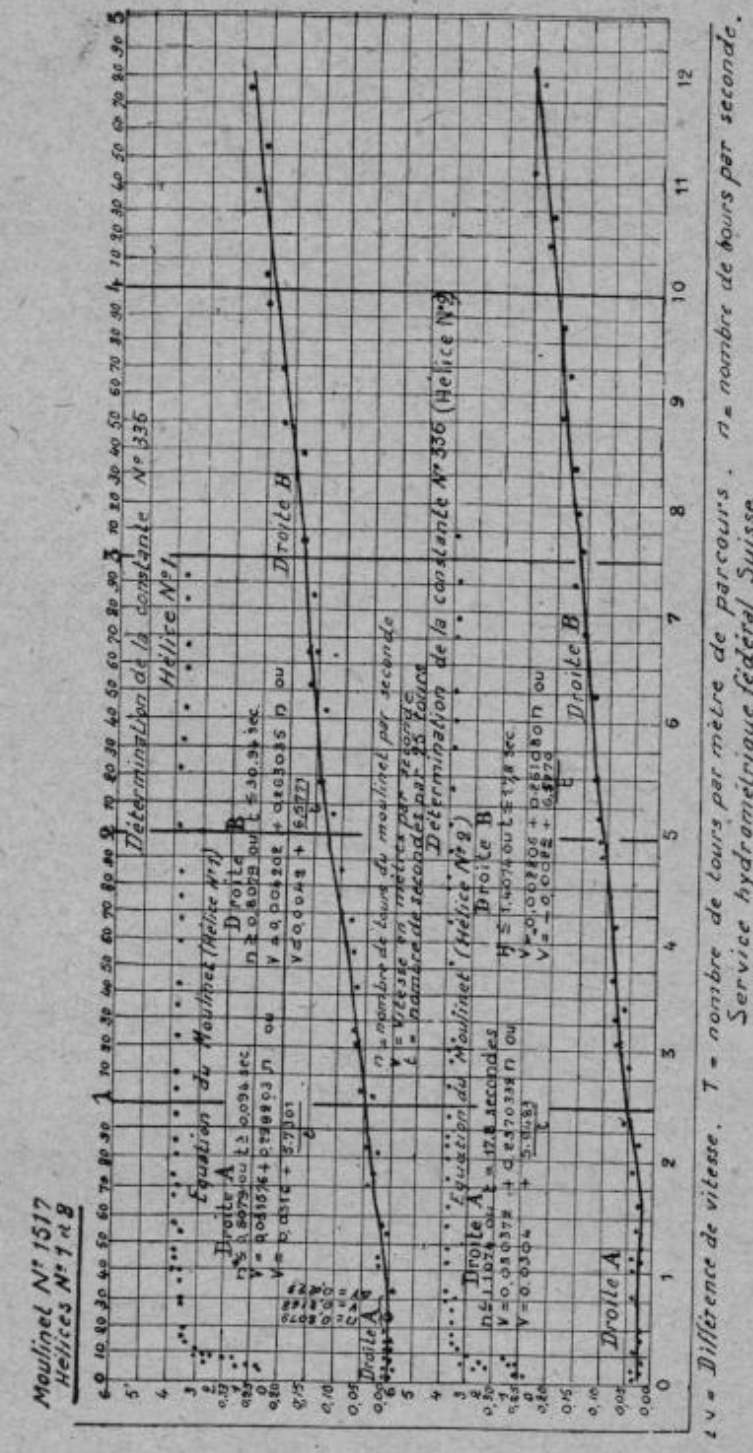
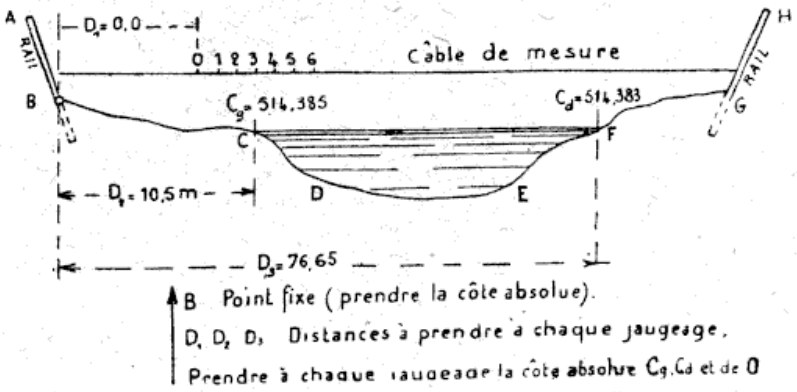


FIG. 133.

Le Bureau hydrométrique fédéral suisse s'est surtout appliqué à construire les moulinets et les pièces accessoires de manière à supprimer, si possible, toute cause de perturbation dans le mouvement de rotation des hélices et il est ainsi parvenu à réduire la dérivation de la courbe dans une mesure telle que cette irrégularité est devenue à peine visible. Dans la règle, le Bureau hydrométrique fédéral se contente de compenser chaque fois la série des points obtenus par un certain nombre de droites formant une ligne brisée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par la méthode des moindres carrés. Si la série des points n'accuse pas une déviation très prononcée, anomalie qui ne se produit guère quand on fait usage de moulinets bien construits et ajustés à des tiges ovalisées de faible diamètre, on se tire d'affaire, dans la pratique, aussi bien à l'aide de deux droites qu'au moyen d'une courbe du deuxième degré ou d'un degré supérieur.



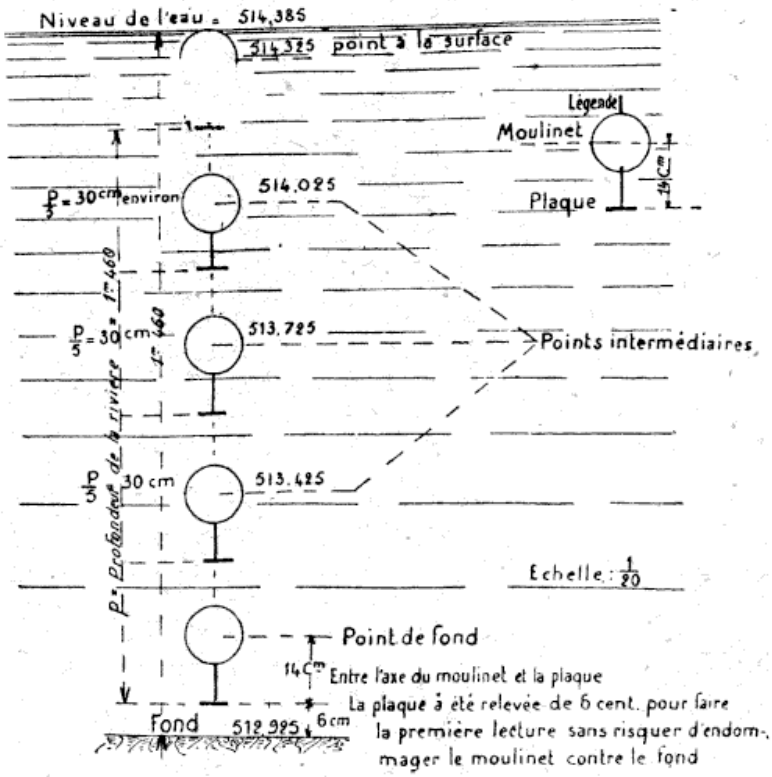


FIG. 139.

Nous donnons ci-après les prescriptions qui ont été suivies dans les jaugeages par moulinets électriques par le Service des Forces hydrauliques du Bas-Congo, marquant les derniers perfectionnements usités dans ce genre d'opérations (année 1910-1911).

A. On installait pour faciliter les opérations du jaugeage, un câble de mesure divisé en mètres et en décimètres, exactement dans la section de jaugeage et deux autres câbles pour les manœuvres à 2 mètres en amont et en aval. Ces deux derniers câbles servaient à la manœuvre du ponton sur lequel était installé le moulinet. Le câble taré servait de mesure pour repérer les verticales dans lesquelles on observait les vitesses. Les barques formant ponton pour la manœuvre des moulinets étaient écartées d'au moins deux mètres pour éviter les remous occasionnant des variations dans la vitesse du courant.

B. La première opération consistait à faire un relevé complet de la section de la rivière à l'emplacement du jaugeage. On comprenait dans la sec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion toute la partie de la vallée qui pouvait être occupée par les eaux au moment des plus fortes crues. La partie mouillée était relevée, à l'aide de la tige du moulinet, en prenant un point tous les 50 centimètres, autant que possible ; la partie non mouillée était relevée au niveau et à la mire. On indiquait, au cours de ce relevé, la position exacte des clous C*g* et C*d*, dont il va être parlé plus loin, la position du câble de mesure, du point fixe B et du zéro du câble (*fig.* 139). Au cours du relevé de la section, on s'assurait exactement du contact de la plaque terminant la tige du moulinet vers le bas, avec le fond de la rivière, car parfois la tige se cale en donnant l'impression d'être arrivée au fond. Le relevé de la section, tout au moins pour la partie mouillée, devait être fait, avant chaque jaugeage, pour s'assurer qu'aucun changement possible n'était survenu dans le lit de la rivière.

C. Avant de commencer le jaugeage (au besoin la veille), on établissait sur chaque rive les piquets A, B, C, D, E. Après avoir établi la côte absolue des clous des piquets, on pouvait déterminer la pente superficielle de l'eau à la rive gauche et à la rive droite ainsi que la pente transversale dans la section de jaugeage, en mesurant la distance de l'eau aux clous précités. Pour établir cette cote, on établissait un parcours de nivellement en partant des points de repère scellés. Ce parcours se faisait en double, c'est-à-dire qu'à la première station, après avoir visé successivement la mire sur le repère scellé et sur le premier clou, ou sur un point intermédiaire, on déplaçait un peu le niveau et l'ayant remis en station, on revisait une seconde fois la mire placée sur les deux mêmes points. En continuant de la sorte, on exécutait en une fois un nivellement double qui permettait de calculer les moyennes pour chaque point. Pour se mettre à l'abri d'une légère crue, on plaçait les clous à environ 50 centimètres au maximum au-dessus du niveau des eaux. On a reconnu prudent de placer immédiatement des piquets pour les niveaux supérieurs, de façon à n'avoir qu'à clouer et niveler les clous au moment des jaugeages futurs.

D. Chaque fois, avant de commencer un jaugeage, on faisait un cheminement aux piquets sur chaque rive de A vers E et retour en indiquant sur la carte les distances observées en millimètres entre l'eau et les faces supérieures des clous. Au cours de ce cheminement, on avait grand soin de faire une lecture au limnimètre.

E. Le jaugeage proprement dit était exécuté sans arrêt, à moins de circonstances exceptionnelles. Il était pratiqué un jaugeage chaque fois que le niveau avait varié suffisamment ou que le temps le permettait. Suivant la nature du fond et pour ne pas endommager le moulinet, on plaçait l'axe de celui-ci à 10 ou 15 centimètres de la plaque d'appui qui termine la tige vers le bas. Cette distance était, à chaque jaugeage, renseignée dans la colonne « Remarques et croquis » (voir tableau ci-après). Pour le numérotage des verticales où doivent se faire les observations de vitesses du cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rant, on commençait par la rive gauche. L'écartement des verticales était fixé théoriquement à 1/20 de la largeur totale de l'eau pour les rivières de 40 mètres et plus, au 1/15 pour les rivières de 15 à 40 mètres et au 1/10 pour celles de moins de 15 mètres. On ne devait prendre, comme distances entre les verticales, que des multiples de $0^m,50$ et ne jamais opérer que dans les verticales qui avaient été mesurées lors du relevé de la section (voir paragraphe B). Enfin les verticales du bord devaient toujours être plus rapprochées que celles du milieu.

F. Pour chaque verticale on opérait comme suit : on commençait par placer la plaque inférieure de la tige du moulinet à fleur d'eau, on lisait le nombre sur la tige et on l'inscrivait dans la colonne « lecture à la tige ». L'exemple suivant montre bien comment on opérait. Soit 473, le nombre inscrit ; on enfonce la tige du moulinet jusqu'à ce que la plaque touche le fond de la rivière et on inscrit toujours dans la même colonne le nombre lu à la tige, soit par exemple 327. La différence (473 — 327) ou $1^m,46$ donne la profondeur de la rivière. On divise cette cote de profondeur par cinq pour obtenir approximativement l'intervalle devant exister entre les points où la vitesse est observée sur la verticale. Dans ce cas, on obtient 30 centimètres pour chaque relèvement du moulinet. L'observation du point le plus bas (point du fond) se fait, la tige ayant été relevée de quelques centimètres, pour se mettre à l'abri des chocs. Ainsi dans l'exemple précité, si on relève la tige du moulinet de 6 centimètres, on doit lire sur la tige $327 + 6 = 333$.

On commençait alors une observation de vitesse en ce point. On inscrivait dans la colonne « signal électrique » le nombre de secondes mis par le moulinet pour faire vingt-cinq, cinquante ou cent tours, suivant le cas. On observait pendant une minute au moins pour obtenir une valeur moyenne en ce point. Pour passer directement au point intermédiaire directement supérieur, on avait soin de placer à l'avance une fiche dans la tige à la distance voulue (dans notre exemple 30 centimètres) ; puis on ordonnait, sitôt la sonnerie arrêtée, à l'observateur tenant la tige du moulinet, de la relever vivement. De cette façon on pouvait continuer les observations aux points supérieurs sans arrêts. On opérait ainsi successivement, en quatre ou cinq points, jusqu'au moment où il n'était plus possible de relever le moulinet de la même quantité que précédemment. On plaçait alors le moulinet affleurant par son arête supérieure et l'on observait ainsi la vitesse à la surface. On en finissait avec les observations pour une verticale, en ramenant la plaque à fleur d'eau et en relisant le nombre correspondant à la tige. On inscrivait ce nombre dans la colonne « lecture à la tige » et l'on s'assurait ainsi que rien d'anormal n'était venu troubler les opérations.

G. On terminait le jaugeage ou la moitié du jaugeage, si celui-ci avait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

JAUGEAGE AU MOULINET ÉLECTRIQUE (Carnet de jaugeage employé au service des forces hydrauliques du Bas Congo)

Rivière Inkisi — Profil de jaugeage n° 25. — Moulinet n° 1409 (Hélice n° 1) — Date : 14 septembre 1911.

HAUTEUR DE L'EAU Cg = 51, 385	HAUTEUR DE L'EAU Cd = 51483	HEURE du commencement et de la fin de la mesure	VERTICALES	LECTURE A LA TIGE	SIGNAL ÉLECTRIQUE après chaque 25 tours de l'hélice — LECTURE AU CHRONOMÈTRE et différence t entre ces lectures	$\Sigma(t)$	NOMBRE de t	MOYENNE des t	VITESSE v	HAUTEUR ABSOLUE de l'axe du moulinet	DISTANCE ENTRE L'AXE et l'arête inférieure du moulinet = 0m,059 — REMARQUES ET CROQUIS
			18	473	Plaque à la surface						
				327	Plaque au fond					592.925	L'axe du moulinet est fixé à 14cm au-dessus de la plaque du fond
		8h14′			10 — 25 — 38 — 52 — 07 — 21						Fond à 8 heures :
				333	15 13 14 15 14	71	5	14.2	0.468	513.125	hauteur limnimétrique = 514,377
					34 — 45 — 58 — 09 — 22						température de l'air = 20° C.
				363	13 11 13 11 13	61	5	12.2	0.544	513.425	— de l'eau = 23° C.
					34 — 44 — 55 — 06 — 16						
				393	12 10 11 11 10	54	5	10.8	0.613	513.725	p = profondeur = 1m,460.
					26 — 36 — 45 — 54 — 05						
				423	10 10 9 9 11	49	5	9.8	0.675	514.025	Contrôle { 8h 18′ 54″ / 8h 14′ 10″ / 4′ 44″ = 284″
					14 — 24 — 34 — 44 — 54						
				453	9 10 10 10 10	49	5	9 8	0.675	514.325	
			21	473	Plaque à la surface	284					
				473	Plaque à la surface					514.385	(Surface à 11 heures :)
		8h20′		332	Plaque au fond						hauteur limnimétrique = 514,375
					13 — 28 — 43 — 57 — 11 — 24						température de l'air = 26° C.
				333	15 15 14 14 13	71	5	14.2	0.468	512.875	— de l'eau = 23° 25 C.
					36 — 47 — 58 — 09 — 20					513.125	
				363	12 11 11 11 11	56	5	11.2	0.590	513.425	Fond
					30 — 38 — 47 — 57 — 07						hauteur limnimétrique moyenne = 514,376
		8h24′		393	10 8 9 10 10	47	5	9.4	0.703	513.725	
					16 — 25 — 34 — 43 — 52						p = 1m,410
				423	9 9 9 9 9	45	5	9.0	0.734	514.025	
					01 — 10 — 19 — 28 — 36,5						Contrôle { 8h 24′ 36″ 5 / 8h 20′ 13″ 0 / 4′ 23″ 5 = 263″,5
				453	9 9 9 9 8,5	44.5	5	8.9	0.742	514.325	
				473	Plaque à la surface	263.5				514.385	Surface

Courbe A : $v = 0{,}0254 + \frac{5.809.500}{t}$ pour $t \geq 43{,}18$ sec. — Courbe B : $v = 0{,}0087 + \frac{6.529.250}{t}$ pour $t \leq 43{,}18$ sec.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dû être interrompu, par un cheminement aux piquets le long de chaque rive donnant les renseignements demandés par la carte.

H. Après chacun des jaugeages, on prenait des échantillons de l'eau à une distance suffisante des rives du fond, lesquels étaient dans des bouteilles de verre blanc transparent, soigneusement bouchées. Cette question, qui n'a pas une importance capitale pour l'utilisation proprement dite des forces hydrauliques, et qui, pour les basses chutes, peut même parfois être négligée, acquiert cependant une grande importance pour les hautes chutes par l'usure anormale qu'elle provoque dans les conduites sous pression et dans les turbines. Ainsi que nous le signalerons plus loin, deux sortes d'usure bien distinctes sont facilement reconnaissables. La première est une usure purement mécanique, due au frottement du sable entraîné. La seconde provient d'action chimique ; elle est due à l'oxygène de l'air contenu dans l'eau et elle se reconnaît à la sodification de certaines parties des turbines, notamment des aubes, qui prennent un aspect spongieux. Il arrive parfois que l'usure est tellement rapide que les roues des turbines doivent être changées chaque année.

I. Enfin on procédait aux observations thermométriques et renseignements divers suivants : température de l'eau (T*e*) ; température de l'air (T*a*) ; état des rives (roches, gravier, sable, argile, etc.) ; état du fond ; remarques sur le transport des galets, état de l'eau, état atmosphérique, etc. (1).

56. Détermination et calcul des pentes superficielles et des courbes de débit. — Cette opération est en général difficile à effectuer ; même dans des cours d'eau à pente régulière, on rencontre des complications en dépouillant les données du levé. En combinant les cotes absolues des clous et les ordonnées lues au piquet, on obtient les cotes absolues de l'eau aux points ABCDE et où on peut dessiner les croquis des pentes entre ces points. Par la méthode des moindres carrés on peut établir pour chaque croquis l'équation de la droite répondant le mieux aux cinq points de cotes absolues (ABCDE) ; la pente superficielle correspondante a été ainsi obtenue où n et v sont, dans l'application de la méthode des moindres carrés, les coordonnées des cinq points de cotes absolues de l'eau correspondant aux cinq points ABCDE (*fig.* 140 et 141).

La pente superficielle moyenne de l'eau sur chaque rive a été obtenue

(1) Des jaugeages effectués sur l'Elbe (1883-1886) ont démontré que le coefficient de rugosité n n'est pas constant ; il varie non seulement sur tout le parcours du fleuve mais aussi dans une même section de jaugeage. On a trouvé pour l'Elbe, des valeurs variant entre 0,021 et 0,30, suivant augmentation de la pente et de la profondeur dans le profil. On a toutefois montré que le coefficient de rugosité allait en diminuant de la source à l'embouchure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en calculant par la méthode des moindres carrés l'équation de la droite

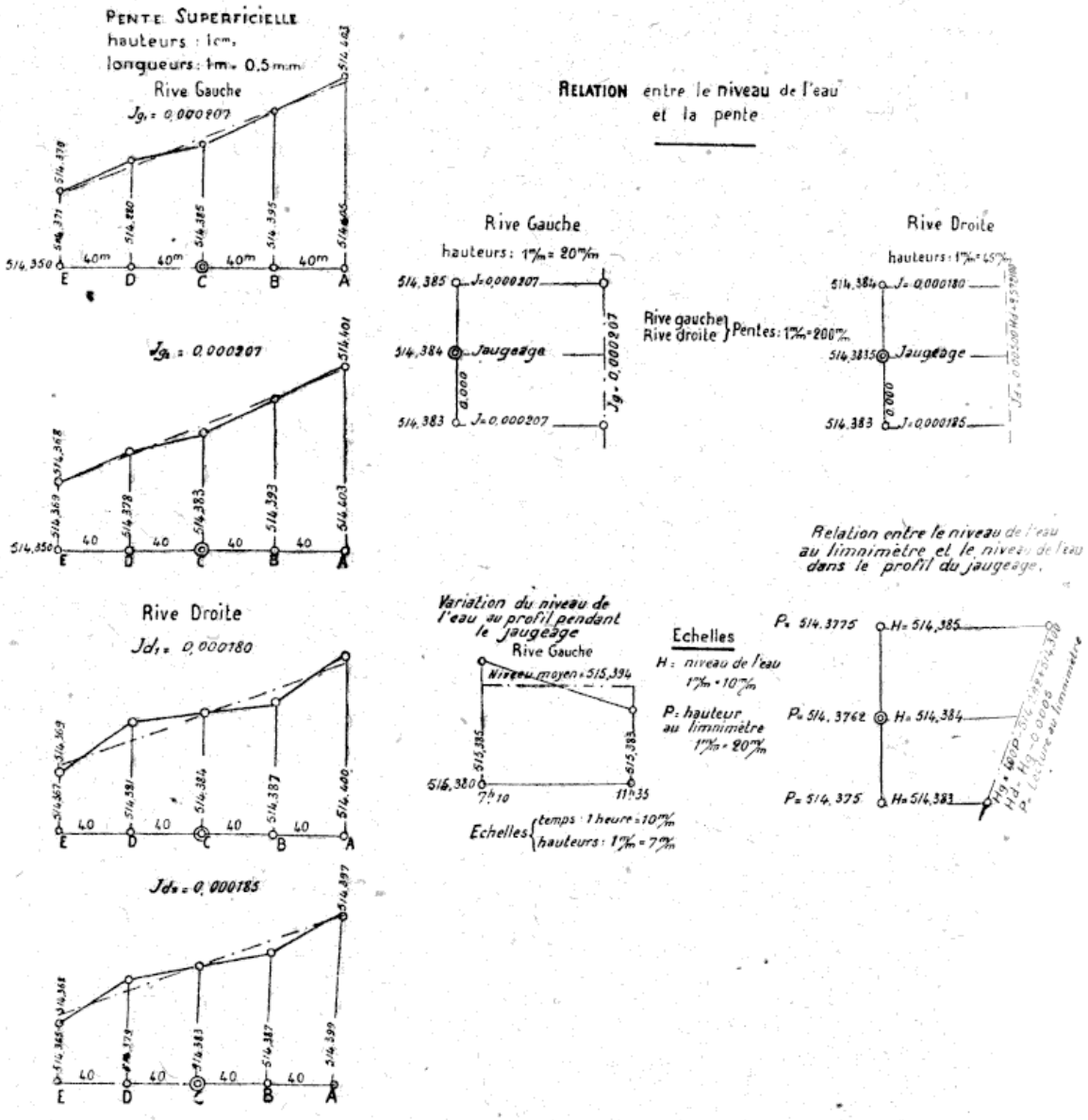


FIG. 140. — Calcul des pentes.

donnant la relation entre le niveau de l'eau et la pente (voir tableaux III,

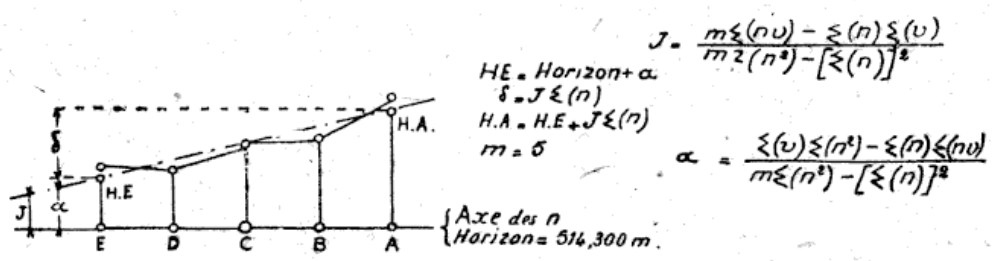


FIG. 141. — Calcul des pentes.

IV, V et VI) et, en introduisant dans cette équation la valeur moyenne du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

niveau de l'eau, on détermine la pente moyenne correspondante. Pour avoir la pente superficielle moyenne du cours d'eau il suffit de prendre la moyenne arithmétique des deux pentes superficielles moyennes, rive gauche et rive droite, ainsi calculées.

Toujours par la méthode des moindres carrés on obtient la relation existant entre le niveau de l'eau au limnimètre et le niveau de l'eau dans le profil de jaugeage.

Le coefficient de rugosité n et la constante c se déterminent par la formule de Ganguillet et Kutter.

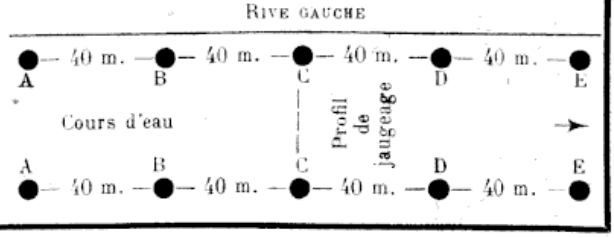
Le tableau VII réunit tous les résultats du jaugeage n° 25 pris comme exemple.

TABLEAU III. — **Calcul des pentes.**

R. INKISI — Mesure des pentes relatives superficielles de l'eau (année 1911) — Jaugeage 25

DATE		Avant midi ou après-midi	Rive gauche ou rive droite	Heure	Minute	ORDONNÉES AVEC PIQUETS							Hauteur limnimétrique		
MOIS	JOUR					AMONT	A	B	C	D	E	AVAL	OBSERVATION	HEURE	MINUTE
Septembre	Jeudi 14	Avant midi	Rive droite	7	10	→ commencement	0.450	0.658	0.375	0.505	1.316	→		7	19
				7	25	← Fin	0.450	0.659	0.375	0.503	1.316	←		7	19
Septembre	Jeudi 14	Avant midi	Rive gauche	7	30	→	0.225	0.665	0.445	0.718	0.415	→	514.3375	7	37
				7	44	←	0.237	0.665	0.447	0.718	0.415	←		7	37
Septembre	Jeudi 14	Avant midi	Rive droite	11	05	→	0.451	0.659	0.376	0.506	1.317	→		11	12
				11	18	←	0.451	0.659	0.376	0.506	1.317	←		11	12
Septembre	Jeudi 14	Avant midi	Rive gauche	11	24	→	0.238	0.667	0.448	0.720	0.417	→	514.375	11	30
				11	35	←	0.238	0.667	0.448	0.720	0.417	←	514.375	11	30

OBSERVATIONS



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU IV

Calcul des cotes absolues de l'eau aux points ABCDE sur les rives gauche et droite.

R. INKISI. Profil jaugeage 25.

NUMÉRO DE LA PENTE	DATE MOIS	DATE JOURS	DATE HEURES	DATE MINUTES	NIVEAUX DES CLOUS ET ORDONNÉES AUX PIQUETS					HAUTEUR LIMNIMÉTRIQUE OBSERVÉES m.	OBSERVÉES cm.	HEURES	MINUTES	
					Ed	Dd	Cd	Bd	Ad					
					515,683	514,885	514,759	515,046	514,850					
1	IX	14	7	19	1,316	0,504	0,375	0,6585	0,450	—	—	7	10	Rive droite
			7	19	514,367	514,381	514,387	514,387	514,400	—	—	7	25	
2	IX	14	11	12	1,317	0,506	0,376	0,659	0,451	—	—	11	05	Rive droite
			11	12	514,366	514,379	514,383	514,387	514,399	—	—	11	18	
					Eg	Dg	Cg	Bg	Ag					
					514,786	515,098	514,831	515,060	514,641					
1	IX	14	7	37	0,415	0,718	0,446	0,665	0,236	—	—	7	30	Rive gauche
			7	37	514,371	514,380	514,385	514,395	514,405	514	377	7	44	
2	IX	14	11	30	0,417	0,720	0,448.	0,667	0,238	—	—	11	24	Rive gauche
			11	30	514,369	514,378	514,383	514,393	514,403	514	375	11	35	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU V. — CALCUL DES PENTES

Rivière INKISI. Date : 14 Septembre 1911 Jaugeage : 25

AU COMMENCEMENT DU JAUGEAGE

RIVE GAUCHE

PIQUETS	DISTANCE	HAUTEUR DE L'EAU	n	v	nv	n^2
E	40	514.371	0	0.071	0.000	0
D	40	514.380	1	0.080	0.080	1
C	40	514.385	2	0.085	0.170	4
B	40	514.395	3	0.095	0.285	9
A		514.405	4	0.105	0.420	16
Σ	160		10	0.436	0.955	30

$\Sigma(v)\Sigma(n^2) = 13.08$
$\Sigma(n)\Sigma(nv) = 9.55$ $J_1 = 0{,}000207$
$= 3.53$
$m\Sigma(nv) = 4.775$ HE = 514.3706
$\Sigma(n)\Sigma(v) = 4.360$
$= 0.415 : (50\times04)$ $\delta = 0.0331$
$m\Sigma(n^2) = 150$
$[\Sigma(n)]^2 = 100$ HA = 514.4037
$= 50$
$\alpha = 0.0706$

RIVE DROITE

PIQUETS	DISTANCE	HAUTEUR DE L'EAU	n	v	nv	n^2
E	40	514.367	0	0.067	0.000	0
D	40	514.381	1	0.081	0.081	1
C	40	514.384	2	0.084	0.168	4
B	40	514.387	3	0.087	0.261	9
A		514.400	4	0.100	0.400	16
Σ	160		10	0.419	0.910	30

$\Sigma(v)\Sigma(n^2) = 12.57$
$\Sigma(n)\Sigma(nv) = 9.10$ $J_1 = 0{,}000{,}180$
$= 3.47$
$m\Sigma(nv) = 4.550$ HE = 514.3694
$\Sigma(n)\Sigma(v) = 4.190$
$= 0.360 : 50\times40)$ $\delta = 0.0288$
$m\Sigma(n^2) = 150$
$[\Sigma(n)]^2 = 100$ HA = 514.3982
$= 50$
$\alpha = 0.0694$

A LA FIN DU JAUGEAGE

RIVE GAUCHE

PIQUETS	DISTANCE	HAUTEUR DE L'EAU	n	v	nv	n^2
E	40	514.369	0	0.069	0.000	0
D	40	514.378	1	0.078	0.078	1
C	40	514.383	2	0.083	0.166	4
B	40	514.393	3	0.093	0.279	9
A		514.403	4	0 103	0.412	16
Σ	160		10	0.426	0.935	30

$\Sigma(v)\Sigma(n)^2 = 12.78$
$\Sigma(n)\Sigma(nv) = 9.35$ $J_2 = 0{,}000207$
$= 3.43$
$m\Sigma(nv) = 4.675$ HE = 514.3686
$\Sigma(n)\Sigma(v) = 4.260$
$= 0.415 : (50\times40)$ $\delta = 0.0331$
$m\Sigma(n^2) = 150$
$[\Sigma(n)]^2 = 100$ HA = 514.4017
$= 50$
$\alpha = 0.0686$

RIVE DROITE

PIQUETS	DISTANCE	HAUTEUR DE L'EAU	n	v	nv	n^2
E	40	514.366	0	0.066	0.000	0
D	40	514.379	1	0.079	0.079	1
C	40	514.383	2	0.083	0.166	4
B	40	514.387	3	0.087	0.261	9
A		514.399	4	0.099	0.396	16
Σ	160		10	0.414	0.902	30

$\Sigma(v)\Sigma(n^2) = 12.42$
$\Sigma(n)\Sigma(nv) = 9.02$ $J_2 = 0{,}000185$
$= 3.40$
$m\Sigma(nv) = 4.510$ HE = 514.3680
$\Sigma(n)\Sigma(v) = 4.140$
$= 0.370 : (50\times40)$ $\delta = 0.0296$
$m\Sigma(n^2) = 150$
$[\Sigma(n)]^2 = 100$ HA = 514.3976
$= 50$
$\alpha = 0.0680$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU VI. — CALCUL DE LA PENTE MOYENNE DE L'EAU J

(En utilisant la relation entre le niveau de l'eau dans la section de jaugeage et la pente (1). Relation entre la hauteur de l'eau H dans le profil de jaugeage et la hauteur au limnimètre P (2).

Rivière INKISI — Date : 14 Novembre 1911 — Jaugeage 25

HAUTEUR AU LIMNIMÈTRE P	NIVEAU DE L'EAU H	PENTE J	n	v	nv	n^2	
Rive gauche	514.383	0.000207	0.083	0.000207	0.000017181	0.006889	
	514.385	0.000207	0.085	0.000207	0.000017595	0.007225	
		Σ	0.168	0.000414	0.000034776	0.014114	1
Rive droite	514.383	0.000185	0.083	0.000185	0.000015355	0.006889	
	514.384	0.000180	0.084	0.000180	0.000015120	0.007056	
		Σ	0.167	0.000360	0.000030475	0.013945	
Rive gauche							
514.3775	514.385		0.077	0.085	0.006545	0.005929	
514.375	514.383		0.075	0.083	0.006225	0.005625	
514.3762	514.384		0.076	0.081	0.006334	0.005776	2
		Σ	0.228	0.252	0.019154	0.017330	

		1		2
		Rive gauche	Rive droite	Limnimètre
$\Sigma(v)\Sigma(n^2)$	=	0.000005843196	0.000005089925	0.00436716
$-\Sigma(n)\Sigma(nv)$	=	0.000005842368	0.000005089325	0.00436711
	=	0.000000000828	0.000000000600	0.00000005
$m\Sigma(nv)$	=	0.000069552	0.000060950	0.057462
$-\Sigma(n)\Sigma(v)$	=	0.000069552	0.000060955	0.057456
	=	0.000000000	0.000000005	0.000006
$m\Sigma(n^2)$	=	0.028228	0.027890	0.051990
$-[\Sigma(n)]^2$	=	0.028224	0.027889	0.051984
	=	0.000004	0.000001	0.000006

	1		2
	J Gauche	J Droite	Limnimètre
$\alpha = \frac{\Sigma(v)\Sigma(n^2) - \Sigma(n)\Sigma(nv)}{m\Sigma(n^2) - [\Sigma(n)]^2}$	= 0.000207	0.000600	0.00833
$\beta = \frac{m\Sigma(nv) - \Sigma(n)\Sigma(v)}{m\Sigma(n^2) - [\Sigma(n)]^2}$	= 0.000000	— 0.00500	1.00 00

1		2	
$n = Hg - 514.300$	$Hd - 514.300$	$P - 514.300$	m = Nombre des observations.
$v = 0.000207$	0.000182	514.384	$v = \alpha + \beta n$.

	1			2		
Rive gauche	H = 514.383	H = 514.385	H = 514.384	Limnimètre P		
	0.000207	0.000207	0.000207	514.377	514.375	514.376
	H = 514.383	H = 514.384	H = 514.3835	514.377	514.375	514.376
Rive droite				514.292	514.292	514.292
	2.572100	2.572100	2.572100	0.085	0.083	0.084
	2.571915	2.571920	2.5719175	514.300	514.300	514.300
	0.000185	0.000180	0.0001825	514.385	514.383	514.384

$Jg = 0.000207$

$$Jd = 0.000600 - 0.00500\ Hd + 2.571500 = -0.00500\ Hd + 2.572100 \quad (1)$$

$$\text{Limnimètre } P = 0.00833 + 1.0000\ (P - 514.300) + 514.300 = 1.000\ P - 514.292 + 514.300 \quad (2)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU VII

Jaugeage 25

RÉSULTATS DU JAUGEAGE

1. Appareil employé pour le jaugeage	Moulinet électrique Ott n° 1409 Hélice I
2. Date du jaugeage	D = 14 (9) 1911
3. Durée de jaugeage de 7 h. 10 à 11 h. 35	d = 4 h. 25 m.
4. Variation du niveau de l'eau pendant le jaugeage sur la rive gauche du profil de jaugeage	$\Delta\, hg$ = 0,002 m.
5. Cote du niveau moyen de l'eau sur la rive gauche du profil de jaugeage	hg = 514,384 m.
6. Variation du niveau de l'eau pendant le jaugeage, sur la rive droite du profil de jaugeage	$\Delta\, hd$ = 0,001 m.
7. Cote du niveau moyen de l'eau sur la rive droite du profil de jaugeage	hd = 514,3835 m.
8. Cote du niveau moyen de l'eau	H = 514,384 m.
9. Hauteur correspondante de l'eau au limnimètre à 50 mètres en aval du profil de jaugeage	P = 514,376 m.
10. Largeur superficielle de l'eau dans le profil de jaugeage	L = 66,15 m.
11. Profondeur maxima de l'eau dans le profil de jaugeage	l_{max} = 2,092 m.
12. Surface de la section du profil de jaugeage	F* = 101.570 m².
13. Débit par seconde	Q = 62,292 m³/s.
14. Vitesse maxima dans le profil de jaugeage	V_{max} = 0,805 m.
15. Vitesse moyenne dans le profil de jaugeage $V_m = \frac{Q}{F^*}$	V_m = 0,613 m.
16. Rapport entre la vitesse moyenne et la vitesse maxima	$\frac{V_m}{V_{max}}$ = 0,761
17. Moyenne des rapports $\frac{V_m}{V_0}$ Pour les ordonnées 15,0 — 75,0, d'après la formule : $e = \frac{\Sigma\left[f\,\frac{V_m}{V_0}\right]}{\Sigma\,[f]}$ déterminée le 14 septembre 1911	e = 0,877
18. Périmètre mouillé du profil de jaugeage	p = 67,075 m.
19. Rayon moyen du profil de jaugeage $R = \frac{F^*}{P}$	R = 1,514 m.
20. Pente relative superficielle de l'eau, sur la rive gauche sur une distance de 80 mètres en amont et 80 mètres en aval du profil de jaugeage	Jg = 0,000207
21. Pente relative superficielle de l'eau, sur la rive droite, à une distance de 80 mètres en amont et 80 mètres en aval du profil de jaugeage	Jd = 0,0001825
22. Pente relative superficielle de l'eau à la surface = J $\frac{Jg + Jd}{2}$	J = 0,000195
23. Coefficient C. [Calculé d'après la formule $V_m = C\sqrt{RJ}$]	C = 35,681024
24. Coefficient de rugosité n (calculé d'après la formule de Ganguillet et Rutter : $c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{J}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}}$	n = 0,0308533
25. Température moyenne de l'eau	Te = 23° C.
26. Température moyenne de l'air	Ta = 20° C.
27. État de la rive gauche : matériel 28. État de la rive droite : matériel } sable argileux. Inclinaison 29. État de fond »	ag = 1 : 2
30. Remarques sur le transport de galets, état de l'eau, état atmosphérique	ad = 1 : 1

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU VIII. — **CALCUL DE L'ÉQUATION DE LA COURBE DES DÉBITS**

(d'après la méthode des moindres carrés avec l'application de la formule spéciale $Q - Q_1 = b\,(P - P_1) + c\,(P - P_1)^2$

Rivière INKISI

	HAUTEURS limnimétriques p	DÉBITS m^3 a	n	v	nv	n^2	n^2v	n^3	n^4	OBSERVATION
	514.376	62.292	—	—	—	—	—	—	—	L'équation de la courbe des débits est calculée comme parabole passant par le point le plus bas :
1	514.501	71.935	0.125	9.643	1.2054	0.0156	0.1504	0.0019	0.0002	
2	514.565	75.606	0.189	13.314	2.5163	0.0357	0.4753	0.0067	0.0012	$(P_1 = 514.376$ m ; $Q = 62.292\,m^3)$.
3	514.666	84.002	0.290	21.710	6.2959	0.0841	1.8258	0.0244	0.0070	
4	514.857	96.426	0.481	34.134	16.4184	0.2313	7.8952	0.1112	0.0534	L'équation de cette parabole est :
5	514.985	100.606	0.609	38.314	23.3332	0.3709	14.2106	0.2259	0.1376	$Q - Q_1 = b\,(P - P_1) + c\,(P - P_1)^2$.
6	515.180	116 848	0.804	54.556	43.8630	0.6464	35.2650	0.5197	0.4178	Les 11 jaugeages restants sont à compenser d'après la méthode des moindres carrés. On fait :
7	515 511	154.291	1.135	91.996	104.4189	1.2882	118 5131	1.4621	1.6595	$Q - Q_1 = v$; $P - P_1 = n$,
8	515.885	195.193	1.509	132.901	200 5476	2.2770	302.6156	3.4360	5.1849	
9	516.096	218.054	1.720	155.762	267.9106	2.9584	460.8063	5.0884	8.7520	de façon que l'équation prenne la forme :
10	516.344	269.711	2.168	207.419	449.6843	4.7002	974.9108	10.1900	22.0919	
11	516.994	287.900	2.318	225.708	523.1911	5.3731	1212.7516	12.4548	28.8702	$v = \beta n + \lambda n^2$
	$m = 11$	Σ	11.348	985.460	1639.3847	17 9809	3129.4197	33.5211	87.1757	β et λ étant dans ce cas identiques avec cb et c.

$$\lambda = \frac{\Sigma[n^2v]\,\Sigma[n^2] - \Sigma[nv]\,\Sigma[n^3]}{\Sigma[n^2]\,\Sigma[n^4] - (\Sigma[n^3])^2} = \frac{1315.8043}{84.2154} = 15.624$$

$$\beta = \frac{\Sigma[nv]\,\Sigma[n^4] - \Sigma[n^2v]\,\Sigma[n^3]}{\Sigma[n^2]\,\Sigma[n^4] - (\Sigma[n^3])^2} = \frac{5225.2241}{84.2154} = 62.046$$

$\Sigma[n^2v]\,\Sigma[n^2]$	= 56269.7827	$\Sigma[n^2]\,\Sigma[n^4]$	= 1207,8795	$\Sigma[nv]\,\Sigma[n^4]$	= 110126.8148
$\Sigma[nv]\,[n^3]$	= 54953.9784	$(\Sigma[n^3])^2$	= 1123,6641	$\Sigma[n^2v\,\Sigma[n^3]$	= 104901.5907
$\Sigma[n^2v]\,\Sigma[n^2] - \Sigma[nv]\,\Sigma[n^3]$	= 1315.8043	$\Sigma[n^2]\,\Sigma[n^4] - (\Sigma[n^3])^2$	= 84.2154	$\Sigma[n^2v]\,\Sigma[n^4] - \Sigma[nv]\,\Sigma[n^3]$	= 5225.2241

$\Sigma[n^2]\,\Sigma[n^4]$	=	1207,8795
$(\Sigma[n^3])^2$	=	1123.6641
$\Sigma[n^2]\,\Sigma[n^4] - (\Sigma[n^3])^2$	=	84.2154

$v = \beta n + \lambda n^2$ $\qquad$ $Q = 62.292 + 62.046\,(P - 0{,}376) + 15.624\,(P - 0{,}376)^2$ $\qquad$ $n = P - 0{,}376$

$Q = 41.171 + 50.296\,P + 15.624\,P^2$ $\qquad$ $v = Q - 62{,}292$

	CALCUL DE L'ERREUR MOYENNE								OBSERVATION
	P	P^2	41.170 + 50.796 P	15.624 P^2	Q calculé	Q observé	ΔQ	(ΔQ^2)	
	0.376	—	—	—	62.292	62.292	0.000	—	Le jaugeage du niveau le plus bas étant effectué au moulinet donne en général un résultat assez exact.
1	0.501	0.2510	66.368	3.921	71.935	70.289	41.646	2.7093	
2	0.565	0.3192	69.587	4.987	75.606	74.574	41.032	1.0650	
3	0.666	0.4435	74.667	6.929	84.002	81.596	42.406	5.7888	Valeurs moyennes de plusieurs observations.
4	0.857	0.7344	84.273	11.474	96.426	95.747	+ 0.679	0.4610	
5	0.985	0.9702	90.711	15.158	100.606	105.869	— 5.263	27.6991	
6	1.180	1.3924	100.019	21.755	116.848	122.274	— 5.426	29.4414	
7	1.511	2.2830	117.167	35.669	154.291	152.841	+ 1.450	2.1025	
8	1.885	3.5532	135.978	55.515	195.193	191.493	+ 3.700	13.6900	
9	2.096	4.3932	146.590	68.439	218.054	215.229	+ 2.825	7.9806	
10	2.544	6.4719	169.123	101.117	269.711	270.240	— 0.529	0.2798	
11	2.694	7.2576	176.667	113.393	290.060	287.900	— 2.160	4.6656	

m = nombre de jaugeages

u = » d'inconnues

f = erreur moyenne

$$f = \pm\sqrt{\frac{\Sigma[(\Delta Q^2)]}{m - u}} \qquad \Sigma\ 95.8831 \qquad = \pm\sqrt{\frac{95.8831}{11 - 2}} = \pm\ 3.264\ m^3. \qquad \Sigma$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

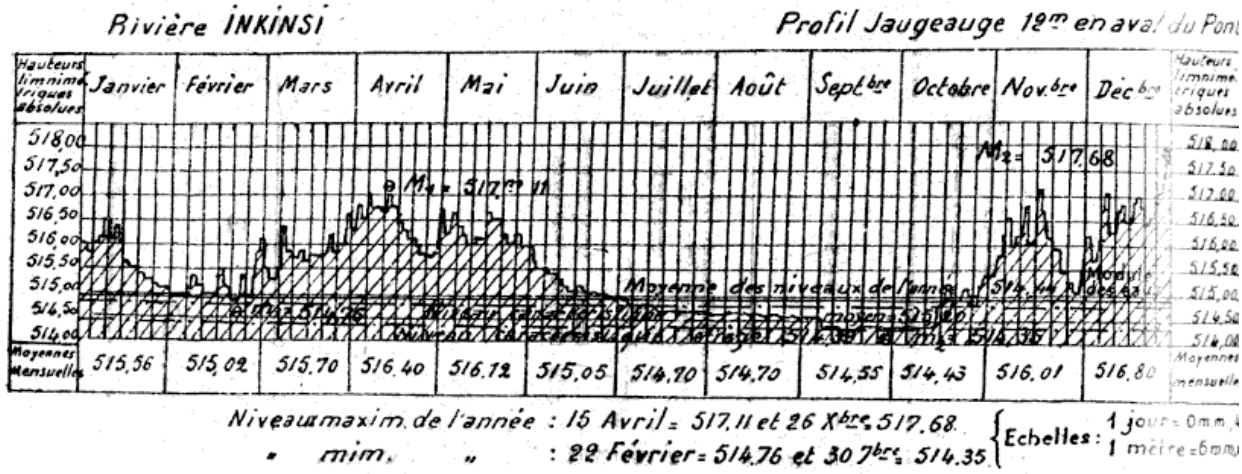


FIG. 142. — Graphique des niveaux journaliers moyens pour l'année 1911.

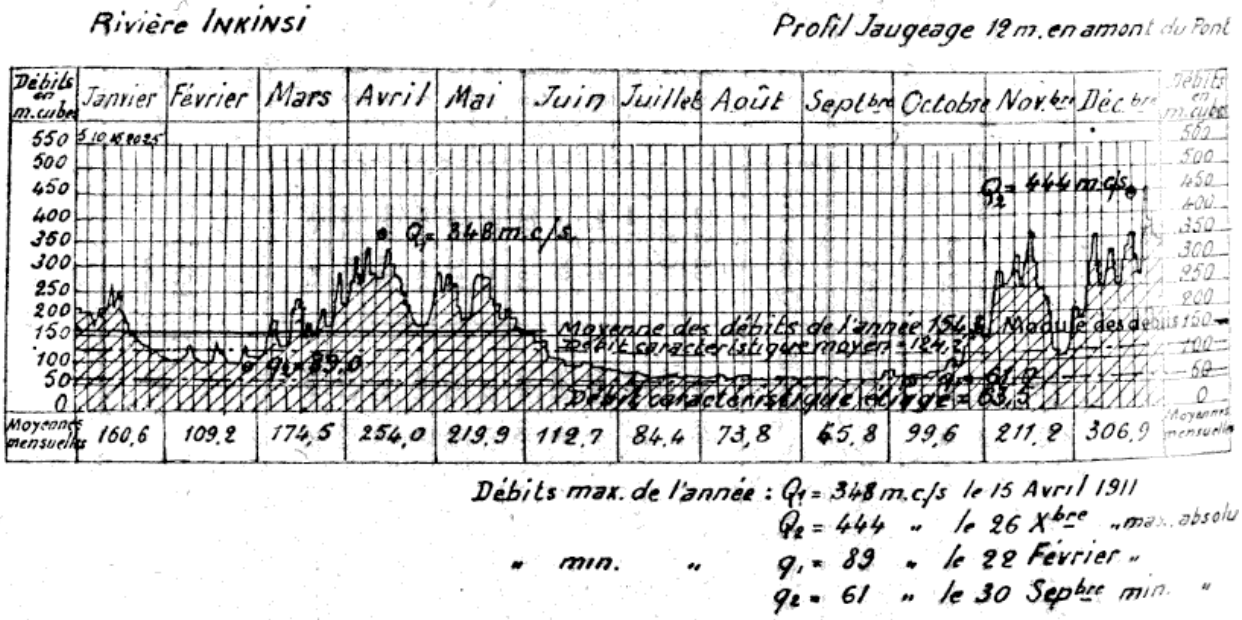


FIG. 143. — Graphique des débits journaliers moyens pour l'année 1911.

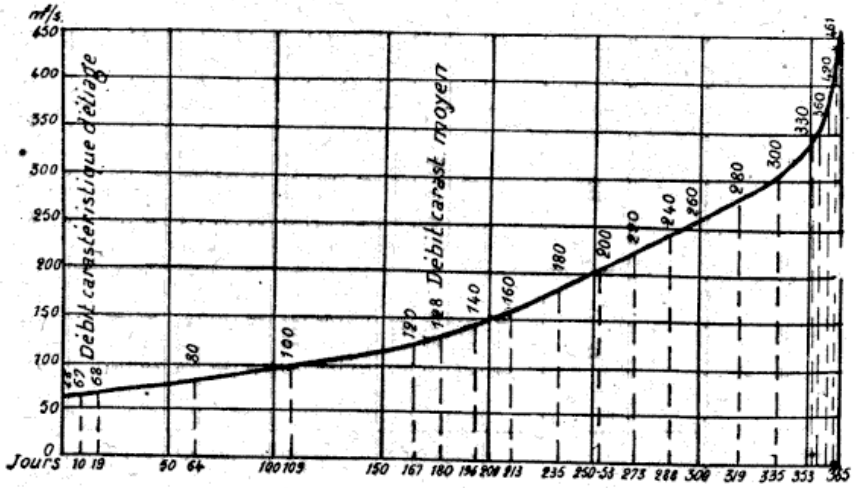


FIG. 144. — Courbe des débits.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

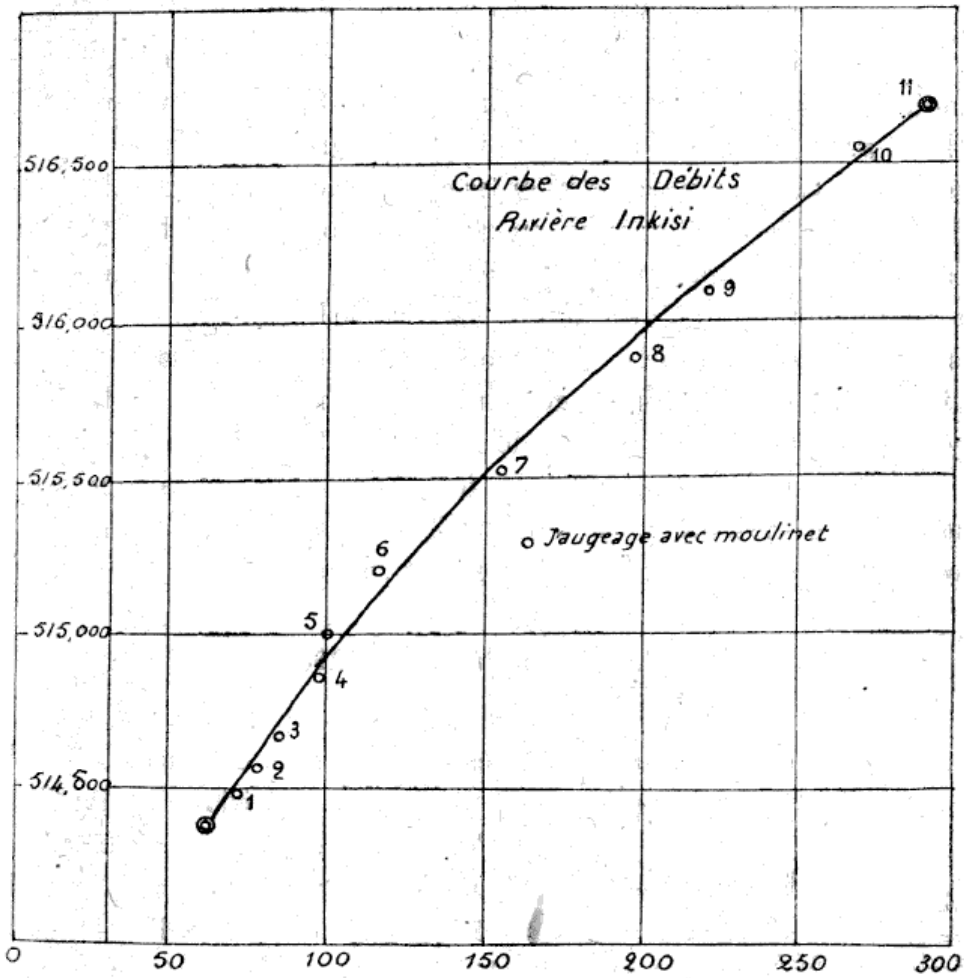
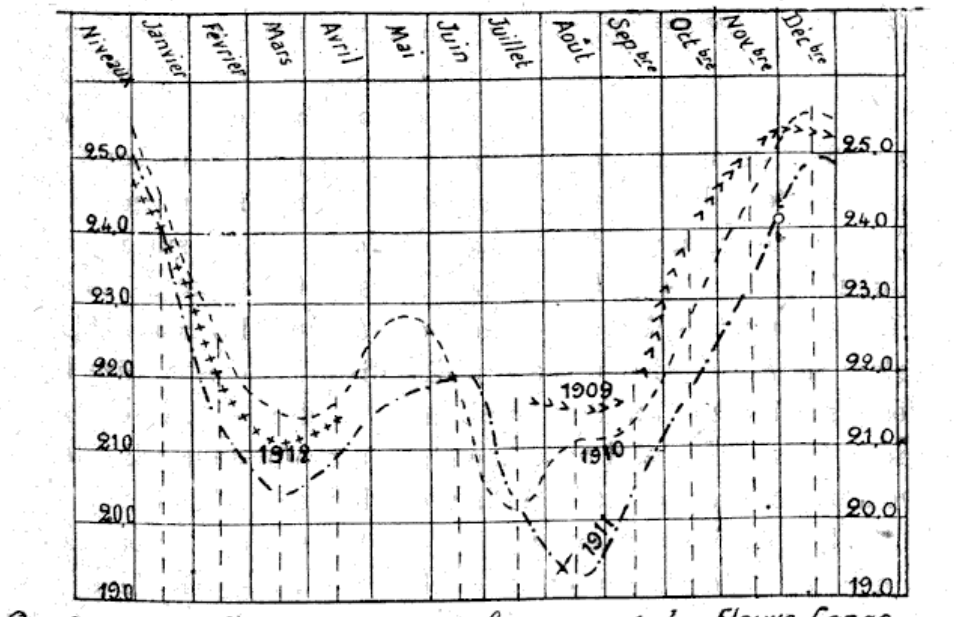


FIG. 145. — Courbe des débits.



Graphique des Niveaux mensuels moyens du Fleuve Congo.
à Matadi 1909 à 1912 {Jaugeage à 48 mètres en amont du pont Inkisy}

Plus grand maximum et plus grand minimum
Maximum et minimum de chaque mois

>>> Année 1909 —.—.— Année 1911
- - - " 1910 + + + + " 1912

FIG. 146. — Graphique des niveaux mensuels moyens.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tableau VIII ci-avant renseigne au sujet des calculs par la méthode des moindres carrés et du tracé de ces courbes. Se basant sur les courbes de débit et grâce aux observations de niveau, le Service des Forces Hydrauliques du Bas-Congo a pu constituer les graphiques annuels des débits lesquels donnent : le débit moyen ou module (moyenne arithmétique des débits), le débit caractéristique moyen, le débit caractéristique d'étiage et les débits maximum et minimum (*fig.* 142 à 146).

Ces graphiques permettent de se rendre compte des variations durant les saisons sèches et les saisons des pluies, les particularités de la rivière, l'importance des crues et des périodes d'étiage, etc.

On a établi aussi les courbes de fréquence pour renseigner sur les puissances des rivières et le caractère plus ou moins torrentiel des rivières. (Le M'Pozo a un régime nettement torrentiel.)

II. — JAUGEAGE PAR DÉVERSOIRS

57. Orifices en déversoirs. — Les déversoirs rendent le plus de services quand on peut les appliquer. Ils joignent la précision à la simplicité.

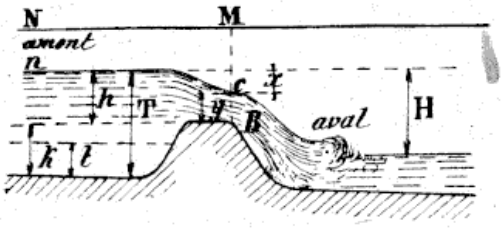


FIG. 147.

L'eau sort des déversoirs en nappes qui selon leur forme prennent les désignations de nappes libres, nappes déprimées, nappes noyées en dessous à ressaut éloigné, nappes noyées en dessous recouvertes en partie par le flux d'aval, nappes ondulées et enfin nappes adhérentes. Les déversoirs sont des orifices de superficie à périmètre incomplet. Pour considérer le liquide comme s'écoulant d'un mouvement uniforme, il faut que le seuil B (*fig.* 147) ait une longueur suffisamment grande. La charge sur le seuil est h et celle sur l'arête est : $y = h - x$. Le déversoir figuré est dit *complet* ou *parfait*. On le désigne parfois sous le nom de déversoir Poncelet et Lesbros.

La valeur de h est prise à une certaine distance, c'est-à-dire là où le plan d'eau est horizontal. Pour obtenir h, la droite MN représentant l'arête de la berge, on prend avec une règle la profondeur MB ; de même on relève à une certaine distance la hauteur Nn, et on fait le nivellement des points M et N. Si par exemple M est à $0^m,10$ en contre-bas de N, on aura pour la valeur de la chute : h = MB + $0^m,10$ — Nn. Ainsi h est la différence d'altitude entre l'arête du déversoir et le plan d'eau du canal à quelque distance de l'amont.

Les formules ci-après ont trait aux déversoirs sans contraction latérale.

Formule Poncelet et Lesbros : $Q = k\sqrt{2g}\, lh^{\frac{3}{2}}$ dans laquelle le coefficient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de contraction k a pour valeur 0,45 et l est la largeur du déversoir ou la longueur de la crête.

Formule Boileau : $Q = 0{,}417 \dfrac{K + h}{\sqrt{(K + h)^2 - h^2}} \sqrt{2g}\, l h^{\frac{3}{2}}$, où K représente la hauteur de la crête du déversoir au-dessus du fond du canal d'amenée. Le rapport $\dfrac{K + h}{\sqrt{(K + h)^2 - h^2}}$ est plus grand que l'unité ; il tend vers 1 quand h tend vers 0 et augmente lorsque la valeur de h augmente elle-même.

Lorsque la nappe se trouve noyée en dessous, c'est-à-dire complètement adhérente à la face d'aval du barrage, ce qui provient de l'air enfermé sous la nappe qui se trouve à une pression inférieure à celle de l'atmosphère avec laquelle il ne communique plus, le coefficient augmente et atteint 0,50. Ce dernier cas a lieu lorsque le déversoir a la largeur du canal, alors l'air n'a plus d'accès direct avec le dessous de la nappe. D'après Bazin, on peut adopter pour les valeurs du coefficient de correction 0,42 à 0,47 pour des veines qui ne sont pas noyées par dessous (nappes libres) lorsque la charge varie de $0^m,10$ à $0^m,50$, et 0,47 à 0,50 pour les veines noyées par dessous.

Formule Bazin : $Q = \mu \left[1 + 0{,}55 \left(\dfrac{h}{k + h}\right)^2\right] l h^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g}$, pour laquelle : $\mu = 0{,}405 + \dfrac{0{,}003}{h}$; h et k sont en mètres. La profondeur k de l'eau dans le canal, au-dessous de l'arête du déversoir, influe sur la vitesse moyenne de l'eau qui s'écoule et par conséquent sur le débit du déversoir.

D'autre part, si y est la profondeur de la crête au-dessous du niveau d'amont et v la vitesse de l'eau dans le bief de retenue, on a pour le débit par seconde :

$$Q = \frac{2}{3} \mu l \sqrt{2g} \left[\left(y + \frac{v^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{v^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}}\right].$$

Appelons H la hauteur de retenue (différence entre les niveaux d'amont et d'aval) ; si e est la hauteur du couronnement nécessaire au-dessus du niveau avant la création du barrage, on a :

$$e = H + \frac{v^2}{2} - \left[\frac{3Q}{2\mu l \sqrt{2g}} + \left(\frac{v^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}}\right]^{\frac{2}{3}}.$$

Soient en outre t la profondeur du cours d'eau avant la création du barrage, b la largeur devant le barrage et Q le débit total, on a :

$$k = t + e \qquad \text{et} \qquad v = \frac{Q_1}{bT}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour des barrages à crête arrondie, munis de murs en ailes, on prend : $\mu = 0{,}80$ à $0{,}85$, et pour ceux sans murs de retour : $\mu = 0{,}65$.

La (*fig.* 148) représente un barrage en *déversoir incomplet* ou barrage

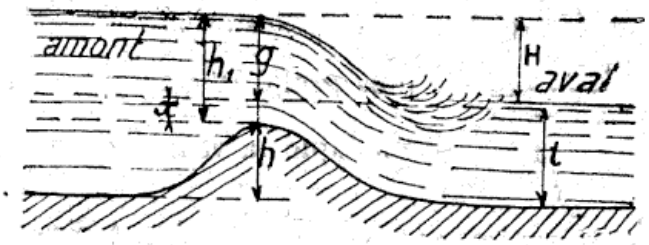


FIG. 148.

noyé, appelé aussi déversoir Boileau et Bazin. Dans ce cas, la crête est placée au-dessous du niveau d'aval.

Soit H la différence des niveaux d'amont et d'aval, on a :

$$Q = \frac{2}{3}\mu_1 l H\sqrt{2gh} + \mu_2 l x\sqrt{2gH},$$

avec

$$\mu_1 = 0{,}855 \quad \text{et} \quad \mu_2 = 0{,}62.$$

Puis :

$$x = \frac{Q}{0{,}62 l\sqrt{2gH}} - 0{,}92H \qquad \text{et} \qquad h = t - x,$$

x étant la hauteur du niveau d'aval au-dessus de la crête du barrage, et t la profondeur de l'eau non retenue.

Si nous appelons h_1 la hauteur de retenue au-dessus du barrage et α l'inclinaison du fond du canal, la formule ci-après de Rühlmann peut servir à calculer le profil de l'eau en amont du barrage ou l'étendue du remous :

$$-\sin\alpha = \frac{1}{3}\log\text{ nep}\frac{h_1}{h} + \frac{2}{3}\frac{h_1 - h}{t} + \frac{1}{9}\frac{h_1^2 - h^2}{t^2}$$
$$-\frac{1}{27}\frac{h_1^3 - h^3}{t^3} + \frac{1}{108}\frac{h_1^4 - h^4}{t^4} + \frac{1}{485}\frac{h_1^6 - h^6}{t^6} + \frac{1}{567}\frac{h_1^7 - h^7}{t^7} - \frac{1}{972}\frac{h_1^8 - h^8}{t^8}.$$

La formule simplifiée suivante permet de calculer avec une approximation assez suffisante le débit d'un déversoir noyé :

$$Q = 0{,}42 l\left(h_1 + \frac{x}{2}\right)\sqrt{2g\,(h_1 - x)}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi, si : $l = 6$ mètres, longueur du déversoir,
$h_1 = 1^m,20$, hauteur d'eau au-dessus du déversoir en amont,
$x = 0^m,20$ — — en aval,

on aura :

$$Q = 0,42 \times 6 \left(1,20 + \frac{0,20}{2} \sqrt{19,62\,(1,20 - 0,20)}\right) = 17^{m3},467 \text{ à la seconde.}$$

58. Déversoirs à mince paroi. — Un orifice est dit en mince paroi lorsque l'épaisseur de la paroi est moindre que la plus petite dimension de l'orifice, et au maximum de $0^m,05$ à $0^m,06$.

Il donne lieu à un débit donné par la formule :

$$Q = 0,62\omega \sqrt{2gh};$$

ω, section de l'orifice, et h, charge sur le centre de gravité de l'orifice ou distance de ce centre à la surface libre du liquide.

Dans les déversoirs en mince paroi, c'est-à-dire lorsque le seuil a des dimensions très petites dans le sens du courant (dans le cas contraire, il est dit à crête ou à seuil épais), si on désigne par L la largeur du déversoir on a la formule suivante pour le débit, dite « formule française », due à Debuat :

$$(1) \qquad Q = KLh \sqrt{2gh} = 1.77Lh \sqrt{h},$$

avec K = 0,40 (coefficient de contraction).

S'il s'agit d'un déversoir à crête épaisse, le coefficient K = 0,30.

Dans cette formule, L et h sont en mètres et Q en mètres cubes par seconde. Si on mesure l'épaisseur de la lame sur le seuil, on prend : $h = \frac{7}{6} e$ (e, hauteur de l'orifice) (*fig.* 149).

Lorsque le déversoir est continué par un coursier, on applique la même formule et, pour les déversoirs incomplets ou noyés, prolongés par un coursier, on prend K = 0,57 à 0,474, et h est la différence des niveaux d'amont et d'aval.

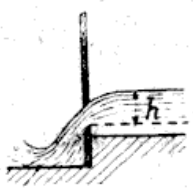


FIG. 149.

Ainsi le coefficient K varie avec l'épaisseur du seuil, sa longueur, le rapport de celle-ci à la largeur du canal alimentaire, enfin avec la contraction plus ou moins complète de la veine liquide au passage du seuil. Lorsque la largeur du déversoir dépasse $0^m,05$, le coefficient K change de valeur ; pour une largeur de $0^m,05$ à $0^m,15$, il varie de 0,43 à 0,45, et au delà de $0^m,15$ il est dit à crête épaisse et est égal à 0,385.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand l'eau en amont du déversoir est animée d'une vitesse sensible v, la formule à appliquer est la suivante :

$$Q = KLh\sqrt{2gh + v^2}.$$

Pour les déversoirs en forme de trapèze, M. Jollois donne la formule :

$$Q = K\ (l + 0{,}80ph)\ h\sqrt{2gh}.$$

Si on désigne par e l'épaisseur de la nappe d'eau qui s'écoule au-dessus du seuil, on a :

$$Q = KLe\sqrt{2ge}; \qquad \text{d'où} \qquad e = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{2K^2L^2g}}.$$

En France, on applique surtout les formules bien connues ci-après de Boileau et de Bazin, conduisant à des résultats sensiblement identiques ; elles ont été établies pour les cas où il n'y a pas de contraction latérale et tiennent compte de la vitesse d'arrivée de l'eau sur le déversoir, vitesse d'autant plus faible que H (*fig.* 150) est plus grand. Plus la vitesse d'arrivée est faible, plus le débit doit être petit pour une même valeur de h :

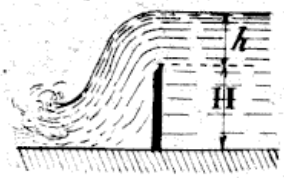


FIG. 150.

$$k_1 = 0{,}417\ \frac{h + H}{\sqrt{(H + h)^2 - h^2}}\ \text{(Boileau)},$$

$$k_1 = \mu\left[1 + 0{,}55\left(\frac{h}{h + H}\right)^2\right]\text{(Bazin)},$$

avec :

$$\mu = 0{,}432,\ 0{,}421,\ 0{,}417,\ 0{,}414, \qquad \text{pour} \qquad h = 0.10, 0{,}20,\ 0{,}30 \text{ et } 0{,}40.$$

En pratique, quand h dépasse $0^m{,}10$, on prend pour la formule du débit :

$$J = \left[0{,}425 + 0{,}212\left(\frac{h}{h + H}\right)^2\right]lh\sqrt{2gh},$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui donne le débit avec une approximation de 3 à 4 0/0. Quand il y a contraction unilatérale, on fait :

$$J = \left[0{,}425 + 0{,}212\left(\frac{h}{h+H}\right)^2\right]\left(l - \frac{2}{10}h\right)h\sqrt{2gh}.$$

Pour une contraction bilatérale, on applique la même formule, mais avec $\frac{4}{10}h$.

En Suisse et en Allemagne, on emploie beaucoup la formule de M. Braschmann :

$$k_1' = 0{,}3838 + 0{,}0386\frac{l}{L} + \frac{0{,}00052}{h};$$

l, largeur du déversoir, et L, largeur du canal.

Lorsque le déversoir est oblique au fil de l'eau, le débit se calcule, d'après M. Lévy-Salvador (1), en multipliant le volume que donnerait un déversoir normal de même longueur par les coefficients ci-après, a étant l'angle d'obliquité du courant, f le coefficient de réduction de la dépense :

$a =$	0°	15°	30°	45°	60°	90°
$f =$	0,80	0,86	0,91	0,94	0,96	1,00

Si le déversoir est disposé parallèlement au fil de l'eau, le coefficient à adopter est : $f = 0{,}80$.

Pour les barrages à chevron ou en forme de V, leur débit, d'après Graeff, est le même que celui d'un déversoir droit dont la largeur serait la somme des largeurs des ailes du chevron et à laquelle on ajouterait la moitié de la projection, sur un plan perpendiculaire à l'axe du cours d'eau, de la partie circulaire ou saillante.

Mais on peut aussi les considérer comme formés de deux barrages obliques, ce qui est plus simple et suffisant.

Avec les *déversoirs inclinés*, les valeurs du coefficient K diminuent quand ceux-ci sont inclinés vers l'amont et augmentent lorsqu'ils ont une pente vers l'aval. Par suite, on fait subir à K une correction en le multipliant par un facteur qui varie de 0,93 à 0,96 dans le premier cas, selon le degré d'inclinaison, et de 1,04 à 1,09 pour le second cas et dans les mêmes conditions. Enfin, pour les *déversoirs à talus* (seuils épais), on prend les valeurs des coefficients des déversoirs en mince paroi, que l'on multiplie par un facteur qui varie de 0,745 à 1,14 (table de Bazin) selon l'épaisseur

(1) *Hydraulique agricole*, par LÉVY-SALVADOR. Dunod et Pinat, éditeurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la lame, l'inclinaison des faces du déversoir, la charge sur la crête et la hauteur au-dessus du fond du canal. Enfin, lorsque le déversoir a sa crête délimitée par un raccordement curviligne, on fait, comme ci-avant, usage d'un coefficient de correction qui varie de 0,898 à 1,09, selon la charge, le dernier chiffre s'appliquant à la charge de plus grande valeur.

Des essais entrepris sur une dérivation de la rivière Alwen par les ingénieurs Gourley et Grimp pour arriver à déterminer les débits des déversoirs de formes diverses à crêtes mouillées vives ont donné les résultats suivants.

Le débit d'un déversoir rectangulaire est proportionnel à la puissance 1,47 de la hauteur de l'eau au-dessus de ce déversoir et à la puissance 1,02 de la longueur de l'arête vive du déversoir.

Le débit d'une encoche triangulaire est proportionnel à la puissance 2,47 de la hauteur de l'eau au-dessus du fond de cette encoche et à la tangente du demi-angle au sommet de cette encoche.

Le débit d'une encoche trapézoïdale est égal à la somme des débits d'une encoche triangulaire d'angle au sommet correspondant et du débit du déversoir rectangulaire de même longueur que la petite base du trapèze.

59. Établissement des déversoirs. — La méthode des déversoirs pour le jaugeage des rivières est la plus communément employée. Pour des cours d'eau de montagne, ce procédé est d'un emploi généralement facile et pratique. Les petits affluents issus des neiges qui alimentent des chutes se prêtent bien à ce mode de jaugeage. Quant à l'emplacement où il convient d'opérer, il faut choisir un endroit où le mouvement de l'eau est sensiblement uniforme et, pour la mesure de l'épaisseur de la lame d'eau au-dessus du seuil, qui doit être lui-même parfaitement horizontal, il faut attendre l'instant où le régime permanent est à peu près réalisé. C'est le moment où toute agitation à l'amont du barrage a cessé. Le barrage lui-même doit être bien étanche pour que l'eau ne s'infiltre pas par dessous.

La méthode de jaugeage directe par déversoir en mince paroi est la plus simple, tout en offrant les garanties d'exactitude nécessaires. A cet effet on établit transversalement à la rivière un petit mur en maçonnerie sur lequel on élève une cloison en bois formant barrage, cette cloison étant terminée, à sa partie supérieure, par une feuille de tôle qui forme la crête du déversoir et qui doit être bien horizontale.

On mesure la hauteur d'eau H au-dessus de la crête du déversoir. La table ci-après donne le débit D, en litres par seconde, correspondant à cette hauteur pour une largeur de barrage de 1 mètre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

H	D	H	D	H	D	H	D	H	D
m		m		m		m		m	
0,01	1,78	0,27	248	0,53	685	0,79	1247	1,25	2476
0,02	4,95	0,28	262	0,54	705	0,80	1270	1,30	2622
0,03	8,90	0,29	277	0,55	725	0,81	1295	1,35	2746
0,04	13,86	0,30	291	0,56	744	0,82	1319	1,40	2941
0,05	19,80	0,31	306	0,57	764	0,83	1343	1,45	3101
0,06	25,70	0,32	321	0,58	784	0,84	1369	1,50	3262
0,07	32.60	0,33	337	0,59	805	0,85	1392	1,55	3427
0,08	39,60	0,34	351	0,60	826	0,86	1417	1,60	3594
0,09	47,50	0,35	367	0,61	846	0,87	1443	1,65	3764
0,10	55,46	0,36	383	0,62	867	0,88	1466	1,70	3937
0,11	64,30	0,37	399	0,63	888	0,89	1491	1,75	4111
0,12	73,20	0,38	416	0,64	909	0,90	1517	1,80	4289
0,13	83,10	0,39	432	0,65	931	0,91	1541	1,85	4552
0,14	93 »	0,40	448	0,66	952	0,92	1567	1,90	4669
0,15	103 »	0,41	465	0,67	974	0,93	1593	1,95	4835
0,16	113 »	0,42	483	0,68	996	0,94	1619	2,00	5023
0,17	124 »	0,43	500	0,69	1018	0,95	1644	2,10	5404
0,18	136 »	0,44	518	0,70	1040	0,96	1670	2,20	5795
0,19	146 »	0,45	536	0,71	1062	0,97	1697	2,30	6194
0,20	158 »	0,46	553	0,72	1084	0,98	1723	2,40	6602
0,21	170 »	0,47	572	0,73	1108	0,99	1749	2,50	7020
0,22	183 »	0,48	590	0,74	1130	1,00	1776	2,60	7446
0,23	195 »	0,49	609	0,75	1153	1,05	1911	2,70	7879
0,24	208 »	0,50	628	0,76	1177	1,10	2048	2.80	8321
0,25	222 »	0,51	646	0,77	1200	1,15	2190	2,90	8771
0,26	235 »	0,52	665	0,78	1224	1,20	2334	3,00	9228

Si L est la largeur du barrage, le produit LD est le débit cherché.

Pour déterminer H (mesurée avant la section contractée), on place en ce point une règle graduée, tenue bien verticalement et dont le zéro est sur l'horizontale de la crête du déversoir.

Soit par exemple un déversoir dont la largeur L = 3m,50 et l'épaisseur de lame d'eau = 0m,100, on voit, dans la deuxième colonne, D = 55l,46. On aura donc :

$$3^{m},50 \times 55,46 = 194 \text{ litres } (1).$$

On peut, dans les cas de très importantes installations sur des rivières où nulle chute n'a été établie, une fois l'emplacement choisi, construire d'abord seul le barrage de dérivation pour, au moyen de cet ouvrage fonctionnant en déversoir, relever pendant un an les débits journaliers de la rivière. Il est possible alors d'installer des appareils permettant d'obtenir d'une manière automatique et continue l'inscription graphique des débits.

(1) La maison Neyret-Brenier a inséré dans son catalogue un abaque basé sur la formule :

$$q = 0,405\, Lh\sqrt{2gh},$$

la hauteur h étant prise au-dessus du seuil du déversoir.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 151) représente un déversoir établi à poste fixe pour jaugeage de canal, comprenant un déversoir en maçonnerie en amont, un bassin de repos et un orifice métallique de jauge en aval.

Le déversoir de jauge est encastré dans une ouverture du bassin de repos, dont la partie inférieure est formée par un seuil en pierre de taille.

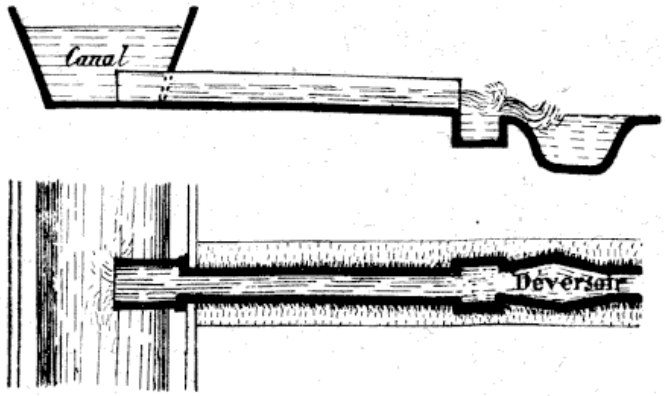


FIG. 151.

L'orifice métallique est constitué par un cadre en tôle de fer de 10 millimètres d'épaisseur dont le vide a $0^m,50$ de largeur et $0^m,75$ de hauteur. Les deux parties pleines ont $0^m,10$ de largeur ; elles sont reliées à leur sommet par deux cornières de $50 \times 50 \times 6$, recourbées à leurs extrémités pour être scellées dans les murs du bassin de repos. Ce déversoir est encastré de $0^m,03$ dans les parois du bassin.

Pour des opérations usuelles et de courte durée, on peut construire assez facilement un appareil déversoir réalisant l'écoulement en mince paroi en faisant un barrage, dans le canal dont on a à mesurer le débit, à l'aide d'une planche de la largeur du canal, dans laquelle on ménage une échancrure dont les trois arêtes sont munies d'une bordure de tôle taillée en biseau ; de cette façon on a un déversoir un peu moins large que le canal, ce qui permet à l'eau de pénétrer librement sous la nappe, de façon à éviter l'inconvénient des nappes déprimées.

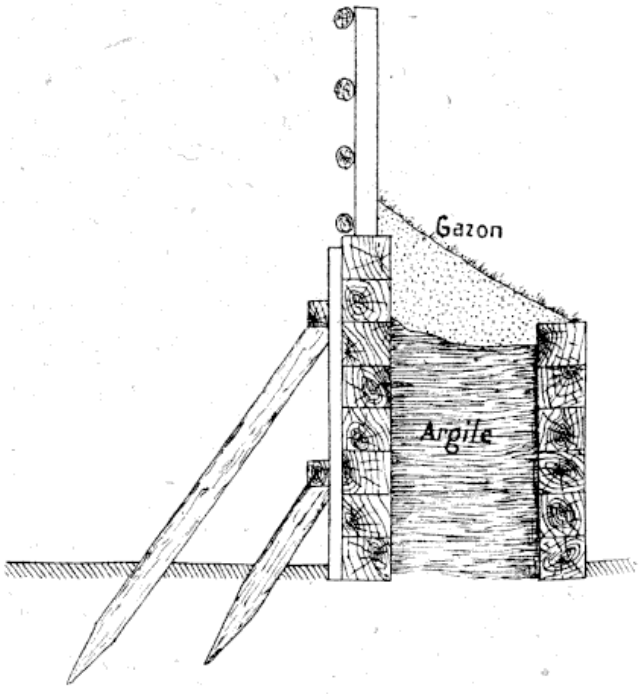


FIG. 152.

Suivant les cas (c'est-à-dire suivant la largeur du cours d'eau, la vitesse de l'eau et la hauteur à laquelle elle s'élève), on construira le barrage avec des madriers, ou des poutrelles, en ayant soin, pour le rendre étanche, de clouer des joints de recouvrement ou de calfater soigneusement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si le débit est fort, on sera obligé de construire un batardeau en damant de l'argile entre deux séries de madriers ou poutrelles, fortement arrêtées sur les rives et dans le courant au moyen de solides piquets (*fig.* 152). Le seuil devra se trouver à moins de 50 centimètres au-dessus du niveau aval, pour éviter que la lame d'eau reste adhérente au barrage, c'est-à-dire qu'elle soit complètement détachée et libre.

Pour la mesure exacte de la hauteur de la lame d'eau, on peut établir, à 4 ou 5 mètres en amont du droit du déversoir, une poutrelle maintenue au-dessus du fil de l'eau, dans laquelle on peut coulisser une tige de fer amincie en pointe à l'extrémité qui doit effleurer le niveau de l'eau. Une passerelle volante permettra d'accéder commodément à cette tige.

A l'aide d'une mire et d'un niveau, on relève exactement les cotes cor-

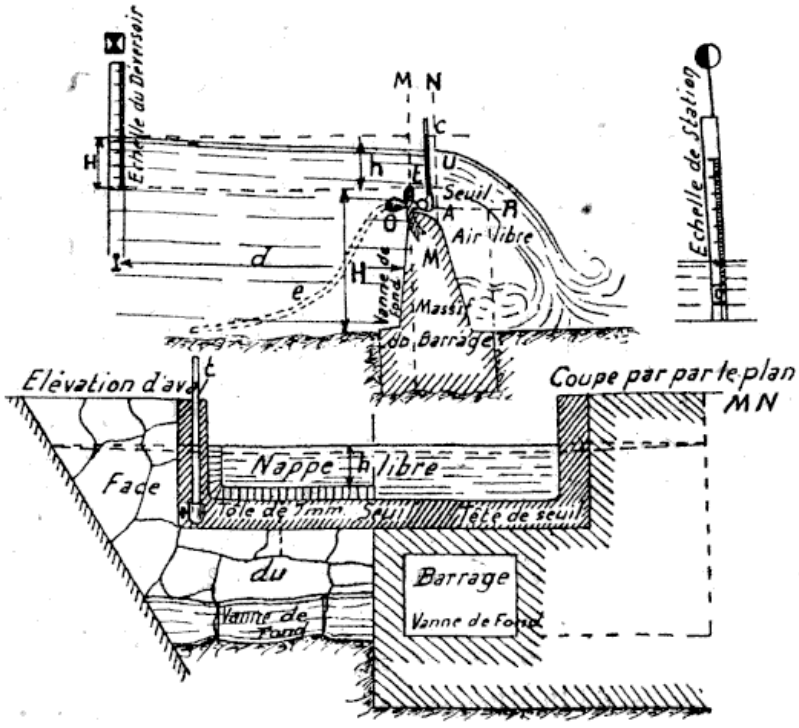


FIG. 153.

respondant aux positions de la tige, qui donneront par leur différence la hauteur *h* cherchée.

En raison de la grande largeur de la plupart des cours d'eau, des matières qu'ils charrient et au défaut de stabilité du lit, les jaugeages par déversoirs sont très difficilement applicables. Généralement ces ouvrages voient, au bout de peu de temps, les matières entraînées par les eaux s'amasser derrière les déversoirs, de telle façon que les formules servant à calculer le débit en fonction de la lame déversante deviennent inapplicables. En outre, s'ils ont été établis pour laisser passer les plus grandes crues avec un seuil arasé à un niveau unique, leur largeur est telle qu'ils

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deviennent tout à fait impropres à accuser les variations des débits d'étiage par des expériences de niveau facilement observables.

Pour parer à ces inconvénients, le Service d'études des grandes forces hydrauliques emploie le dispositif de déversoir présenté par la (*fig.* 153). Lorsqu'on veut faire un jaugeage, on engage une douille coudée A portant à l'amont un renflement en olive pour recevoir un tube de caoutchouc et à l'aval un robinet ; puis, après le coude, une amorce de tubulure verticale qui s'arrête à 3 ou 4 centimètres plus bas que le déversoir.

Lorsque la rivière charrie des sables ou graviers, on munit l'ouvrage de vannes de fond qui restent habituellement ouvertes. On ne les ferme et l'on ne reconstitue la retenue que pour procéder à un jaugeage, ce qui doit avoir lieu plusieurs heures avant l'opération.

III. — JAUGEAGE PAR VANNES

60. Méthodes diverses de jaugeage. — Généralement le récepteur hydraulique se trouve à l'extrémité d'un canal d'arrivée ou d'amenée possédant à proximité une vanne formant déversoir complet ou incomplet.

L'eau, après avoir agi sur le moteur hydraulique, s'écoule dans un canal de fuite, et la hauteur de chute est la différence de niveau dans les deux *biefs* ou bassins. Les vannes sont dites dans ce cas *vannes de fond*. Elles peuvent aussi être disposées avec orifice à mince paroi. Le débit par seconde d'une vanne avec charge sur le sommet est donné par la formule :

$$Q = KS\sqrt{2gh} \quad \text{ou} \quad Q = Kle\sqrt{2gh};$$

Q, débit en litres à la seconde ; S, section d'écoulement en mètres carrés ; h, charge sur le centre de l'orifice en mètres, et l et e, dimensions de l'orifice d'évacuation.

Pour une vanne à orifice en mince paroi, on prend K = 0,60, et pour une vanne de fond K = 0,67 (valeurs moyennes).

Les coefficients indiqués supposent la contraction complète et h dépassant $0^m,15$. Si l'orifice est prolongé par un canal de même largeur, on fait entrer h' dans la formule, h' représentant la charge sur le sommet de l'orifice ; alors le coefficient 0,60 suppose la hauteur de l'orifice supérieure à $0^m,15$ et $h' > 0^m,40$ et une contraction complète. Les valeurs à donner à K, pour des charges sur le sommet de l'orifice variant de $0^m,01$ à 3 mètres et pour des hauteurs d'orifice variant de $0^m,01$ à $0^m,20$, sont fournies par les tables résultant des expériences de Poncelet et Lesbros. On peut calculer approximativement le débit d'un orifice d'écoulement, suivant qu'il

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est au-dessus du niveau du bief inférieur en totalité (*fig.* 154) ou en partie (*fig.* 155) ou qu'il se trouve en entier au-dessous de ce niveau (*fig.* 156), par les formules ci-après :

1° $$Q = \frac{2}{3}\,\mu L\,\sqrt{2g}\left[(h_1 + k)^{\frac{3}{2}} - (h + k)^{\frac{3}{2}}\right];$$

2° $$Q = \frac{2}{3}\,\mu L\,\sqrt{2g}\left[(h_1 + k)^{\frac{3}{2}} - (h + k)^{\frac{3}{2}}\right] + \mu L a\,\sqrt{2g}\,\sqrt{h_1 + k};$$

3° $$Q = \mu L a\,\sqrt{2g}\,\sqrt{h + k};$$

L, largeur de l'orifice ; $k = \frac{V^2}{2g}$; V, vitesse de l'eau immédiatement à l'amont, et $\mu = 0{,}60$, dans le cas où l'arête se trouve haut placée par rapport au lit, et 0,65 à 0,70 lorsqu'elle se trouve au niveau de celui-ci.

Pour opérer le jaugeage, on se sert de la vanne de décharge de l'usine,

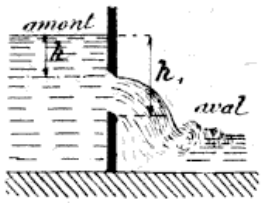


FIG. 154.

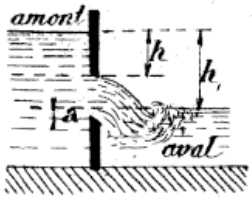


FIG. 155.

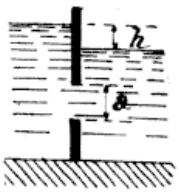


FIG. 156.

que l'on ouvre d'une certaine quantité. A cet effet, on a préalablement repéré sur la paroi du canal le niveau exact et fermé la vanne. Quand le niveau du canal se maintient d'une façon constante, il s'ensuit que le débit de la vanne de décharge est égal à celui dépensé par la turbine. On relève alors les cotes nécessaires pour calculer le débit.

Pour que l'opération puisse se faire dans de bonnes conditions, il faut que la manœuvre des vannes soit disposée de façon que leur fermeture puisse se faire très rapidement.

Si le moteur est insuffisant à débiter toute l'eau disponible, on ouvre une vanne de façon à dépenser l'excédent d'eau et à ramener le niveau de l'eau au repère fixe que l'on s'est donné. Puis on ferme le moteur et l'on ouvre une ou plusieurs vannes de la hauteur nécessaire à l'écoulement de toute l'eau de la rivière, en maintenant toujours le niveau amont au repère, et en faisant en sorte que toutes les vannes fonctionnent avec une charge d'eau suffisante pour qu'il ne se forme pas de remous devant. On totalise les résultats obtenus à chaque vanne.

On peut aussi, à l'entrée de la chambre de mise en charge de la turbine, installer simplement, en travers du canal d'amenée, un barrage volant constitué de manière à pouvoir faire passer toute l'eau prise par la turbine à essayer par un orifice muni d'une vanne pouvant se fermer très rapide-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment, et l'on mesure l'abaissement de ce plan d'eau pendant un temps donné.

Soit une vanne de fond ayant $1^m,40$ de largeur, laissant écouler une nappe d'eau de $0^m,40$ (distance verticale entre le seuil et l'arête inférieure de la vanne $= a$), la charge d'eau sur le seuil (H') étant de $2^m,20$ et la pression $h = 2$ mètres (distance verticale entre le niveau amont et le centre de l'orifice d'écoulement).

On a alors :

$$H' - \frac{1}{2}a = 2,20 - \frac{0,40}{2} = 2^m,00$$

$$\text{Et : } Q = KS\sqrt{2gh} = 0,60 \times 1^m,40 \times 0^m,40\sqrt{19,62 \times 2} = 2^{m3},150.$$

La pression exercée par l'eau sur une vanne rectangulaire, en supposant que la vanne effleure le plan d'eau, est donnée par l'expression : $P = \frac{1}{2}\delta h^2 l$, et le centre de pression est : $x = \frac{2}{3}h$ (h, hauteur de la vanne ; l, largeur, et δ, densité de l'eau). Nous revenons sur cette question au (chapitre X), où nous traitons des vannages d'une façon plus particulière.

Méthode de M. Bellet. — En un point convenablement choisi, soit du canal d'amenée, soit du canal de fuite, on installe deux vannes A et B (*fig.* 157), à une certaine distance l'une de l'autre, de manière à créer un réservoir artificiel. La vanne B est disposée de telle sorte que l'orifice d'écoulement soit tout entier au-dessus du niveau d'aval, à moins que celui-ci puisse être considéré comme rigoureusement constant, par exemple dans le cas d'un lac, d'une pièce d'eau ou d'une rivière importante. Une fois le régime permanent établi, un flotteur muni d'un appareil enregistreur est mis en jeu et, à ce moment, il inscrit une ligne droite. Mais, si on surélève légèrement le niveau, par exemple en baissant légèrement la vanne B, après avoir soigneusement repéré la position primitive, et si on ferme complètement la vanne A aussi rapidement que possible, pendant que l'on ramène la vanne B exactement à sa position première, le cylindre de l'appareil, qui tourne avec une vitesse uniforme, décrit une courbe dont la tangente en un point quelconque donne la vitesse d'abaissement du plan d'eau.

Lorsque l'installation comporte une chambre de mise en charge, ce qui est le cas général pour les hautes chutes, on peut mesurer exactement la section, et le produit de cette section par la valeur de la tangente trigonométrique donne l'expression du débit.

L'application de la méthode ne comporte donc pour tout appareil de mesure qu'un enregistreur de niveau d'eau. Cet appareil introduit, il est vrai, son coefficient propre K dans la mesure ; mais ce coefficient peut

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être déterminé une fois pour toutes avec précision en laboratoire, car l'enregistreur est un instrument d'horlogerie qui fonctionne en échappant à toutes perturbations dues à des influences extérieures. Cet appareil ne complique donc pas la méthode, et intervient au contraire pour éliminer toutes chances d'erreur.

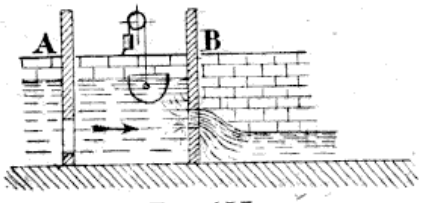


FIG. 157.

La formule de jaugeage : $Q = KS\sqrt{\text{tang } \beta}$, très simple, comme on le voit et rigoureusement exacte au point de vue théorique, est donc indépendante de la hauteur de chute et de la forme des orifices d'écoulement ; sa caractéristique est de n'employer aucun coefficient empirique à déterminer par des

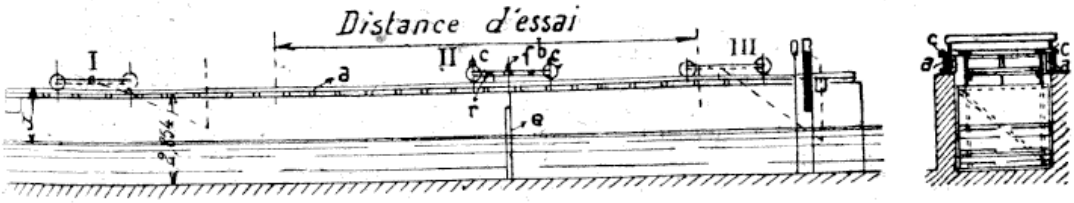



FIG. 158. — Coupes longitudinale et transversale du canal de fuite et de l'appareil de mesure.

jaugeages préalables. Sa précision ne dépend que de l'exactitude apportée dans l'évaluation des grandeurs géométriques qui la composent.

MÉTHODE DE L'ÉCRAN OU DU RIDEAU. — Cette méthode, due au pro-

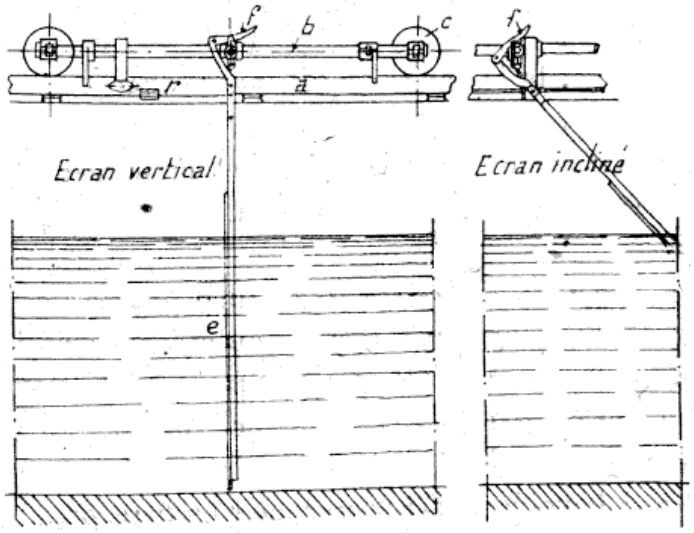


FIG. 159. — Vues en bout de l'écran abaissé et relevé.

fesseur Erik Anderson, qui a été expérimentée aux ateliers de la grande maison de construction de turbines hydrauliques J. Voith, à Heidenheim (Allemagne), consiste, en principe, à émerger dans le canal de section

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constante alimentant une usine, un écran obturant cette section aussi complètement que possible, et qui est entraîné par le courant. On mesure la vitesse de cet entraînement, laquelle représente nécessairement la vitesse moyenne de l'eau dans la section considérée. Les (*fig.* 158, 159 et 160), permettent de se rendre compte du fonctionnement de ce dispositif.

Le rideau suspendu au-dessous du chariot roulant sur les bords du canal peut aller de la position verticale à la position horizontale dans un sens. Le chariot amené à l'extrémité amont du canal et l'écran étant dans la position verticale, il se crée une dénivellation entre l'amont et l'aval de

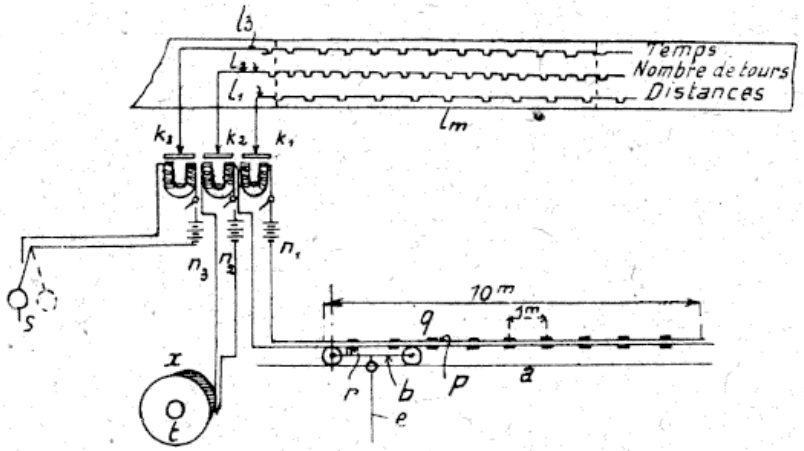


FIG. 160. — Schéma des connexions pour l'enregistrement de la vitesse.

l'écran, dont la valeur de la pression correspondante fait mouvoir le chariot vers l'aval.

La vitesse de translation ainsi acquise par le chariot est enregistrée, par l'intermédiaire de contacts électriques sur un cylindre tournant. On connaît donc la vitesse et la section mouillée et on en déduit le débit.

Plus la section du canal et la surface du rideau sont grandes, meilleur est le résultat.

La méthode ancienne des *réservoirs ou capacités* peut être utilisée, dans le cas de grands réservoirs, en se servant du procédé chimique. En faisant dissoudre un poids connu de sel dans le liquide dont on veut connaître le volume et une fois la dissolution faite, on dose la quantité de sel renfermée dans un litre du liquide. Si V est le volume cherché en litres, P le poids de sel introduit et p le poids du sel trouvé dans un litre, on a :

$$V = \frac{P}{p}.$$

On peut déterminer p à un millième près, et même doser le sel dans une solution aqueuse à moins d'un millième près.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IV. — MESURE DES VITESSES DANS LES CONDUITES D'EAU SOUS PRESSION

61. Méthode des ondes colorées. — Quand on a affaire à une turbine à laquelle l'eau est amenée par une conduite forcée un peu longue, on peut mesurer le débit par l'évaluation de la vitesse de l'eau dans cette conduite. Lorsque le régime d'écoulement uniforme de l'eau est établi dans une conduite de mise en charge d'une chute d'eau, de forme cylindrique, en métal et d'un même diamètre sur toute la longueur, le volume d'eau qui y est débité par seconde a évidemment pour facteur important la vitesse moyenne des filets liquides occupant la majeure partie de la section transversale, vitesse qu'on peut mesurer en colorant une tranche de liquide à son passage amont, près de la prise d'eau, et en observant le passage de cette même tranche en aval, près de la turbine. La longueur de la conduite comprise entre deux points d'observation donne, avec le temps écoulé, la vitesse moyenne par seconde.

Le débit par seconde étant Q, la section uniforme de la conduite S, la vitesse moyenne observée V, on a : $Q = KSV$.

Pour K, on peut prendre une valeur comprise entre 0,90 et 0,95 (expérience de M. Ribourt).

La matière colorante qui paraît donner le meilleur résultat est le rouge de fuchsine. Pour effectuer l'opération, on installe une petite pompe en amont auprès de la prise d'eau, et raccordée à la conduite au moyen d'un tuyau de petit diamètre, le conduit d'aspiration de cette pompe plongeant dans un sceau où est la liqueur colorée. En aval, l'eau colorée est recueillie auprès de la turbine dans un tube de prise d'un manomètre, tube qui permet de prendre l'eau à tel point de la section qu'on désire, plus ou moins près du centre ou des parois de la conduite. Des tubes témoins ou éprouvettes sont placés à proximité du tube explorateur de prise d'eau, auprès de la turbine en aval. Les chronomètres doivent être mis en concordance au début de l'opération. Cette méthode, qui permet de déterminer la vitesse moyenne d écoulement de l'onde colorée dans la conduite, avec une approximation de 1 0/0, serait ainsi d'une précision de même ordre de grandeur que celle des mesures du débit par l'écoulement en déversoir ; en outre, elle est d'une application facile et ne nécessite aucune installation importante ni coûteuse et elle peut être employée pendant la marche courante d'une installation hydraulique.

62. Méthode des jaugeages chimiques. — Si on veut déterminer le débit d'un torrent ou jauger l'eau d'une turbine lorsque celle-ci est branchée sur un collecteur en alimentant d'autres et évacue ces eaux dans un canal de fuite qui collecte aussi d'autres eaux, il n'y a guère que les jau-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

geages chimiques qui permettent de résoudre ces cas, avec un degré de précision acceptable.

Cette méthode due à M. Th. Schlœsing, a été reprise et mise au point par MM. Mellet et Boucher.

Le principe est le suivant : si on fait écouler à débit constant et régulier une solution quelconque et si on envoie ce flux liquide dans un autre flux liquide s'écoulant aussi à débit constant et régulier, mais ne renfermant pas en solution la même substance que le premier flux, celui-ci est dilué. Si maintenant, avant d'opérer le mélange, on a dosé la substance caractéristique du premier flux, et si, après mélange, on fait un nouveau dosage, le rapport des titres donne le rapport des débits, et par conséquent, si le débit de l'un des flux est connu, l'autre l'est aussi.

La solution qui convient le mieux est le chlorure de sodium (sel de cuisine) à cause de son bas prix et de sa grande solubilité. Sa titration chimique se fait en précipitant le chlorure de sodium renfermé dans les solutions, au moyen d'une solution de nitrate d'argent dont le titre est parfaitement connu. On ajoute goutte à goutte le nitrate d'argent, et au moment où le chlorure de sodium est précipité, on observe la quantité de nitrate d'argent employé et on calcule facilement la quantité de chlorure de sodium précipitée. Mais pour saisir le moment où on a ajouté assez de nitrate d'argent et pas encore trop, il faut déterminer un changement de coloration et pour qu'il se produise nettement, il faut une certaine concentration de chlorure de sodium, de là l'obligation de concentrer les échantillons.

On peut remplacer une partie des opérations chimiques par des mesures électriques basées sur le fait qu'à mesure que s'appauvrit une solution, sa résistance électrique augmente. Donc si on précipite peu à peu le chlorure de sodium renfermé dans une solution, la résistance électrique de celle-ci va augmenter pour arriver à un certain maximum au moment où tout le chlorure de sodium aura disparu. Si à ce moment, on continue à ajouter du nitrate d'argent, celui-ci reste dissous, et la résistance électrique baisse de nouveau. Le maximum de résistance électrique correspond donc à la fin de la réaction et sert de révélateur au lieu et place de réactif coloré employé dans le procédé chimique.

Si on représente par D le volume de dilution de comparaison, par a le nombre de centimètres cubes moyens de solution d'azotate d'argent correspondant à une prise de 1 litre, par b le nombre de centimètres cubes de solution d'azotate d'argent correspondant à 1 litre de solution diluée au volume D, et, si a est différent de b, on a le débit V du cours d'eau à jauger en employant la formule :

$$V = \frac{Db}{a}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On obtient la solution mère en faisant fondre dans un vase, deux ou trois jours avant l'essai, 300 grammes de sel blanc ordinaire par litre d'eau, puis on filtre rapidement cette solution avant de l'introduire dans un vase à débit constant pour son emploi (vase de Mariotte) et l'on agite fortement avant de s'en servir.

Le jour de l'expérience, on prélève des prises à des points différents de la rivière ; l'expérience pourra être tenue rigoureuse si toutes les prises exigent la même quantité de solution de nitrate d'argent.

On prépare, préalablement à l'expérience, un réactif en dissolvant 30 grammes de nitrate d'argent pur du commerce dans 1 litre d'eau distillée. Chaque centimètre cube de ce réactif équivaut à $0^{gr},01$ de sel marin environ. Lors de l'expérience on étend une certaine quantité de ce réactif concentré d'eau distillée, de façon que la quantité de sel contenu, dans une prise de 1 litre, nécessite 10 à 15 centimètres cubes de ce réactif étendu. On reconnaît la fin de la décomposition du sel d'une prise par le nitrate d'argent par le moyen d'une solution de chromate jaune de potassium qui fait passer la couleur du liquide du jaune au rouge brique. Un centimètre cube de cette solution par prise de 1 litre est suffisant.

M. Ch. Louis a procédé expérimentalement à des mesures comparatives avec un déversoir de 2 mètres de largeur en mince paroi et haut de $0^{m},80$, fonctionnant en lame libre ; les résultats fournis par les deux méthodes ont été à très peu près concordants. Ainsi, par exemple, lorsque la hauteur de la tête du déversoir était de 216 millimètres, la formule de Bazin fournissait :

$$Q = mLH\sqrt{2gH} = 0{,}431 \times 2 \times 0{,}170\sqrt{19{,}62 \times 0{,}170} = 0^{m3},266.$$

Le réactif employé était une solution de 10 grammes de nitrate d'argent par litre. Les trois prises effectuées ont donné comme moyenne $14^{cm3},8$ de réactif et la solution mère diluée à raison de 117 centimètres cubes dans 250 litres d'eau, 16 centimètres cubes de réactif pour 1 litre de cette dilution.

Par suite le débit a été :

$$V = \frac{250 \times 16}{14{,}8}\ 0^{m3},270.$$

D'autres mesures effectuées avec des valeurs différentes de H ont fourni des résultats aussi concluants que celui que nous venons de relater.

La distance entre l'introduction et la prise était de 45 mètres environ et le temps du parcours de l'eau, de 32 secondes ; le temps du parcours était déterminé en injectant une solution de fluorescine qui teintait l'eau à son passage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

63. Méthodes Parenty.-Bellet — *a*) Appareils Parenty et Mesnager. — Ces instruments permettent d'effectuer le jaugeage des conduites forcées. Ils consistent, en principe, en un tube Pitot transformé spécialement en vue de son introduction dans une tubulure, additionné d'une balance ou d'un *peson* enregistreur des pressions transmises par le tube Pitot et transformées en vitesses.

Plus simplement, et si l'on a en vue une expérience à réaliser sur une grosse conduite, on peut brancher sur celle-ci un tuyau court, de petit diamètre, déterminant une dérivation dans laquelle on interpose un compteur. L'eau qui a traversé celui-ci retourne à la conduite par la deuxième branche du tuyau recourbé. Les débits dans la grosse conduite et dans le petit tuyau sont toujours proportionnels ; le compteur donne le volume d'eau passant par la petite dérivation pratiquée sur la conduite à jauger, et une proportion à établir fournit le débit de cette dernière.

b) M. Bellet adapte au tube de Pitot-Darcy un dispositif qui permet de mesurer la vitesse avec une très grande approximation. Il est basé sur le même principe que l'appareil de M. Mesnager, mais il peut déceler, étant plus sensible, une différence de pression pouvant être inférieure à 1/10 de millimètre d'eau.

Il consiste, en principe, à relier l'un des ajutages du Pitot-Darcy à l'une des branches d'un tube en U non capillaire et dans lequel on a préalablement versé un liquide A non miscible à l'eau et un peu plus dense que celle-ci. L'autre ajutage est relié à l'autre branche de l'U, de manière à constituer un circuit complètement fermé. Lorsque l'eau de la conduite est animée d'une certaine vitesse, la pression n'étant pas la même dans les deux ajutages, il se produit dans les deux branches du tube en U une dénivellation des surfaces de contact de l'eau et du liquide A. Si l'on désigne la densité de l'eau (d) par rapport à l'eau du liquide A (sulfure de carbone coloré, par exemple, dont $d = 1{,}27$ environ) et par h la hauteur de dénivellation produite, la relation qui donne la vitesse en fonction de h est : $K \frac{V^2}{2g} = h\,(d - 1)$.

K, coefficient du tube Pitot-Darcy, très voisin de l'unité, et il faut choisir la densité de A la plus voisine de l'unité.

Si on veut employer un liquide moins dense que l'eau, il suffit simplement de renverser le tube en U.

Ce manomètre permettant la lecture des dénivellations à 1 millimètre près, pour une vitesse de 1 mètre par exemple, celle-ci sera estimée avec une approximation de 0,3 0/0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

64. Méthode Venturi [1]. — Cette méthode basée sur une loi d'hydraulique, ne comporte sur la conduite même, aucun organe mobile, ni aucun obstacle à l'écoulement de l'eau ; son emploi consiste en la mesure de pression en des points déterminés et, par suite, sa vérification, une fois l'appareil étalonné, ce qui se fait avant la mise en place, se réduit à la vérification du manomètre employé. Le compteur Venturi, inventé par Clemens Herschel, se compose essentiellement de deux troncs de cône (*fig.* 161), l'un convergent, l'autre divergent, réunis par leur sommet commun avec interposition d'un manchon cylindrique ; il est intercalé dans la conduite dont on veut mesurer les débits, les grands diamètres des troncs de cône étant égaux à celui de la conduite. Deux tubes piézométriques sont placés l'un sur l'un des cônes, et l'autre sur le manchon cylindrique. Par suite de l'augmentation de vitesse dans ce dernier, la pression P′ qui y règne et qu'indique le tube piézométrique correspondant est plus petite que la pression P indiquée sur le cône. Si l'axe de l'appareil est horizontal, ces deux pressions sont reliées entre elles par la formule suivante dérivée de l'équation de Bernouilli :

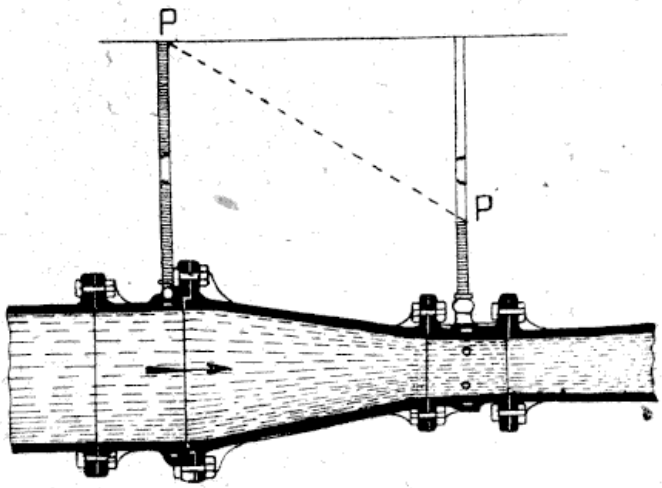


FIG. 161.

$$\frac{V^2}{2g} + P = \frac{V'^2}{2g} + P'$$

En posant :

$$Q = \omega\, V = \omega_1 V_1.$$

$$n = \frac{\omega}{\omega_1}\sqrt{n^2 - 1}\ K = n\omega_1 \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{n^2 1}};$$

on obtient :

$$Q = K\sqrt{P - P'}$$

[1] La loi de « Venturi », physicien italien, peut s'énoncer comme suit : « Dans un tuyau dont la section ou le diamètre diminue, la pression que l'eau exerçait latéralement, baisse avec l'augmentation de la vitesse, de sorte qu'au rétrécissement du tube « Venturi », qui met en communication les deux cônes tronqués, il s'agit d'obtenir une vitesse suffisamment grande pour anéantir toute pression et créer à sa place un vide ou action aspirante. Réciproquement dans un tuyau conique dont la section ou diamètre augmente, l'eau perd en vitesse et gagne en pression ; conséquemment le tube « Venturi » produit une grande perte de charge au rétrécissement de l'appareil, mais à la sortie cette perte est compensée et l'eau revient à peu près à son niveau primitif ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Et pratiquement :

$$Q = \lambda K \sqrt{P - P'}$$

Le facteur λ peut dépendre à la fois du débit et de la forme de l'appareil.

Pour un Venturi ayant $0^m,302$ et $0^m,1366$, $n = 4,89$ et $K = 66,30$, on a trouvé pour valeur $\lambda = 1$ (1).

Le compteur Venturi se compose de deux parties : le tube et l'enregistreur.

Le tube fait corps avec la tuyauterie ordinaire, la seule différence est que sur une petite distance il comprend une fraction tronconique formée de deux troncs de cône accolés par leurs petites bases. Il n'y a donc aucune pièce mécanique en contact avec l'eau et par suite aucune interruption dans l'alimentation.

Le rapport de la section du rétrécissement à celle de la conduite principale, dans laquelle est placé le tube, dépend entièrement des indications données par l'exploitant quant au maximum et au minimum à enregistrer, la section du rétrécissement augmentant lorsque le maximum et le minimum à enregistrer sont élevés, et diminuant quand ils sont bas.

Le tube est muni extérieurement, au rétrécissement et à l'entrée, de chambres de pression annulaires. Ces dernières communiquent avec l'intérieur du tube par de petits trous, garnis de caoutchouc vulcanisé pour empêcher l'incrustation. La pression dans ces chambres est donc la même que celle au rétrécissement et à l'entrée du tube Venturi. De petits tubes, de préférence en cuivre, transmettent ces pressions à l'appareil enregistreur. Les petits trous, les tubes de communication et les chambres de pression peuvent être nettoyés, s'il le faut, sans suspendre l'alimentation.

L'enregistreur, qui peut être placé à toute distance jusqu'à 300 mètres du tube, est généralement muni d'un dispositif traçant un diagramme de la vitesse d'écoulement, ainsi que d'un cadran indiquant la quantité totale d'eau passée. Il est facile de transmettre électriquement à toute distance les indications tant du diagramme que du cadran.

L'enregistreur se compose de deux parties : 1° un tube en forme d'U contenant du mercure qui, communiquant avec l'entrée et le rétrécissement, transmet la « charge de Venturi » ; 2° d'un mouvement d'horlogerie commandant des engrenages et qui indique la mesure du temps. La connexion entre les indications de pression et de temps est établie au moyen de flotteurs placés sur la colonne de mercure dans le tube en U. Ces flotteurs portent de légères crémaillères engrenant avec des pignons en relation avec d'autres crémaillères à l'extérieur des tubes. Ces dernières portent des tiges qui vont au mécanisme à mouvement d'horlogerie. Celle

(1) Essais de l'Institut Électrotechnique de Toulouse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de gauche appartient à l'indicateur à diagramme et supporte, à son extrémité supérieure, un porte-plume dont la hauteur est en relation directe avec la hauteur du mercure dans la branche de gauche du tube en U, autrement dit, avec la « charge de Venturi », de sorte que l'enregistrement est direct et très simple. La crémaillère de droite qui règle l'enregistrement, au moyen du cadran totalisateur, est munie d'un petit support dont la fonction est d'engager ou de dégager l'engrenage sur le fond du cylindre totalisant, ainsi que le pignon qui fait marcher le cadran.

L'appareil imaginé et étudié par la Société Belge des appareils Rateau indique et enregistre les débits en échelles proportionnelles au débit et il permet de transmettre les indications à telle distance que l'on veut.

Lorsque l'on possède une dépression suffisante, comme lorsque l'appareil est placé à l'amont de la turbine et qu'il s'agit de fortes pressions, on relie par des tuyaux *cd* (*fig.* 162) le col du Venturi et une partie normale quelconque de l'amont de la conduite aux branches *e* et *f* d'un tube manométrique de forme appropriée contenant un liquide conducteur de l'électricité, le mercure de préférence. Dans la branche manométrique *f* est disposé un conducteur électrique *g* dont la résistance *r* varie suivant une loi déterminée en fonction de sa hauteur d'immersion dans le mercure (où il varie suivant la racine carrée de la dépression). L'une des extrémités du conducteur d'une part et le mercure d'autre part sont reliés par deux simples fils à un appareil de mesure à déviations proportionnelles. Pour indiquer le débit, il suffit que l'appareil donne des indications proportionnelles à la racine carrée de la chute de pression. La (*fig.* 165) montre le montage de l'appareil électrique. L'un des cadres J, de l'équipage mobile est branché sur la résistance qui varie suivant $\sqrt{p}$ et l'autre J_2 est branché

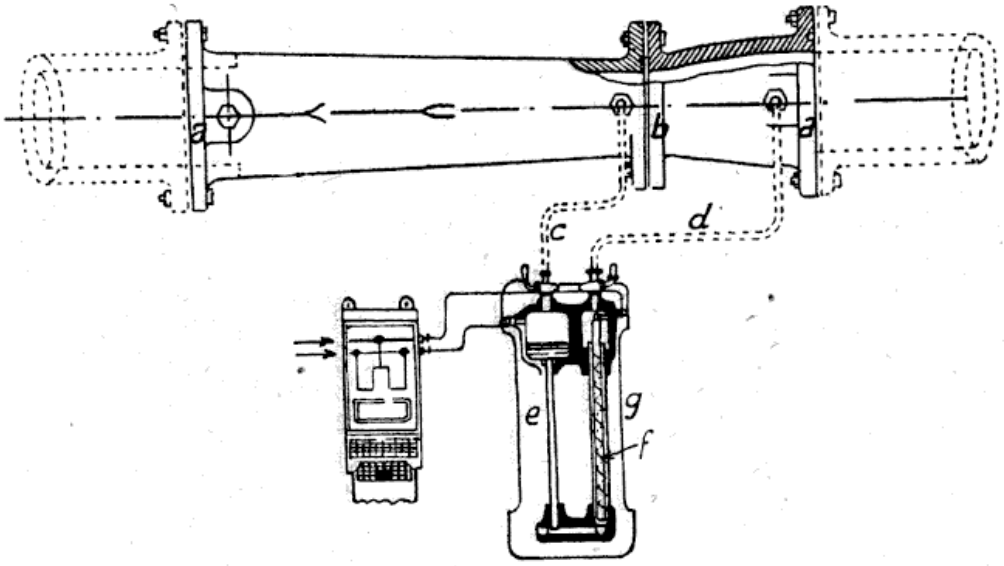


FIG. 162.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

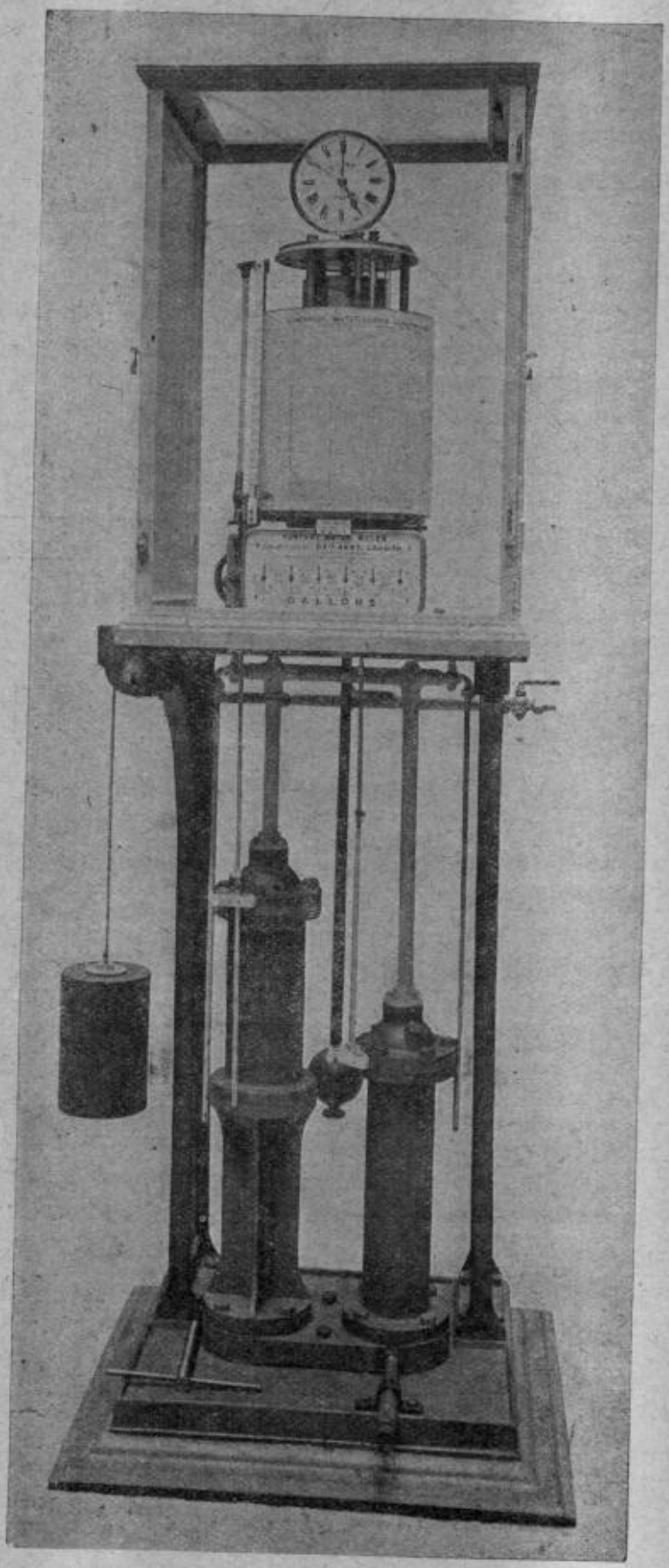


FIG. 163. — Compteur enregistreur Venturi à diagramme et cadran réunis, indiquant la vitesse d'écoulement du liquide passant réellement par l'appareil et la quantité qui a passé par le tube Venturi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur la tension du réseau alimentant l'appareil. J_2 a une résistance constante. Si on ne dispose pas d'une dépression p suffisante (cas où les tuyères noyées du Venturi se trouvent dans un canal de fuite de la turbine, ou lorsque le Venturi se trouve placé à l'amont, mais qu'il s'agit d'une installation à faible ou moyenne pression), pour qu'une très faible

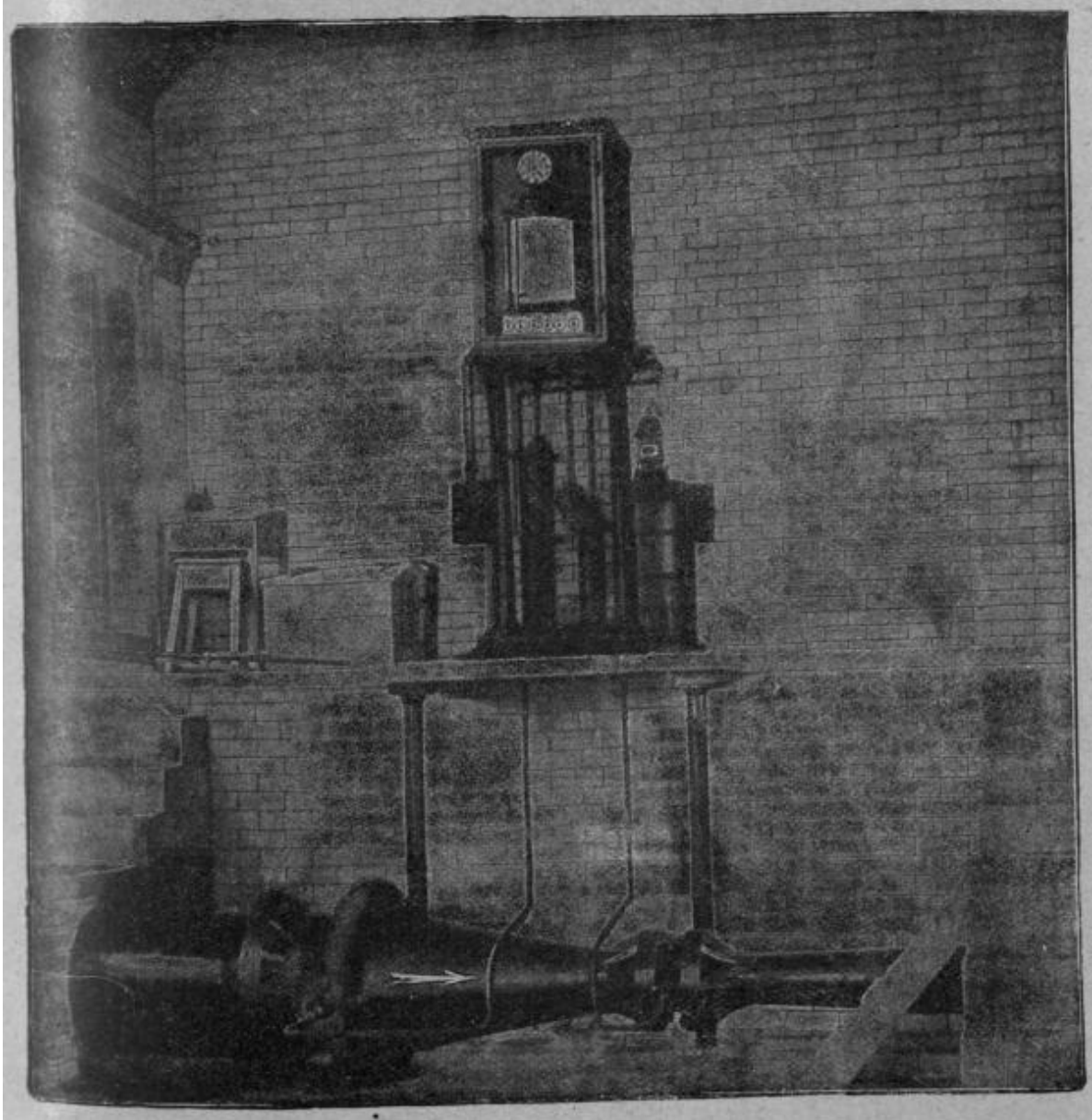


FIG. 164. — Installation d'un compteur Venturi

charge puisse suffire on a recours au dispositif (*fig.* 166). Le manomètre différentiel devient un multiplicateur à cloche.

Dans le réservoir cylindrique R se trouve du mercure et dans celui-ci plonge une cloche munie d'un flotteur intérieur F en matière isolante. Une résistance électrique r est disposée autour de ce flotteur de manière

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que sa résistance varie suivant la racine carrée de la hauteur H dont elle pourra s'élever au-dessus du mercure.

Toutes les autres parties de la cloche sont remplies d'eau. La pression P_0 de l'amont du Venturi agit à l'intérieur de la cloche par l'intermédiaire du tuyau *d*, la pression P_1 au col du Venturi agit à l'extérieur de la cloche.

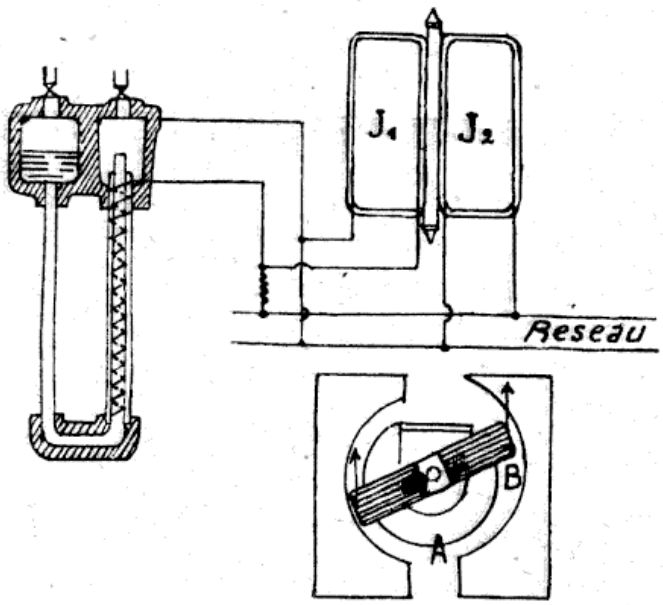


FIG. 165.

Sous l'influence de $p = P - P_0$, la cloche monte d'une quantité toujours proportionnelle à p. En montant, la valeur de la résistance enroulée à la périphérie du plongeur varie suivant $\sqrt{p}$, c'est-à-dire proportionnellement au débit. Cette résistance est reliée au même appareil électrique que celui employé avec simple manomètre différentiel et le fonctionnement de l'ensemble est le même.

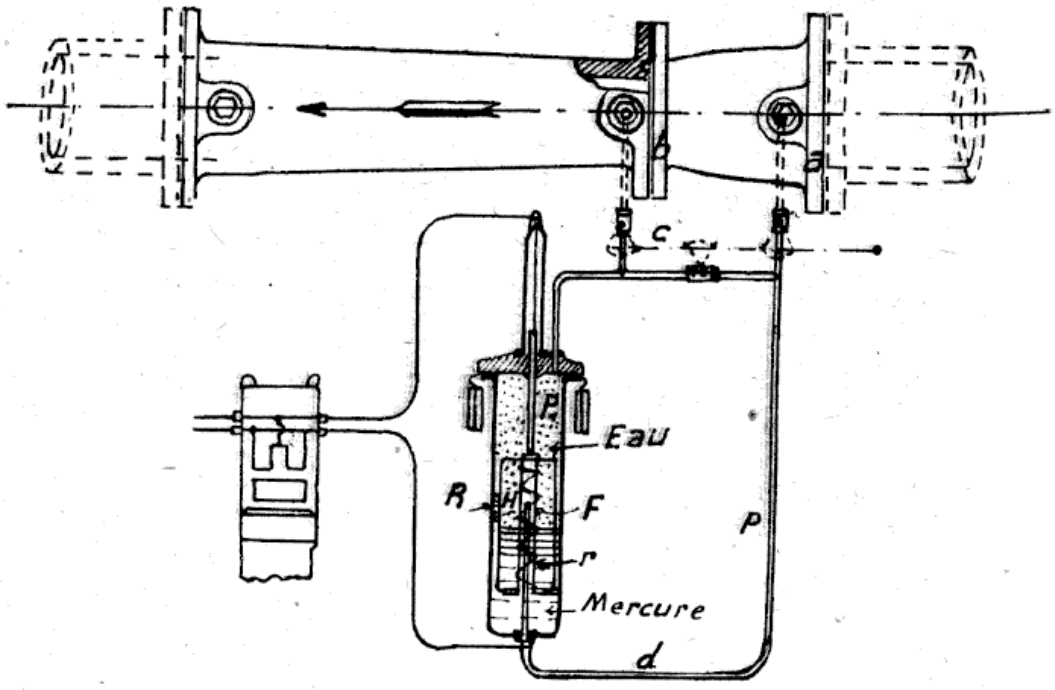


FIG. 166.

Les erreurs dans ces appareils peuvent être rendues inférieures à 1 0/0 du débit réel.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin l'appareil indicateur ou enregistreur peut être installé à tel endroit qu'on le désire.

L'enregistrement, à n'importe quel point, doit être proportionnel à la racine carrée de la charge.

Cet appareil, très précis (il donne les volumes d'eau à 2 0/0 près), très simple, et qui peut être placé à demeure sur les conduites forcées pour le contrôle permanent des débits et de la marche des turbines, semble devoir acquérir toute la confiance des techniciens. Il a été étudié de près par la Commission des turbines hydrauliques et des essais, très précis, ont été faits au Conservatoire des Arts et Métiers.

Le Venturi peut être installé soit à l'amont, soit à l'aval des appareils

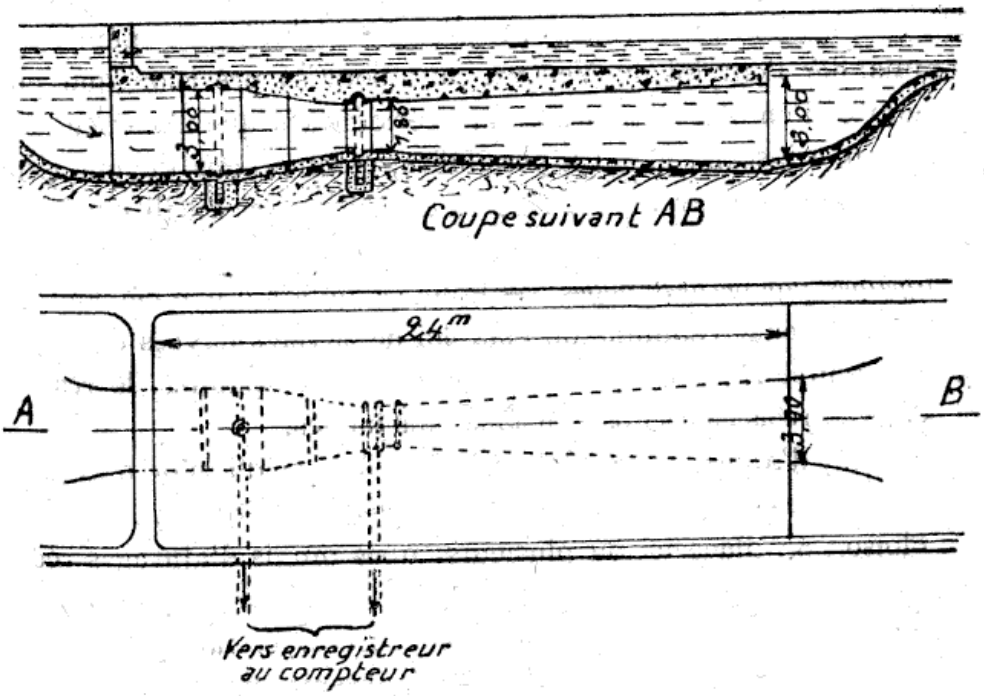


FIG. 167.

d'utilisation, lesquels sont généralement des turbines. La (*fig.* 167) montre un venturi installé pour mesurer le débit d'une rivière. Un tel dispositif est applicable aux canaux de fuite des turbines, mais on peut aussi simplement ne pas mettre la partie divergente et ainsi se borner à une ou plusieurs tuyères convergentes noyées.

La (*fig.* 162) montre la disposition d'un Venturi placé sur la conduite d'amenée d'eau à une turbine ; ainsi qu'on le voit l'entrée et le col du Venturi sont raccordés aux deux branches d'un manomètre différentiel. Il y a une catégorie d'usines où l'emploi du Venturi est à peu près indispensable, ce sont les usines qui prennent l'eau dans un réservoir, dont les ressources en eau ne sont pas illimitées. On peut citer à cet égard, l'usine hydroélectrique d'Éget dans les Hautes-Pyrénées et l'usine de Porté dans les Pyré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nées-Orientales. Ici les Venturi font office de sept jaugeurs indiquant à chaque instant la quantité débitée, c'est-à-dire sortie du réservoir de mise en charge, et permettant par suite, au gardien de la prise d'eau, de la régler à volonté.

Dans les essais faits à l'usine hydroélectrique de Soulom par MM. Camichel, Eydoux et Lhériaud et pour des débits atteignant jusqu'à 3.000 litres à la seconde, il a été reconnu que les écarts entre les débits donnés par le déversoir et le Venturi n'atteignaient jamais 4 0/0, et en général ne dépassaient pas 2 0/0. Or le déversoir pouvant donner une précision de 2 0/0, c'est donc la preuve que le Venturi donne industriellement la même précision que le déversoir établi suivant toutes les règles prescrites pour le maximum de précision.

En conséquence on ne saurait, au dire de ces distingués opérateurs, trop recommander l'emploi du Venturi tant pour sa précision que pour sa commodité d'emploi dans les essais périodiques que l'on peut avoir à faire sur une installation. La possibilité, comme nous l'avons expliqué, d'en faire un enregistreur contribue à en augmenter l'utilité puisque l'on est ici en présence d'un instrument de contrôle permanent.

Jaugeages par orifices noyés. — Pour les débits d'une certaine importance, M. Rateau recommande l'emploi de tuyères noyées de préférence aux déversoirs. L'installation n'est pas plus compliquée, le résultat au moins aussi précis et les observations plus faciles.

On installe d'abord un canal dont la forme a peu d'importance, traversé par une cloison s'élevant au-dessus du niveau du liquide. Au travers de cette cloison on place un ou plusieurs tubes munis d'ajutages réduisant au minimum les pertes de charge.

Suivant les quantités d'eau qu'on doit mesurer, on fait varier le nombre et les dimensions des ajutages de façon à obtenir, entre l'amont et l'aval de la cloison, une dénivellation aussi grande que possible sans cependant découvrir les ajutages.

La section des orifices étant connue ainsi que la différence de hauteur de l'eau à l'amont et à l'aval (H), la valeur du débit Q est fournie par l'expression :

$$Q = 4{,}25\, S \sqrt{H}.$$

L'erreur se chiffre à 1 0/0 à 2 0/0 maximum.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE V

CONDUITES FORCÉES

I. — FORMULES POUR LA DÉTERMINATION DU DIAMÈTRE DES CONDUITES D'EAU

65. Mouvement de l'eau dans les tuyaux. — Dans un tuyau, la vitesse de tous les filets liquides d'une section varie du centre à la périphérie : elle décroît depuis l'axe, où elle est la plus grande, jusqu'à la paroi, où elle est la plus faible. La vitesse moyenne est à une distance du centre entre 0,66 et 0,71 du rayon du tuyau.

FIG. 168.

L'on ne considère que la *vitesse moyenne* dans les questions ordinaires, c'est-à-dire celle qui, multipliée par la section transversale du tuyau, donnerait le débit *réel* ou le volume réellement écoulé par cette section dans l'unité de temps. On la désigne par la lettre U (*fig.* 168). Si la section de la conduite est partout la même, le débit étant le même pour chaque section à cause de la permanence du mouvement, il en résulte que la vitesse moyenne est constante.

La formule pratique fondamentale du mouvement de l'eau dans un tuyau est :

$$\frac{1}{4}\,DJ = F(U),$$

dans laquelle J est égal au rapport $\left(\frac{h}{l}\right)$: h, charge totale pour la longueur l de la conduite considérée, c'est-à-dire la différence de niveau entre le réservoir d'alimentation et le bout de la conduite. Donc J est la perte de charge par unité de longueur du tuyau de diamètre D.

La *résistance* occasionnée par le frottement des filets liquides contre les parois du tuyau est indépendante de la pression, proportionnelle à la longueur du tube, et dépend de la nature des parois ainsi que de la vitesse d'écoulement, soit pratiquement de la vitesse moyenne. La résistance du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tuyau à l'écoulement d'un liquide croissant très rapidement avec la vitesse moyenne, on évite, en général, de donner à cette vitesse des valeurs supérieures à 2 mètres par seconde.

Dans les distributions d'eau pour l'alimentation des villes, on ne dépasse généralement pas la vitesse de $0^m,80$, surtout dans les conduites à fortes déclivités.

Les vitesses *maxima* sont les suivantes :

Diamètre du tuyau	Vitesse	Diamètre du tuyau	Vitesse
0,06	0,70	0,40	1,25
0,10	0,75	0,60	1,60
0,20	0,90	0,80	1,80
0.30	1,10	1,00	2,00

Dans les conduites métalliques en acier, pour chutes d'eau, ne travaillant pas à plus de 4 kilogrammes, on peut adopter 3 à 4 mètres par seconde pour la vitesse d'écoulement.

Le *débit* diminue avec le diamètre du tuyau ; il augmente avec la vitesse comme la racine carrée de l'augmentation de la charge. Donc, si on *diminue* le diamètre d'un orifice, on *augmente* la charge sur l'orifice et par suite la vitesse.

Le *débouché* d'une conduite est la facilité avec laquelle une pression donnée h y fait circuler le liquide. Le débouché pris pour unité est celui d'un tuyau qui débite 1 mètre cube par seconde sous une perte de charge de 1 mètre.

La *puissance* d'une conduite, parcourue d'un bout à l'autre par un même volume de liquide, est le produit de sa longueur développée par le débit. On prend pour unité la puissance d'une conduite de 1 mètre de longueur débitant 1 mètre cube par seconde.

L'expression donnant la *perte de charge* h dans une conduite de longueur l et de section Ω, l'eau ayant une vitesse w, est :

$$h = \varphi \frac{\chi l}{\Omega} \frac{w^2}{2g}.$$

Si dans cette formule on remplace χ par πd et Ω par $\frac{\pi d^2}{4}$ et si on pose : $\Delta r = 4\varphi$ on obtient :

$$h' = \Delta r \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g}.$$

On prend généralement $\Delta r = 0{,}025$, valeur moyenne.

66. Conduites à diamètre constant. — *a*) FORMULE DE DE PRONY. —

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous avons vu que la formule de l'écoulement ou la loi des résistances est donnée par la relation :

$$\frac{1}{4}\,DJ = F(U).$$

De Prony a trouvé pour F (U) la valeur : $aU + bU^2$; d'où :

$$\frac{1}{4}\,DJ = aU + bU^2,$$

avec :

$$a = 0{,}0000173 \qquad \text{et} \qquad b = 0{,}000348.$$

b) Formule de Darcy. — Cet illustre ingénieur a reconnu que la nature et l'état des surfaces des parois avaient une action sensible sur les débits des conduites et que, dans les tuyaux recouverts de dépôts, soit au bout de quelque temps de service, la résistance devait être considérée comme simplement proportionnelle au carré de la vitesse.

D'où la formule monôme :

$$\frac{1}{4}\,DJ = b_1 U^2 \qquad \text{ou} \qquad J = \frac{4}{D}\,b_1 U^2,$$

dans laquelle : $b_1 = \alpha + \frac{\beta}{r}$, r étant le rayon du tuyau.

Pour les tuyaux neufs, $\alpha = 0{,}000507$ et $\beta = 0{,}00000647$. On peut donc écrire : $b_1 = 0{,}000507 + \dfrac{0{,}00001294}{D}$.

Par suite :

$$\frac{1}{4}\,DJ = \left(0{,}000507 + \frac{0{,}00001294}{D}\right)U^2.$$

Le volume d'eau Q écoulé par seconde étant égal au produit de la section Ω du tuyau par la vitesse, en substituant à U, dans la formule $\frac{1}{4}\,DJ = b_1 U_2$, qui est celle des tuyaux neufs, sa valeur $\left(\frac{Q}{\Omega}\right)$ ou $\dfrac{Q}{\frac{1}{4}\pi D^2}$, on obtient :

$$\frac{DJ}{2} = b_1 \left(\frac{Q}{\frac{1}{4}\pi D^2}\right)^2.$$

Et, en remplaçant b_1 par sa valeur :

$$(1) \qquad J = \left[\frac{3{,}2423}{D^5}\left(0{,}000507 + \frac{0{,}00001294}{D}\right)\right]Q^2 ;$$

soit, en remplaçant par α la valeur entre double parenthèse :

$$J = \alpha Q^2.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les tuyaux en service, on double la valeur de α, et les formulaires renseignent sur les valeurs diverses de α.

La formule de Darcy peut se mettre aussi sous la forme :

$$D = \frac{(0{,}0025 \times LQ^2)^{\frac{1}{5}}}{J},$$

D exprimé en mètres, Q en mètres cubes, et J, la perte de charge, aussi en mètres.

c) Formules de Flamant. — Les formules ci-dessus, basées sur des expériences faites sur des conduites à faibles pressions, ne conviennent généralement pas pour le calcul des conduites forcées de grands diamètres, car elles conduisent à des résultats trop élevés, allant jusqu'au double dans certains cas. La formule de M. Flamant peut s'employer pour de faibles pressions et pour des tuyaux jusqu'à $1^m,30$ de diamètre. Elle a pour expression (tuyaux en service) :

$$\frac{1}{4} DJ = 0{,}00023 \sqrt[4]{\frac{U^7}{D}}; \quad \text{ou} \quad DJ = 0{,}00092 \sqrt[4]{\frac{U^7}{D}}.$$

Cette expression peut se mettre sous la forme :

$$J = \gamma \, Q^{\frac{7}{4}}$$

Auquel cas les tables dressées par M. Flamant donnent les valeurs de γ et $\frac{\gamma}{J}$.

d) Formules de M. Lévy. — Les formules de M. Lévy sont celles qui conviennent le mieux pour le calcul des conduites forcées supportant de hautes pressions.

L'expression qui relie les éléments de la section du tuyau à la vitesse du fluide se présente sous les formes suivantes :

1° $$\left(\frac{U^2}{20{,}5}\right) = RJ\,(1 + 3\sqrt{R}); \quad \text{d'où} \quad U = 20{,}5\sqrt{RJ\,(1 + 3\sqrt{R})},$$

pour les conduites en service courant ;

U, vitesse moyenne ; R, rayon intérieur ; J, perte de charge par mètre ;

Si nous posons :

$$\mu = 20{,}5\sqrt{R + (1 + 3\sqrt{R}}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on obtient :

$$\mu = \frac{U}{\sqrt{J}}$$

et de même si on pose :

$$\beta = \frac{Q}{\sqrt{J}}$$

on pourra recourir aux tables de M. Lévy pour la facilité des calculs.

2° $$D = 0{,}324 \left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right)^{\frac{3}{8}};$$

D, diamètre en millimètres ; Q, débit en mètres cubes par seconde ; J, perte de charge en millimètres par mètre courant. Cette formule s'applique aux tuyaux incrustés ou en service ; elle se présente aussi sous la forme :

$$\frac{1}{4} DJ = \frac{V^2}{840{,}5 \left(1 + 3\sqrt{\frac{D}{2}}\right)}.$$

e) Formule de MM. Ganguillet et Kutter :

$$\frac{1}{4} DJ = \left[\frac{1 + \left(23 + \frac{0{,}00155}{J}\right)\frac{2n}{\sqrt{D}}}{23 + \frac{1}{n} + \frac{0{,}00155}{J}}\right]^2 U^2.$$

Cette formule nécessite l'emploi d'un abaque où $n = 0{,}01$ pour parois en ciment lissé.

Abaque pour le calcul des conduites d'eau. — M. Dariès a construit un abaque en partant de la formule de M. H. Vallot :

$$D = 0{,}324\ Q^{\frac{3}{8}} J^{\frac{3}{16}}.$$

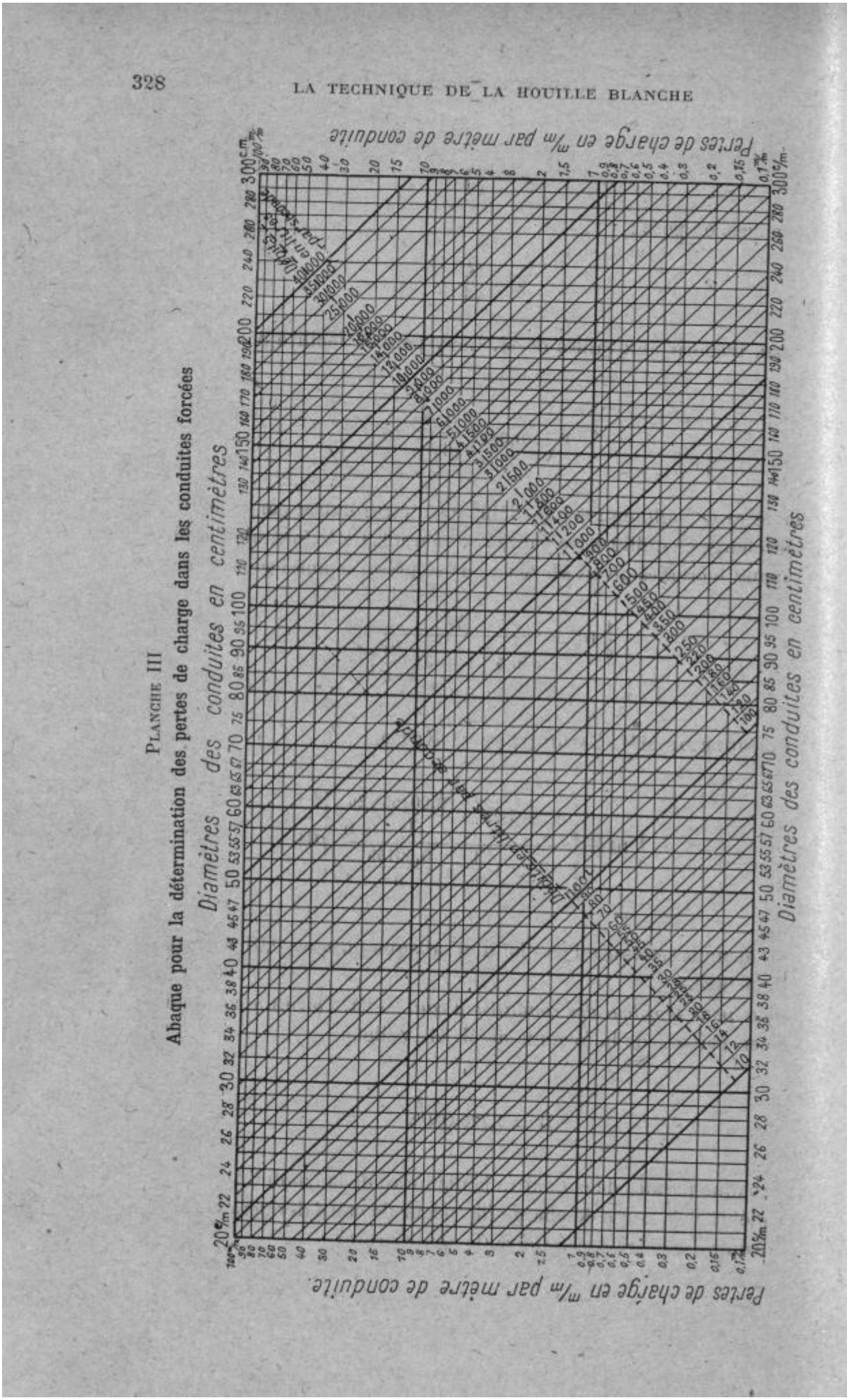
Cet abaque permet de connaître le diamètre de la conduite en connaissant le débit et la perte de charge (la valeur de cette dernière est généralement comprise entre 3 et 6 0/0 de la chute brute).

La planche III donne le moyen de déterminer rapidement les pertes de charge produites par l'écoulement de l'eau dans les conduites forcées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PLANCHE III

Abaque pour la détermination des pertes de charge dans les conduites forcées



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les (*fig.* 169 et 170) ont trait à des graphiques ou diagrammes de pertes de charge.

Quand on doit établir une chute hydraulique de grande hauteur, il est

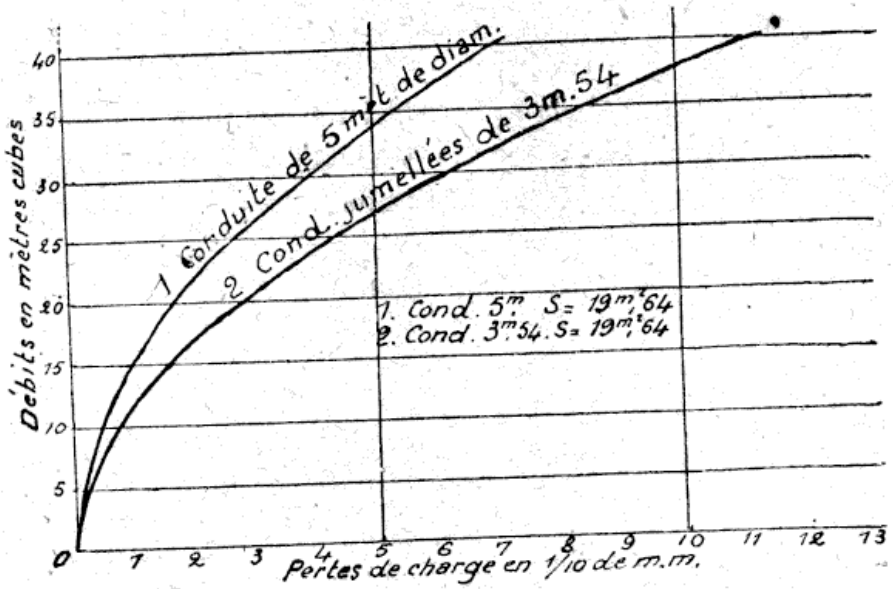


FIG. 169. — Graphiques des pertes de charge dans les conduites.

important d'étudier de très près le diamètre à donner aux conduites forcées, car leur prix devient considérable.

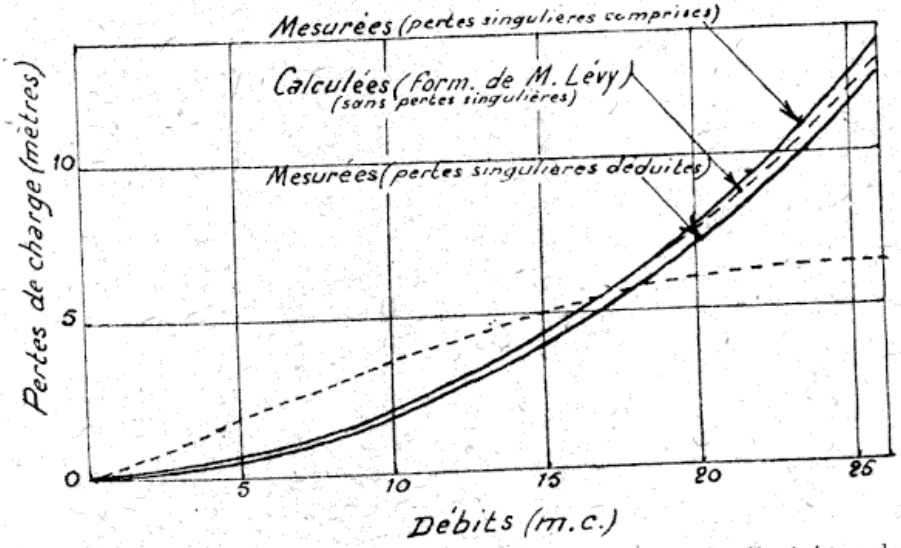


FIG. 170. — Diagramme des pertes de la conduite de l'usine hydroélectrique de Champ. Diamètre 3m,30. Longueur 4.700 mètres. Chûte 37m,40.

Si L est la longueur de la conduite, H la hauteur de chute et D le diamètre, le poids total est donné par la formule :

$$p = 1.3\ H\ D^2\ L$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si N est le nombre d'heures de fonctionnement prévu par an il sera $P = NP'$, P' étant la puissance moyenne. La recette annuelle sera $R = v\,NP'$, v étant le prix de vente du cheval-heure.

Les dépenses comprennent : 1° une partie M, indépendante de la conduite ; 2° une partie variable X, provenant de l'intérêt et de l'amortissement de la conduite.

Si f est le prix en francs de la tonne d'acier et t le taux d'amortissement et d'intérêt par franc, cette partie variable aura pour expression : $X = a\,D^2$, en posant $a = 1{,}3\,HLtf$; la dépense annuelle sera :

$$M + X = M + 1{,}3\,H\,D^2\,L\,t\,f$$

Les bénéfices seront :

$$B = v\,NP' - (M + 1{,}3\,H\,D^2\,L\,t\,f)$$

Il faut donc chercher à rendre maximum la valeur de B.

Si Q est le débit moyen en mètres cubes, h la perte de charge brute, ρ le rendement de l'usine seule, la puissance moyenne sera :

$$P' = \frac{1000}{75}\,Q\,(H - h)\,\rho$$

si $\rho = 0{,}75$, on a :

$$P' = 10\,Q\,(H - h).$$

Or, la perte de charge J par mètre de tuyau peut être évaluée à :

$$J = 0{,}00243\,\frac{Q^2}{D^5},$$

relation équivalente à la formule monome :

$$D = 0{,}3\,\sqrt[5]{\frac{Q^2}{J}}$$

La puissance moyenne devient donc :

$$P' = 10\,Q\left(H - 0{,}00243\,\frac{Q^2 L}{D^5}\right)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et la dépense Y correspondant à la puissance perdue par frottement devient :

$$Y = \frac{b}{D^5},$$

en posant $b = 0{,}00243\ vQ^3NL$.

L'expression des bénéfices annuels sera par suite :

$$B = 10\ Q\ v\ N\ H - M - \left(a\ D^2 + \frac{b}{D^5}\right)$$

La seule variable qui figure dans le second membre est D. L'expression de B sera donc maximum quand le terme soustractif entre parenthèses sera minimum. Si l'on pose :

$$z = a\ D^2 + \frac{b}{D^5},$$

il suffira de chercher la valeur de D qui donne :

$$\frac{dz}{dD} = 0,\ \text{or},\ \frac{dz}{dD} = 2aD - \frac{5b}{D^6}$$

d'où :

$$D = \sqrt[7]{\frac{5b}{2a}} = \sqrt[7]{0{,}046\ \frac{v\ Q^3\ N}{H\ t\ f}}.$$

La valeur ainsi trouvée pour D, calculable par les tables de logarithmes ou la règle à calcul, est celle qui correspond au maximum d'économies, elle est indépendante de la longueur L de la canalisation.

On peut remarquer que $X = a\ D^2 = a\left(\frac{5}{2}\ \frac{b}{a}\right)^{\frac{2}{7}}$ et que $Y = \frac{b}{D^5}\ \frac{b}{\left(\frac{5}{2}\ \frac{b}{a}\right)^{\frac{5}{7}}}$

d'où :

$$\frac{Y}{X} = \frac{2}{5}.$$

On peut donc formuler la règle suivante :

La conduite forcée la plus économique est celle pour laquelle la valeur de l'énergie perdue annuellement par les frottements est égale aux deux cinquièmes du coût annuel de l'intérêt et de l'amortissement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

67. Conduites à diamètres variables. — Les formules ci-dessus sont applicables aux conduites à diamètre constant. Mais, si on a affaire à une conduite à diamètres variables et si nous appelons d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, ... les diamètres des différents parcours ; l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, ..., les longueurs correspondantes, et Q le débit, on a pour l'expression de la perte de charge :

$$\frac{4Q^2}{\pi^2 g}\left(\frac{1}{d_4^2}+\frac{1}{d_3^4}+\frac{1}{d_4^4}+\frac{3}{d_5^4}-\frac{1}{d_1^4}\right)-\frac{16aQ}{\pi}\left(\frac{l_1}{d_1^3}+\ldots+\frac{l_5}{d_5^3}\right)-\frac{64bQ^2}{\pi^2}\left(\frac{l_1}{d_1^5}+\ldots+\frac{l_5}{d_3^5}\right).$$

Si D représente le diamètre constant d'une conduite comportant n tronçons, les valeurs de d_1 (de diamètre plus grand que D) et de d_n (du tronçon de diamètre plus petit que D) seront respectivement :

$$d_1 = D\left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{1}{5}} = 0{,}87D\,(n+1)^{\frac{1}{5}} \quad \text{et} \quad d_n = D\left(\frac{n+1}{2n}\right)^{\frac{1}{5}} = 0{,}87\left(1+\frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{5}}.$$

M. Remo Catani a donné dans la revue *la Houille blanche* (1) une étude relative à une chute de 445 mètres avec un débit de 1 mètre cube, la perte

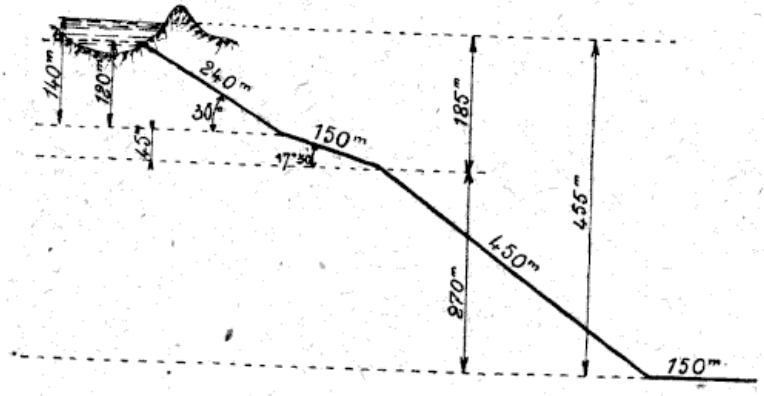


FIG. 171.

de charge admise étant de 2 0/0, soit 9m,10, et la longueur totale 990 mètres (*fig.* 171). Pour une conduite à diamètre constant, on aurait :

$$D = \left(\frac{0{,}0025 \times 990 \times 1}{9{,}10}\right)^{\frac{1}{5}} = 0^m{,}771.$$

(1) Numéro de mars 1904.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En appliquant les formules relatives aux diamètres variables, on obtient :

1er	Étage, diamètre variant de	1m,36	à 0m,89
2e	—	—	0 ,88 à 0 ,82
3e	—	—	0 ,80 à 0 ,70
4e	—	—	0 ,69 à 0 ,68

Les épaisseurs des tuyaux nécessaires dans les deux cas variant de 3 à 25 millimètres pour le diamètre constant et de 4 à 22 millimètres pour les diamètres variables, il en résulte une économie, pour les trois premiers étages, de 7.000 kilogrammes sur les 23.400 kilogrammes de la conduite à diamètre constant, soit 30 0/0, et, pour la partie horizontale, de 17.800 kilogrammes contre 81.400 kilogrammes, soit 22 0/0.

Lorsque la conduite est composée de plusieurs tronçons de longueurs et diamètres différents, on peut appliquer la formule suivante pour un débit donné q. Le cas envisagé comporte trois tronçons.

$$J = 0{,}002 \left[\frac{l_1}{D_1^5} \left(\frac{q}{2}\right)^{\frac{15}{8}} + \frac{l_2}{D_2^5} \left(\frac{q}{4}\right)^{\frac{15}{8}} + \frac{l^3}{D_3^5} \left(\frac{q}{8}\right)^{\frac{15}{8}} \right].$$

Si on prend $D_1 = 0^m,700$, $D_2 = 0^m,500$ et $D_3 = 0^m,360$, on obtient :

$$J = q^{\frac{15}{8}} (0{,}0032 l_1 + 0{,}0047 l_2 + 0{,}0077 l_3) = 7 q^{\frac{15}{8}}.$$

Pour une conduite à diamètres variables, si on divise la longueur en un nombre de tranches n et si on admet que les diverses pertes de charge y croissent comme les termes d'une progression arithmétique, de telle sorte que l'on ait :

$$j_1 = j_1, \quad j_2 = 2j_1, \quad \ldots, \quad j_r = rj_1, \quad \ldots, \quad j_n = nj_1$$

et :

$$J = \Sigma j = (1 + 2 + 3 + \ldots + r + \ldots + n) j_1,$$

de ces expressions on tire :

$$j_1 = \frac{2J}{n(n+1)} \qquad \text{et} \qquad j_r = \frac{2J}{n(n+1)},$$

r étant le r^{me} tronçon de la conduite.

Ainsi que nous le verrons plus loin, il y a une importance marquée à diminuer le poids du métal employé, dans la mesure du possible, tout en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne dépassant pas une perte de charge déterminée. Dans le premier tronçon, la vitesse est moindre que dans le cas d'un diamètre constant, ce qui fournit l'avantage de réduire la perte de charge à l'entrée de l'eau dans le tuyau et d'empêcher, pour une hauteur d'eau donnée dans la chambre de mise en charge, la création, le long de la conduite, de poches d'air nuisibles au bon fonctionnement du moteur hydraulique.

Alors que le volume V contenu dans un tuyau vertical de diamètre constant est : $V = \frac{\pi D^2 H}{4}$, le volume V′ d'un tuyau à diamètre variable, de même hauteur H et pour une même perte de charge, est :

$$V' = \frac{D^2 H}{4n}\left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{2}{5}} \int \left(\frac{1}{r^5}\right)_{r=1}^{r=n} \quad \text{ou :} \quad V' = \frac{V}{n}\left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{2}{5}} \int \left(\frac{1}{r^5}\right)_{r=1}^{r=n};$$

n, nombre de tranches, en lesquelles on suppose divisée la hauteur H, et r, le n^{me} tronçon.

Pour $n = 10$, on a $V' = 1{,}14$ V, soit une augmentation de volume de 14 0/0.

Quoique ce volume soit plus grand, la force vive de la masse liquide contenue dans la conduite est moindre dans le cas de diamètres variables que dans celui du diamètre constant, et la diminution de la force vive est un précieux avantage contre les coups de bélier et facilite en outre la régulation des turbines.

Pour une même charge d'eau, et en appelant Q le débit d'une canalisation à diamètre constant et Q′ celui d'une canalisation à diamètres variables, le rapport μ de ces deux quantités est :

$$\mu = \frac{Q'}{Q} = \frac{d_n^2}{D^2} = \left(\frac{n+1}{2n}\right)^{\frac{2}{5}}.$$

Pour $n = 33$, on trouve $\mu = 0{,}75$.

Nous n'avons envisagé jusqu'ici que la perte de charge provenant de l'écoulement du liquide dans une conduite rectiligne ; mais il y a d'autres pertes, telles que celles dues à un élargissement brusque de section, au passage d'une section à une autre plus petite, à un coude brusque ou arrondi, et enfin celle qui se produit au sortir du réservoir et à l'entrée de la conduite ; mais les pertes de charges provenant de ces diverses circonstances sont d'ordre relativement négligeable devant la perte par frottement dans la conduite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les coudes arrondis, on peut employer la formule Napier :

$$P = \frac{U^2}{2g}(0{,}0039 + 0{,}0186r)\frac{a}{r^2};$$

P, perte en atmosphères ; r, rayon de courbure du tuyau de raccordement en mètres ; a, longueur de l'arc développé correspondant.

La position de la conduite étant déterminée par la situation des ouvrages d'amont et d'aval, pour en réaliser la plus grande économie on ne peut que faire varier la vitesse et le diamètre du tuyau. Si on veut diminuer la perte de charge, il faut augmenter le diamètre et par conséquent le poids de la conduite. C'est par tâtonnements qu'on arrive à déterminer le diamètre, de façon que l'économie réalisée par la diminution de la perte de charge donne un chiffre inférieur à celui dépensé pour obtenir ce surcroît de diamètre.

Ce calcul suppose qu'on connaît au préalable le prix de vente du cheval hydraulique, ce qui, en général, est difficile à apprécier. Dans un projet d'aménagement de chute d'eau, il y a intérêt, quand cela est possible, à déterminer, autant que faire se peut, la longueur des conduites forcées qui constituent un des éléments les plus coûteux. Si l'usine est rapprochée du cours d'eau, celui-ci est encaissé dans les roches, et alors sa situation permet l'établissement d'un tunnel, qui, avec une très faible pente, déversera l'eau dans une chambre d'eau située au-dessus de l'usine, et on diminuera ainsi la longueur de la colonne de pression. A mesure que l'on s'éloigne de la source, la pente du torrent diminue, et il faut dans ce cas suivre le thalweg du cours d'eau. Alors on établit un canal ouvert arrivant à la chambre d'eau que l'on met aussi élevée que possible. On fait une partie de la colonne de pression en ciment armé, jusqu'à 2 kilogrammes de pression environ, et on achève la conduite avec des tuyaux en acier jusqu'au collecteur de l'usine.

Dans ce dernier cas, les installations sont plus coûteuses et elles sont faites pour de plus gros débits.

Le tableau ci-après, publié par la maison Teisset-Chapron et Brault frères, permet de trouver la perte de charge provenant de l'écoulement de l'eau dans des tuyaux dont le diamètre varie de $0^m,200$ à 2 mètres et pour des vitesses de $0^m,800$ à 2 mètres.

Les poids du mètre courant de conduites sont indiqués approximativement ; ils comprennent les cornières et boulons d'assemblage correspondant à des longueurs comprises entre 4 et 6 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Conduites en tôle de 0m,200 à 2 mètres de diamètre

DIAMÈTRE intérieur DES TUYAUX	VITESSE DE L'EAU A LA SECONDE												ÉPAISSEUR DE LA TOLE		
	0m,500		1m,000		1m,250		1m,500		1m,750		2m,000		4mm	5mm	6mm
	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	POIDS PAR MÈTRE		
m.		m.		m.		m.		m.		m.		m.	kg.	kg.	kg.
0,200	25	0,00724	31	0,01114	39	0,01763	47	0,01560	55	0,03505	62	0,04455	25	31	37
0,250	39	0,00564	49	0,00890	61	0,01380	73	0,01977	85	0,02680	98	0,03646	32	40	48
0,300	56	0,00460	70	0,00719	88	0,01136	106	0,01649	123	0,02221	141	0,02918	40	47	57
0,350	77	0,00397	96	0,00617	120	0,00965	144	0,01389	168	0,01891	192	0,02470	46	56	66
0,400	100	0,00340	125	0,00532	157	0,00840	188	0,01204	219	0,01634	251	0,02147	50	60	75
0,450	127	0,00302	159	0,00474	198	0,00735	238	0,01062	278	0,01449	318	0,01897	55	70	85
0,500	157	0,00271	196	0,00423	245	0,00662	294	0,00953	343	0,01297	392	0,01694	65	80	95
0,550	190	0,00245	237	0,00388	296	0,00588	356	0,00865	415	0,01176	475	0,01541	70	85	105
0,600	226	0,00224	282	0,00349	353	0,00548	424	0,00790	494	0,01073	565	0,01403	80	95	115
0,650	266	0,00207	332	0,00323	415	0,00504	497	0,00723	580	0,00985	663	0,01287	85	105	125
0,700	308	0,00191	385	0,00299	481	0,00467	577	0,00673	672	0,00913	770	0,01198	95	115	135
0,750	354	0,00178	442	0,00278	552	0,00434	662	0,00624	773	0,00850	883	0,01110	100	120	145
0,800	402	0,00167	502	0,00260	628	0,00407	753	0,00586	879	0,00798	1.005	0,01044	105	130	155
0,850	454	0,00157	567	0,00245	709	0,00383	850	0,00550	991	0,00748	1.135	0,00981	110	135	160
0,900	509	0,00148	636	0,00231	795	0,00361	954	0,00520	1.113	0,00708	1.272	0,00924	120	145	170
0,950	567	0,00140	708	0,00218	885	0,00341	1.062	0,00491	1.240	0,00670	1.417	0,00875	125	150	180
1,000	628	0,00132	785	0,00207	981	0,00324	1.177	0,00466	1.374	0,00635	1.570	0,00829	130	160	190
1,050	693	0,00126	866	0,00197	1.082	0,00309	1.298	0,00444	1.514	0,00605	1.731	0,00791	140	170	200
1,100	760	0,00120	950	0,00188	1.187	0,00294	1.425	0,00424	1.663	0,00578	1.900	0,00754	145	180	205
1,150	830	0,00115	1.038	0,00179	1.297	0,00280	1.557	0,00404	1.816	0,00550	2.077	0,00720	150	190	215
1,200	905	0,00110	1.131	0,00172	1.414	0,00269	1.696	0,00387	1.980	0,00528	2.262	0,00689	155	200	225
1,300	1.062	0,00101	1.327	0,00159	1.658	0,00248	1.990	0,00357	2.321	0,00486	2.654	0,00635	175	215	255
1,400	1.231	0,00094	1.539	0,00147	1.924	0,00230	2.309	0,00331	2.693	0,00451	3.078	0,00589	190	230	275
1,500	1.414	0,00088	1.767	0,00137	2.208	0,00214	2.650	0,00309	3.092	0,00420	3.534	0,00549	205	250	290
1,600	1.608	0,00082	2.010	0,00128	2.513	0,00200	3.015	0,00289	3.518	0,00393	4.021	0,00514	215	260	310
1,700	1.816	0,00076	2.270	0,00121	2.837	0,00189	3.405	0,00272	3.972	0,00370	4.540	0,00484	225	270	320
1,800	2.036	0,00073	2.545	0,00114	3.180	0,00178	3.817	0,00257	4.453	0,00349	5.089	0,00456	235	290	340
1,900	2.268	0,00069	2.835	0,00108	3.544	0,00168	4.252	0,00243	4.960	0,00379	5.670	0,00432	250	300	360
2,000	2.513	0,00065	3.141	0,00102	3.926	0,00160	4.712	0,00230	5.497	0,00367	6.283	0,00410	250	320	380

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

68. Détermination du débit correspondant au travail maximum à l'issue aval d'une conduite donnée. — On se trouve obligé, dans certains cas, d'utiliser une conduite déjà existante. Alors il convient de rechercher les conditions de débit dans lesquelles cette utilisation doit aboutir au plus grand travail utile.

En partant de la formule de Darcy (§ 66), la perte de charge dans une conduite de longueur l est :

$$p = l\alpha Q^2.$$

La charge effective à l'aval de la conduite a par suite pour expression :

$$H - p = H - l\alpha Q^2,$$

H, hauteur brute de la chute.

Quant au travail disponible, il est :

$$T = Q\,(H - l\alpha Q^2) = QH - Q^3 l\alpha.$$

Il s'agit donc de déterminer la valeur Q pour laquelle T est maximum. H étant constant, l'expression $QH - Q^3 l\alpha$ sera maximum avec :

$$Q - \frac{l\alpha}{H} Q^3.$$

L'analyse montre qu'elle atteint son maximum lorsque :

$$Q = \sqrt{\frac{H}{3l\alpha}}.$$

En remplaçant Q par sa valeur dans celle de T ci-avant, on obtient :

$$(1) \qquad T = \sqrt{\frac{H}{3l\alpha}}\, H - l\alpha \frac{H}{3l\alpha}\sqrt{\frac{H}{3l\alpha}} = \frac{2}{3} H \sqrt{\frac{H}{3l\alpha}}.$$

La perte de charge par mètre sera :

$$J = \alpha Q^2 = \alpha \frac{H}{3l\alpha} = \frac{H}{3l}.$$

Et la perte de charge totale $= lJ = \dfrac{lH}{3l} = \dfrac{H}{3}$.

Ainsi, pour obtenir le travail maximum, il faut sacrifier en perte de charge le tiers de la charge brute totale sous laquelle la conduite est établie ; c'est à cette condition que le produit de la charge par le débit correspondant atteint sa plus grande valeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rapport du débit pour travail maximum au débit à débouché lib

où à travail nul $= \dfrac{\sqrt{\dfrac{H}{3l\alpha}}}{\sqrt{\dfrac{H}{l\alpha}}} = \sqrt{\dfrac{1}{3}} = 0.577.$

Si pour l'établissement de la valeur de T, on veut tenir compte de l puissance vive de l'eau en mouvement, il faut faire intervenir un coeffi cient de la forme : $\beta = \dfrac{8}{n^2 D^2 g}$, et alors :

$$Q = \sqrt[2]{\frac{H}{3\,(l\alpha - \beta)}} \qquad \text{et } T = \frac{2}{3} H \sqrt{\frac{H}{3\,(l\alpha - \beta)}}.$$

La perte de charge totale sera aussi égale à : $\dfrac{H}{3}$.

Mais, dans ce cas, le sacrifice du tiers de la charge brute ne correspond plus uniquement à la perte de charge due au frottement de l'eau, mais à la différence entre cette perte de charge et la charge due à la vitesse propre de l'eau.

II. — CONSTRUCTION DES TUYAUX

69. Tuyaux en tôle. — Pour les conduites de distributions d'eau de villes, la fonte de fer est restée, jusqu'à présent, le métal préféré dans la fabrication des tuyaux, ainsi que pour les canalisations de gaz et de vapeur. Cette préférence est justifiée par la flexibilité du métal, qui lui permet d'épouser toutes les formes répondant aux exigences des canalisations, ainsi que par son inoxydabilité, qui lui assure une durée plusieurs fois séculaire.

Les tuyaux en fonte résistent très bien aux pressions usuelles adoptées en pareil cas et offrent le minimum de joints.

On distingue les tuyaux à emboîtement et cordon, les tuyaux articulés avec joints Doré, les tuyaux à emboîtement avec joints en caoutchouc (joint Chapée, joints Somzée et Trifet), les tuyaux cylindriques avec joint Gibault ou avec joint Lavril, et enfin les tuyaux à brides (1).

Pour les tuyaux destinés à supporter des pressions plus élevées, M. Roger a imaginé de fretter les conduites en fonte, à partir de 0m,300 de diamètre jusqu'à 1m,50, à l'aide de bagues en acier posées à chaud.

(1) *Traité des canalisations et distributions d'eau*, par E. Pacoret. J. Loubat et Cie, éditeurs à Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le même ordre d'idées, M. Jacquemart utilise un frettage à l'aide de fils d'acier. Par le frettage, on a non seulement réalisé un recul sensible de la charge de rupture de la fonte, mais on a aussi limité, en cas d'avarie, l'intensité des débits nuisibles par les seules fissures, les frettes retenant en place les parties brisées par les effets de coups de bélier, avantage très appréciable pour les tuyaux de grand diamètre.

Pour les conduites forcées utilisées dans les prises d'eau des hautes chutes, le métal exclusivement employé est la tôle d'acier doux, répondant aux qualités suivantes définies par M. A. Bouchayer : 1° acier extra-doux, fabrication de première qualité, dont la résistance R à la rupture est de 38 à 40 kilogrammes, l'allongement A, de 24 à 25 0/0 avec tolérance de 2 0/0 (correspondant à une résistance de 2 kilogrammes en moins ou en plus, la somme R + A restant égale à 64) ; 2° acier extra-doux, qualité chaudière, avec R = 38 à 40 kilogrammes, A = 26 à 28 0/0, la somme R + A restant égale à 66.

Les tuyaux se font à double clouure longitudinale et transversale, ou ils sont revêtus de bandes circulaires. D'autres fois on dispose, de distance en distance, des brides en fers cornières, placées à environ tous les 4 mètres, ces brides formant joints des tronçons entre eux par l'intermédiaire d'une tresse de chanvre serrée par des boulons.

Quand l'épaisseur des tôles dépasse 20 millimètres, on a intérêt à remplacer les clouures, au moins celles longitudinales, par la soudure autogène des tôles, car le calcul rationnel des clouures oblige alors à admettre des triples rangées longitudinales de rivets.

En Suisse, la Société des forces motrices du lac Tanay a installé une conduite en acier Martin-Siemens sous 950 mètres de chute (§ 486), sans aucune rivure. Les plus gros tuyaux ont été soudés à la main et les autres au laminoir. Tous les tronçons ont été essayés à l'usine à 50 0/0 de surpression, le métal travaillant normalement à 7 kilogrammes.

La rigidité de deux tôles rivées l'une à l'autre est huit fois plus grande que celle de chacune des deux tôles considérées isolément. Par suite, les cercles de recouvrement des spirales successives qui composent une canalisation en tôle constituent de véritables armatures transversales. La maison Bouchayer et Viallet emploie des spirales constituées par une double rivure, évitant ainsi les armatures transversales. Elle fait usage aussi des joints à brides en fers cornières formant jonction des tronçons entre eux.

La maison Bouchayer et Viallet, qui s'est acquis une grande réputation comme constructeur de conduites forcées, établit ses conduites de petit diamètre (150 à 550 millimètres de diamètre), en tronçons de $6^{m},50$ de longueur, en grandes et petites viroles cylindriques, les pinces se chevauchant. L'assemblage des tronçons entre eux se fait à l'aide de brides et de joints. Les brides sont fixes ou tournantes ; les premières constituées par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des cornières cintrées, soudées et placées à chaud sur le marbre, ou en

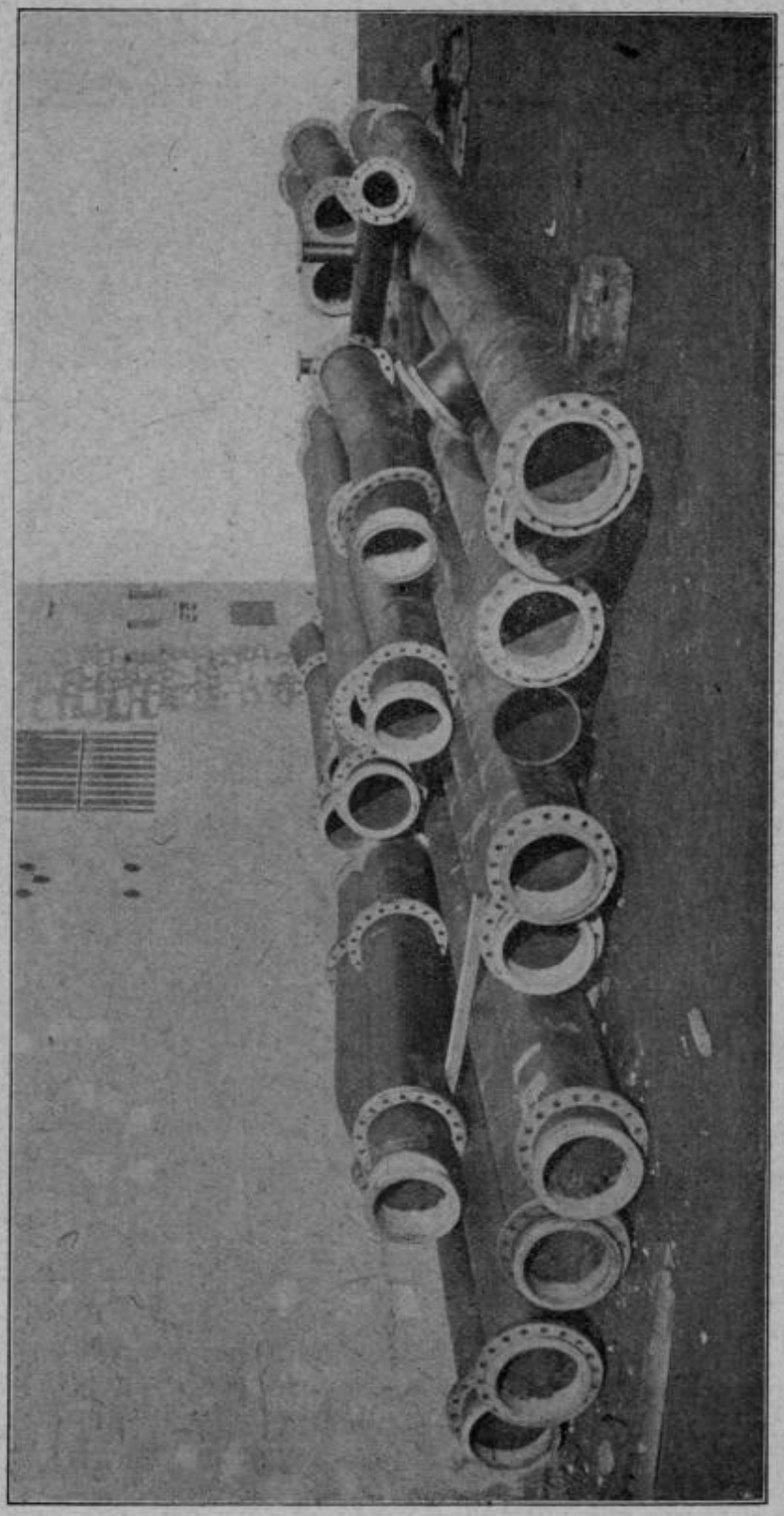


Fig. 172. — Tuyaux soudés pour pression de 600 mètres de hauteur (H. Bouchayer et Viallet, constructeurs).

tôle d'acier emboutie, ou enfin en acier coulé pour les pressions impor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tantes. Les joints sont faits à l'aide de rondelles de plomb munies de rainures concentriques entre lesquelles on dispose un cordon de bitord enduit de minium de plomb. Dans les parties de pose difficile, on emploie des brides dressées, à cordon et à emboîtement, ne demandant qu'un joint très mince et facile à serrer.

Pour les conduites de grand diamètre (jusqu'à 3 mètres), on opère, quand cela est possible, sur place le rivetage des tronçons bout à bout. Les tuyaux sont livrés de l'usine en tronçons complètement achevés.

Quand le rivetage bout à bout devient trop difficile sur place, on a recours aux brides, tel est le cas lorsque les conduites descendent à pic ou suivent une très forte pente ; il en est de même quand la tuyauterie passe en souterrain. A part ces exceptions, les tronçons sont livrés en longueurs de $6^{m},50$, exécutés en grandes et petites viroles qui se chevauchent ou qui

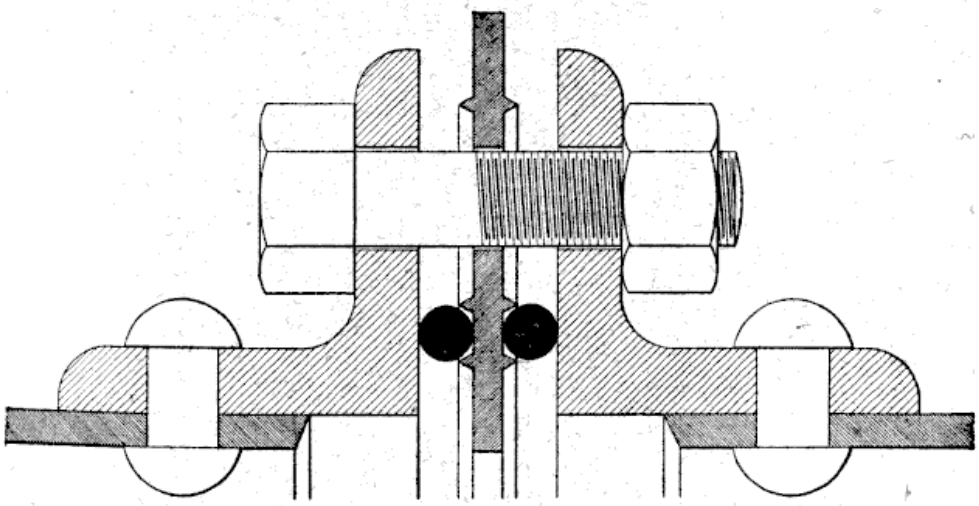


FIG. 173. — Joint de brides à rondelles de plomb et cordons de bitord.

sont unies par des couvre-joints. Les extrémités de chaque tronçon sont chanfreinées pour pouvoir faire sur place le matage le long des clouures faites au dehors. Des trous sont percés à leurs extrémités pour permettre leur jointoiement par simple clouure et rivetage ; on obtient ainsi des constructions homogènes sur toute leur longueur.

Le joint à brides est obtenu par le serrage de boulons pressés en nombre et de diamètre suffisant pour que le travail de ces boulons ne dépasse pas le travail homogène de 7 kilogrammes par millimètre carré de section ; mais, lors du serrage, ces boulons sont pressés de telle sorte qu'on obtienne une étanchéité parfaite, et assez souvent on dépasse de cette façon la résistance effective du boulon et on détermine ainsi un point faible dans la canalisation. Cet inconvénient est évité par le jonctionnement par rivetage, car les rivets étant posés à chaud, on connaît exactement leur résistance effective, et de plus, pour les fortes épaisseurs, l'emboîtage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut se faire à chaud et dans de telles conditions qu'au refroidissement il se produise un serrage donnant une adhérence qui augmente encore la résistance du joint.

Quant aux conduites de très grand diamètre (au-dessus de 3 mètres), comme elles ne peuvent être transportées par voies ferrées, on est obligé de les construire sur place. Alors on expédie de l'atelier les tôles toutes préparées, ou on envoie directement des forges.

Fig. 174. — Tubulures de prise en tôle soudée, l'une à bride fixe, l'autre à bride tournante.

Ainsi pour la fameuse conduite de l'usine de Champ, la maison Bouchayer et Viallet avait installé au milieu du tracé un atelier comportant toutes les machines-outils nécessaires. On sortait de cet atelier des viroles de $1^{m},800$ de longueur qui étaient roulées sur les bords de la tranchée et ensuite assemblées pour former un tronçon de 50 à 60 mètres de longueur. Celui-ci était descendu dans la tranchée en béton formant berceau, et l'assemblage de ces tronçons entre eux était ensuite exécuté dans la tranchée elle-même.

Lorsque la hauteur de la chute oblige à employer des tôles d'une épaisseur supérieure à 20 millimètres, la construction des tuyaux nécessite un outillage spécial et des soins de construction particuliers compatibles avec un travail donnant toute sécurité. Le cintrage doit être fait à chaud, les

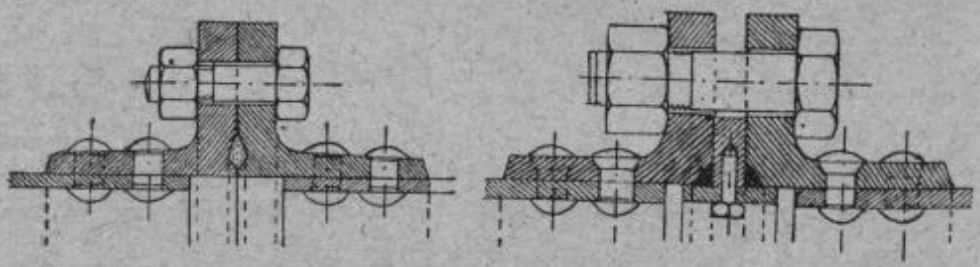


Fig. 175. — Usine de Kubel. Joints de tuyaux système Gebrüder-Sulzer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tôles étant au préalable passées dans un four à réchauffer, puis de là à une machine à amorcer et enfin au cylindrage, ces opérations successives étant faites, la tôle se trouvant au rouge sombre. Un autre avantage du cintrage à chaud est que l'amorçage étant fait à la presse, la tôle ne subit pas les chocs d'un amorçage au marteau comme cela a généralement lieu dans les maisons de construction qui ne possèdent pas un outillage spécial et moderne.

Nous avons dit que pour les très fortes épaisseurs (à partir de 20 millimètres), il convenait de recourir aux tuyaux soudés. En effet, dans ce cas, pour avoir une résistance convenable à la clouure, il faut donner en pleine tôle une surépaisseur qui atteint quelquefois 2 millimètres. Cette surépaisseur augmente par suite le poids normal de la conduite, et si on remarque de plus que les pinces des doubles et triples clouures donnent aussi un surcroît de poids, on arrive à cette conclusion, en admettant que la résistance à la soudure soit celle de pleine tôle, que le prix d'une tuyauterie soudée ne revient pas à un prix plus élevé que celui d'une conduite avec clouures.

La soudure longitudinale s'effectue le long de une ou de deux génératrices, suivant le diamètre du tuyau à obtenir. Les tôles une fois chauffées au rouge dans un four à recuire, passent au calibrage et subissent une préparation des bords à souder qui s'effectue à la machine à chanfreiner, puis vient l'opération du cintrage. Le tube ainsi obtenu est passé au four à recuire, puis cylindré à nouveau à chaud pour le calibrage.

La soudure longitudinale a lieu au moyen des procédés de la soudure dite « au gaz à l'eau ». Le dit gaz renferme 40 0/0 d'oxyde de carbone et environ 50 0/0 d'hydrogène, obtenu par la dissociation de la vapeur d'eau passant sur du carbone incandescent. Le chauffage a lieu à l'aide de chalumeaux très puissants, dans lesquels s'opère le mélange du gaz à l'eau et de l'air, gaz utilisés sous pression. Les parties ainsi chauffées sont martelées soit à la main, soit à la presse, ou au marteau pneumatique. La chauffe, c'est-à-dire la soudure faite en une seule opération, a environ un mètre de longueur et elle dure de trois à quinze minutes suivant l'épaisseur.

Les conditions de résistance de la soudure sont la plasticité de l'acier et la température de soudure. L'acier se soudant bien doit renfermer peu de carbone et avoir une grande plasticité. La bonne qualité du métal est essentielle pour obtenir de bonnes soudures.

Selon M. Bouchayer, l'acier extra-doux donne des soudures à cohésion. Une telle soudure dont la surface de suture est suffisante donne à l'épreuve de traction les résultats suivants :

$$R = 32\ K\ 480;\ A = 29\ 0/0 \text{ et } E = 21\ Kg.\ 20$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le travail des extrémités des tronçons pour l'assemblage de ces derniers répond au jonctionnement à brides ou au jonctionnement par rivures. L'assemblage (*fig.* 176) s'obtient en soudant, à l'extrémité du tuyau, un collet d'une seule pièce dont la forme exacte est donnée au tour, la bride mobile ayant été préalablement introduite.

L'emmanchement indiqué par la (*fig.* 177 I) est un simple bord tombé,

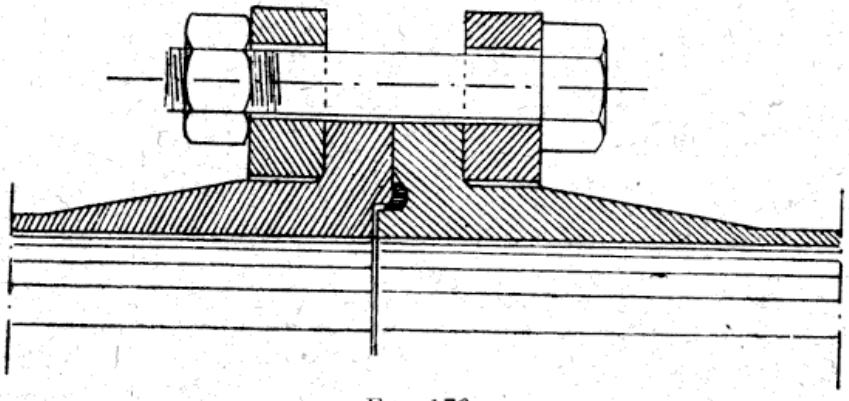


FIG. 176.

le serrage étant obtenu avec une bride mobile. Enfin le joint transversal (*fig.* 177 II) par clouure simple ou double s'obtient après emboîtage, l'une des extrémités du tube étant renflée, à cet effet. Les deux extrémités sont

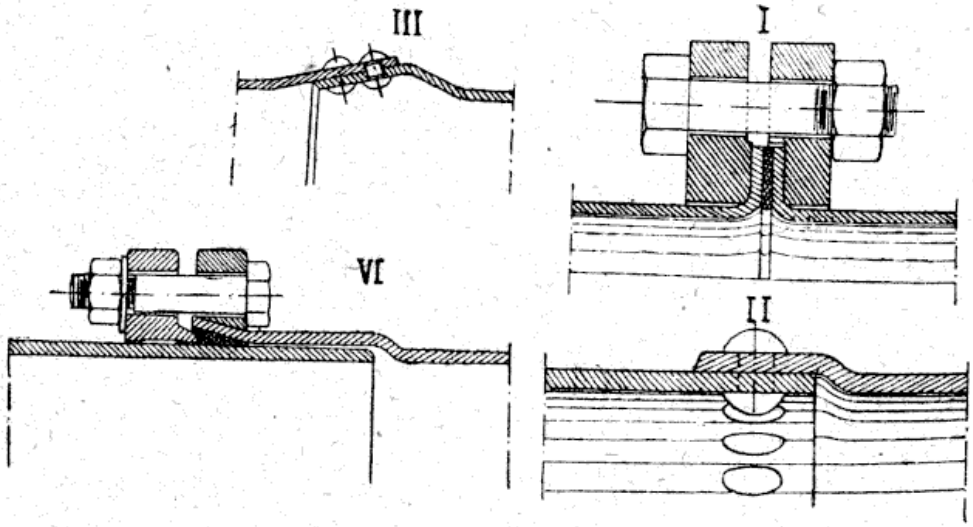


FIG. 177. — Types de joints.
I. Joints à bord tombé et brides tournantes. — II. Joint rivé dit à tulipe.
III. Joint rivé. — IV. Joint à emboîtement et brides.

tournées pour assurer un emboîtage précis. Le travail des têtes étant exécuté, les tuyaux passent au banc d'épreuve où ils supportent une pression d'essai égale à une fois et demie la pression de service.

La (*fig.* 177 III et IV) donne des types de joints proposés par des usines allemandes. Les Américains ont imaginé des tuyaux s'exécutant sans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rivure, ni soudure, qui consistent en un système d'agrafe. La jonction longitudinale est opérée soit à l'aide d'une languette ayant tantôt la forme d'un double champignon ou d'un double V (*fig.* 178). Dans le premier cas, les deux bords à réunir sont au préalable renflés par un forgeage

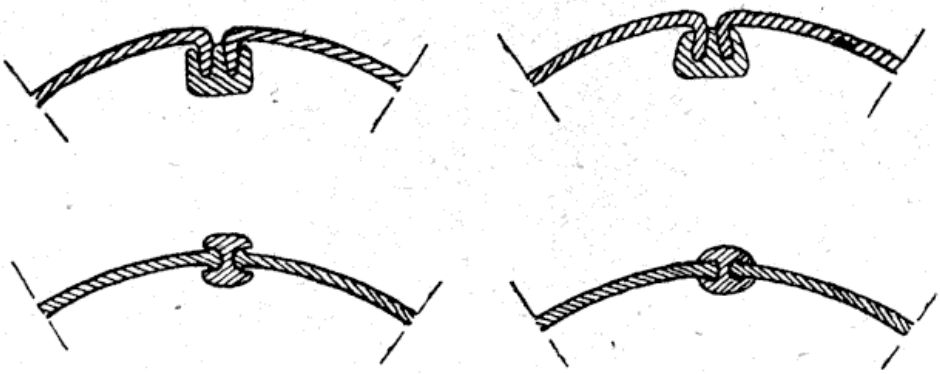


FIG. 178.

à froid et le serrage a lieu à la presse hydraulique. Dans le second cas les bords de la tôle sont renflés. On a exécuté ainsi des tuyaux pouvant supporter des pressions allant jusqu'à 80 kilogrammes sans que le joint ait eu à en souffrir.

Le procédé Ehrhardt permet d'obtenir des tuyaux sans soudure, mais qui nécessite un outillage considérable. On part d'un lingot d'acier coulé brut, puis laminé ou étiré, afin de lui donner une section carrée. Ce lingot (pesant parfois jusqu'à 20 tonnes) est introduit au rouge blanc dans une matrice ronde (*fig.* 179 I), puis perforé à la presse. Toujours à très haute température, l'ébauche est prise sur un second mandrin (*fig.* 179 II) appartenant à une machine à étirer horizontale. L'ébauche est ainsi allongée sur un jeu de filières successives jusqu'à ce qu'on ait obtenu la longueur et l'épaisseur de paroi désirées. Le tube ainsi obtenu est calibré sur un cylindre spécial.

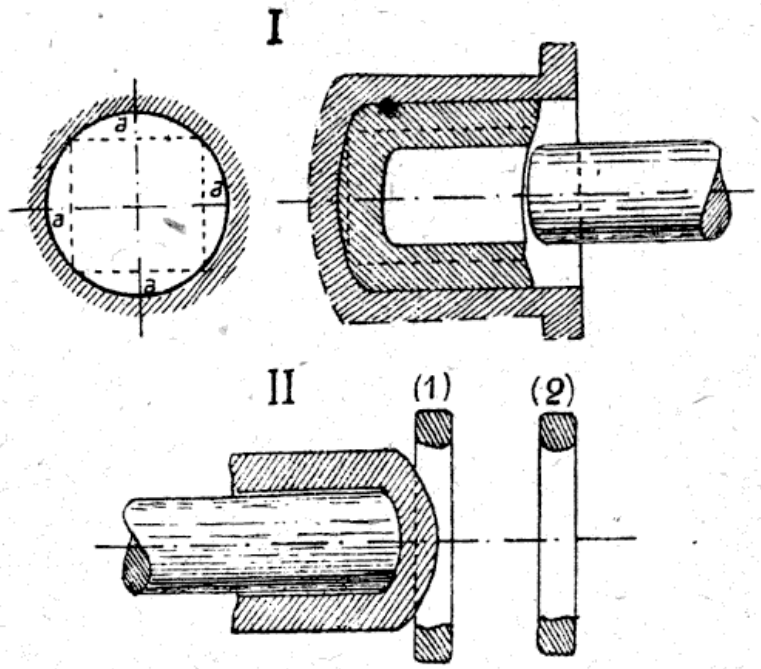


FIG. 179.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce système de tuyaux a été utilisé pour l'aménagement de la chute du lac Fully de 1.650 mètres de hauteur de chute (Suisse) étudiée et réalisée par M. Boucher, ingénieur à Lausanne, la plus haute chute du monde à ce jour.

Pour écarter l'emploi de la tôle soudée (épaisseurs au-dessus de 25 millimètres), on peut remplacer la conduite uniforme par une canalisation conique ou la subdiviser en deux ou trois conduites distinctes.

Le frottement que l'eau éprouve dans les conduites, en raison de la saillie intérieure des rivets, et les fuites qui se produisent au bout de quelques années de service par les trous de rivure, ont fait souvent préférer à ce mode d'assemblage le système Fergusson, très usité en Australie. Dans ce système, les tuyaux en acier sont en deux pièces, cintrées à la presse hydraulique et leurs bords viennent s'engager dans les rainures de deux baguettes rondes en acier diamétralement opposées, comprimées fortement pour rendre le joint étanche. Les bords restent plats et la moitié de la baguette cylindrique de jonction fait une saillie longitudinale à l'intérieur de la conduite (1).

M. Kronauer a apporté un perfectionnement caractéristique aux tuyaux du système Fergusson ; il a supprimé toute saillie dans l'intérieur de la conduite. Les bords des deux moitiés de tuyaux à réunir sont recourbés, et la baguette de jonction se trouve ainsi reportée en entier à l'extérieur de la conduite et l'étanchéité est parfaite après compression à la presse hydraulique des mâchoires. Les presses utilisées à cet effet sont portatives et peuvent s'installer sur les chantiers de pose.

70. Travail de la tôle dans les clouures. — 1° *Clouures transversales.* — L'effort tendant à séparer les tôles sur une distance l d'axe en axe de deux rivets contigus doit être équilibré par la résistance de la tôle dans la partie du métal qui existe entre les deux rivets considérés, dont nous désignerons la longueur par l' et par celle du quart des deux rivets. Soit R′ la tension de la tôle dans la partie l', et posons $l = Kd$, on a :

$$R' = \frac{Kd R}{4(Kd - d)} = \frac{KR}{4(K - 1)}.$$

Le nombre des rivets dans la clouure se déduit de l'expression :

$$\frac{R e n l}{2} = \frac{T \pi d^2}{4};$$

(1) D'après des expériences récentes faites en Amérique par M. Moritz, les pertes de charge dans les tuyaux soudés seraient de 20 0/0 inférieures à celles dans les tuyaux rivés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

n, nombre de rivets ; e, épaisseur de la tôle ; et T, travail des rivets en kilogrammes par unité de section ; d, diamètre du rivet.

2° *Clouure longitudinale.* — Ici nous avons une double file de rivets et, si nous appelons R'' le travail de la tôle dans la partie *gh* (*fig.* 180) et si on fait $l = K_1 d$, on a :

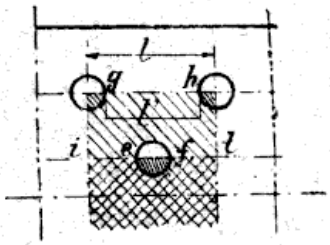


FIG. 180.

$$R'' = \frac{K_1 R}{4 (K_1 - 1)}.$$

Le travail des rivets est donné par l'expression : $T = \frac{2l'eR}{\pi d^2}$.

Enfin, soit R''' la tension de la tôle dans les parties *ie* et *ft* ; on obtient:

$$R''' = \frac{3K_1 R}{4 (K_1 - 1)}; \quad \text{d'où} \quad R''' = 3R''.$$

On fait généralement : K = 3 à 2,50 et K_1 = 5 à 2,70.

Par suite, le rapport entre R' et R''' varie de 0,375 à 0,350.

La valeur de R''' étant la plus grande, il n'y a pas lieu de s'occuper de R'', qui lui est inférieure.

Il faut donc s'attacher à obtenir dans la clouure horizontale des valeurs de R'' et de T égales à la tension imposée (soit 8 kilogrammes par millimètre carré, par exemple).

On a alors :

$$R'' = 8K = \frac{3\pi}{K - 1} \times \frac{d}{e} \qquad \text{et} \qquad \frac{e}{d} = \frac{3\pi}{8 (K - 1)} = \frac{1,178}{(K - 1)}.$$

Quant à la clouure transversale, en prenant $K = 3d$, pour des raisons de construction et d'étanchéité, on a :

$$T \text{ (travail des rivets)} = 1,91R \frac{e}{d} \qquad \text{et} \qquad K = \frac{12,566}{R} \frac{d}{e}.$$

71. Conduites en ciment armé.— Ces tuyaux s'emploient pour les conduites de grand diamètre et pour de faibles pressions. La raison en est que les parties supérieures d'une conduite travaillant à une pression inutilement utilisée, puisqu'on ne peut employer des tôles de moins de 4 millimètres d'épaisseur, — au-dessous de quelle épaisseur le montage devient impossible, — le béton armé remplace avantageusement la tôle, étant moins coûteux. Jusqu'à $4^{kg},5$ de pression (45 mètres de charge d'eau) et 4 mètres de diamètre, une conduite en ciment armé est possible (1).

(1) La première conduite en ciment armé fut réalisée en 1899 à l'Usine hydroélectrique de Champ (Isère) sous la direction de M. Lépine, ingénieur des Arts et Manufactures et par les soins de la Société Rossignol et Delamarche, actuellement Société anonyme des Ciments prompts et Portland artificiels de Grenoble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'appareil en ciment armé peut servir soit à établir une canalisation à flanc de coteau servant de canal d'amenée, conduisant l'eau en charge dans la chambre d'équilibre, soit comme conduite forcée, suivant la pente du terrain et prolongée par une conduite métallique, enfin comme conduite forcée exécutée complètement en ciment armé. Certains passages de ravin peuvent être évités d'être contournés, par un passage direct au moyen d'un siphon, dont la construction en ciment armé est facilement réalisable.

L'usine hydroélectrique d'Arreau a ses siphons de 3m,30 de diamètre, supportant des pressions de 28 à 30 mètres, établis en ciment armé.

Certaines installations comportent des tunnels en charge ; il y a parfois intérêt à remplacer le tunnel en charge par une conduite en ciment armé à

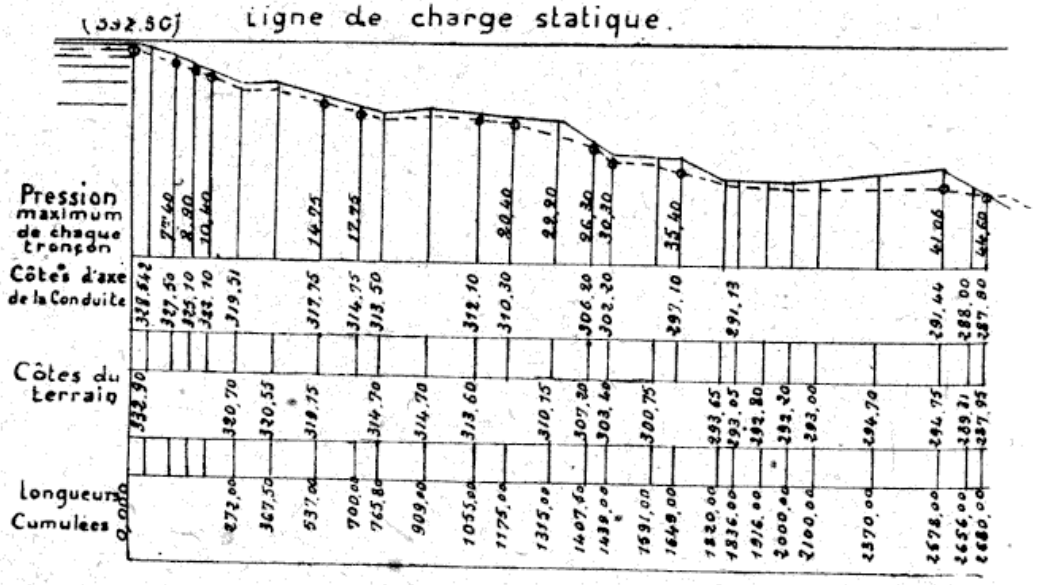


FIG. 181. — Profil en long de la conduite de l'usine hydroélectrique d'Aix-sur-le-Verdon.

flanc de coteau ; de même, une conduite en ciment armé, montée sur un terrain que l'on peut vérifier d'avance présente plus de certitude d'établissement qu'un tunnel souterrain soumis à des venues d'eau, de rencontres de poches, d'éboulis, de désagrégation de roche, etc. ; alors que les conduites métalliques ne peuvent être exécutées qu'avec un minimum d'épaisseur de tôle, l'armature des tuyaux en ciment, pour les faibles pressions, est réduite à son minimum, étant exactement prévue pour les efforts auxquels elle doit résister. Nous avons dit qu'on fabriquait des tuyaux pouvant supporter jusqu'à 45 mètres de charge d'eau ; telle est la conduite de l'usine hydroélectrique d'Aix-Verdon (*fig.* 181 et 182), laquelle est prolongée par des tuyaux en tôle pour des pressions supérieures. A l'usine de Pontamafrey (*fig.* 183), l'on n'a pas hésité de faire tout la con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duite en ciment armé d'une longueur de 3.290 mètres et 40 mètres de charge.

Les conduites en ciment armé sont inaltérables et ne demandent pas

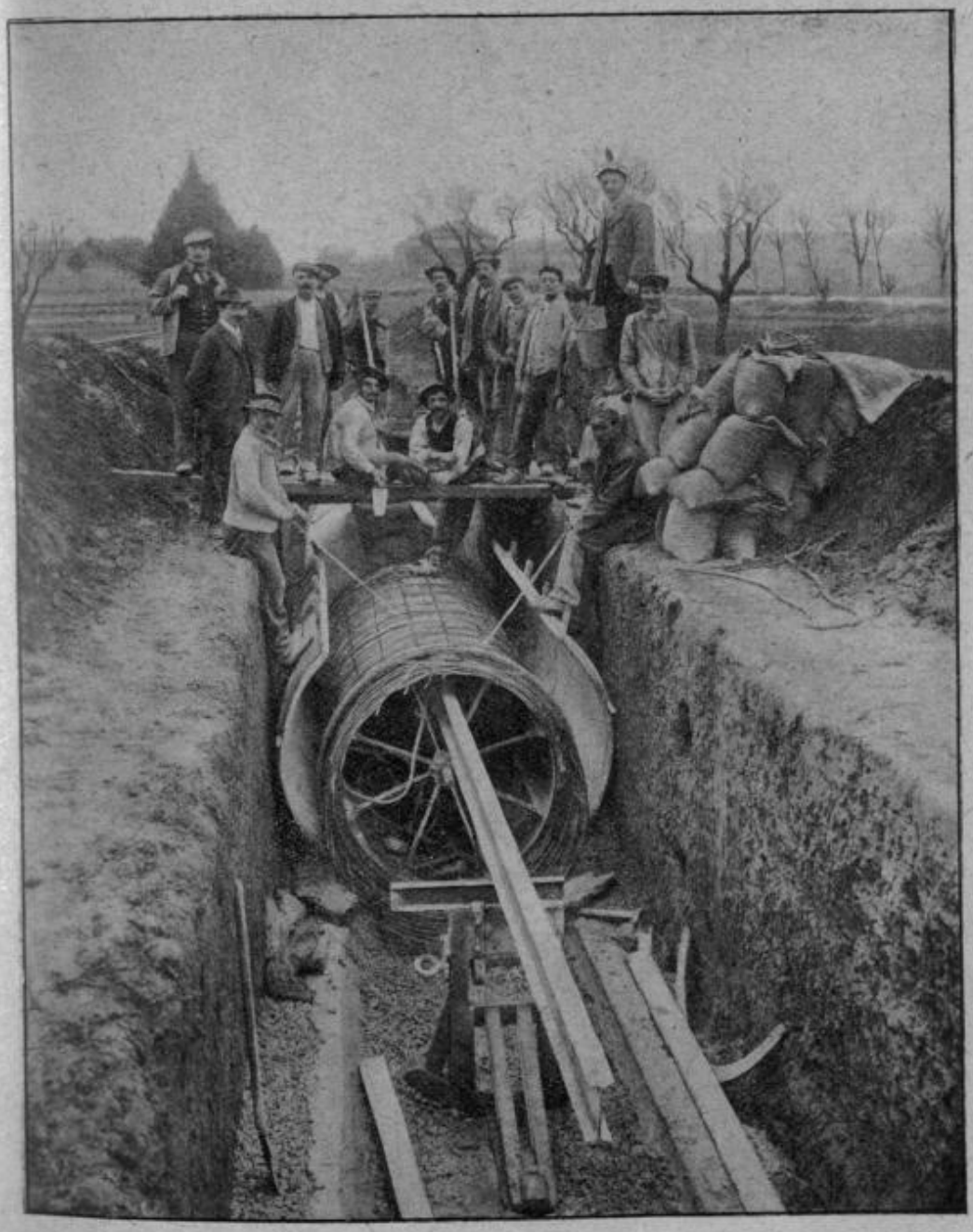


Fig. 182. — Conduite de l'usine hydroélectrique d'Aix-Verdon.
(Société des Ciments prompts et portland artificiels, Grenoble.)

d'entretien. Elles peuvent être installées en sous-sol. De plus elles résistent bien aux coups de bélier et ne sont pas sujettes à vibrations. Enfin elles résistent aussi bien aux pressions intérieures de l'eau qu'aux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FIG. 183. — Conduite de l'usine hydroélectrique de Pontamafrey (Savoie).
(Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble).

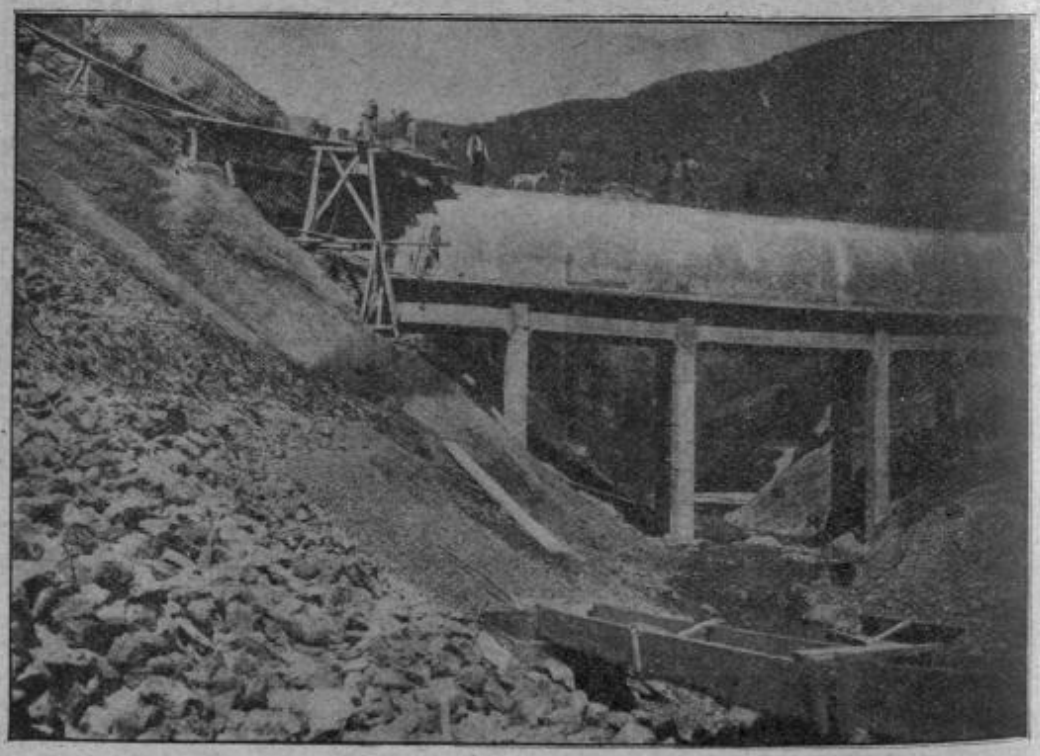


FIG. 184. — Conduite de l'usine hydroélectrique d'Arreau.
(Siphon d'Ardengost en construction).
(Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 185. — Conduite de l'usine hydroélectrique d'Arreau (Hautes-Pyrénées). (Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble).

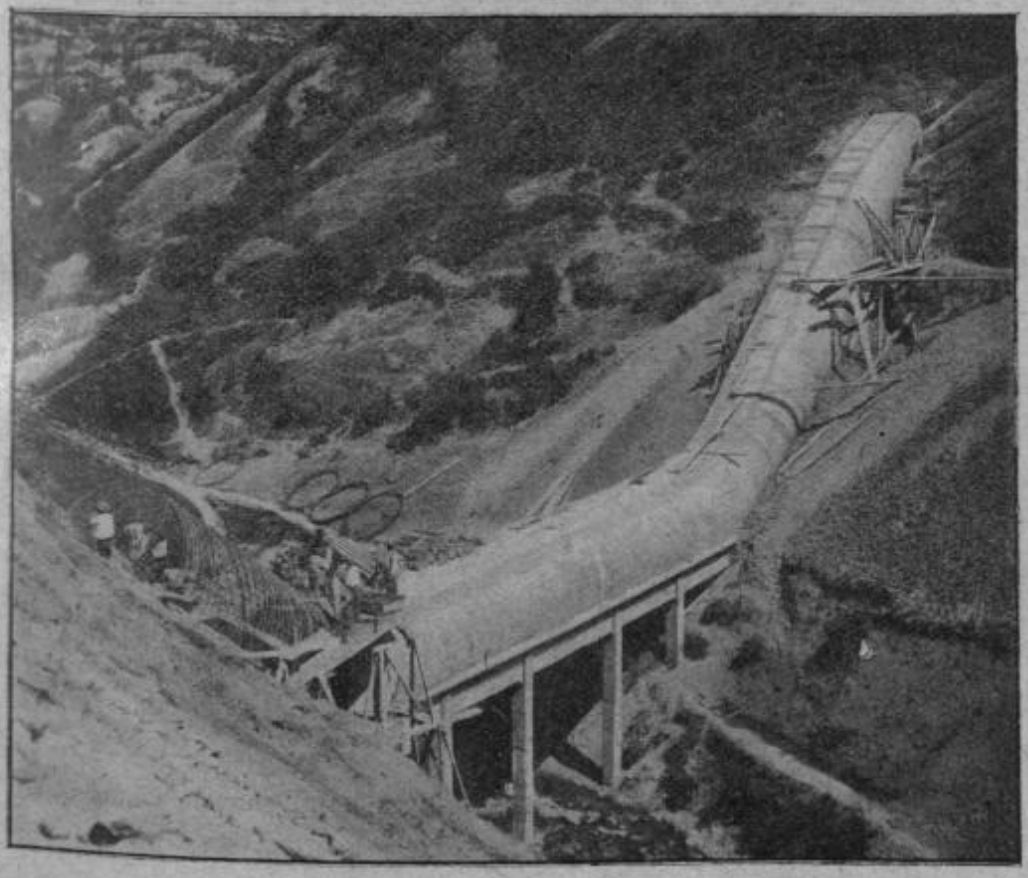


Fig. 186. — Conduite de l'usine hydroélectrique d'Arreau. (Siphon d'Ardengost). (Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

efforts extérieurs, tels que charge des remblais et pression atmosphérique dans le cas de brusque vidange. Nous signalerons que l'on utilise aussi le

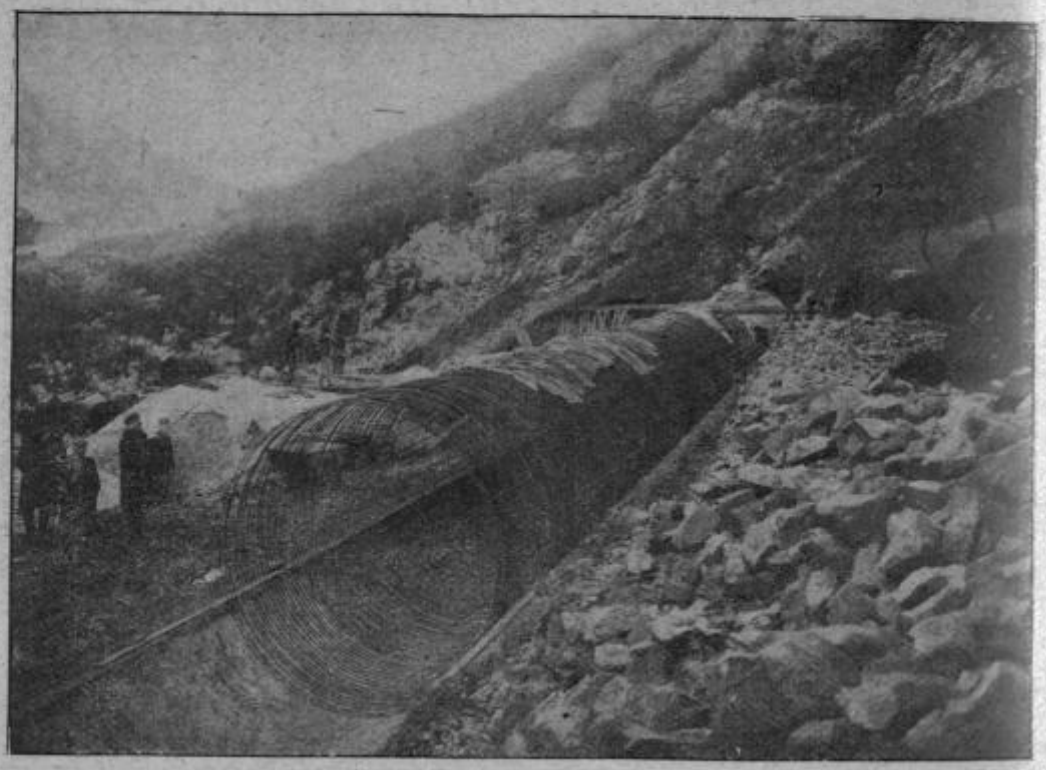


FIG. 187. — Conduite de l'usine hydroélectrique d'Arreau.
Vue du treillis préparé pour le montage.
(Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble.)

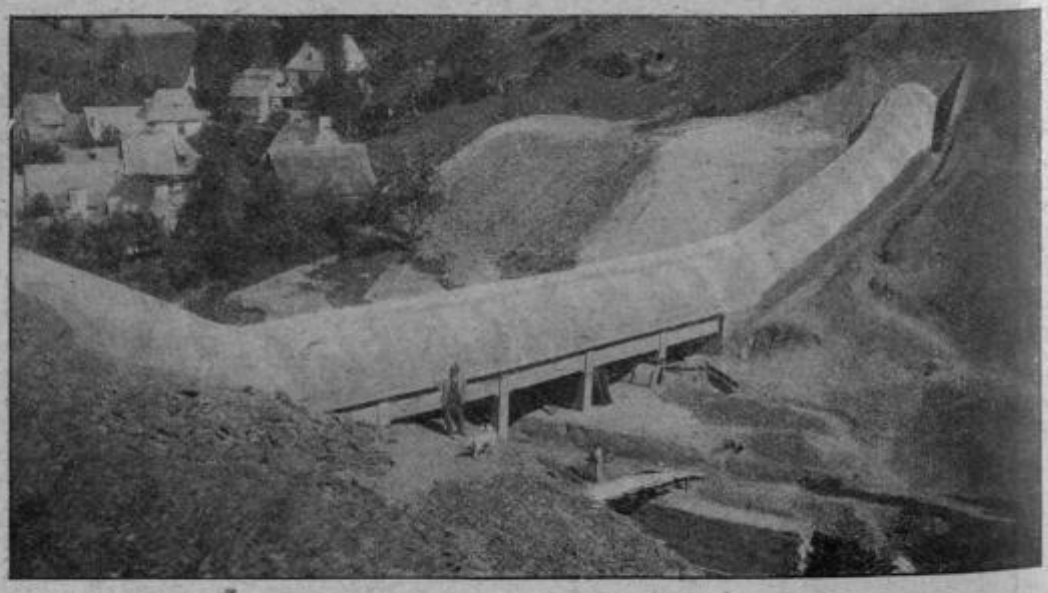


FIG. 188. — Conduite d'Arreau (Hautes-Pyrénées). Siphon de Camous.

ciment armé comme enveloppe de renforcement sur des conduites métalliques (usines de Queiz et de la Praz) (Savoie).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

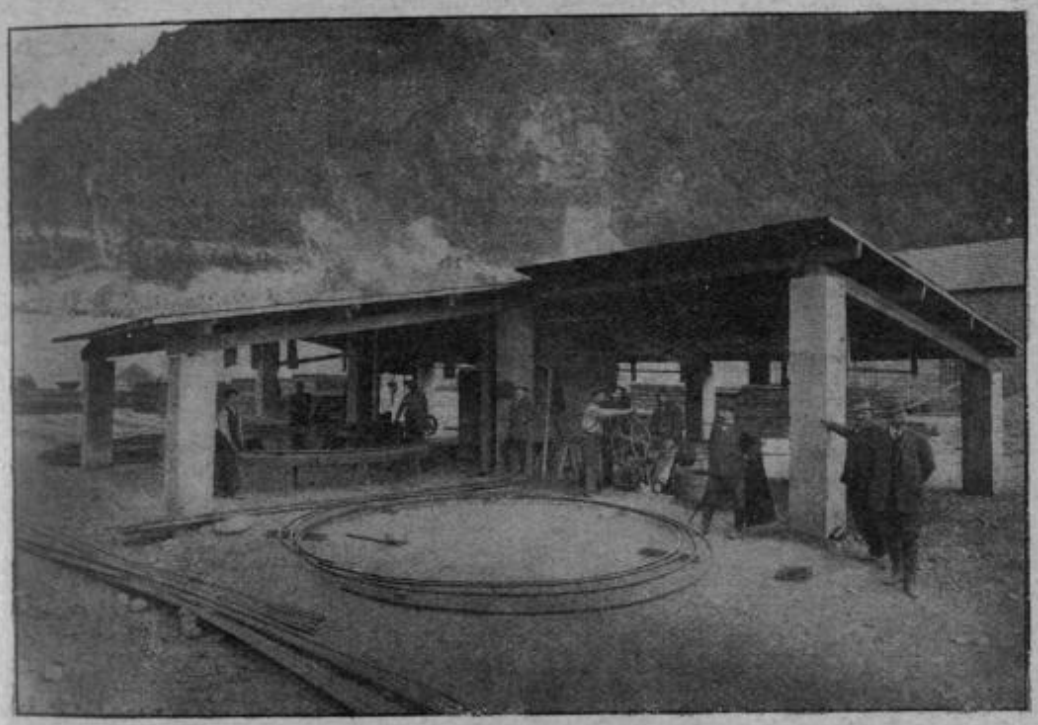


FIG. 189. — Conduite de l'usine hydroélectrique de Saint-Julien-de-Montricher (Savoie). — Atelier de cintrage et de soudure.
(Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble).

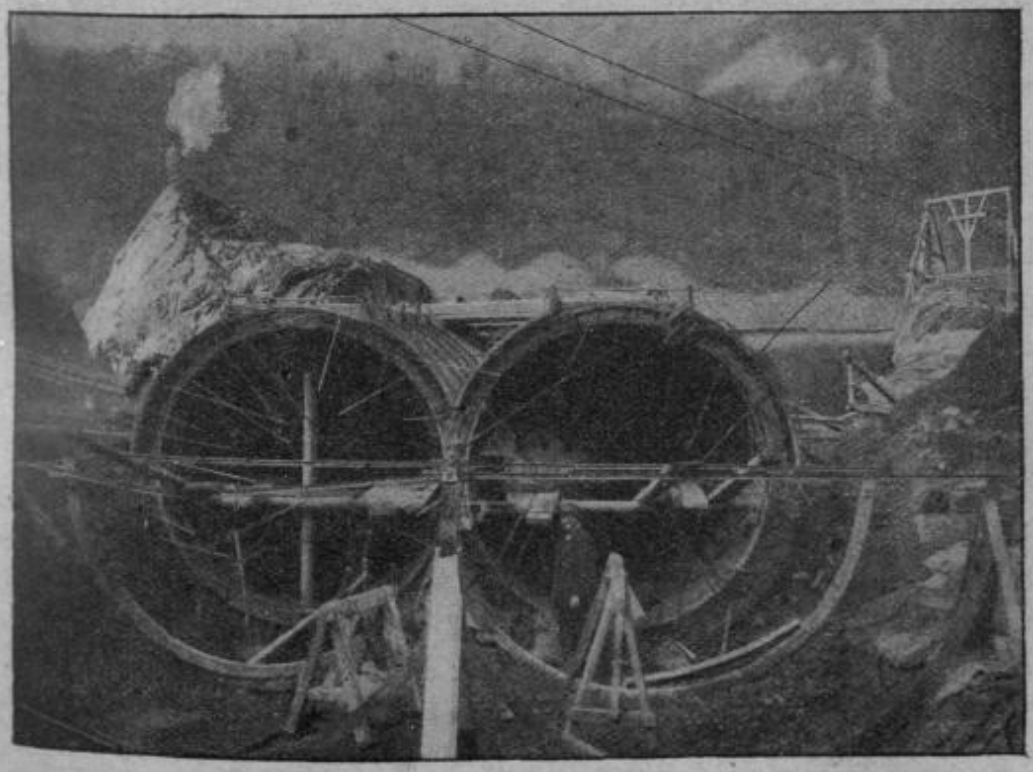


FIG. 190. — Conduite jumelée de l'usine hydroélectrique des Roberts (Isère).
(Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les tuyaux en ciment armé consistent à incorporer dans le béton une ossature métallique de fers ronds, en enroulant ces fers sur un mandrin, ou de fers ronds et de fers à **T** ou à **I** pliés en forme de cercles autour de génératrices en fer ronds, ou de fers à **I** en acier, suivant les résistances que l'on veut obtenir. Pour leur construction, les points délicats sont le profil du métal et l'assemblage parfait des deux matériaux (fer et ciment), qui doivent donner à l'un et à l'autre leur maximum de résistance, en même temps que la répartition convenable du métal assure l'économie recherchée.

Les tuyaux armés se construisent avec du ciment lent ou du ciment à

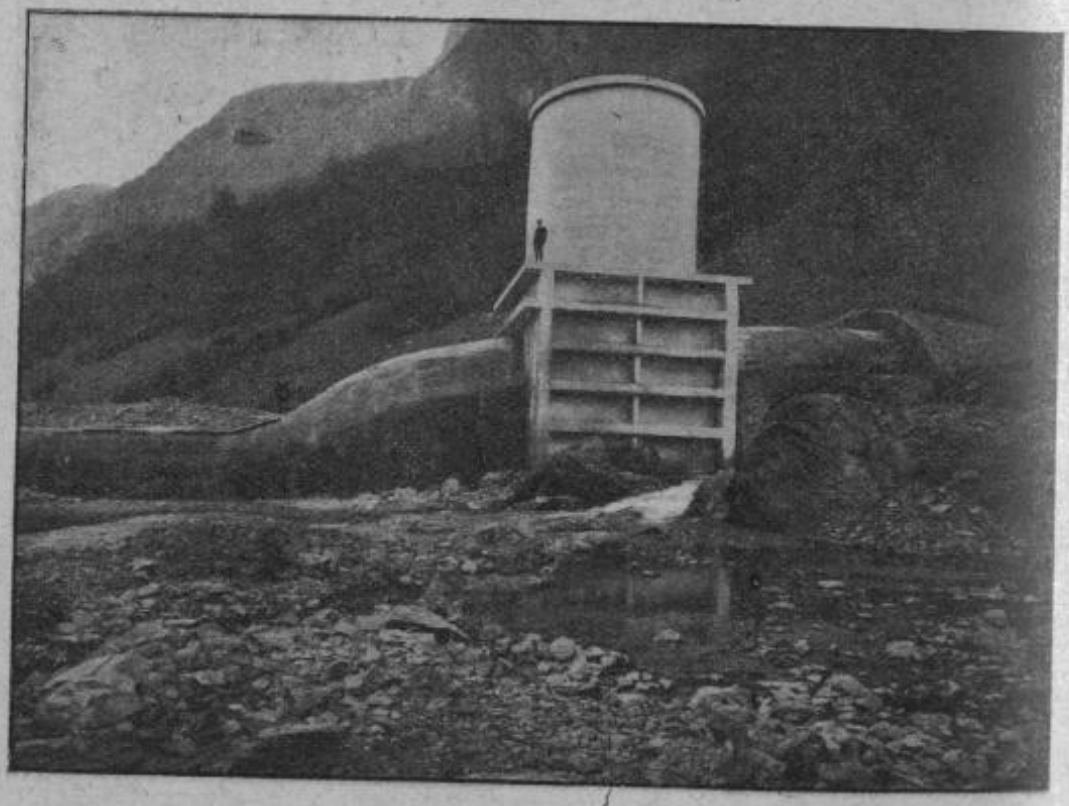


Fig. 191. — Chambre d'eau et cheminée d'équilibre de l'usine hydroélectrique des Roberts, à Rioupéroux (Isère).
(Société des Ciments prompts et portland artificiels. Grenoble).

prise rapide ; dans le premier cas, l'opération de la mise en ciment se fait dans des coffrages *ad hoc*, et, dans le second cas, par coulée verticale dans un moule. Ce dernier procédé permet d'obtenir une surface absolument lisse à l'intérieur des conduites et empêche ainsi l'accumulation des dépôts.

Les tuyaux, au moment de la pose, sont placés bout à bout, et le joint s'opère au moyen de bagues cylindriques fabriquées de la même façon que le tuyau.

La (*fig.* 192) montre le système de construction imaginé par M. Borde-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nave. L'épaisseur de la bague est la même que celle du tuyau, ainsi que le mode d'armature. Entre le tuyau et la bague il est laissé un vide qu'on remplit de ciment et qui forme joint étanche. On peut faire travailler les

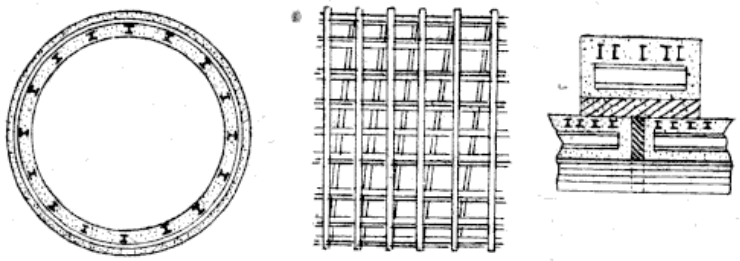
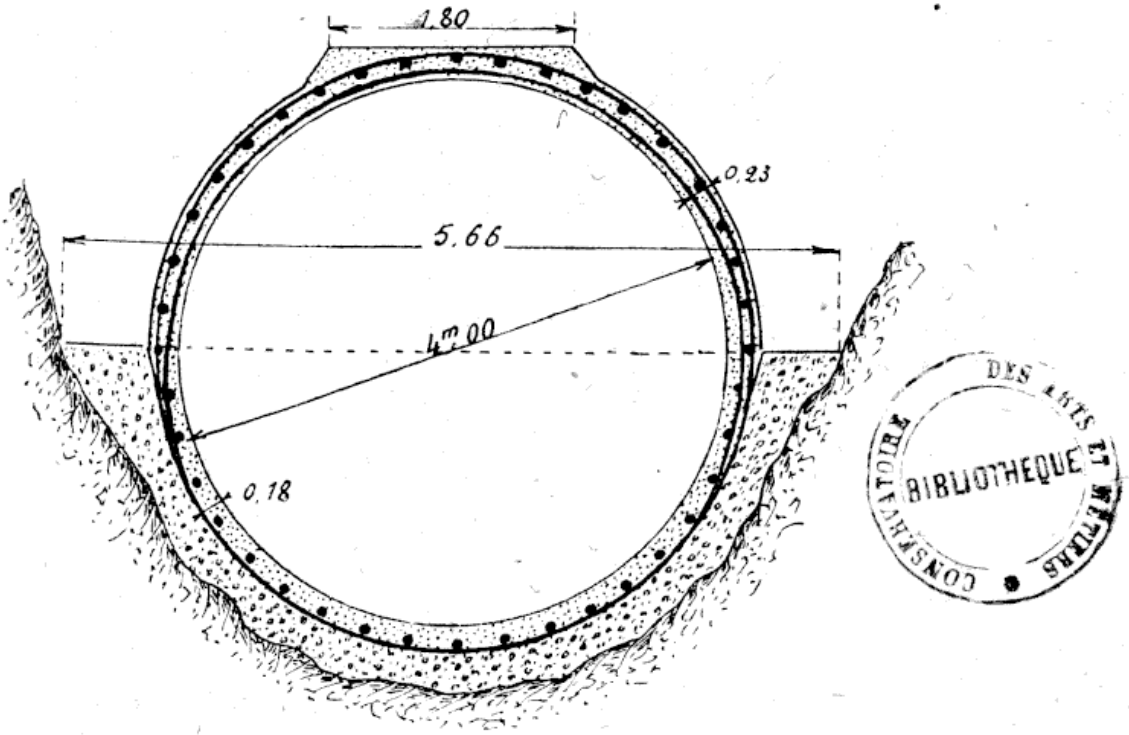


FIG. 192.

fils de fer ou les aciers profilés à 8 kilogrammes par millimètre carré, au lieu de 2 kilogrammes demandés à la fonte pour les tuyaux de grand diamètre. Le fer et le mortier de ciment ont le même coefficient de dilatation, et le fer noyé dans le ciment devient inaltérable.

Quand il s'agit de conduites de grand diamètre, surtout, on établit leur construction sur place ; à cet effet, et si le tuyau doit être enterré, on garnit les parois de la fouille de béton de chaux lourde de façon à obtenir



CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

FIG. 193. — Conduite de l'usine hydroélectrique de Pontamafrey (Savoie).

un berceau semi-cylindrique, sur lequel on applique le treillis métallique. Quand il s'agit de conduites de grand diamètre, l'armature par mètre courant constituant un poids important, on prépare d'avance et séparé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment chaque élément du treillis que l'on assemble directement sur le berceau, en les ligaturant, diamètre et écartement des dits ayant été déterminés par le calcul, suivant la pression de chaque tronçon. Les directrices peuvent être soit des fers profilés, soit des aciers ronds. Elles sont généralement placées vers l'extrados du tuyau et sont recouvertes seulement de quelques centimètres de béton pour les protéger de l'oxydation. Dans ces conditions le tuyau ne résiste aux pressions extérieures que par sa paroi de béton, l'armature n'étant pas disposée pour résister à de semblables efforts. Si on a affaire à des charges extérieures importantes et si on est en présence de conduites de grand diamètre (4 ou 5 mètres) on fait appel à un double treillis (*fig.* 193). Le treillis une fois exécuté sur une certaine longueur, on procède à l'opération du moulage en employant des moules métalliques dans lesquels on coule le béton composé de 600 kilogrammes de ciment prompt ou demi-lent, 450 litres de sable grenu et propre et 750 litres de gravier à l'anneau de 3 centimètres. Dès que la partie supérieure du tuyau, coulée la dernière, a fait prise, on peut immédiatement déplacer le moule pour l'exécution du tuyau suivant.

Pour la réfection des joints, on repique le béton entre les deux tuyaux à assembler, en forme de sifflet et on garnit la partie repiquée d'un mortier de ciment riche et bien tassé. Après quelques mois de durcissement la conduite est apte à être mise en eau.

Pour calculer l'épaisseur des fers constituant les spires, on peut partir de la formule suivante :

$$e = \frac{1033 \times n \times d}{2 \times \mathrm{K}};$$

e, épaisseur en centimètres du tuyau fictif en métal ; n, pression en atmosphères ; d, diamètre intérieur en centimètres ; K, coefficient de résistance à la traction par centimètre carré du profil employé.

L'épaisseur du métal étant connue, on répartit sa section sur un certain nombre de spires dont on se donne *a priori* soit la section, soit l'écartement. Mais le plus souvent on se donne celle-là et on détermine l'écartement x des spires par la formule :

$$x \times e = \mathrm{S}; \quad \text{d'où} \quad x = \frac{\mathrm{S}}{e} = \frac{2 \times \mathrm{S} \times \mathrm{K}}{1033 \times n \times d}.$$

L'effort de tension sur les génératrices a une valeur égale à la moitié de celui produit sur les cercles ; il faudrait donc, si on employait le même profil de fer, donner aux génératrices un écartement double de celui des spires ; mais cet écartement ne peut être supérieur à 10 ou 12 centimètres, pour assurer le liaisonnement du mortier entre les mailles. Il convient donc

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'employer un profil plus réduit ou encore d'intercaler des fers ronds entre deux fers profilés.

Le ciment entrant dans la confection des tuyaux n'intervient que pour assurer l'étanchéité. Si son épaisseur varie suivant les pressions et la richesse du mortier de ciment, elle est indépendante du diamètre de la conduite. La pratique a démontré que l'épaisseur de 45 à 50 millimètres, avec un dosage de 1.100 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable, convient très bien aux pressions de 25 à 30 mètres d'eau. L'épaisseur du tuyau est en outre subordonnée à cette considération que les génératrices et les spires doivent être recouvertes de 9 à 11 millimètres de ciment pour la protection du métal.

Les tuyaux du *système Bonna* consistent en un tube en tôle d'acier rivé, recouvert d'une armature métallique noyée dans une couche de ciment faisant enveloppe, ou d'un tube en tôle plombée disposé dans la partie médiane du tuyau, entre deux armatures métalliques. Cette tôle est ainsi préservée des effets de l'oxydation et de l'attaque des eaux. Dans les tuyaux de grand diamètre, l'armature métallique est constituée au moyen de frettes rivées avec plaques de recouvrement. Intérieurement aux frettes sont placées, longitudinalement et sur toute la longueur du tuyau, des barres d'acier portant à leur partie supérieure des encoches régulièrement distancées pour recevoir et encastrer la base des frettes.

Le moulage des tuyaux de ce système se fait verticalement, comme nous l'avons indiqué plus haut. Leur assemblage s'opère au moyen d'une bague appliquée sur les extrémités du tube intérieur, qui dépasse de 5 centimètres le revêtement ; elle est composée d'une feuille d'amiante caoutchoutée, collée avec de la céruse recouverte d'une bague en plomb, soudée et matée sur le tube pour en épouser toutes les formes. Une seconde bague en acier, de la même forme que les tuyaux, est appliquée sur la seconde pour en augmenter sa résistance et l'étanchéité.

Aux conduites établies en plein rocher et en tête des tuyauteries de mise en charge, on peut faire subir en toute sécurité une pression intérieure supérieure à 20 mètres, sans aucun travail spécial, et aller jusqu'à 40 mètres avec un enduit et avec une pente de 10 millimètres par mètre. Cette pente permet d'enlever tous les dépôts sableux à l'aide d'une vanne de chasse placée à la partie inférieure d'une petite chambre de dépôts, avant l'entrée des tuyaux de pression en tôle ; en outre, on peut reporter le déversoir à l'origine de la prise d'eau (§ 182) et utiliser toute la chute en basses eaux, la canalisation étant en pression sur toute sa longueur.

Il est souvent préférable, surtout pour des conduites en ciment armé, pour les débits importants, d'employer une seule conduite au lieu de plusieurs de section équivalente.

Ainsi soit une conduite composée de deux tuyaux jumelés de $3^{m},54$ de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diamètre que l'on peut remplacer par un seul tuyau de 5 mètres de diamètre. Dans les deux cas le poids de l'armature par mètre courant est le même, ce poids pour une même pression, étant proportionnel à la section du tuyau, mais une seule conduite comporte un cube de béton plus tôt moindre et une réduction de l'importance des fouilles. Son prix au mètre courant est quelque peu inférieur. Mais le principal avantage est naturellement la diminution de perte de charge.

Ainsi la (*fig.* 194) présente un graphique établi d'après la formule de Maurice Lévy (1) :

$$p = \frac{V^2}{440\ R\ (1 + 3\sqrt{3}}\ ;$$

p perte de charge en millimètres par mètre de conduite ; v vitesse de l'eau, en mètres et R, rayon du tuyau.

On voit que sur 1 kilomètre de canalisation, pour un débit de 40 mètres cubes correspondant à 2 mètres de vitesse d'eau, la perte de charge de tuyaux jumelés de $3^m,54$ serait de $1^m,10$ alors qu'elle n'est plus que de $0^m,66$ pour un seul tuyau de 5 mètres.

III. — COUPS DE BÉLIER DANS LES CONDUITES

72. Théorie du coup de bélier.— Pour le calcul des conduites forcées, il ne suffit pas de s'inquiéter de leurs conditions de résistance provenant de la hauteur de chute, il faut d'autre part faire intervenir les coups de bélier en raison de leurs redoutables variations de pression dues à l'action rapide des régulateurs des turbines. On doit aussi envisager les réactions sur les coudes.

Si on considère une conduite forcée en fonctionnement et qu'à un instant donné on fasse une fermeture rapide du vannage de la turbine, on constate alors que presque instantanément l'aiguille du manomètre se déplace vers les pressions plus fortes, atteint un maximum, puis revient en arrière.

Si la conduite est courte relativement à la hauteur de la chute, l'aiguille revient généralement jusqu'au point correspondant à la pression statique de la colonne d'eau, puis s'y fixe si le vannage de la turbine reste fermé ; au contraire si la conduite est longue, l'aiguille en revenant en arrière, dépasse le point correspondant à la pression statique en indiquant une dépression un peu inférieure à la surpression enregistrée tout d'abord ; puis la pression remonte et l'on observe une série d'oscillations qui vont

(1) Voir la figure (194) *en errata* à la fin du livre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'amortissant lentement et d'autant plus dans cet ordre que la conduite est plus longue (*fig.* 195).

Le coup de bélier est donc un phénomène oscillatoire, à période plus ou moins amortie. Si les conduites sont longues, on peut avoir à craindre des phénomènes de résonance extrêmement dangereux.

Dans le cas des turbines Pelton, le réglage sans coup de bélier peut être réalisé d'une manière très simple par l'emploi d'un déflecteur qui permet de régler la puissance sans que le débit de la buse varie. En liant automatiquement le jeu de l'aiguille à celui du déflecteur, de façon que le déflecteur agisse brusquement lors des décharges, puisque l'aiguille se referme elle-même lentement jusqu'à ce que le déflecteur se retrouve précisément au bord du jet et que toute l'eau soit utilisée complètement par la turbine, on a un dispositif à la fois actif et économique.

La théorie du coup de bélier a pris, ces dernières années, un intérêt particulier, en raison de l'importance exceptionnelle des conduites

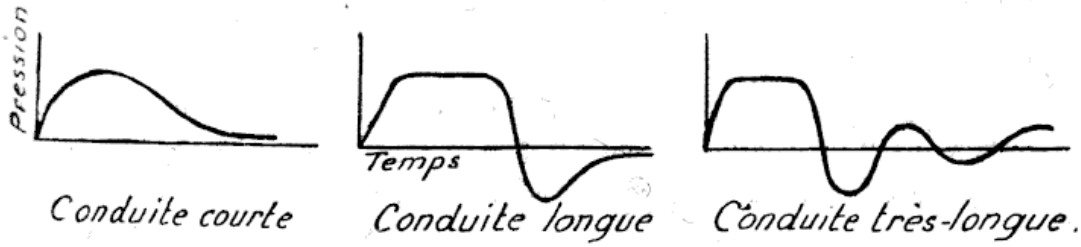


FIG. 195.

amenant les forces hydrauliques aux puissantes usines d'énergie électrique. Le professeur Joukosky paraît avoir élucidé pleinement, dès l'année 1898, les questions relatives au coup de bélier, lesquelles ont été reprises depuis par M. Rateau (*Traité des turbo-machines*, 1900), par M. Michaud (*Bulletin technique de la Suisse-romande*, 1903), par M. Alliévi (*Revue de mécanique*, 1904), par M. le comte de Sparre (*la Houille blanche*, 1905) et par M. E. Jouguet (*Congrès de la Houille blanche*, 1914).

Dans son état actuel, la théorie du coup de bélier paraît fournir des formules suffisamment approchées pour les cas de la pratique courante. Cependant, d'après M. l'ingénieur Goupil (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1907), l'étude de l'influence des coudes brusques des conduites demanderait à être examinée de plus près, en raison de l'effet de l'onde-pression qui tend à déboîter ces coudes et provoquer une réaction plus ou moins intense des appuis extérieurs, ou des efforts, ou des effets longitudinaux dans les tuyaux.

Les conduites sont soumises à des coups de bélier, soit lors du remplissage ou mise en charge, soit pendant la marche, provenant d'une variation brusque de résistance pendant le travail des turbines ou de la manœuvre des robinets-vannes d'arrêt ou de réglage. Ainsi, à cause de l'inertie, il se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

produit un certain retard dans la compression du liquide et dans la dilatation. Ce phénomène a pour effet d'augmenter, comme l'on sait, la pression et de faire travailler par suite le métal au delà de sa limite d'élasticité, ce qui peut amener la rupture de la conduite, surtout dans le cas de tuyaux en fonte, en raison de la faible élasticité de ce métal. Par suite de cette augmentation de pression et de la vitesse acquise, la compression et la dilatation du liquide dépassent ce qu'elles sont à l'état statique.

D'après la théorie de M. Alliévi, dont les résultats ont été vérifiés d'une manière satisfaisante par les expériences faites à Allevard (Isère), si l est la longueur de la conduite, et a la vitesse de propagation (1), on doit considérer des périodes successives de longueur égale à $2\frac{l}{a}$.

La vitesse de propagation a est d'ailleurs donnée par la relation :

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48{,}3 + k\frac{d}{e}}},$$

où d est le diamètre et e l'épaisseur de la conduite, et où, de plus, $k = 0{,}5$ pour le fer et l'acier et $k = 1$ pour la fonte.

La surpression $h = y - y_0$ ou la dépression, c'est-à-dire le coup de

---

(1) Les expériences d'Allevard ont démontré : 1° que la théorie de M. Allievi est conforme aux faits, en ce qui concerne la propagation des ondes le long du tuyau, mais elles tendent à devenir sinusoïdales ; 2° que les intensités des coups de bélier sont notablement plus fortes que ce que l'on calcule par les formules théoriques. L'écart, aussi bien dans le cas des coups de bélier négatifs que dans celui des coups positifs, est en moyenne de 14 à 17 0/0. Cependant M. l'ingénieur Rateau demandait à voir serrer de plus près cette question au moyen d'expériences à faire sur des conduites plus importantes et plus longues, et régulières comme diamètre et comme épaisseur.

Les nouvelles expériences décidées sont à peine commencées et nous n'en connaissons pas encore les résultats.

Les observations faites sur la conduite de l'usine hydro-électrique d'Aix-Verdon, ont donné lieu à des interprétations intéressantes.

Cette conduite d'une longueur de 2.680 mètres, au début de son exploitation, eut à supporter des coups de bélier anormaux, dont l'importance atteignait cent pour cent de la pression statique. Pour vérifier cette surpression, à laquelle la conduite avait parfaitement résisté, en cas de fonctionnement intempestif des régulateurs, on installa quatre manomètres échelonnés le long de la conduite.

Les deux premiers instruments où les pressions statiques étaient à peu près équivalentes (41 et 40 m.) donnaient toujours les mêmes indications malgré la distance qui les séparait. Un coup de bélier de 110 mètres fut enregistré. Le troisième manomètre après un double coude et en un point où la pression statique était de 26m,30, donnait des indications concordantes, mais fort atténuées. Enfin le quatrième disposé en un endroit où il y avait deux coudes brusques et où la pression statique était de 14m,75 ne fut jamais influencé. Ce qui semblerait indiquer que les coups de bélier ne se transmettaient pas jusque-là.

On peut en déduire que les coups de bélier ne se transmettaient pas en vraie grandeur tout le long de la canalisation, que leur amplitude diminuait rapidement avec la pression statique et que la longueur de la conduite aussi bien que les coudes contribuaient à les atténuer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bélier créé par une ouverture ou une fermeture instantanée a pour valeur, en mètres :

$$h = y - y_0 = -\frac{a}{g}\Delta v;$$

Δv la variation de l'eau : $v - v_0$ dans la partie inférieure de la conduite avant et après le coup de bélier. Si la conduite est en état de régime, avant le coup de bélier, la vitesse v_0 se calcule aisément d'après la pression statique (perte de charge comprise) avant l'orifice du distributeur, et d'après la section de cet orifice ; mais la vitesse v, après le coup de bélier, dépend non seulement de la pression statique initiale et de l'ouverture de l'orifice, mais aussi de la valeur même du coup de bélier.

Dans le cas d'une fermeture totale $\lambda = 0$ et le coup de bélier a pour valeur $\frac{av_0}{g}$, λ étant le rapport de la section de l'orifice d'écoulement, après une fermeture, à la section initiale, avant la fermeture.

L'intensité des coups de bélier occasionnés par une fermeture ou une ouverture instantanées ne dépend en aucune manière de la longueur de la conduite ; mais si les ouvertures ou fermetures de l'orifice d'écoulement sont progressives, l'intensité peut encore ne pas dépendre, pour une certaine longueur de la conduite, à partir de l'orifice d'écoulement, de la longueur totale de cette conduite, ou au contraire, elle peut en dépendre, suivant les valeurs relatives de la durée de fermeture (ou ouverture) et de la demi-période de l'onde de choc $\frac{2L}{a}$ (L, longueur de la conduite, à la vitesse de propagation).

Il importe donc, pour le calcul d'une conduite, de connaître la manière dont les orifices d'écoulement seront fermés ou ouverts par les appareils de réglage. Si l'on doit redouter des fermetures ou des ouvertures brusques, il faut établir les épaisseurs de la paroi de la conduite de façon qu'elle puisse supporter la même surcharge d'un bout à l'autre. Si au contraire on n'a affaire qu'à des ouvertures progressives il faut distinguer les cas où les durées de fermeture ou d'ouverture sont inférieures à $\frac{L}{a}$, comprises entre $\frac{L}{a}$ et $2\frac{L}{a}$ ou supérieures à $\frac{2L}{a}$.

M. Alliévi a examiné plus particulièrement le cas suivant : on ferme brusquement le distributeur au début de la première période, et on le tient fermé pendant toute cette période. On l'ouvre ensuite brusquement, et en plein, au début de la deuxième période, en le laissant ouvert pendant toute cette période, pour le refermer à nouveau au début de la troisième

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

période en le tenant fermé pendant toute cette période, pour le rouvrir encore au début de la quatrième période, et ainsi de suite.

Dans ce cas, la valeur c du coup de bélier est :

$$c = y_0 \left[1 + \frac{(1 - \varepsilon)}{(n + \varepsilon)^2} \right] \qquad \text{où :} \qquad n + \varepsilon = \frac{g y_0}{a v_0}.$$

y_0 et v_0 étant les valeurs de la charge et de la vitesse à l'état de régime. Quant à g, il est égal à 9,81 ; n représente le nombre entier et ε la fraction décimale.

Ainsi, par exemple, si l'on avait $y_0 = 800$ mètres, $v_0 = 1$ mètre, on aurait $n + \varepsilon = 7{,}848$ et par suite $n = 7$ et $\varepsilon = 0{,}848$, et la valeur du coup de bélier serait : $c = 801^{m},6$, c'est-à-dire que ce coup de bélier serait légèrement supérieur à la pression statique, autrement dit que le métal de la canalisation travaillerait au-dessus de la charge statique.

La valeur maxima que le coup de bélier puisse prendre correspond au cas où l'on aurait $n = 1$, $\varepsilon = 1/3$; dans ce cas, le coup de bélier serait égal aux 9/8 de la charge statique.

L'auteur a étudié aussi le cas où l'orifice de distribution est successivement fermé ou ouvert progressivement dans un temps égal à $\frac{2L}{a}$, de façon à réduire son ouverture, lorsqu'on la ferme, d'une fraction $\frac{1}{p}$, et à l'ouvrir ensuite en plein, pendant la période suivante, mais toujours d'une façon progressive.

Dans ce cas, les effets de résonance peuvent faire prendre une valeur sensiblement égale à $\frac{y_0}{p}$, y_0 désignant la pression statique. Toutefois, ceci ne s'applique qu'au cas où p est supérieur à 2.

Ainsi pour $y_0 = 500$ mètres et $\frac{a v_0}{g} = 10$ mètres, on a :

$$c = 248 \text{ mètres, } 89 \text{ mètres, } 43 \text{ mètres,}$$

pour :

$$p = 2, \quad 3, \quad 10.$$

M. le comte de Sparre, pour l'étude des conduites fermées de sections de diamètres différents, et en particulier des conduites formées de deux sections de diamètre différents, mais pour lesquelles la durée de propagation est la même, donne les formules suivantes pour la valeur du coup de bélier $H'n$ à la jonction des deux sections :

$$H'_n = \frac{1}{2}(\xi'_n + 1 + \xi'_n) - \frac{1}{2}\rho\lambda_1(\xi'_n - \xi'_n + 1) \qquad (1)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si en particulier il s'agit d'une fermeture totale dans un temps inférieur à 0, le distributeur étant primitivement complètement ouvert, on aura :

$$H'_n = (-1)^{n-1} \frac{av_1}{g} \sin. n\beta g \frac{\beta}{2} \qquad (2)$$

Dans les formules (1) et (2) on a considéré $t = n\theta + \frac{\theta}{2}$; θ durée d'une période $\left(= \frac{2L}{a} = \frac{2L'}{a}\right)$, L et L' longueurs des deux sections de tuyaux; λ_1 est la fraction dont est ouvert le distributeur; $\rho = \frac{2g\gamma_0}{av_1}$;

$\xi'n = (-1)^{n-1} \frac{av_1}{g} \frac{\cos \frac{2^{n-1}\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}}$, avec $\cos \beta = \frac{1-a}{1+a}$; v_1 vitesse de régime pour le distributeur complètement ouvert, γ_0 la pression statique au distributeur, à la vitesse de propagation dans la section voisine du distributeur; $\alpha = \frac{a'd^2}{ad'^2}$; a' vitesse dans la section voisine de la prise d'eau, d et d' les diamètres des sections; n, indice de la période et θ durée de la première période pour $t = n\theta$.

M. de Sparre a appliqué ces formules au cas particulièrement intéressant de la conduite du lac de Fully (1.650 mètres de chute).

La conduite forcée se compose de deux sections pour lesquelles la durée de propagation est sensiblement la même ; soit une première section d'une longueur de 2.347m,50 et d'un diamètre de 0m,50, suivie d'une autre section de 2.278 et d'un diamètre de 0m,60 ; dans la première la durée de propagation est de 1''87 et dans la seconde de 2''12.

Pour avoir une durée de propagation rigoureusement égale dans les deux sections, il faudrait ramener respectivement les longueurs aux chiffres de 2.496m,30 et 2.129m,20.

Il est prévu au début une roue Pelton marchant avec 200 litres à la seconde ; ce débit correspond dans la partie inférieure de la conduite (celle de 0m,50 de diamètre) à une vitesse de v_1 de régime de 1m,0188.

On a alors :

$$\theta = \frac{2L}{a} = 3 \text{ s., } 972 \text{ soit } 4 \text{ secondes.}$$

On aura, d'ailleurs, en supposant qu'il s'agisse d'une fermeture totale dans un temps inférieur à 0, en vertu des formules données plus haut :

$$\frac{\beta}{2} = 37°35 \qquad \text{et} \qquad \frac{av'}{g} = 130,6.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Et par suite, pour le coup de bélier à la vanne à la fin d'une période quelconque :

$$\xi'_n = (-1)^{n-1}\ 130{,}6\ \frac{\cos.\ \frac{2n-1}{2}\beta}{\cos.\ \frac{\beta}{2}}$$

Comme $\frac{\beta}{2} = 37°35'$, cette expression, si on considère seulement les premières oscillations, aura sensiblement sa valeur positive maxima pour $n = 5$, soit sensiblement au bout de 20 secondes, moment où l'on aura :

$$\xi'_5 = 153.$$

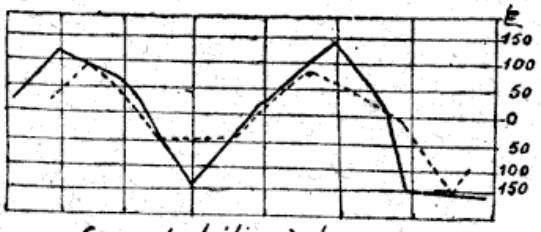
Et, à la jonction, ce coup de bélier, à la fin de la n période, c'est-à-dire pour $l = n\theta + \frac{\theta}{2}$ sera :

$$H'_n = (-1)^{n-1}\ 130{,}6\ \sin.\ n\beta\ \text{tg.}\ \frac{\beta}{2}.$$

Si on considère également les premières oscillations, il aura sa plus grande valeur positive pour $n = 1$, valeur pour laquelle on obtient :

$$H'_1 = 96{,}2.$$

Si la fermeture était rigoureusement instantanée, le coup de bélier maximum garderait pendant chaque période la même valeur depuis la vanne jusqu'à la jonction et de la jonction à la prise d'eau.



Coup de bélier à la came
" " " à la jonction
Fermeture en 4 secondes pour un débit de 200 litres

FIG. 196.

Voir Errata à la fin du livre

Si, au lieu de cela, la fermeture se faisait en un temps θ, soit très sensiblement de 4 secondes, il décroîtrait d'une façon sensiblement régulière de la vanne à la jonction et de la jonction à la prise d'eau ; de plus, à la vanne, pendant une période, la variation serait sensiblement proportionnelle au temps, et il en serait de même à la jonction.

Les résultats sont indiqués par le diagramme (*fig.* 196) où on a porté les valeurs du coup de bélier à la vanne et à la jonction, pour l variant de 0 à 7θ, soit sensiblement de 0 à 28 secondes.

Dans les conduites de Fully, l'épaisseur des parois est de 41 millimètres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à 17 millimètres dans la première section et de 20 millimètres à 6 millimètres dans la seconde. Or une variation de l'épaisseur des parois entraîne une variation de la vitesse de propagation, et par suite, un résultat semblable, quoique beaucoup plus faible à celui résultant d'une variation de diamètre de la conduite.

En résumé, d'après M. de Sparre, on peut sans erreur notable, tenir compte de la variation de l'épaisseur des parois en remplaçant simplement la vitesse de propagation par une valeur moyenne, mais par contre, il y a lieu de tenir compte de la variation du diamètre de la conduite.

Le danger pouvant résulter de l'effet des résonances surtout pour les hautes chutes provient de deux causes. On peut d'abord avoir un régulateur possédant des oscillations à longues périodes et dont la période coïncide avec celle de l'oscillation de l'eau dans la conduite. L'autre cas est celui où la fermeture se fait avec des arrêts successifs, dans les deux cas ; malgré une atténuation notable par l'intervention de la viscosité, on peut avoir à redouter des effets dangereux. Un phénomène de même ordre peut se produire avec une intensité plus ou moins grande toutes les fois qu'il y a concordance entre la période d'oscillation de l'eau dans la conduite et celle de la variation de travail.

L'influence de la perte de charge sur le coup de bélier n'a encore pu être établie expérimentalement. M. Neeser (1) admet que cette perte est proportionnelle au carré de la vitesse au distributeur et M. de Sparre émet qu'elle est proportionnelle à la vitesse moyenne de l'eau, pour toute la conduite à un instant donné.

Le plus souvent les coups de bélier proviennent du réglage des turbines. Les commandes des tabliers des vannes sont, en effet, munies de nombreux harnais et ne peuvent jamais atteindre la vitesse de fonctionnement susceptible de produire des chocs ; il faut donc s'arrêter d'une façon particulière à ce qui intéresse le réglage des turbines proprement dites.

Le régime de la turbine, eu égard à la puissance absorbée, essentiellement variable, lorsqu'il s'agit du transport de force, de traction ou d'éclairage, est fonction de deux éléments : l'inertie de la masse en mouvement et la variation du débit. De fait les tendances actuelles se portent vers un réglage de plus en plus parfait et les constructeurs étant, d'un autre côté, obligés de réduire au minimum les poids du métal employé pour atteindre le prix minimum, on est conduit à augmenter la vitesse de fermeture ou d'ouverture des orifices d'entrée d'eau sur la roue mobile. Il en résulte, par conséquent, une modification du régime de la masse en mouvement et production de coups de bélier.

---

(1) *Bulletin technique de la Suisse Romande* (1910).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le maintien d'une vitesse constante de la veine liquide dans la conduite est impossible à obtenir d'une façon absolue en pratique. La conjugaison des mouvements de vannage, la difficulté d'obtenir des orifices absolument identiques sous un déplacement quelconque des obturateurs, le chemin que doit parcourir l'eau pour aller d'un orifice à l'autre ; toutes raisons qui font que les vannes compensatrices n'annulent pas les coups de bélier, mais les réduisent dans une proportion importante, il est vrai.

Le choc est donc le résultat de la transmission des mouvements et des pertes de charge à l'intérieur de l'appareil. Selon M. Bouchayer, c'est la valeur de ce coup de bélier qui doit être fixée pour le calcul des conduites et qui varie en général de 10 à 20 0/0 de la charge statique supportée par la tuyauterie.

Pour avoir une sécurité parfaite, il conviendrait de connaître la valeur du coup de bélier accidentel qui pourrait se produire en cas de non-fonctionnement de la vanne compensatrice et la conduite devrait être calculée de telle sorte que le travail du métal résultant ne dépasse pas sa limite d'élasticité. On devrait vérifier après avoir calculé la conduite si on reste dans les conditions indiquées ci-dessus.

A cet égard M. Bouchayer conseille la formule suivante pour déterminer l'épaisseur de la conduite :

$$e = \frac{(P + 2B)\,D}{200R};$$

B, coup de bélier, et P, la pression statique supportée en chacun des points de la canalisation.

Il faudrait aussi faire entrer en ligne de compte la loi de propagation du choc le long des canalisations ; mais les expériences faites jusqu'ici, pour établir cette loi, n'étant pas encore suffisamment concluantes, on peut que s'en tenir, comme l'indique M. Bouchayer, à admettre la proportionnalité du coup de bélier à la hauteur de chute [1].

73. Dispositifs de protection contre les coups de bélier. — Dans les conduites de services de distributions d'eau, on dispose le plus généralement des réservoirs d'air pour parer aux inconvénients résultant des coups de bélier.

Les réservoirs d'air ne sauraient être employés pour les très hautes chutes, car la pression de l'air atteindrait une valeur inacceptable sans compter que leur remplissage présenterait de sérieuses difficultés. Il en est de même pour les installations à très gros débits, à cause des dimensions

[1] Les expériences de Verenon (coups de bélier et réservoirs d'air) n'ont pu avoir lieu à cause de la guerre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

considérables qu'il faudrait donner à ces réservoirs. Mais pour les installations moyennes, 200 à 300 mètres de chute, s'ils sont convenablement établis, le coup de bélier devient presque indépendant de la vitesse de fermeture, fut-elle même instantanée. Ils suppriment aussi bien le coup de bélier d'ouverture que celui de fermeture, tandis que l'emploi d'un orifice compensateur qui supprime le coup de bélier de fermeture est sans effet sur celui de l'ouverture. Lorsqu'ils sont munis d'une tubulure qui amène, par la perte de charge accompagnant chaque oscillation de l'eau, une destruction rapide de la force vive possédée par l'eau de la conduite, ils suppriment les dangers de résonance.

Quand il s'agit de conduites d'usines hydroélectriques, où on met de grandes masses d'eau en jeu, on établit le plus souvent, le long de la conduite, des cheminées d'équilibre ou reniflards, notamment dans le voisinage des turbines (*fig.* 197). Alors la masse de la colonne d'eau en jeu n'est plus que celle contenue dans la cheminée et non celle de la conduite tout entière, ce qui diminue considérablement les effets de l'inertie. Dans ces tubes piézométriques, l'eau peut facilement osciller et amortir sa force vive lors des variations de résistance des moteurs. Lors des surpressions, l'eau sort par l'orifice supérieur de la cheminée et se déverse au dehors ; en cas d'ouverture rapide des turbines l'eau s'abaisse au contraire dans la cheminée qui fournit un certain appoint de débit. La (*fig.* 198) montre la disposition d'une cheminée d'équilibre à double enveloppe installée par la maison Bouchayer et Viallet, à l'usine d'Entraygues. L'enveloppe extérieure forme avec la cheminée proprement dite un espace annulaire dans lequel se déverse l'eau projetée par l'extrémité supérieure de la cheminée ; cette eau est alors ramenée à l'aide de tuyaux d'évacuation.

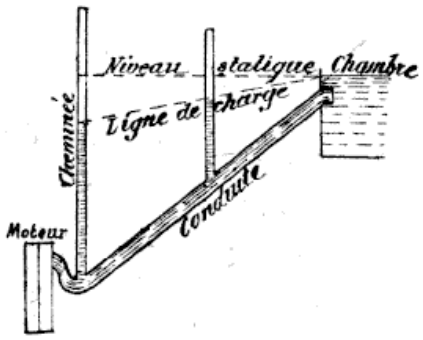


FIG. 197.

D'après M. le comte de Sparre, ces cheminées d'aération doivent avoir un diamètre à peu près égal à celui de la conduite, à l'effet de réduire l'action du coup de bélier à la différence entre le niveau du déversement et la charge. Des tubes trop faibles ne produisent qu'un effet à peu près nul.

Disons que bien souvent ces organes sont mal placés et ils sont quelquefois remplacés par des vannes d'aspiration, flotteurs ou ventouses disposés la plupart du temps sans discernement, rendant à peu près nul leur effet.

Dans le cas des conduites d'amenée à faible pente, l'installation d'une cheminée d'équilibre, le dispositif est facile à réaliser (*fig.* 199) (*Ferrière d'Allevard*). Pour les conduites en charge progressant avec la pente du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

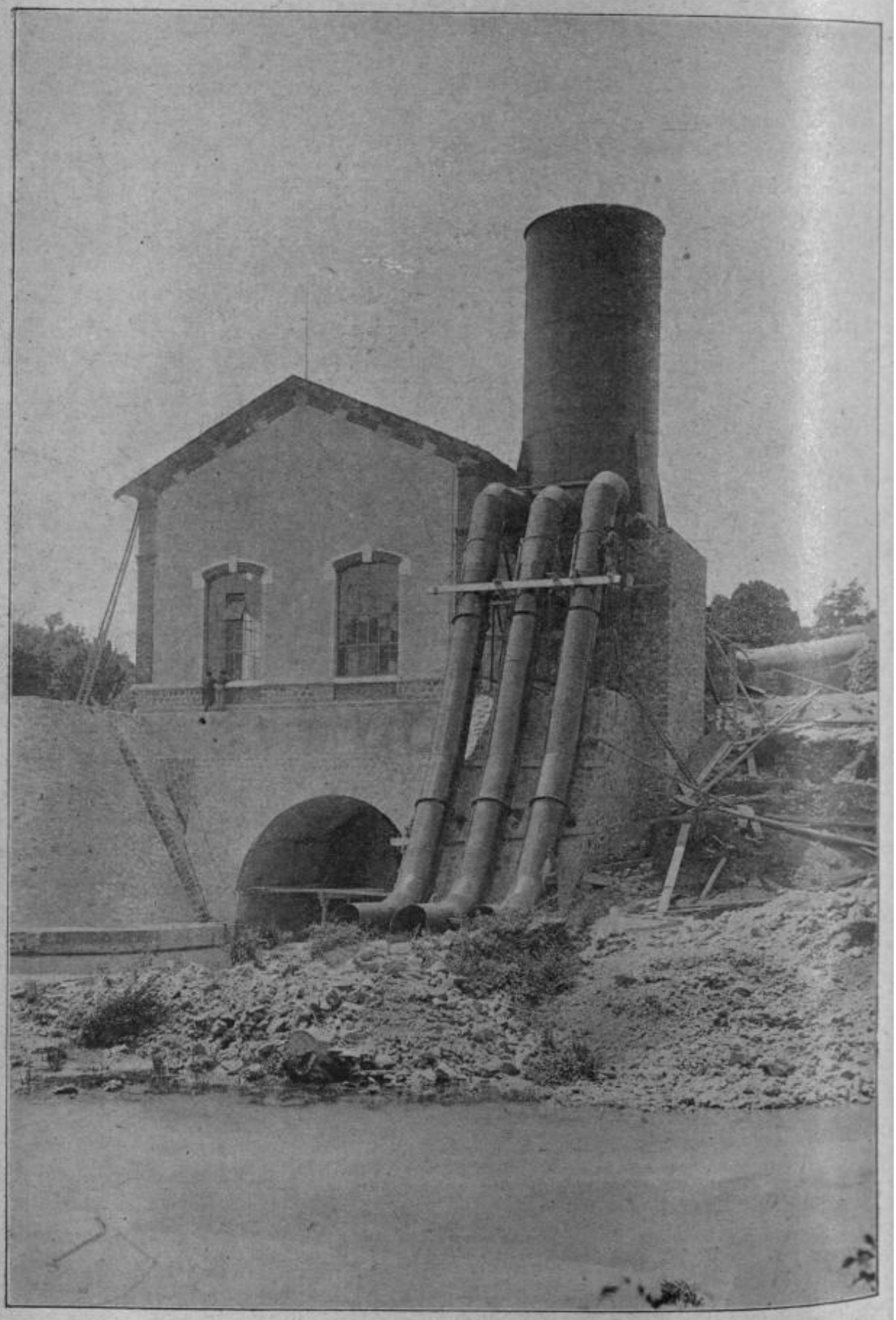


FIG. 198. — Cheminée d'équilibre à double enveloppe (usine d'Entraygues).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

terrain et devant se raccorder au collecteur, on peut utiliser la disposition suivante (*fig.* 200). La conduite principale, se relevant verticalement de préférence avec élargissement de son diamètre, communique avec une autre conduite verticale qui lui est accolée. L'eau passant de l'une à l'autre change de direction, de sorte que, si un coup de bélier se produit, la vitesse de l'eau ne s'amortissant que très lentement dans la conduite principale, celle-ci continue à débiter par des déversoirs latéraux, arasés à un niveau égal ou légèrement inférieur à celui de la retenue. Le niveau de jonctionnement des deux cheminées est d'ailleurs prévu beaucoup plus bas que la cote de perte de charge maxima pour que la conduite puisse débiter en cas d'appels d'eau trop brusques des turbines.

Pour parer à ces brusques appels d'eau et

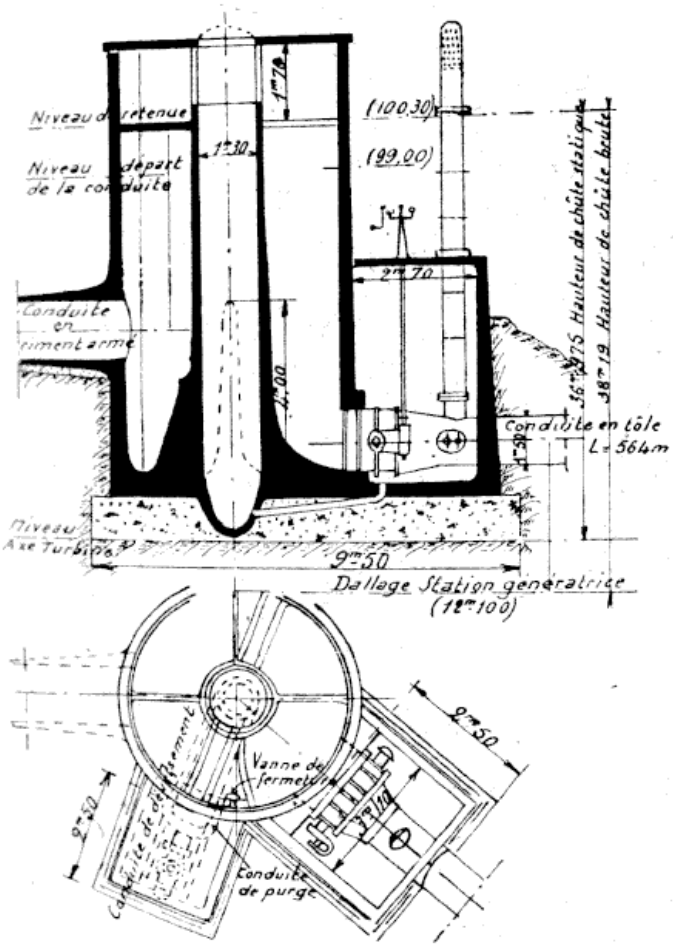


FIG. 199.

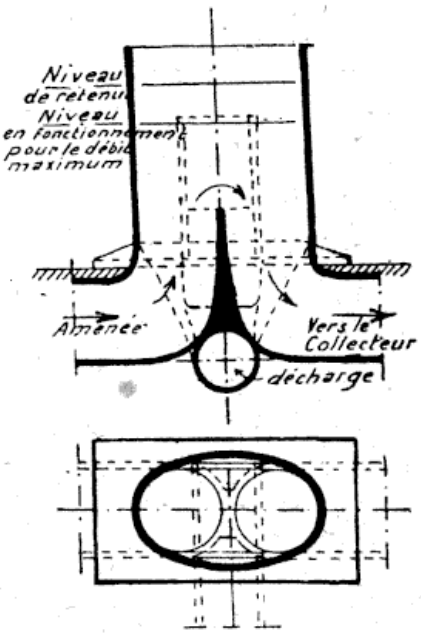


FIG. 200.

aux pertes de charge négatives, on peut aussi prévoir au sommet de cette chambre un épanouissement suffisant pour constituer une certaine réserve d'eau. Lorsque la conduite fonctionne comme conduite forcée, réunissant une chambre d'eau au collecteur de l'usine, sa longueur est généralement peu importante; on se contente le plus souvent de calculer l'épaisseur des tuyaux de façon que le métal ne travaille pas à plus de 7 à 8 kilogrammes.

A l'usine hydroélectrique d'Amsteg (Suisse), qui utilise une chute de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

276 mètres, on a construit un château d'eau dans le roc qui assure le passage de l'eau de la galerie d'amenée à la conduite forcée ; il comprend principalement un tunnel-réservoir et un puits vertical avec galerie de décharge et puits d'aération. Lors d'une brusque diminution de la demande d'eau, cette dernière refoulée dans la galerie se déverse dans le tunnel de décharge établi au niveau de la couronne du barrage, de telle sorte que la conduite forcée est à l'abri de coups de bélier dangereux.

Pour ce genre de conduites, on emploie aussi, pour obtenir la diminution des coups de bélier, des *vannes compensatrices* conjuguées au mouvement du vannage, lesquelles s'ouvrent à l'instant même où la vanne d'entrée aux turbines se ferme. La vanne compensatrice qui est sous la dépendance du régulateur se ferme ensuite très lentement : le but est de maintenir constante la veine liquide dans la conduite.

Dans le cas des roues Pelton le « déflecteur » joue le même rôle. Il consiste essentiellement en un écran mobile manœuvré par le régulateur qui dévie tout ou partie du jet en dehors de la roue.

Des dispositifs permettent de faire agir rapidement le régulateur sur le déflecteur seul lors d'une fermeture ; l'aiguille se ferme ensuite d'elle-même très lentement, tandis que le déflecteur reprend une position tangentielle au jet ainsi réduit ; si le régulateur agit pour ouvrir, il commande simultanément et rapidement le déflecteur et l'aiguille.

M. Michaud préconise la formule suivante pour déterminer la durée T en secondes de la fermeture, pour que le coup de bélier (B), évalué en mètres, ne dépasse pas une quantité donnée :

$$B = \frac{2LV}{gT};$$

L, longueur de la conduite en mètres ; V, vitesse de l'eau en mètres par seconde ; g, accélération due à la pesanteur. On voit ainsi que l'importance du choc est inversement proportionnelle au temps de fermeture et proportionnelle à la vitesse d'écoulement de l'eau.

On atténue les effets des coups de bélier en évitant de placer la vanne d'admission à l'origine de la conduite et en faisant déboucher celle-ci librement dans la chambre de mise en charge pour qu'elle soit en communication avec l'atmosphère. On obvie de même aux effets du vide, qui se produit dans toute conduite dont on ferme l'orifice supérieur.

Si cet orifice supérieur est muni d'une vanne, il est indispensable de fixer un *reniflard* sur cette conduite, à peu de distance à l'aval de la vanne. Ce reniflard peut être formé d'un tube de grand diamètre rivé sur la conduite, ouvert à sa partie supérieure et dépassant de 1 mètre, par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exemple, le niveau de l'eau dans la chambre aval. Quant à son diamètre, on le prendra égal aux 2/3 de celui de la conduite forcée.

Si on a disposé des trous d'homme sur la conduite, on peut les ouvrir lors du remplissage, pour permettre à l'air de s'échapper ; à défaut, on installe des robinets purgeurs d'air que l'on ferme lorsque tout l'air à l'aval s'est échappé. Cette précaution a une grande importance lorsque la conduite a des points hauts, auquel cas l'air ne peut s'évacuer sans purgeurs d'air. On doit remplir la canalisation lentement pour que l'air puisse s'échapper lui-même par la partie supérieure.

M. H. Bouvier a imaginé un régulateur de pression pour conduites forcées, destiné à éviter les coups de bélier lorsqu'on est amené à fermer rapidement les vannages des turbines. Au moment où la fermeture du vannage se produit, le régulateur de pression ouvre automatiquement un orifice, cette ouverture ayant pour but de maintenir constant le débit de la conduite. Comme, dans beaucoup de cas, il y a intérêt à ne pas dépenser inutilement l'eau qui s'échappe par cet orifice additionnel, le régulateur en question permet à cet orifice supplémentaire de se refermer automatiquement, la vitesse de ce mouvement de fermeture étant suffisamment faible pour n'amener aucune surpression dans la conduite forcée.

L'appareil est une sorte de pot à huile de grandes dimensions, muni d'un piston à soupape, celui-ci servant de point d'appui pour le levier qui

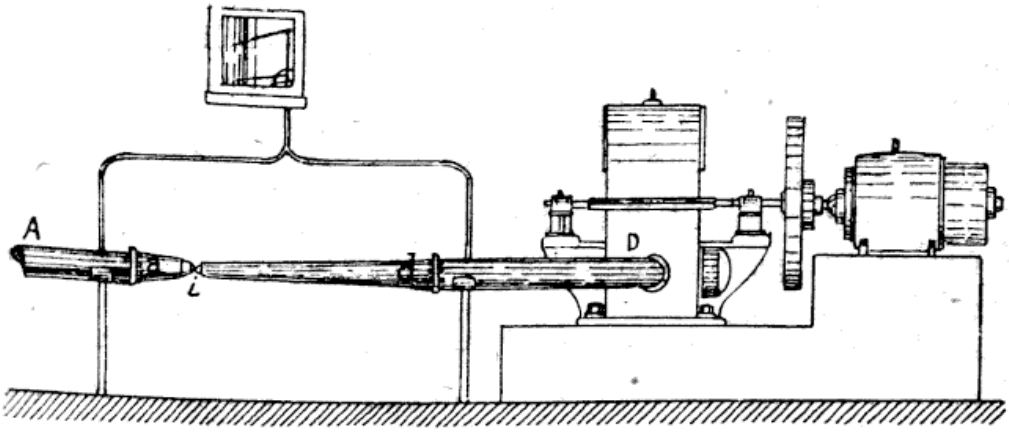


FIG. 201.

manœuvre la soupape compensatrice. Un pointeau, qui suit le mouvement de cette soupape, permet de diminuer progressivement la vitesse de fermeture de cette soupape et de la rendre aussi faible qu'on le désire au moment où la fermeture devient complète. Une liaison rigide entre le mouvement de vannage et la soupape compensatrice a pour effet d'assurer la marche simultanée du vannage et de la soupape pendant les périodes de fermeture du vannage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A titre documentaire, nous signalons l'appareil représenté par la (*fig.* 201), dit « brise-coup de bélier », qui peut convenir lorsque le débit est constant. Il consiste à créer une solution de continuité dans la conduite au voisinage des turbines, coupure qui joue le rôle de vanne compensatrice toujours ouverte, c'est-à-dire sans retard.

Dans quelques installations, notamment en Suisse et en Italie, on a fait usage, pour garantir les conduites contre les surpressions accidentelles, de plaques de sûreté dont l'emploi est basé sur le principe d'une décharge brusque produite par la rupture d'une plaque calculée à cet effet, celle-ci devant se rompre lorsque la pression intérieure de la conduite est telle que le travail des tôles atteint la limite d'élasticité.

La plaque de sûreté est disposée sur un collecteur en relation avec la ou les conduites, celles-ci étant isolées du collecteur par l'intermédiaire de robinets-vannes qui doivent être fermés après la rupture de la plaque pour ne pas interrompre le service de l'usine. La plaque de sûreté qui s'est rompue est remplacée et on remet l'appareil en action.

La plaque est une espèce de bouchon à grain d'orge avec rainure circulaire qui laisse à la tôle l'épaisseur juste nécessaire pour se rompre à la pression voulue ; elle est éprouvée à l'avance de façon à ne pas donner d'ouverture prématurée, eu égard à des défauts cachés de matière.

La maison Bouchayer et Viallet, qui a soumis ce dispositif à une étude approfondie, n'en préconise pas l'emploi par le fait que le fonctionnement de cet appareil, au lieu de diminuer les coups de bélier, en augmente l'importance dans la conduite, tout au moins dans la partie de cette conduite placée à l'amont de ce dispositif, et comme celui-ci est en général installé aux environs du collecteur, il en résulte donc un danger pour les 9/10 de l'ouvrage. D'ailleurs les calculs ci-après corroborent péremptoirement les allégations des grands constructeurs dont nous venons de parler.

En outre, l'appareil est d'un prix élevé, coûteux d'entretien et de fonctionnement et présente la suggestion d'organes mécaniques délicats sur les conduites et de précautions à prendre pour que la colonne d'eau de l'exécutoire ne vienne pas désagréger les tuyaux frappés par l'eau.

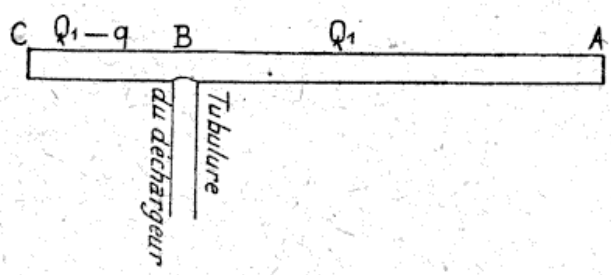


FIG. 202.

Pour se rendre compte d'une façon analytique du fonctionnement de l'appareil qui nous occupe, nous avons à examiner les phases qui précèdent et suivent la rupture de la plaque de sûreté, cette rupture ayant eu pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cause un choc dans la conduite, phases qui sont : le régime normal, choc et rupture de la plaque et enfin le régime résultant de cette rupture.

Appelons P la pression statique dans la conduite, L la longueur de la conduite, i la perte de charge par mètre et Li la perte de charge totale ; nous allons d'abord définir le régime normal (1).

La plaque de sûreté a un diamètre tel que l'orifice découvert laisse passer un écoulement q, et son ouverture se fera lorsque le coup de bélier détournera une quantité donnée égale à B (*fig.* 202).

En nous reportant à la formule (1), on a pour la valeur de la pression supportée en chacun des points de la conduite :

$$P - Li + \frac{2LV}{gM}. \tag{2}$$

Si on remplace i par sa valeur tirée de la formule de M. Maurice Lévy (§ 60), on obtient la relation :

$$P = \frac{\left(\frac{U}{20,5}\right)^2}{R\,(1 + 3\sqrt{R})} + \frac{2LV}{gT}. \tag{3}$$

La longueur de la conduite et le rayon étant des quantités constantes, on peut mettre la formule (3) sous la forme générale :

$$P = f\left(\frac{V}{20,5}\right)^2 + f\left(\frac{V}{T}\right), \tag{4}$$

où les deux variables sont la vitesse de la veine liquide (V) et le temps de fermeture (T).

En cas de fermeture brusque, ou deuxième phase du régime, les coups de bélier étant plus grands que B, provoquent la rupture de la plaque de sûreté. Au moment précis où se produit le choc et où l'orifice d'évacuation n'a pas encore débité, dans la formule (4), V n'a pas varié et $f\left(\frac{V}{T}\right)$ a augmenté d'une quantité inversement proportionnelle à la durée de fermeture de la turbine.

Donc, durant cette deuxième phase, la conduite a à supporter le coup de bélier en vraie grandeur, et ce phénomène se présente comme si la plaque de rupture n'existait pas.

---

(1) Nous devons les éléments de cette étude à l'obligeance de M. Bouchayer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pendant la troisième phase, c'est-à-dire lors du régime résultant de la rupture, admettons qu'il se produise sur la conduite un coup de bélier identique au premier, la relation (4) peut s'écrire sous la forme :

$$P - f\left(\frac{V}{20,5}\right)^2 + f(V), \tag{5}$$

c'est-à-dire indépendante du temps.

Comme nous l'avons dit plus haut, l'ouverture de l'orifice ne doit pas modifier le régime de la marche des turbines au delà d'une faible limite, sinon il irait à l'encontre de son but. Or, dans le fonctionnement normal des conduites, la vitesse ne dépasse pas 3 à 4 mètres à la seconde, et si on admet que q soit au plus égal au débit normal de la conduite, il en résulte dans la conduite, à l'amont de la plaque de sûreté, une vitesse qui atteindra au maximum le double de la vitesse normale. On peut donc dire, d'une façon générale, que la vitesse dans les canalisations doit rester inférieure à $20^m,50$, et cela d'après l'ouverture de la plaque de sûreté, sans cela le service serait interrompu.

Il résulte donc de cette remarque que, dans la formule (5), le second terme $\left(\frac{V}{20,5}\right)$ est toujours plus petit que 1 et que son carré $\left(\frac{V}{20,5}\right)^2$ tend vers l'unité lorsque la vitesse augmente, tout en restant inférieur à 1.

Le troisième terme augmente, au contraire, proportionnellement à V.

On constate donc que, pour un même coup de bélier, plus l'orifice de sécurité débite, plus la pression dynamique supportée par la conduite en chacun de ses points situés à l'amont de l'orifice d'évacuation sera grande.

Pour une application numérique on écrit que le rapport des débits des première et troisième phases sont proportionnels aux charges dynamiques. Si donc Q_1 est le débit de A en B (*fig.* 125) et $Q_1 - q$ celui de B en C, on a pour le rapport des débits en C :

$$\frac{Q_1 - q}{Q} = \sqrt{\frac{h'}{h}}; \tag{1}$$

h' charge dynamique en C (3e phase) et h la charge dynamique au même point (1re phase) :

Or :

$$h' = P - i - i' \text{ (1)}; \tag{2}$$

(1) Pour que cette formule fût complète, il faudrait tenir compte du relèvement de pression produit en B par la tubulure du déchargeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

i perte de charge de A à B et i' perte de charge de B en C, P pression statique.

D'après la formule de Maurice Lévy :

$$\frac{Q}{\sqrt{C}} = \text{constante} = K;$$

Pour un diamètre de conduite déterminé, la formule (2) devient alors :

$$h' = P - \frac{Q_2^2}{K} - \frac{(Q_1 - q)^2}{K} \qquad (3)$$

et la formule (1) s'écrit :

$$\frac{Q_1 - q}{Q} = \sqrt{\frac{P - \frac{Q_2^2}{K} - \frac{(Q_1 - q)^2}{K}}{h}}. \qquad (4)$$

Connaissant le nouveau débit en C, on peut avoir la vitesse et les éléments déterminant les nouveaux coups de bélier.

Appareils automatiques d'arrêt des conduites. — Depuis longtemps, l'on a reconnu la nécessité d'un appareil permettant d'isoler automatiquement une conduite d'eau de son réservoir, en cas de rupture de la canalisation.

M. Piccard, le constructeur de turbines bien connu, emploie, à cet effet, une soupape concave équilibrée qui se ferme lorsque la vitesse de l'eau dépasse une certaine mesure. On a imaginé également d'autres appareils basés sur un principe analogue ou sur celui du flotteur.

Dans certaines installations, on fait simplement usage d'un système d'obturation pouvant se commander de l'usine en cas d'accident. Le système le plus généralement employé consiste dans des vannes plates à tablier métallique soutenues par une sorte de frein ou par un cliquet. Un électro-aimant mis en action de l'usine commande le frein ou le cliquet, de telle sorte que le tablier, rendu libre, descende brusquement et vienne boucher l'orifice de la conduite. Dans les installations importantes, on laisse un homme à la chambre d'eau, lequel a pour mission, en cas d'accident, de fermer les vannes disposées à la chambre de mise en charge.

Mais tous ces systèmes mécaniques sont d'un fonctionnement incertain ; en effet, s'ils donnent de bons résultats aux essais, il n'est pas rare de constater qu'au bout d'un certain temps ils ne rendent plus le service qu'on leur demande lorsque cela devient nécessaire.

M. Bouchayer, qui s'est acquis un haut et universel renom dans les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

questions d'hydraulique touchant à l'aménagement moderne des chutes d'eau, a instauré un appareil automatique remplissant le but désiré

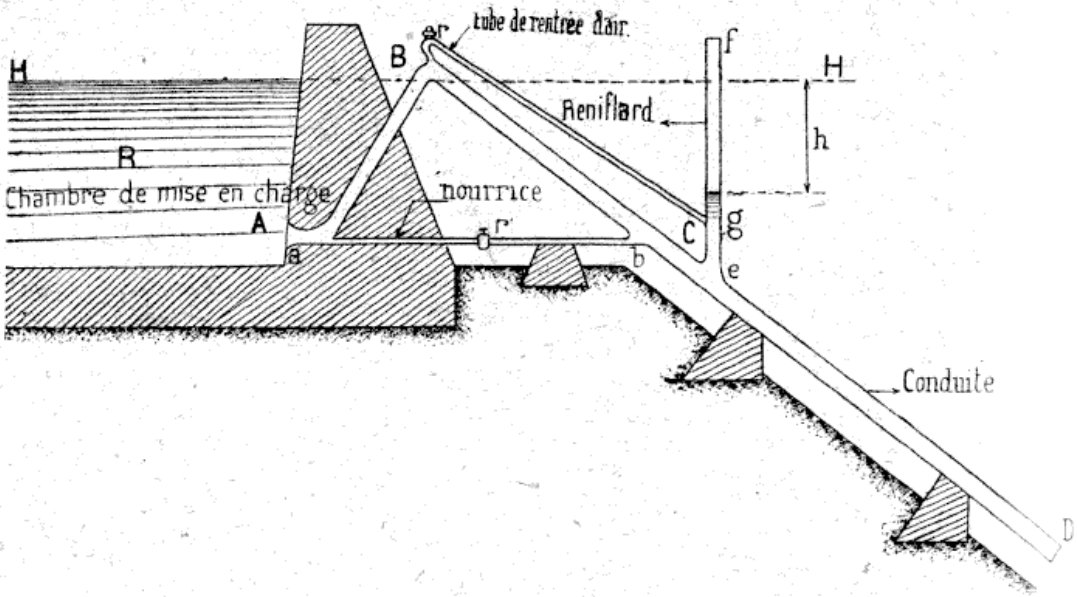


FIG. 203.

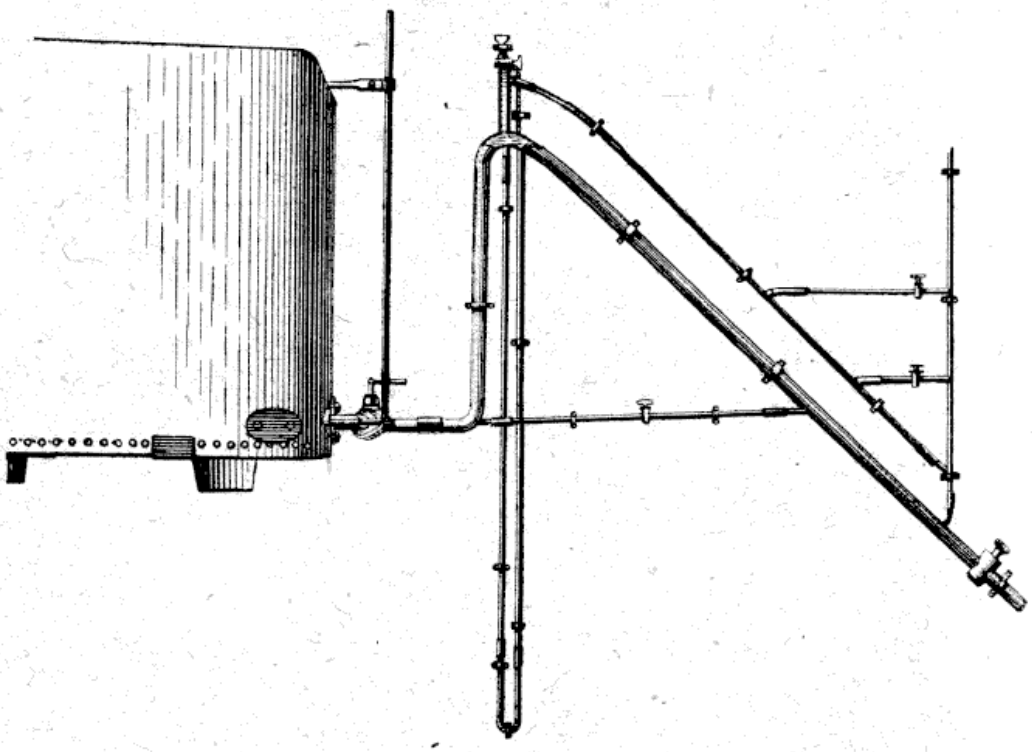


FIG. 204. — Appareil automatique d'arrêt des conduites (Bouchayer et Viallet, constructeurs).

tout en écartant toute chance de non fonctionnement. Il est basé sur une loi hydraulique que rien ne peut empêcher d'être vraie. Nous avons été

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

particulièrement heureux d'avoir pu présenter cet appareil à nos lecteurs, dès son apparition.

A la sortie du réservoir R ou chambre de mise en charge (*fig.* 203 et 204), la conduite ABCD a la forme d'un siphon dont le sommet B se trouve au-dessus du plan d'eau maximum HH dans le réservoir. Un tube piézométrique ou reniflard *ef* est disposé sur la branche descendante du siphon.

Le reniflard communique avec le sommet B du siphon par l'intermédiaire d'un tube de rentrée d'air *gr* qui possède un robinet *r* d'échappement d'air. Un tube *ab* (nourrice), muni d'un robinet *r'*, permet le remplissage de la conduite.

La conduite ayant été remplie jusqu'au niveau du réservoir, à l'aide de la nourrice on ferme les robinets *r* et *r'* et l'appareil est prêt à fonctionner. En ouvrant l'extrémité aval de la conduite, le siphon ABC s'amorce et l'écoulement de l'eau se produit normalement.

Le niveau de l'eau s'abaissant dans le reniflard d'une hauteur *h* égale aux pertes de charge dans la tuyauterie depuis A jusqu'au point *e*, si la vitesse vient à augmenter dans la conduite, la dénivellation *h* augmente dans le reniflard et, lorsque le plan d'eau à l'intérieur de ce dernier descend au-dessous du point *g*, l'air pénétrant par le tube de rentrée d'air désamorce le siphon et l'écoulement s'arrête automatiquement. Le point de branchement *e* du tube piézométrique ainsi que le point *g* sont déterminés pour que la rupture se produise à une vitesse connue fixée.

On pourrait être tenté d'objecter que l'eau par les grands froids pourrait se geler dans le tube de rentrée d'air et dans le reniflard. Mais on peut se rendre compte que le reniflard est identique à ceux que l'on place généralement sur les conduites et dont le but est de permettre la rentrée d'air en cas de vidange brusque. Or, dans ces reniflards l'eau est constamment en mouvement à cause des variations de débit produites par le réglage des turbines, par suite cette eau ne peut geler. Il en est donc de même dans le reniflard et le tube de rentrée d'air de l'appareil que nous venons de décrire.

La disposition imaginée par M. Bouchayer offre l'avantage d'assurer le remplissage des conduites dans un laps de temps déterminé ; il suffit de fixer un diamètre suffisamment réduit pour la nourrice et on est sûr ainsi que le remplissage ne se fait pas avec une vitesse exagérée comme cela arrive souvent, circonstance qui peut amener comme l'on sait des vibrations violentes et dangereuses dans les conduites. L'appareil tel qu'il est disposé amène l'air au point voulu dans la canalisation, c'est-à-dire dans les conditions les plus favorables pour éviter l'aplatissement. Enfin, il permet de commander l'arrêt de la conduite par la manœuvre à l'usine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un robinet de vidange dont la section donne un débit qui, ajouté à celui des turbines, produit la vitesse de désamorçage.

Ces appareils sont maintenant d'installation courante.

Régulateur de pression ou amortisseur H. Bouvier. — Nous avons dit que pour parer aux effets désastreux des coups de bélier dans les conduites forcées, on avait recours à des dispositifs plus ou moins opérants, tels que : les cheminées d'équilibre seules, ou avec bassins déversoirs placés en tête des cheminées ; les réservoirs d'air interposés sur les conduites ; l'adoption d'orifices complémentaires ou soupapes destinés à compenser la fermeture du vannage et enfin certains constructeurs ont adopté une solution qui consiste à donner au régulateur de vitesse des turbines des rapidités différentes pour les ouvertures et les fermetures des vannages.

Toutes ces solutions ne permettent pas d'éviter d'une façon absolue la production ou l'atténuation des effets des coups de bélier ou ne réussissent que dans des cas spéciaux. Ainsi les cheminées d'équilibre sont impraticables dès qu'on aborde les moyennes et hautes chutes ; les réservoirs d'air fonctionnent la plupart du temps comme une boîte de résonance, aggravant l'effet du coup de bélier ; les soupapes compensatrices sont sans action s'il s'agit d'ouvertures brusques des orifices distributeurs ; la solution des régulateurs avec vitesses différentes à la fermeture et à l'ouverture des vannages présente de multiples inconvénients ; leur construction est plus compliquée, le coefficient de régularité se trouve influencé lorsqu'il se produit des ouvertures brusques des vannages et d'autre part, on est conduit à augmenter l'importance des masses en mouvement. La véritable solution du problème consiste donc dans l'emploi d'un orifice complémentaire dont l'ouverture serait provoquée par les surpressions quelles que soient les causes qui les ont provoquées et dont le fonctionnement serait entièrement automatique. Dans cet ordre d'idée, l'emploi de soupapes de sûreté le long de la conduite ou de venturis placés dans le bas de la conduite présente, à côté de certains avantages, des inconvénients réels et nombreux.

Un hydraulicien de grand mérite, pour qui l'industrie des chutes d'eau n'a pas de secrets, M. Henri Bouvier, a résolu la solution si complexe du problème.

L'inventeur a basé son appareil sur cette considération : que si on peut éviter les surpressions dans les conduites forcées en obtenant l'ouverture d'un ou plusieurs orifices de décharge même dès qu'une surpression très faible commence à naître, on aura doté l'industrie des chutes d'eau d'un appareil capable de donner toute sécurité quant au but visé.

La réalisation pratique de cette idée est résolue par l'appareil H. Bou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vier au moyen de deux cycles : 1° une sorte d'indicateur des surpressions ; 2° un clapet de décharge actionné par un servo-moteur, et ce sont les déplacements effectués par l'indicateur qui sont utilisés pour obtenir la commande du servo-moteur et du clapet de décharge.

L'appareil indicateur se compose d'un piston *p* (*fig.* 205) qui reçoit sur une de ses faces la pression de l'eau de la conduite dans la conduite forcée. La pression statique ou normale qui s'exerce sur ce piston est équilibrée par un contrepoids, ou par une pression hydraulique de valeur constante s'exerçant sur l'autre face de ce piston, de telle sorte qu'en marche nor-

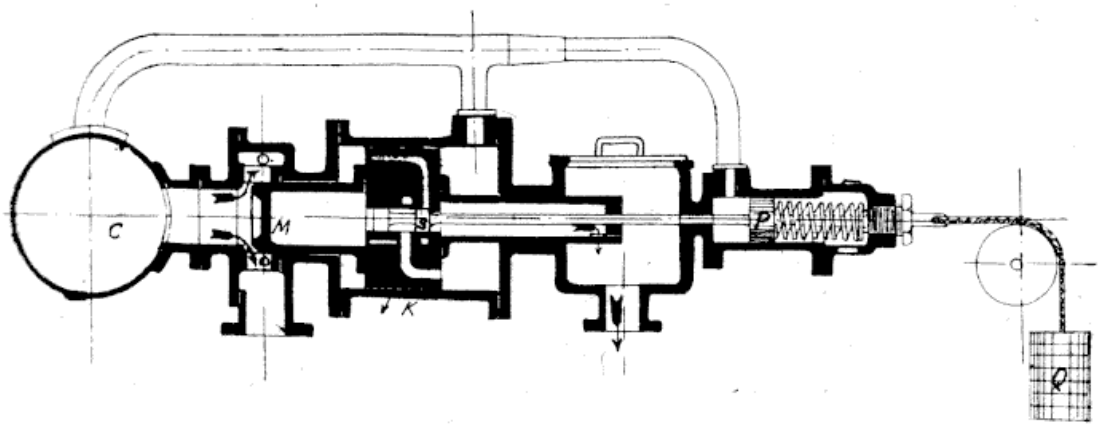


FIG. 205.

Légende.

C. — Conduite forcée ;
K. — Cylindre de prise ;
M. — Clapet de décharge ;
p. — Piston ;
Q. — Contrepoids.

male le piston est en équilibre sous les effets de la pression dans la conduite et de l'effort de contre-butée opposé à cette pression.

Le déplacement du piston est sensiblement proportionnel à la valeur de la surpression dans la conduite. Alors si on utilise ce déplacement pour produire l'ouverture du clapet de décharge, dès qu'une surpression commence à se produire, on provoque une ouverture de l'orifice d'échappement qui atteint une amplification suffisante pour que la surpression soit limitée à une valeur que l'on peut rendre d'autant plus faible que le piston *p* se déplace plus facilement et que l'ouverture du clapet de décharge est plus rapide. De cette façon la première onde se trouve arrêtée dans son développement et la faible surpression qui aura pu provoquer l'ouverture

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du clapet de décharge va en s'éteignant en même temps que se produit la fermeture lente et progressive de ce clapet.

Pour obtenir ce résultat, une tige fixée au piston p porte à son extrémité une soupape S d'un servo-moteur relai ; le piston de celui-ci suit instantanément tous les mouvements de la soupape et conséquemment le clapet de décharge relié au piston du servo-moteur.

L'eau de la conduite forcée trouvant ainsi un orifice d'échappement additionnel, la surpression qui vient de s'amorcer cesse de croître, et si les dimensions de l'appareil sont bien calculées, on peut limiter les surpressions à des valeurs très faibles.

Le diagramme (*fig.* 206) indique pour une série d'essais effectués avec

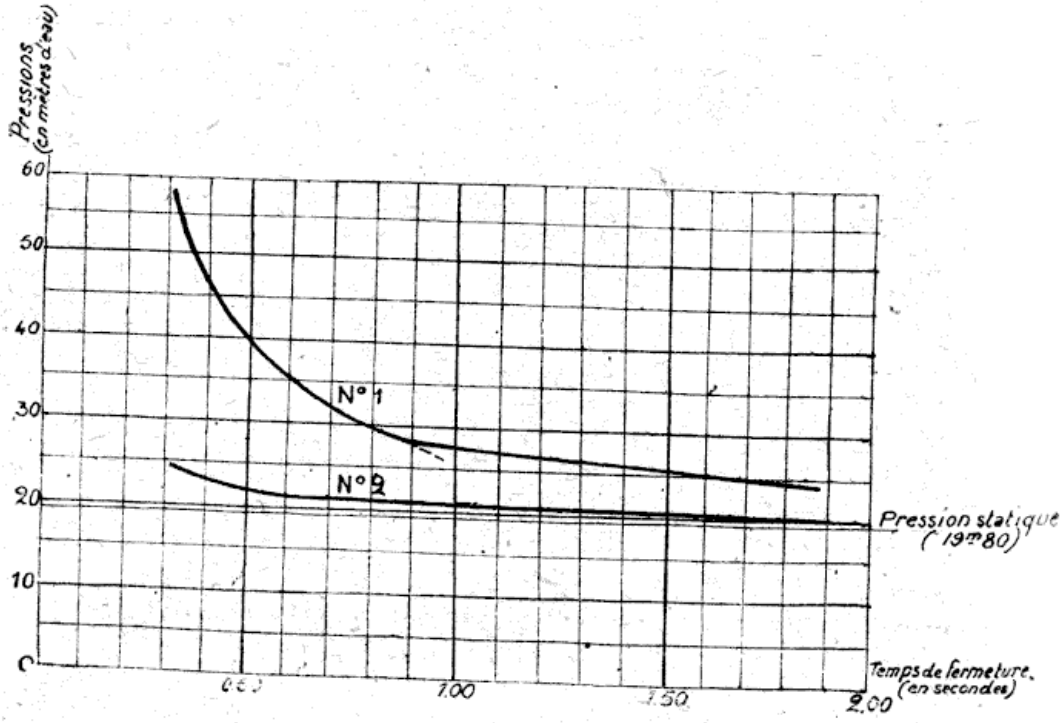


FIG. 206.

l'amortisseur H. Bouvier, la nature des résultats que l'on peut obtenir. Une première courbe montre les surpressions enregistrées pour une série de vitesses de fermeture et, pour ces mêmes vitesses, les surpressions obtenues lorsque l'appareil est en fonctionnement.

Il apparaît qu'un tel appareil, dont le fonctionnement est entièrement automatique, est d'un entretien et d'une surveillance à peu près nuls, qu'il évite les pertes d'eau, qu'il permet une grosse économie de métal dans les conduites (en limitant les surpressions à des valeurs comprises entre 5 et 10 0/0 de la valeur statique), que les vitesses d'ouverture et de fermeture des vannages peuvent être rendues plus rapides, entraînant ainsi une di-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

minution importante des poids des volants, et qu'enfin l'appareil peut être installé sur toutes les conduites, quels que soient la hauteur et le débit de la chute.

Appareil régulateur de débit et de pression pour conduites d'eau forcées alimentant des appareils à pression hydraulique dont le débit est irrégulier. — Au début de l'année 1915, en vue d'alimenter des appareils à pression hydraulique (presses à forger, à emboutir, à poinçonner et presses hydrauliques destinées à tous usages résultant des besoins de fabrications de guerre), on a songé à employer l'eau sous pression prise sur les conduites

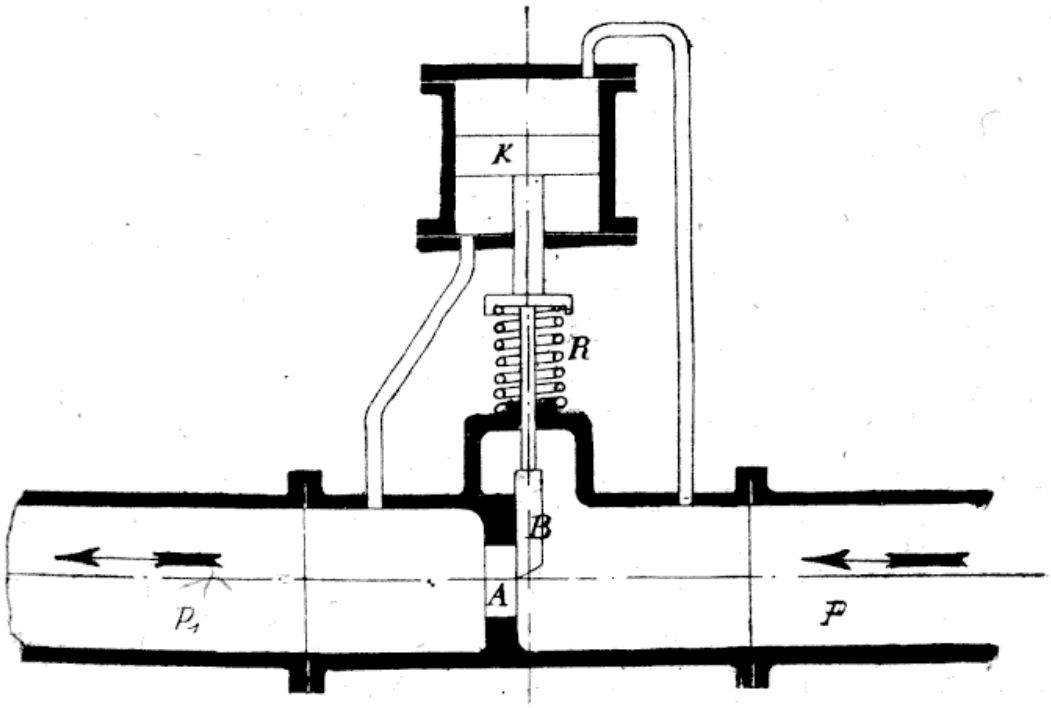


FIG. 207.

forcées des hautes chutes et à remplacer avantageusement les pompes employées pour alimenter ces sortes de machines.

Dans les installations comportant des appareils à pression hydraulique alimentés par des pompes, on sait que l'on emploie des accumulateurs qui permettent de donner aux appareils le débit irrégulier ou même intermittent qui leur est nécessaire tout en maintenant constant le débit des pompes.

Pour l'emploi des conduites d'eau forcées un problème nouveau s'est immédiatement posé ; celui de régulariser le débit demandé à ces conduites afin d'éviter les *coups de bélier* et les surpressions dangereuses pouvant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résulter de l'irrégularité du débit exigé par les machines utilisant la pression de l'eau.

Dans ce but, la maison H. Bouvier, Paul et Cie, constructeurs de turbines hydrauliques à Grenoble, a inventé un régulateur spécial qui résout pleinement la question.

L'appareil H. Bouvier suppose l'emploi d'accumulateurs comme dans le cas des pompes.

Sur la conduite forcée, et en amont des accumulateurs, se trouve interposé un obturateur comportant un orifice A (*fig.* 207) dont la section est réglable au moyen d'une pièce B susceptible d'obturer plus ou moins l'orifice A. La pièce B est elle-même actionnée par un servo-moteur hydraulique comportant un piston K. Sur une des faces du piston s'exerce la pression p qui existe dans la conduite forcée en amont de l'orifice A ; sur l'autre face du piston agit la pression p_1 qui s'exerce à l'aval de l'orifice A.

A chaque position de l'obturateur B correspond une section s de l'orifice A. L'effort exercé sur le piston du servo-moteur est contre-buté par un ressort R.

On voit immédiatement que pour une valeur déterminée de $p - p_1$ le piston du servo-moteur occupera une position déterminée qui correspondra à la compression subie par le ressort R, sous la pression $p_2 = p - p_1$. L'obturateur de l'orifice A occupera la position correspondante et, pour cette position, la section s de passage, laissée libre par l'obturateur B, sera calculée de telle façon que le débit qui est donné par la formule $K = s\sqrt{2gp_2}$ soit égal à la valeur donnée Q (débit constant de la conduite forcée). L'orifice A présentera donc une section de forme spéciale résultant des différentes valeurs que doit avoir la section s pour les valeurs successives que peut prendre la différence p_2 des pressions p et p_1.

Le débit se trouvera donc ainsi régularisé et se maintiendra à la valeur donnée. Dans ces conditions, ce sont les accumulateurs qui pareront aux variations de débit des machines-outils et cela dans les mêmes conditions que si ces machines étaient alimentées par des pompes.

Il est bien entendu que dans une installation de ce genre les accumulateurs doivent être munis de soupapes de décharge qui s'ouvrent lorsque les accumulateurs arrivent à fin de course et cela dans le but que le débit constant Q de la conduite forcée (comme s'il s'agissait de pompes) puisse toujours trouver une issue dans le cas d'arrêt complet des machines-outils.

Il est à remarquer que l'appareil, tel qu'il vient d'être indiqué, permet de maintenir le débit constant malgré les variations que peut avoir une pression p_1. Celle-ci peut en effet varier si la conduite forcée est appelée à fournir, outre le débit Q, un débit supplémentaire destiné, soit à des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteurs, soit à d'autres besoins. Mais dans ce cas, l'installation devra toujours être faite de telle façon que l'orifice A n'ait à débiter que le volume régulier pour lequel cet orifice aura été réglé.

Si on était amené à changer le débit prévu Q, il faudrait modifier les

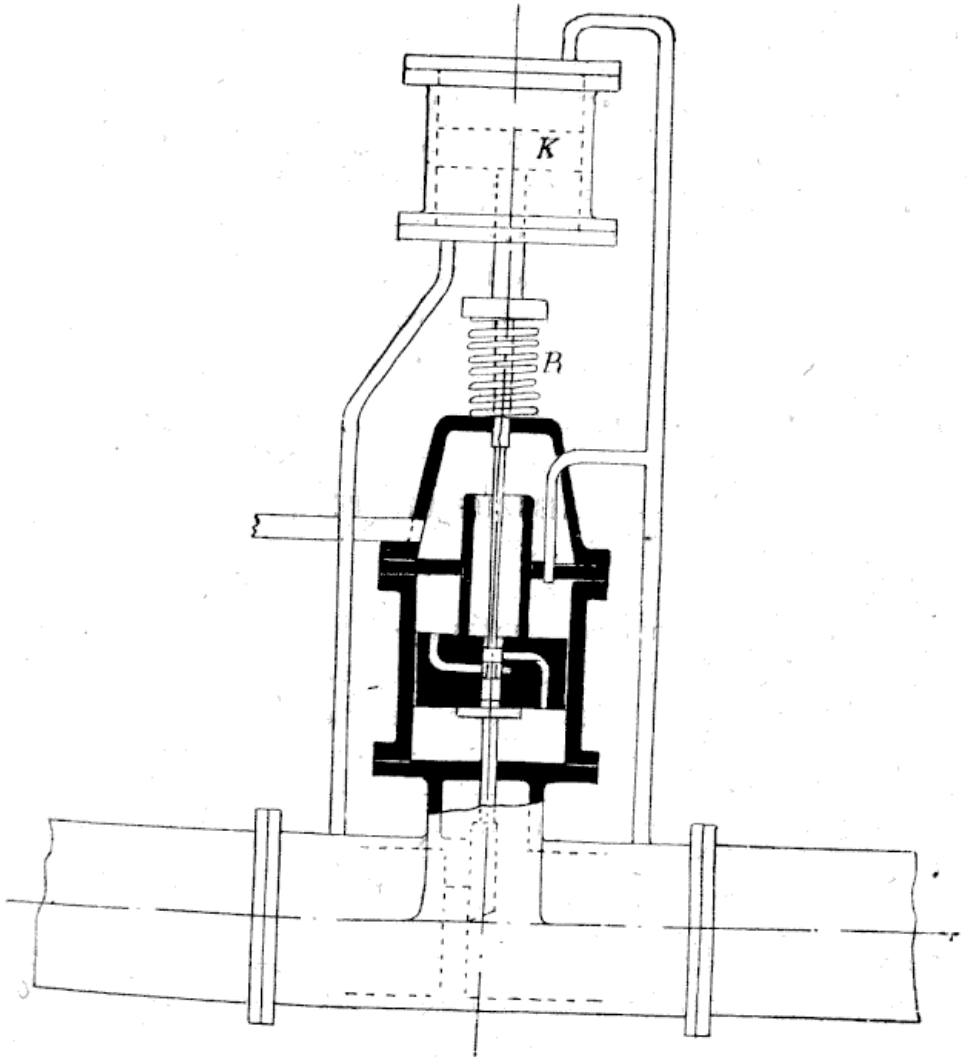


FIG. 308.

dimensions de l'orifice A, ce qui peut du reste s'obtenir par un dispositif de réglage convenablement aménagé dans ce but.

Enfin le débit Q restera régulier et constant lorsque la pression p_1 variera et s'abaissera plus ou moins lors du fonctionnement des presses et alors que les accumulateurs descendent et fournissent le complément du débit exigé par les presses.

Le dispositif décrit se complète, si besoin est, par l'addition d'un servo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur relai, ayant pour effet d'amplifier l'effort donné par le piston K (*fig.* 208).

Au moyen de cette addition, le piston n'aura plus qu'à actionner la soupape du servo-moteur, et, dans ces conditions la sensibilité de l'appareil se trouvera augmentée dans toute la mesure qui sera jugée utile.

Cet appareil, né en 1916 des nécessités d'armement de la guerre, a reçu sa première application aux usines métallurgiques d'Épierre pour l'emboutissage des obus de 75.

Les régulateurs fournis devaient donner un débit constant à une pression de 50 kilogrammes pour l'actionnement de huit presses montées directement sur le collecteur d'une conduite forcée de 575 mètres de hauteur de chute, les huit presses pouvant fonctionner simultanément. Ces appareils ont donné toute satisfaction, soit qu'ils aient marché séparément ou accouplés en parallèle, toutes surpressions ayant été évitées dans la conduite à haute pression.

IV. — ÉPAISSEUR DES TUYAUX

74. Conduites à diamètre constant. — Pour que les tuyaux en fonte puissent être coulés avec une certitude de succès, on a recours à la formule suivante, dérivée de la formule générale de Lamé :

$$e = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{R + p}{R - 2p_0 - p}}\right),$$

dans laquelle e est l'épaisseur de la paroi, D le diamètre intérieur, p la pression intérieure, p_0 la pression extérieure et R le plus grand effort d'extension auquel les fibres de la section sont soumises.

Comme dans la plupart des cas le diamètre est très grand par rapport à l'épaisseur, en négligeant $\frac{e}{D}$ devant l'unité ainsi que p_0, la pression atmosphérique, on obtient la formule approchée suivante :

$$e = \frac{PD}{200R} + 1^{mm},5,$$

e et D en millimètres, P en kilogrammes par centimètre carré, R en kilogrammes par millimètre carré.

Soit p la pression intérieure dirigée suivant un rayon, pression due à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

colonne d'eau, nous avons à considérer le travail du métal, selon que la tension intérieure s'exerce suivant un plan diamétral ou un plan tranversal.

Prenons un élément $mn = \gamma$ (*fig.* 209) infiniment petit et ayant l'unité pour longueur. La pression p est normale à cet élément, et on a deux composantes parallèles aux axes yy' et xx', qui ont pour valeurs : $p\,\gamma \sin \alpha$ et $p\,\gamma \cos \alpha$; la composante ol ($p\,\gamma \sin \alpha$) agit seule sur le plan xx'.

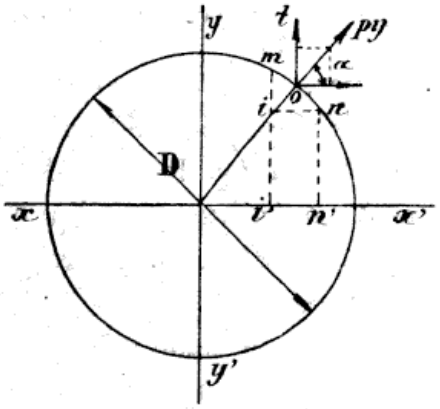


FIG. 209.

La pression p s'exerçant sur tous les éléments de la conduite situés au-dessus de xx', la somme des efforts produits sur une longueur égale à l'unité a pour valeur :

$$p\Sigma\gamma \sin \alpha = p\Sigma ni = pD.$$

On a donc l'équation d'équilibre :

(1) $$pD = 2eR\,; \qquad \text{d'où :} \qquad R = \frac{pD}{2e}.$$

Quant à la tension du métal suivant un plan transversal, l'effort total produisant cette tension est : $\frac{p\pi D^2}{4}$, et l'équation d'équilibre devient :

(2) $$\frac{p\pi D^2}{4} = \pi DeR_1\,; \qquad \text{d'où :} \qquad R_1 = \frac{pD}{4e}.$$

Cette formule montre que le métal fatigue doublement dans le sens diamétral ; de là l'usage des clouures doubles horizontales.

De la formule (1) on tire :

$$e = \frac{pD}{2R} \qquad \text{ou} \qquad e = \frac{pD}{200R};$$

avec les valeurs données plus haut, à e, R et D.

Dans les petits et moyens diamètres, les épaisseurs ainsi obtenues sont largement suffisantes pour assurer les conduites contre toute rupture pouvant être provoquée par des causes même fortuites.

Les tuyaux de grand diamètre sont fondus à des épaisseurs telles que le travail sous l'action des pressions intérieures d'épreuve ne dépasse pas 3 kilogrammes par millimètre carré, et comme en général les pressions de service sont sensiblement inférieures de moitié aux pressions d'épreuve,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il s'ensuit que le métal subit au plus une tension tangentielle de $1^{kg},5$ à $1^{kg},7$, soit $\frac{1}{10}$ environ de l'effort produisant la rupture, estimé à 15 kilogrammes.

D'après le théorème de Lamé, si t représente la tension moyenne par unité de surface de la section transversale de la matière du tube, et p la pression qui s'exerce sur l'unité de surface cylindrique extérieure au même endroit (*fig.* 210), on a entre ces forces la relation : $t - p = C^{te} = \alpha$ (α, tension initiale).

Quand la pression p est nulle, on a : $\alpha = t - 0 = t_0$.

Dans un tuyau plein d'eau, la tension initiale t_0 est nulle ; c' est la valeur de la constante dans ce cas particulier, et nous écrivons : $t - p = 0$.

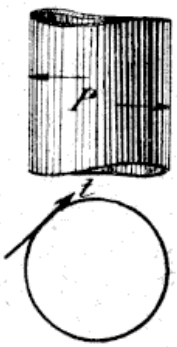


FIG. 210.

Il en résulte que la pression p qu'on peut exercer à l'intérieur du tube est limitée par la tension t, que le métal peut supporter sans inconvénient.

Or, si $t = 1^{kg},5$ par millimètre carré de section du métal, la pression tolérable par millimètre carré de surface intérieure du tube sera également $1^{kg},5$, et par centimètre carré de surface $= 1,5 \times 10^2 = 150$ kilogrammes. C'est la pression qu'exercerait une colonne d'eau de 1.500 mètres de hauteur sur chaque centimètre carré de section à sa base.

Mais les effets des chocs sont deux fois plus accusés que ceux des efforts statiques. On en tient compte en doublant les dimensions que les calculs donnent comme plus haut.

L'emploi de l'acier permet de reculer considérablement cette limite, et c'est pourquoi on adopte aujourd'hui, comme nous l'avons vu, les tuyauteries en tôle d'acier, — au grand avantage de la sécurité des installations, — pour les conduites à haute pression des fortes chutes d'eau. L'on ne dépasse pas généralement 5 à 6 kilogrammes par millimètre carré comme coefficient du travail d'une conduite avec des tôles en acier doux (acier Martin).

Le réglage des turbines produit des coups de bélier en faisant varier la vitesse de l'eau. Généralement les fabricants de turbines indiquent la surcharge maximum provenant de ce fait (10 à 15 0/0), et l'on tient compte de cette surcharge dans le calcul de l'épaisseur de la tôle.

M. Remo Catani a donné dans le journal *la Houille blanche* (1) les formules suivantes pour la détermination des épaisseurs et des poids des conduites métalliques.

(1) Numéro de mars 1904.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CONDUITES A DIAMÈTRE CONSTANT. — Soient : d le diamètre de la conduite en mètres, h la pression en mètres, e l'épaisseur en millimètres, R la charge de rupture en kilogrammes du métal, et δ le coefficient de sécurité de ce dernier.

On a :

$$100 \times 100 \times d \times \frac{h}{10} = 2 \times e \times 1000 \times \delta \times R ;$$

d'où on tire :

$$e = \frac{hd}{2\delta R}.$$

Le poids p d'un mètre linéaire de tuyau, exprimé en kilogrammes, s'obtient par la formule ci-après, dans laquelle ρ représente le poids d'un mètre cube du métal employé :

$$p = 0{,}00157 \frac{hd^2\rho}{6R}.$$

Pour l'acier, en prenant R = 42 kilogrammes, $\alpha = \frac{1}{6}$ et $\rho = 7.800$ kilogrammes, on obtient : $e_{mm} = 0{,}0714\, hd$ et $p_{kg} = 1{,}72 hd^2$.

Pour tenir compte du poids supplémentaire des rivets, des recouvrements de l'une des tôles, etc., on compte sur une majoration de 15 0/0, ce qui conduit à admettre : $p = 2hd^2$.

Dans le cas d'une conduite inclinée d'un angle α sur l'horizontale, le poids d'un mètre linéaire de projection devient : $p = \frac{2hd^2}{\sin \alpha}$.

Pour une conduite horizontale de longueur L soumise à une charge constante H, on a :

$$\text{P, poids total} = 2\text{H} \int_{L_1}^{L_2} d^2 \times dl.$$

Dans le cas des conduites à diamètre constant qui nous occupe, le poids total d'une tuyauterie soumise à une charge maxima de H mètres d'eau peut alors s'exprimer approximativement par :

$$(1) \quad \begin{cases} P = H^2 d^2 \text{ (tuyau continu vertical)}, \\ P = \frac{H^2 d^2}{\sin \alpha} \text{ (tuyau incliné d'un angle } \alpha), \\ P = 2HLd^2 \text{ (tuyau horizontal de longueur L)}. \end{cases}$$

Quels que soient la nature du phénomène propre au coup de bélier et les éléments de régime de la conduite, il faut dans chaque cas, déterminer la surpression x en tous points de la conduite, et si on admet que cette dernière puisse être assimilée à une force instantanée, elle produit donc un effet double de celui produit par les forces progressives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a alors :

$$e = \frac{(h + 2x)d}{2R};$$

h, indépendant des unités choisies.

On prendra par exemple h, pression statique en kilogrammes par centimètre carré;

x, coup de bélier maximum en kilogrammes par centimètre carré;

d, diamètre en centimètres et R la charge par centimètre carré;

R correspondant aux 7/10 par exemple de la limite inférieure, on obtient ainsi e en centimètres.

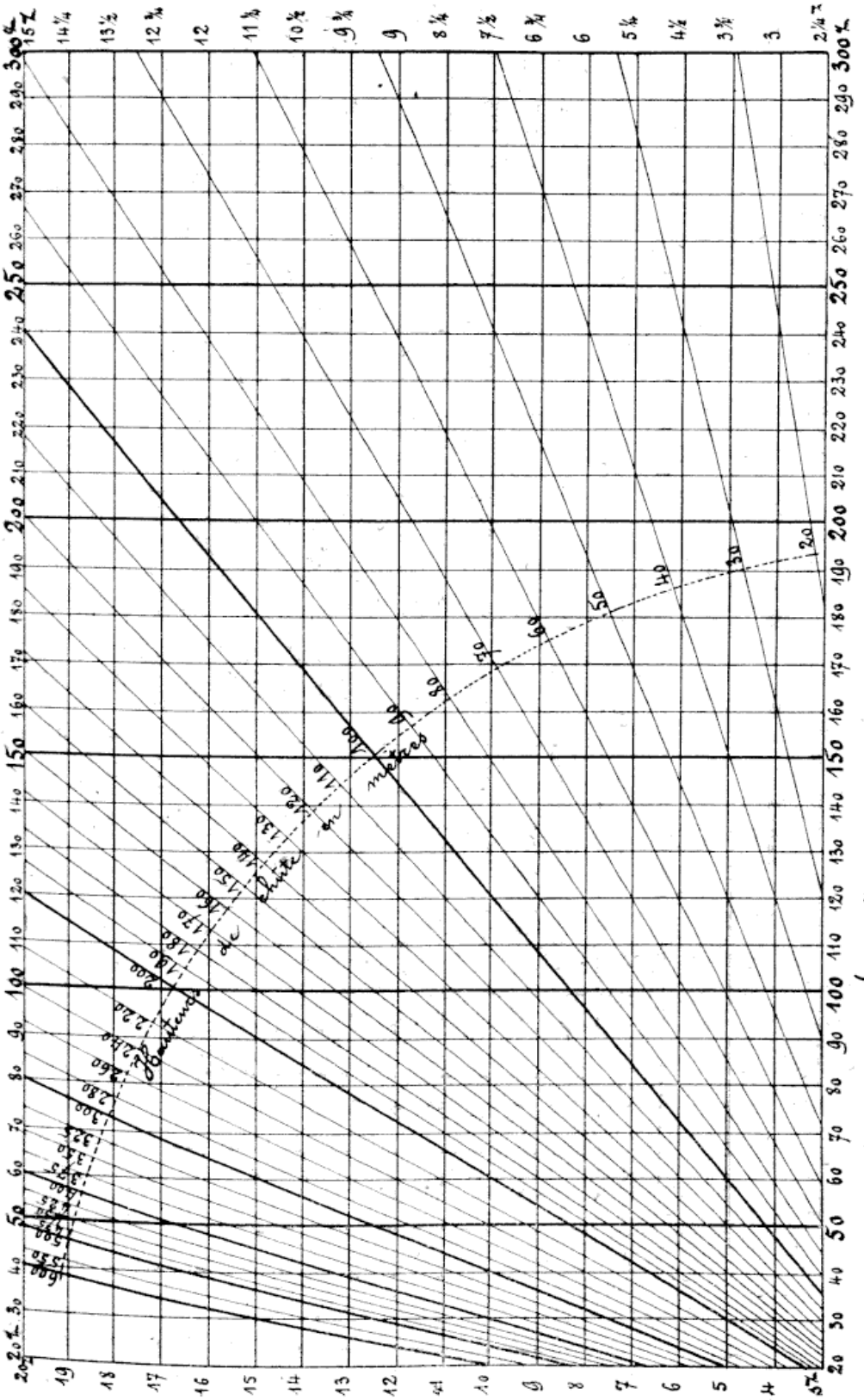
75. Formules et abaques pour la détermination des épaisseurs des tuyaux en tôle. — D'après M. Bouchayer, le coefficient de travail de la tôle doit être pris égal à 6 kilogrammes pour l'acier de déphosphoration obtenu par le procédé Thomas et de 8 kilogrammes pour l'acier au four Martin.

C'est sur cette base qu'a été calculé l'abaque ci-après, contenu dans l'intéressante brochure *les Conduites sous-pression* de la maison Bouchayer et Viallet.

Pour s'en servir (Pl. IV), on suit la verticale du diamètre jusqu'à sa rencontre avec la ligne inclinée de la pression, ou celle indiquant la pression immédiatement supérieure à celle mesurée sur le terrain. La ligne horizontale la plus proche de ce point d'intersection donne l'épaisseur par une lecture à gauche, pour un travail de 6 kilogrammes par millimètre carré, et une lecture à droite pour un travail de 8 kilogrammes. Ayant ainsi déterminé la plus forte épaisseur correspondant au bas de la chute, on cherche pour ce même diamètre à quelle hauteur de la chute correspondent des épaisseurs moindres que l'on fixe, en remontant vers l'origine de la chute, et cela, en se servant de la même table, mais en sens inverse. On marque ces points sur le profil en long de la canalisation, et on a ainsi divisé la conduite en tronçons d'épaisseurs variant du maximum au minimum, de millimètre en millimètre, et correspondant aux différentes pressions. Connaissant le diamètre et l'épaisseur des canalisations, on aura le poids au mètre courant des canalisations en calculant le poids de la tôle, des recouvrements, des rivets et des brides d'extrémité et cela pour un tronçon de 6 mètres à $6^{m},50$ de longueur environ (conduites de 150 à 1.000 millimètres) et, en divisant par la longueur du tronçon, on a le poids au mètre courant. Pour les conduites de plus grand diamètre, on opère de la même façon sans tenir compte des brides puisque la jonction des tronçons se fait par un rivetage bout à bout sur place. Les deux tableaux ci-après publiés par MM. Bouchayer et Viallet donnent, le premier, le poids

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des conduites avec brides dont les diamètres varient de 200 à 1.000 millimètres, et le second, des conduites sans brides, pour des diamètres variant de 600 millimètres à 3m,30. Ces poids ne sont qu'approximatifs mais peuvent être consultés utilement pour un avant-projet,



Abaque pour la détermination des épaisseurs de la tôle dans les conduites forcées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tableau des poids de conduites avec brides, correspondant à une longueur de 6m,50 pour les tronçons (Tuyaux de la Maison Bouchayer et Viallet).

ÉPAISSEUR DES CONDUITES en millim.	DIAMÈTRES DES CONDUITES EN MILLIMÈTRES																
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
3	23	27	32	34	39	43	48	54									
4	27	34	40	44	50	59	66	70	76	80	89	96	101	107	113	119	125
5	32	41	49	58	66	74	81	88	97	104	111	118	128	133	142	148	159
6	40	49	59	64	79	88	97	102	114	122	130	142	149	158	168	175	186
7	46	58	69	84	92	103	113	122	130	144	153	165	176	186	195	204	219
8		69	81	93	105	117	129	140	154	165	175	187	200	209	222	234	246
9		82	94	109	122	134	148	159	176	189	201	216	231	238	253	270	280
10		87	104	119	135	150	164	186	196	214	223	242	259	273	285	300	314
11			114	133	149	168	182	199	217	230	247	264	281	302	318	328	344
12			129	148	174	185	201	221	244	253	275	295	318	329	349	368	384
13					182	196	219	238	261	276	286	319	337	350	374	389	415
14						209	238	258	284	300	325	349	367	387	414	428	442
15							259	276	295	318	346	367	389	415	436	457	478
16							270	298	312	334	368	393	417	444	469	499	516
17								316	344	366	394	417	437	474	506	546	567
18									370	385	413	442	472	497	534	576	600

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tableau des poids des conduites sans brides au mètre courant (Tuyaux de la Maison Bouchayer et Viallet).

ÉPAISSEUR DES CONDUITES en millimètres	DIAMÈTRES DES CONDUITES EN MILLIMÈTRES															
	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.500	1.600	1.800	2.000	2.200	2.500	2.800	3.000	3.300
3	51	60														
4	69	80	90	100	116	125	135									
5	86	100	115	125	140	155	168	210	225	250						
6	105	120	137	155	170	185	200	250	270	305	340	370	420	465	500	
7	123	140	160	180	200	220	235	295	318	360	395	435	490	550	590	690
8	142	165	185	210	230	250	275	335	360	405	455	500	565	635	675	745
9	160	185	210	235	260	280	305	385	405	455	510	560	635	705	755	830
10	180	205	235	265	290	315	345	430	455	510	575	630	720	790	850	935
11	200	230	265	295	320	350	385	475	500	570	640	700	785	880	940	1.030
12	220	255	285	320	350	385	420	520	550	620	700	765	870	975	1.040	1.135
13	240	275	310	350	385	420	455	565	600	675	755	830	935	1.040	1.120	1.235
14	260	300	335	375	415	450	495	610	645	725	815	895	1.020	1.135	1.210	1.335
15	280	320	360	405	445	485	530	655	695	780	890	970	1.100	1.230	1.310	1.435
16	300	350	385	430	480	520	570	700	740	830	945	1.025	1.170	1.300	1.385	1.525
17	320	370	410	465	510	555	605	745	790	915	1.010	1.100	1.245	1.385	1.480	1.620
18	340	390	435	495	540	590	640	790	840	965	1.065	1.160	1.310	1.465	1.565	1.715
19	360	415	460	520	570	625	675	835	890	1.015	1.120	1.225	1.385	1.535	1.650	1.805
20	380	440	490	545	600	660	710	880	940	1.065	1.180	1.290	1.460	1.615	1.740	1.900

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A titre d'indication, nous avons dressé le tableau suivant, d'après les nombreuses installations réalisées par la maison Joya de Grenoble.

DIAMÈTRES en mètres	LONGUEURS des CONDUITES en mètres	PRESSION en mètres de hauteur d'eau	ÉPAISSEUR des TOLES	POIDS en kilogrammes	FORCE DE LA CHUTE en HP
0,200	855	320	3 à 10	29.900	201
0,220	750	454	3 à 7	36.000	350
0,250	300	»	3	7.210	100
0,300	700	190	4 à 7	35.000	268
0,350	350	320	7 à 11	35.000	640
0,350	3.650	622	3 à 14	317.550	1.035
0,400	200	60	4	10.500	150
0,400	3.200	500	7 à 16	493.920	1.256
0,450	1.800	500	3 à 16	251.864	1.600
0,500	120	60	3 à 6	11.800	200
0,500	970	230	3 à 9	84 500	1.200
0,500	1.300	136	3 à 9	55.000	350
0,600	4.800	50	3 à 4	28 700	113
0,660	860	90	3 à 7	79 500	615
0,700	440	70	4 à 5	36.015	600
0,700	480	136	4 à 8	63.900	791
0,800	160	90	4 à 5	57.600	936
0,900	660	40	5 à 6	8.900	117
1,000	118	30	4	16.800	471
1,200	250	90	4 à 7	62.850	2.838
1,400	40	10	6	8.850	1.160
1,400	264	142	15 à 19	226.000	4.000
1,400	500	140	5 à 13	700.000	10.000
1,450	350	136	5 à 13	165.000	5.000
1,500	400	45	6	40.000	1.600
1,800	620	70	6 à 19	350.000	9.000
1,800 × 2	424	28	6 à 8	169.000	4.000
2,200	26	23	7 à 8	15.000	2.000
2,150 × 2	117	18	6 à 8	59.000	»
2,200 × 3	79	23	7 à 8	51.950	10.000
3,300	705	38	10	770.000	10.000

76. Conduites à diamètres variables. — Pour une perte de charge déterminée, la méthode du diamètre variable conduit à un poids de tuyau inférieur à celui qu'on obtient par la méthode ordinaire.

Comme l'on peut réduire l'épaisseur des tôles à mesure que la pression ou la hauteur diminue, on prend pour valeur dans chaque tronçon celle de la charge moyenne.

Soient n le nombre de tranches dans lesquelles on suppose divisée la hauteur H et r le n^{me} tronçon. Lorsque n est impair, r est le tronçon pour lequel le diamètre se trouve être précisément celui que l'on aurait employé pour une conduite à diamètre constant.

Le poids total de la conduite est donné par l'expression :

$$(2) \qquad P' = \frac{P}{n^2}\left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \int \left(\frac{2r-1}{r^{\frac{2}{3}}}\right)_{r=1}^{r=n} = P\eta ;$$

P, poids déduit de la formule (1) du paragraphe précédent.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le coefficient de P est moindre que l'unité dès que $n = 2$, et plus ce coefficient sera petit, plus il sera avantageux de construire une conduite à diamètres variables. La variation de η en fonction du nombre n de tronçons de la conduite n'est pas grande.

La formule (2) peut s'écrire sous la forme :

$$\eta = \frac{P'}{P} = 0{,}95 - \frac{1}{2n},$$

suffisamment exacte pour les besoins de la pratique, lorsque n est grand.

La valeur limite du coefficient η pour $n = \infty = 0{,}95$.

La tôle doit, indépendamment des efforts ci-dessus, pouvoir supporter sans risques les effets dus à la dilatation. D'après M. Bouchayer, les joints de dilatation, préconisés en principe, auraient plutôt donné lieu à des résultats contraires à ceux que l'on attendait de leur emploi.

Ces joints ne s'utilisent guère plus qu'au voisinage de la chambre de mise en charge. Ils sont constitués par un presse-étoupe formant joint étanche et fixé sur la partie aval de la conduite. La partie amont est engagée dans ce presse-étoupe et peut y glisser lorsque la dilatation de la partie inférieure le fait remonter.

M. Bouchayer estime que la solution la plus rationnelle est que le métal résiste seul, par sa nature, à la dilatation.

La charge limite d'élasticité de la tôle d'acier étant comprise entre 12 et 14 kilogrammes, il est très rare que l'effort de tension résultant de l'allongement de la conduite dépasse $10^{kg},15$, ce dernier chiffre correspondant à un écart de température de 50° entre la température de mise en place de la conduite et la température la plus froide d'hiver.

Les phénomènes de dilatation sont considérablement moindres lorsque les conduites sont pleines ; il convient donc de ne les vider qu'en cas de nécessité absolue, comme par exemple lorsque les conduites ne travaillent pas en hiver.

V. — INSTALLATION DES CONDUITES

77. Causes des déformations des conduites forcées. — Les forces déformatrices à envisager se réduisent généralement à deux dans la pratique : le poids propre du tuyau et celui du liquide contenu, qui tendent à ovaliser la conduite, en l'aplatissant contre les supports résistants sur lesquels elle s'appuie. La fatigue moléculaire due à la flexion peut être plus importante que celle due à la pression intérieure du liquide. Les fatigues dues aux flexions varient sensiblement comme les cubes des diamètres des conduites.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'équation générale donnant le moment fléchissant dans chaque section de la paroi, dans le cas d'un tuyau vide, se réduit à la formule :

$$M_f = Kz;$$

M_f, moment fléchissant cherché ; K, constante pour chaque cas particulier, dont la valeur est donnée par le produit du poids p de la paroi par mètre courant de développement du tuyau par le carré (R^2) du rayon ; z, variable, fonction d'un angle α qui définit la section considérée.

M. Birault, qui a présenté cette formule, explique, d'autre part, qu'en chaque point de la paroi les déformations élastiques dues au poids propre et au poids du fluide contenu sont proportionnelles. Il suffit, par suite, d'ajouter les effets venant du poids de l'eau à ceux provenant du poids propre du métal.

Si donc on fait entrer en ligne de compte la déformation due au poids du fluide contenu dans le tuyau, la formule générale sera la même que précédemment, mais où K aura pour valeur :

$$K = pR^2 + \frac{1}{2}\delta R^3 ;$$

δ, densité du liquide contenu.

M. Birault donne aussi la formule suivante pour déterminer la valeur de l'aplatissement e due au tuyau ou diminution de longueur du diamètre vertical :

$$e = \left(\frac{\pi^2}{4} - 2\right)\frac{KR^2}{EI} = 0{,}467\,\frac{KR^2}{EI};$$

E, coefficient d'élasticité de la matière des parois ; I, moment d'inertie de l'unité de longueur des parois, ce moment d'inertie étant supposé constant sur toute la circonférence. En général, l'action du poids du liquide est prépondérante et elle varie proportionnellement aux cubes des rayons. Les flexions augmentent avec une très grande rapidité avec l'augmentation des diamètres ; pour un diamètre double, les moments fléchissants sont près de huit fois plus grands. Il est donc préférable de renforcer les parois par des armatures ou par des dispositions d'appuis bien étudiées, plutôt que de recourir à des augmentations d'épaisseur lorsque les flexions deviennent considérables. En négligeant l'action du poids des parois, les déformations sont proportionnelles à la cinquième puissance du rayon, si les moments d'inertie ne changent pas.

M. Bouchayer estime que l'aplatissement de la conduite atteint son maximum avant que le tuyau soit plein d'eau. Dans la détermination pratique des épaisseurs d'une conduite de grand diamètre, on doit donc con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sidérer la déformation due au remplissage, qui correspond au travail maximum du métal. Il convient cependant de remarquer que ce travail n'est que passager et que les conduites ne se vident que très rarement et, par suite, que ce surcroît de travail ne se produit que par intervalles.

On a proposé divers dispositifs pour éviter la déformation des conduites utilisées dans l'aménagement des hautes chutes, tels que les tuyaux à double clôture longitudinale et transversale, les tuyaux munis de brides circulaires, à l'effet de les renforcer au point de vue de la section, ainsi que nous l'avons vu plus haut.

Il peut arriver qu'une rupture brusque se produisant par un joint de dilatation, — au moment de la mise en charge d'une conduite, — la canalisation se vide spontanément et qu'un aplatissement ait lieu sous l'effet du vide partiel dû à la vidange brusque.

Lorsque les conduites sont vides, les changements de température amènent des perturbations qui se manifestent soit par une compression, soit par une tension du métal, que celui-ci doit supporter sans aucun risque. Pour une différence de température de 50° par exemple (en supposant l'installation faite à une température de 35° et en supposant la conduite exposée à un froid de — 15°), la canalisation, supposée amarrée à ses deux extrémités, l'allongement par mètre sera de :

$$0{,}000016 \times 50 = 0^{m},000580.$$

Et l'effort de tension résultant :

$$0{,}000580 \times 17500 = 10^{kg},15.$$

Dans ces formules, le chiffre 0,000016 est le coefficient de dilatation de l'acier et le chiffre 17.500 le coefficient d'élasticité de la tôle.

La conduite étant vide, l'effort dû à la pression du liquide ne vient pas s'ajouter.

Or la charge limite d'élasticité du métal étant comprise entre 12 et 14 kilogrammes, on voit que la différence de températures admise n'a pas d'effet désastreux sur la conduite.

78. Tracé des conduites. — Il est bon de ne pas adopter un tracé absolument rectiligne en plan, mais bien un peu brisé pour faciliter la dilatation dans les angles.

Les effets de dilatation ont pour résultat d'ouvrir et de fermer les coudes de la canalisation lorsque ceux-ci ne sont pas amarrés et peuvent jouer librement.

Lorsque les conduites sont placées sur un terrain à faible déclivité, on laisse ces coudes se déplacer légèrement, s'ouvrir et se fermer librement et les parties extrêmes sont seules amarrées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour réduire au minimum ces déplacements, il faut avoir soin de faire le dernier raccordement, c'est-à-dire le dernier joint, par une température moyenne, de telle sorte que les effets dus aux variations de température soient réduits de moitié.

Lorsque les tuyaux ont une forte déclivité, on arrête les mouvements de la conduite en plaçant au bas des parties en forte pente des caissons de butée, comme il sera expliqué plus loin.

Les conduites peuvent être constituées par une seule file de tuyaux de même diamètre, ou, lorsque la hauteur de chute amène à une épaisseur de tôle qui rend le tuyau impossible à exécuter dans de bonnes conditions, on remplace la conduite unique par une série de conduites de diamètres plus petits, qui rentrent alors dans la construction courante (1).

Des considérations obligent parfois à réduire le diamètre des conduites plus on approche de l'usine. Pour maintenir la perte de charge constante, il faut augmenter le diamètre à l'amont et on constitue ainsi une canalisation à sections variables.

Il arrive aussi que l'on sectionne la chute, pour éviter des épaisseurs trop fortes ; alors l'usine génératrice supérieure devient la chambre d'eau de celle venant immédiatement après. Cependant, comme l'on est arrivé pratiquement à établir une chute de plus de 1.000 mètres débitant 500 litres à la seconde (débit qui se rapproche du maximum que l'on peut avoir à une altitude aussi élevée), les cas où l'on sera obligé de recourir à un sectionnement sont plutôt rares. Ils n'auront guère leur raison d'être que lorsqu'on créera une réserve pour débiter ensuite pendant un laps de temps restreint. Les canalisations à diamètres variables, le plus grand diamètre correspondant aux faibles pressions, établies de façon que la perte de charge moyenne soit celle demandée, sont tout indiquées pour réaliser une économie importante sur le poids total de la conduite.

En traitant de la pose des conduites, nous aurons l'occasion de revenir sur cette intéressante question du tracé des conduites.

79. Pose des conduites. — Les conduites pour chutes d'eau sont disposées en terre ou en élévation, selon la configuration des terrains destinés à les recevoir.

---

(1) L'installation de la canalisation forcée de l'usine hydro-électrique d'Orlu (940 mètres de chute) a été faite au moyen d'une seule file de tuyaux. La partie supérieure a été exécutée à l'aide de la tôle rivée jusqu'à la pression de 40 atmosphères ; l'épaisseur de la tôle est de 5 millimètres à la naissance de la chute et finit avec une épaisseur de 18 millimètres. La tôle soudée qui fait suite à la tôle rivée, commence avec une épaisseur de 14 millimètres et finit avec 32 millimètres pour des pressions de service de 40 à 94 atmosphères.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si le sol est incompressible, on enterre la conduite à moitié diamètre et quelquefois dans une tranchée entièrement remblayée.

Dans certains cas, on loge les tuyaux dans un puits ou dans une galerie, quand on craint des chutes de rochers.

Le plus souvent les conduites reposent sur le sol en en suivant les aspérités et les sinuosités, ce qui nécessite parfois des travaux d'art importants, tels que pylônes, passerelles, etc., qui donnent à cette partie des travaux d'aménagement d'une chute le côté audacieux et imposant qui retient l'attention du touriste, toujours en quête d'émotion.

La traversée de l'Arve, à l'usine de la Praz (Savoie), est faite au moyen d'un pont-conduite d'une portée de 40 mètres sans point d'appui intermédiaire (1). La conduite a 2m,40 de diamètre et elle se porte d'elle-même. A Bozel, on a établi un escalier longeant la conduite pour en faciliter la visite et l'entretien. La (*fig.* 213) montre une disposition schématique d'une installation de ce genre.

Pour la conduite de l'usine hydroélectrique de Fully (*fig.* 211), la plus

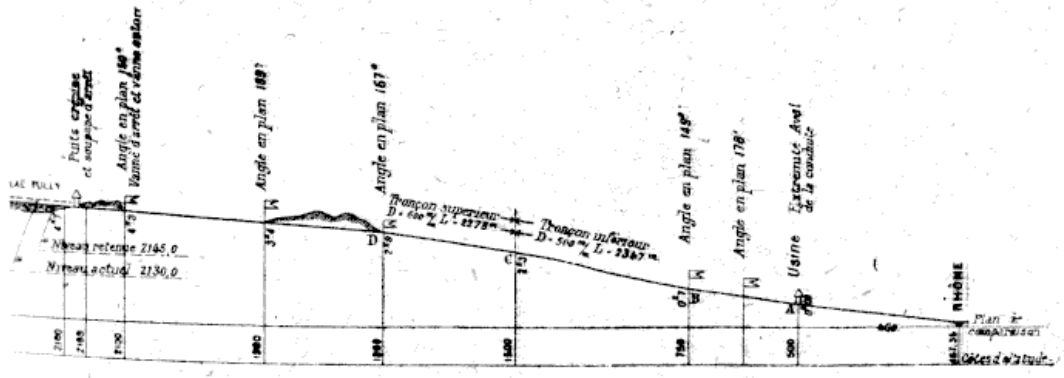


FIG. 211. — Conduite forcée de l'usine hydroélectrique de Fully (Suisse).

haute chute à ce jour, qui a 4.000 mètres de longueur, en diamètres de 600 et 500 millimètres, l'épaisseur des tuyaux varie de 6 millimètres à 12 millimètres pour une pression maximum de 165 atmosphères. La canalisation est entièrement enterrée sur toute sa longueur.

A la partie supérieure de la conduite métallique se trouve une vanne-tiroir et une soupape automatique qu'on règle pour qu'elle se ferme d'elle-même dès que le débit dépasse une quantité déterminée.

A l'usine de Vouvry tous les tuyaux ont été amenés à pied d'œuvre au moyen d'un transporteur aérien spécialement établi à cet effet. Les différents éléments de la canalisation pesaient de 800 à 1.000 kilogrammes et leur longueur variait entre 5 et 10 mètres. Le chemin de fer aérien les disposait en cours de route à un point aussi voisin que possible de leur empla-

(1) A l'usine de Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie), la conduite de 3m,30 de diamètre traverse la rivière de l'Arc sur une portée de 60 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cement définitif mais plus élevé, et de là on les faisait redescendre en les retenant au moyen de cordages et de treuils.

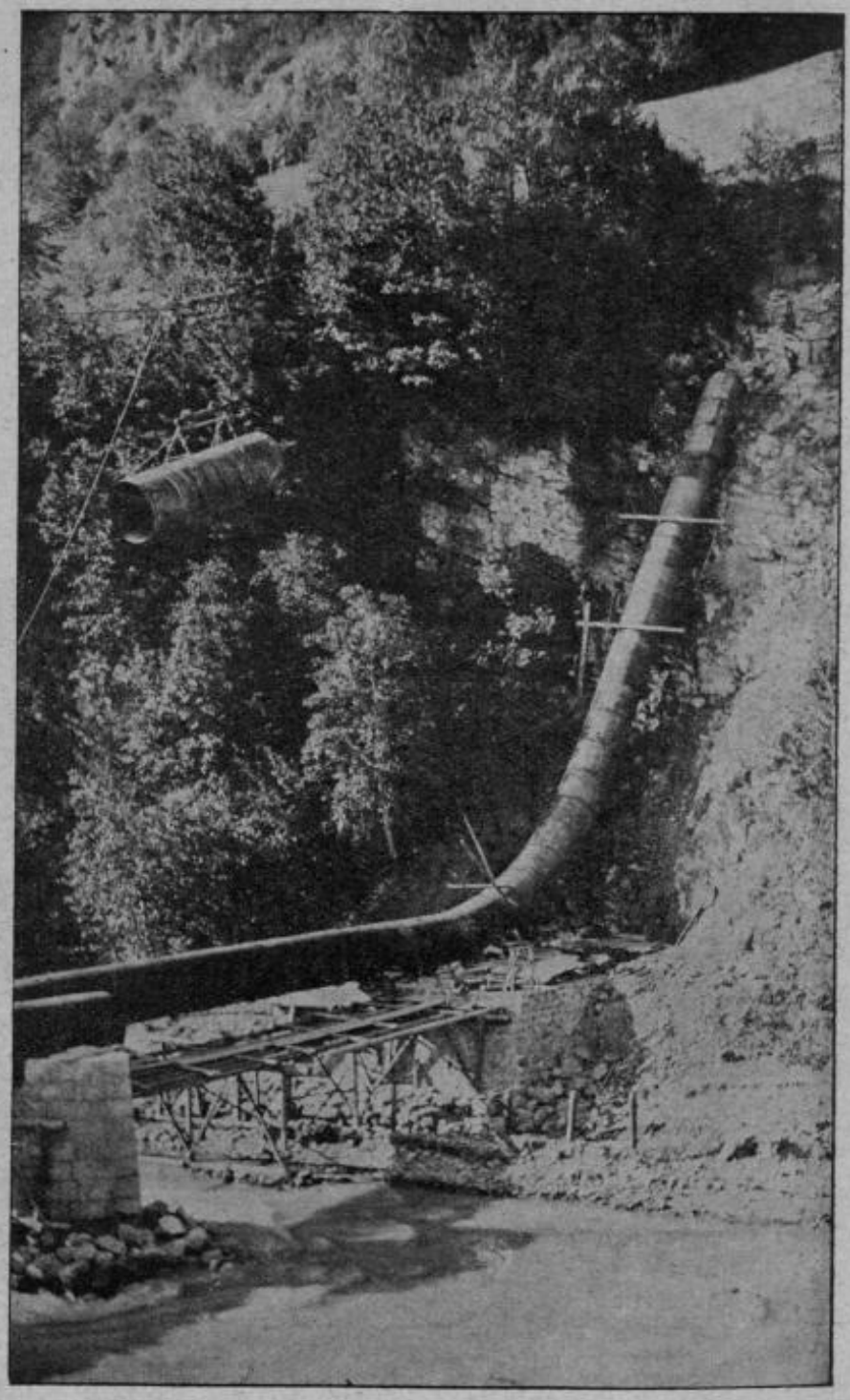


Fig. 212. — Montage de conduite forcée.

Quand les conduites sont posées sur piliers, il faut faire intervenir, dans l'établissement du calcul de l'épaisseur des tuyaux, le moment de flexion maximum et l'effort tranchant, qui sont obtenus en considérant ceux-ci

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

comme formant une poutre continue supportant la charge uniformément répartie de son poids et de l'eau contenue.

Les piliers reçoivent, eux-mêmes, des supports en fonte ou en tôlerie qui

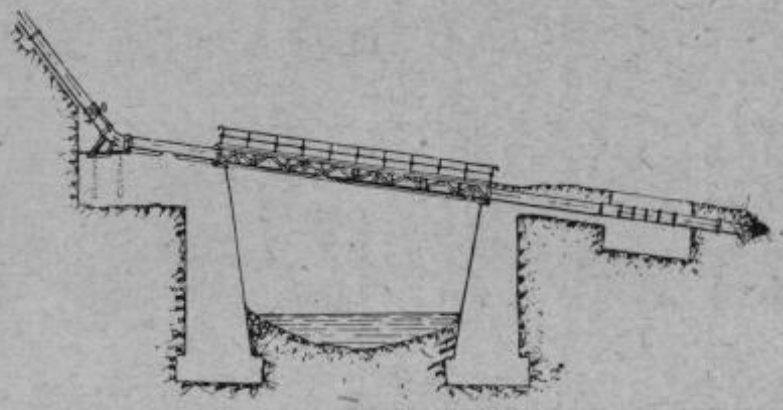


FIG. 213.

embrassent les tuyaux sur près de la demi-circonférence et disposés au droit des grandes viroles. Leur longueur varie de $0^m,60$ à 1 mètre, suivant la génératrice. Ces supports sont établis à l'aide de deux flasques bien reliées entre elles, formant une grande surface d'appui sur la maçonnerie.

La force et la forme de ces supports doivent être calculés pour s'opposer complètement à toute déformation sensible des tuyaux sur eux.

On peut aussi terminer les piliers par une tôle plate et disposer entre cette tôle et la conduite un coussinet ou semelle en fonte, libre de se déplacer suivant les mouvements de la conduite et selon les besoins de la dilatation.

FIG. 214. — Pose de tuyaux dans une partie verticale.

On a obtenu de bons résultats en faisant reposer la conduite sur des berceaux en béton enterrés dans le sol, disposition qui présente l'avantage d'empêcher la déformation du tuyau pendant le remplissage. Le reste peut être recouvert d'une couche de terre ou de gravier de $0^m,40$ d'épaisseur pour éviter les effets de la dilatation. Des tuyaux de $3^m,90$ de diamètre ont été installés de cette façon à l'usine de Champ par la maison Rossignol et Delamarche, de Grenoble.

Quand les conduites ne sont pas enterrées, il y a lieu de prendre des précautions contre les effets du soleil et du gel. Dans le premier cas, on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peint les tuyaux en blanc et pour le second on laisse toujours un certain écoulement à l'eau.

Pour déterminer le débit, en mètres cubes, à écouler par heure pour éviter le gel, c'est-à-dire la production de glace dans la conduite, on peut appliquer la formule suivante de M. Boucher :

FIG. 215. — Approvisionnement d'un chantier par voie Decauville.

$$Q = \frac{\left(\theta - \frac{T}{2} \cdot S\right)}{20T},$$

dans laquelle θ est la température la plus basse de l'air; T, la température de l'eau à son entrée dans la conduite ; S, la surface de tôle exposée au refroidissement. Si on prend $\theta = 20$ et si on considère que $\frac{T}{2}$ est toujours très petit par rapport à 20, on pourra écrire :

$$Q = \frac{S}{T}.$$

Pratiquement on peut admettre un débit de 1 mètre cube par heure et par mètre carré de surface exposée au refroidissement.

La chaleur émise par seconde par la surface d'une conduite de diamètre D est donnée par la formule suivante :

$$0{,}00063\pi Dl\,[(t-\theta)-t']\,[1+0{,}0056\,[(t-\theta\,t']].$$

D'autre part, la chaleur développée par le frottement dans la conduite a pour expression :

$$\frac{q^{\frac{23}{8}}l}{212D^{\frac{5}{2}}}.$$

FIG. 216. — Traversée dans un souterrain.

Dans ces formules, t est la température de l'eau à son entrée dans la conduite, t' celle de l'air ambiant, θ la variation de température de l'eau jusqu'à l'état stationnaire, et q le débit de la conduite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En égalant ces deux dernières expressions, on tire la valeur de t' en fonction de q ; on remarquera que la température de t' s'abaisse très rapi-

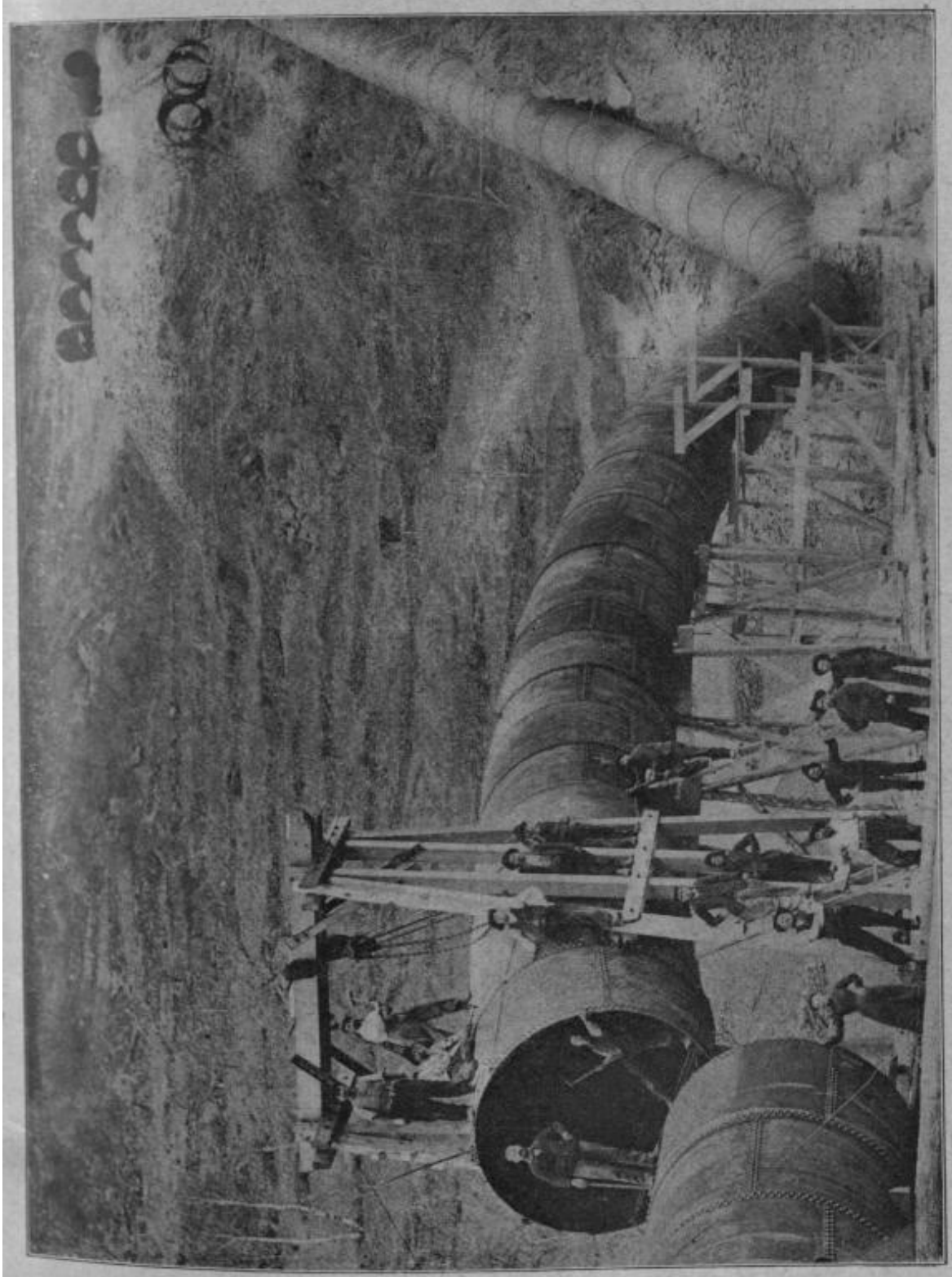


FIG. 217. — Traversée de rivière. Conduite de 2m,90 de diamètre (Bouchayer et Viallet constructeurs).

dement à mesure que q augmente. On voit ainsi qu'il est toujours possible de combattre les froids les plus intenses par le sacrifice d'une certaine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

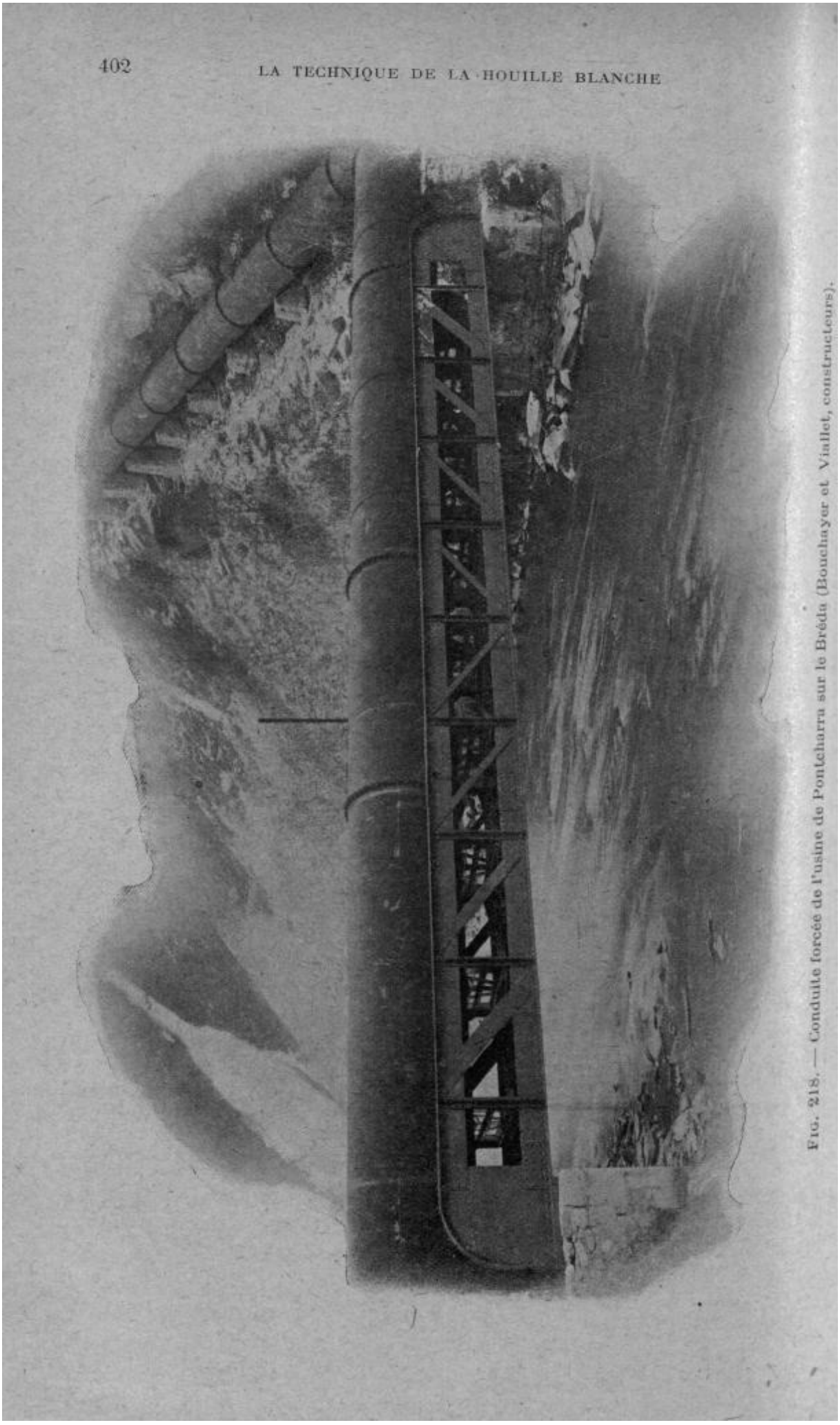


FIG. 218. — Conduite forcée de l'usine de Pontcharra sur le Bréda (Bouchayer et Viallet, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quantité d'eau. Et, si l'on veut réduire cette perte d'eau, qui est une perte d'énergie, il faut recouvrir la conduite par une couche de matériaux capables de limiter l'émission calorifique.

Le dégel des conduites peut aussi s'effectuer à l'aide de l'électricité. La Compagnie du gaz et de l'électricité de Rutherford (New-Jersey) emploie à cet effet deux transformateurs de 10 kilowatts portatifs, isolés à l'huile, abaissant la tension à 55 volts. Une résistance liquide et un ampèremètre permettent de régler le courant. Le circuit formé par le tuyau et les conducteurs est fermé sur le secondaire au moyen du rhéostat. Au bout de une minute, la température commence à s'élever dans la section du tuyau expérimentée. On a remarqué qu'avec la glace se trouvaient entraînés les dépôts de sable et de terre, de sorte que l'on obtient en même temps un nettoyage complet.

Les effets de la mise en charge d'une conduite se traduisent par une déformation des tuyaux à mesure qu'on exécute le remplissage. La conduite s'ovalise et se réduit en hauteur si on n'a eu le soin de l'armer ou de l'enterrer sur la moitié au moins de sa hauteur.

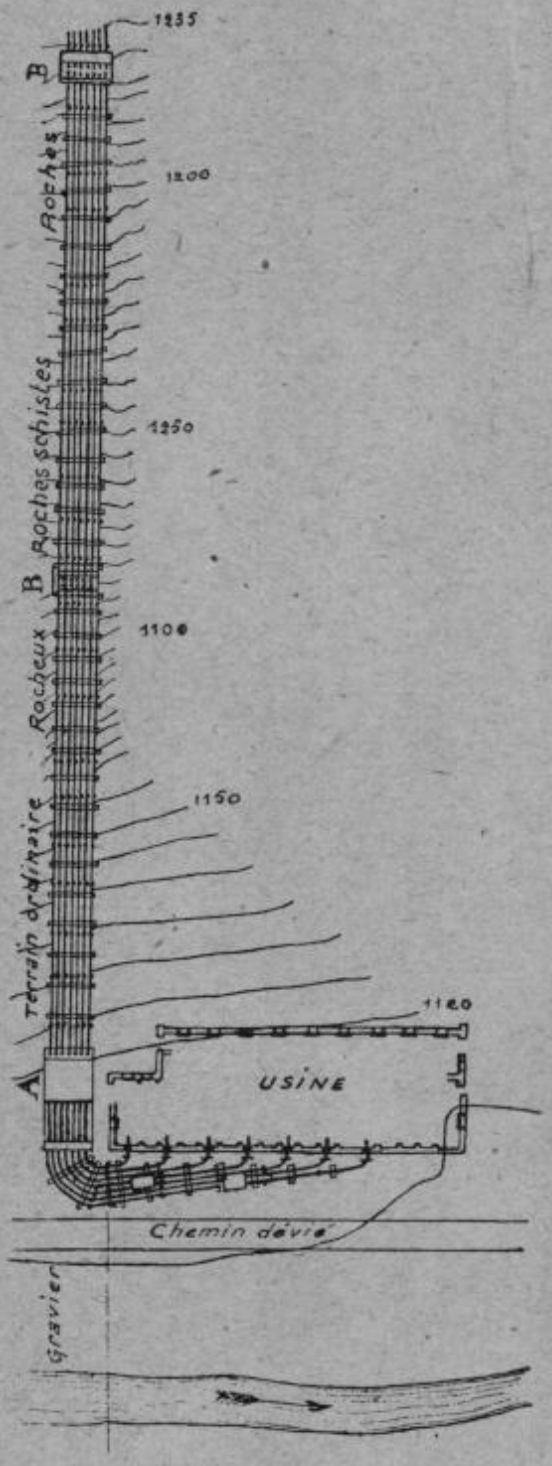


FIG. 219.

Les amarrages et massifs de butée sont destinés à parer aux déboîtements dans les angles; on amarre et on bute encore contre des maçonneries pour parer aux déplacements transversaux quand la conduite n'est pas enterrée ; enfin on amarre et on bute pour éviter un glissement en long, dernier cas qui n'est motivé que lorsqu'on a des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sections rectilignes longues, à forte pente et aboutissant à un changement de pente très accentué.

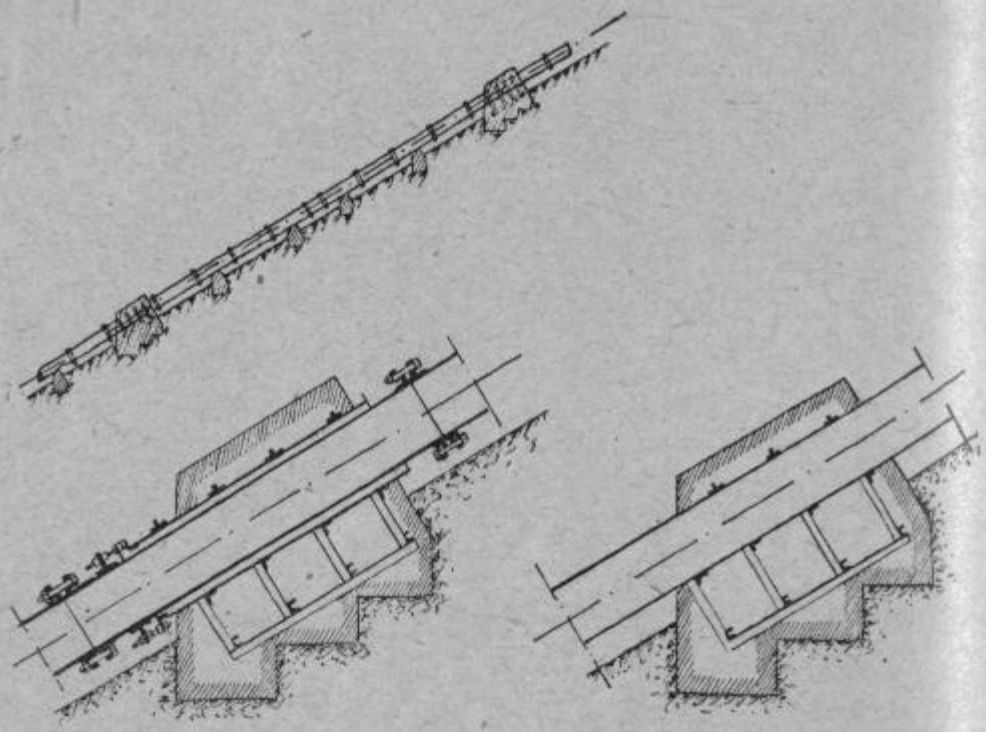


FIG. 220. — Joint de réglage.

A l'usine d'Éget, pour la Compagnie du Midi, comportant sept conduites parallèles devant supporter la charge due à une chute de 710 mètres,

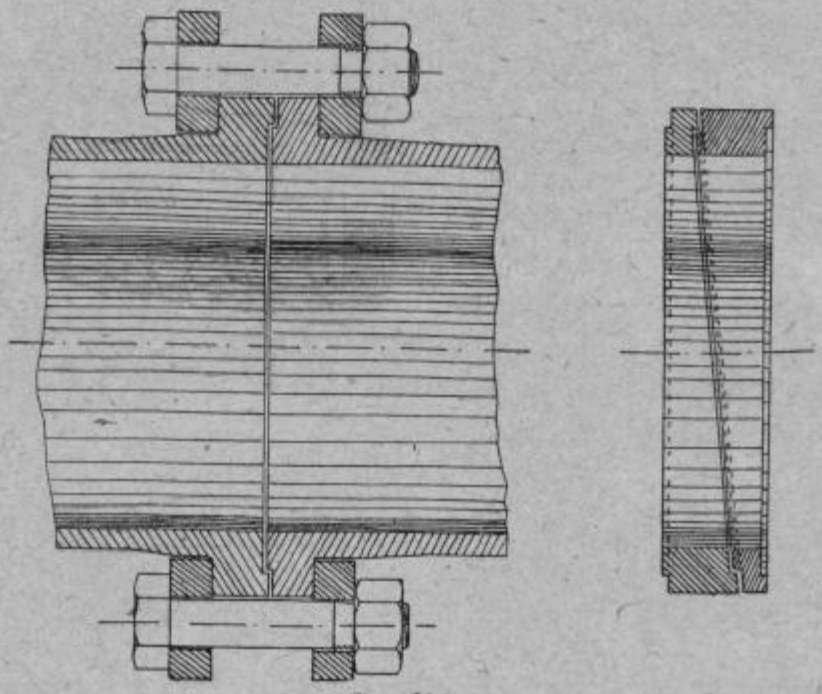


FIG. 221.

on a établi un premier massif d'arrêt à la partie inférieure de la canalisa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion, puis un autre au départ de la chambre de mise en charge, et enfin une série de massifs d'ancrage le long de la canalisation, ces derniers n'ayant à supporter que la différence des efforts de tension ou de compression des parties de conduites abandonnées amont et aval (*fig.* 219). Un joint de réglage permet aux tronçons entre deux massifs de se dilater librement au cours du montage. Lorsque celui-ci est terminé, on bloque le joint à la température exacte prévue aux calculs pour les massifs d'ancrage. La maison Bouchayer a fait usage dans cette installation du dispositif indiqué par la (*fig.* 220).

Le tuyau coulisse à l'intérieur d'une chemise fixe scellée dans la maçonnerie. Cette chemise et le tuyau peuvent à volonté être rendus solidaires grâce à une couronne de boulons.

Ce système permet d'éviter un joint glissant ; en outre les tuyaux peuvent se contracter ou se dilater librement sans agir sur les massifs, en leur laissant tout le temps nécessaire pour une bonne prise.

M. Boucher a imaginé pour la conduite à haute pression de l'usine de Vouvry un système de joint (*fig.* 221) permettant d'obtenir facilement les changements de direction imposés par le tracé. Il consiste en une paire de faux joints biais à emboîtements. Les deux pièces sont identiques et munies chacune sur sa face cylindrique extérieure d'un trou qui ne la traverse pas. Au moyen d'une clé spéciale on peut faire tourner chaque pièce et créer ainsi un angle quelconque inférieur à 10°. Pendant la pose on suspend le tuyau par son centre de gravité, on place les joints biais dans une position quelconque, puis trois boulons qu'on ne serre que très peu. Ensuite au moyen de clés, on tourne les anneaux biais, et le tuyau se déplace

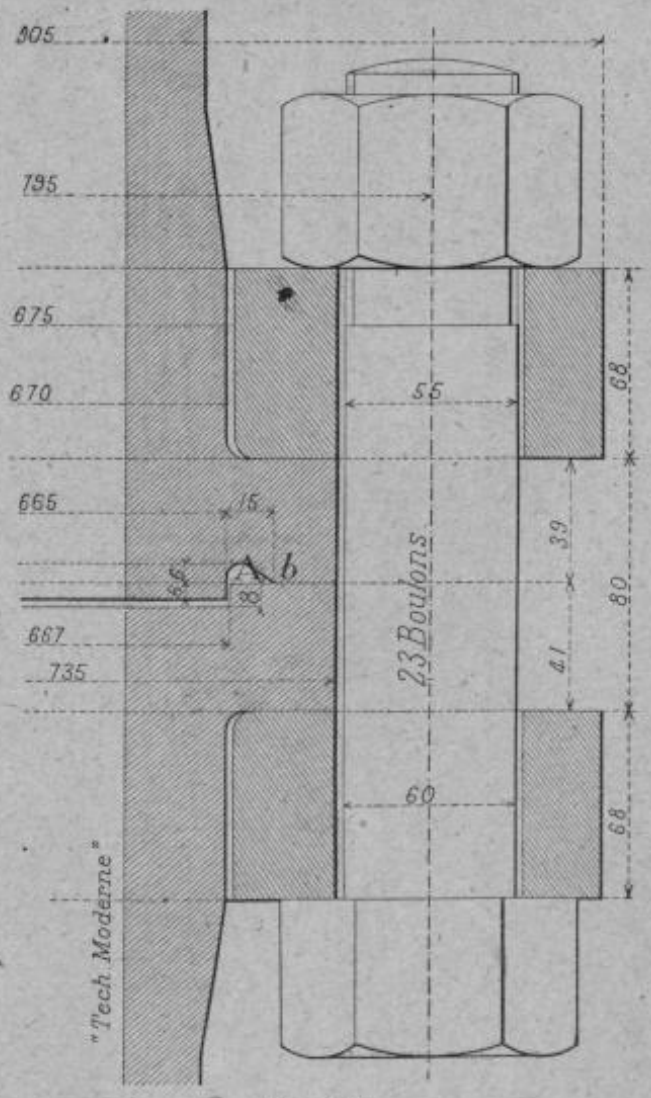


FIG. 222.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans l'espace jusqu'à ce qu'il ait pris la direction voulue. La faculté de créer sur place un angle quelconque réglable a une très grande importance; cette disposition appliquée la première fois à l'usine de Vouvry (§ 427) a été une des principales causes du succès de cette belle installation.

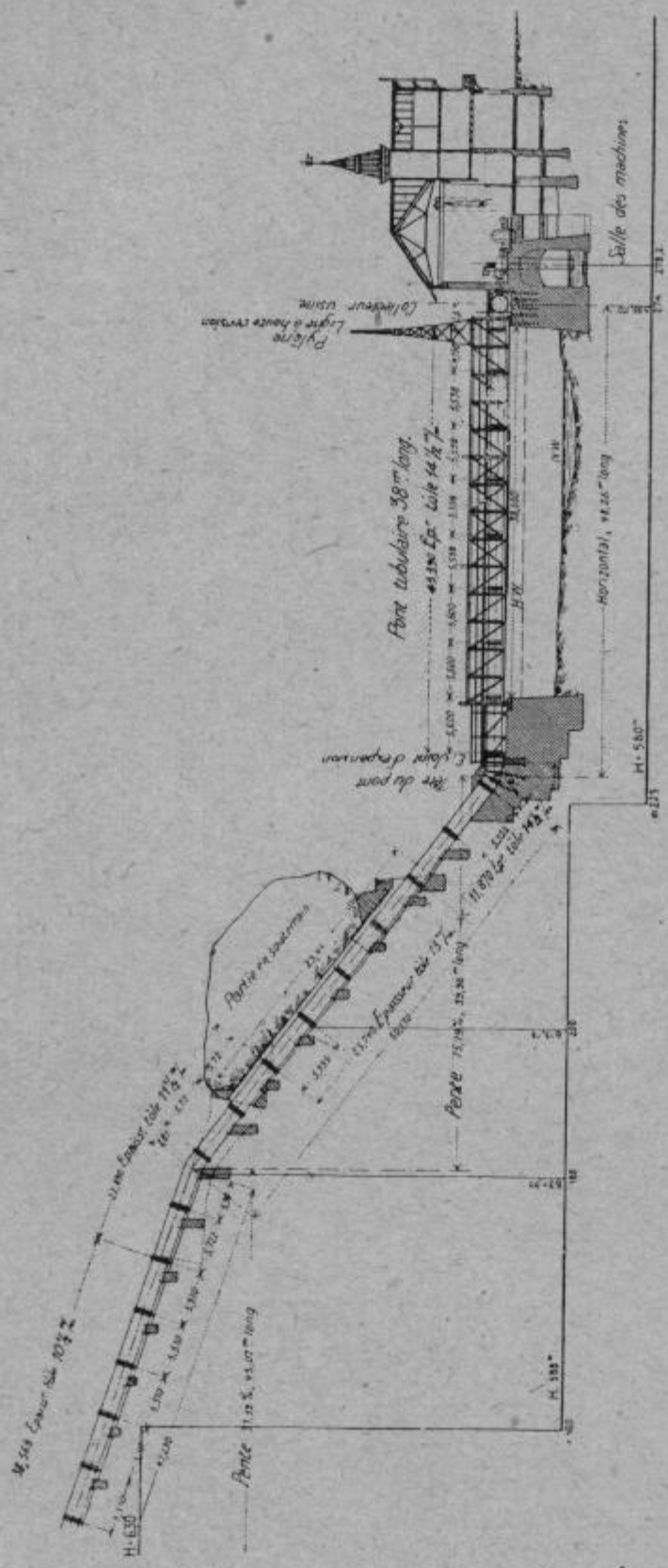


Fig. 223. — Conduite forcée de l'usine de Kubel (Suisse).

La (*fig.* 222) montre le genre de joints adoptés par M. Boucher pour la canalisation en tôle soudée de l'usine d'Orlu (940 mètres de chute).

Dans l'évidement A on loge un petit tore de caoutchouc que la pression refoule vers *b* et l'étanchéité est parfaite. Toutes les fois que l'on a monté une centaine de mètres de conduite, on remplit d'eau, on met un joint plein et au moyen d'une petite pompe on donne 30 0/0 de pression de plus que la pression normale, à l'effet de vérifier les joints. Les changements de direction en plan et en profil ont été exécutés en partie avec des bagues biaises et en partie avec des têtes biaises.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les tuyaux rivés, employés dans la partie supérieure de la chute (jusqu'à 40 atmosphères) avaient chacun une tête droite normale à leur axe et l'autre oblique. En plaçant deux têtes biaises en regard, de façon à ce que la longue génératrice d'un tuyau fût dans le prolongement de la courte génératrice de l'autre, les deux axes se trouvaient en ligne droite. En faisant pivoter un des tuyaux sur son axe, tout en maintenant les deux brides en contact, on faisait faire aux deux axes un angle quelconque en dessous d'une certaine valeur égale au double de l'angle du biais de chacune des têtes. Cette disposition permet de faire des changements de direction en plan et en profil non pas à chaque joint, mais à un joint sur deux.

Dans les parties verticales, il faut veiller à la poussée au vide en encastrant solidement les coudes adjacents et, au bas de la conduite, en disposant un solide caisson de butée, ainsi

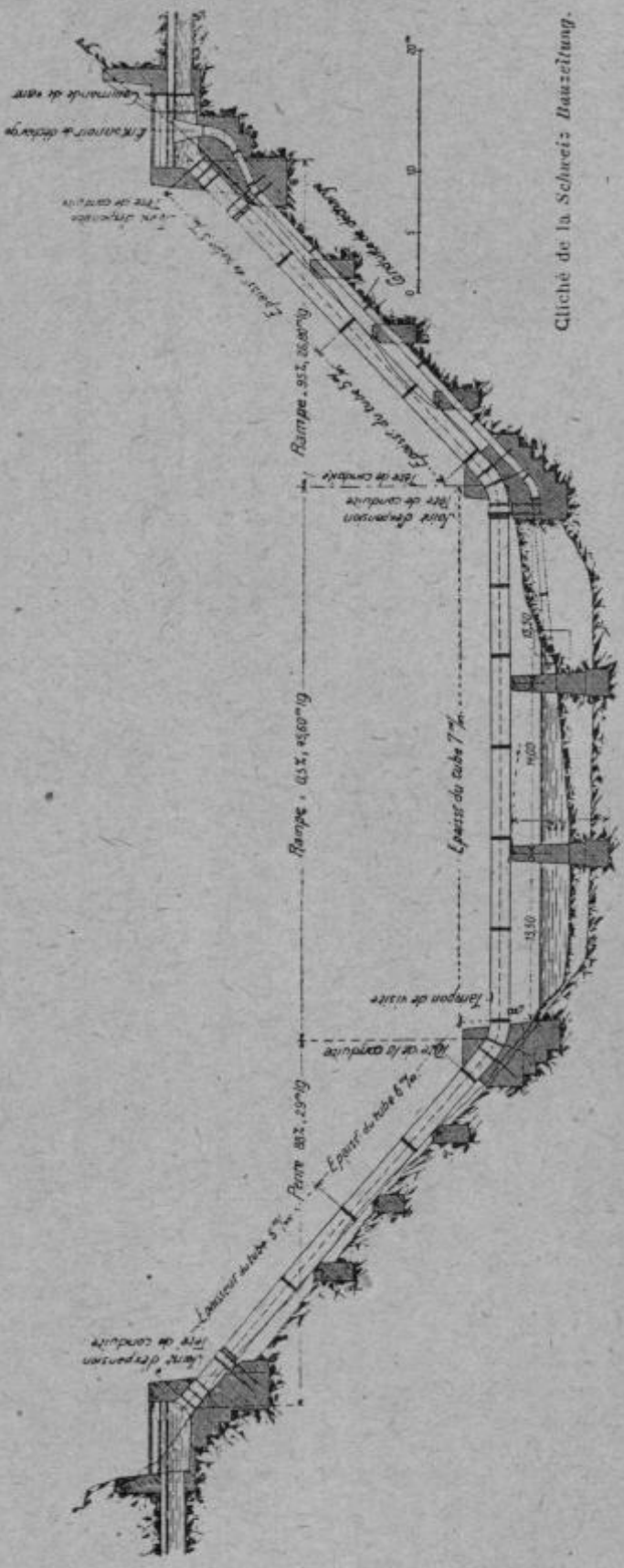


FIG. 224. — Conduite-siphon de l'usine de Kubel (Suisse).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'à l'extrémité supérieure de la conduite (usine et chambre d'eau). D et d étant les diamètres extérieur et intérieur de la conduite, et R le travail dû à l'allongement de celle-ci sous l'effet de la dilatation, on aura pour l'effort total de tension due à la dilatation :

$$F = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \times R ;$$

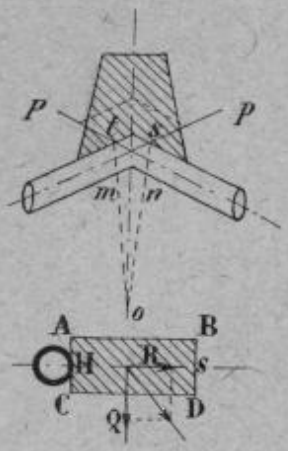


FIG. 225.

D et d en millimètres et R en kilogrammes par millimètre carré = $10^{kg},15$ pour une variation de température de 50°. A cet effort il faut ajouter celui provenant du poids propre des canalisations et de l'eau contenue en tenant compte de l'angle α que fait la conduite avec l'horizontale. Soient P le poids de la conduite entre deux amarrages successifs, f le coefficient de

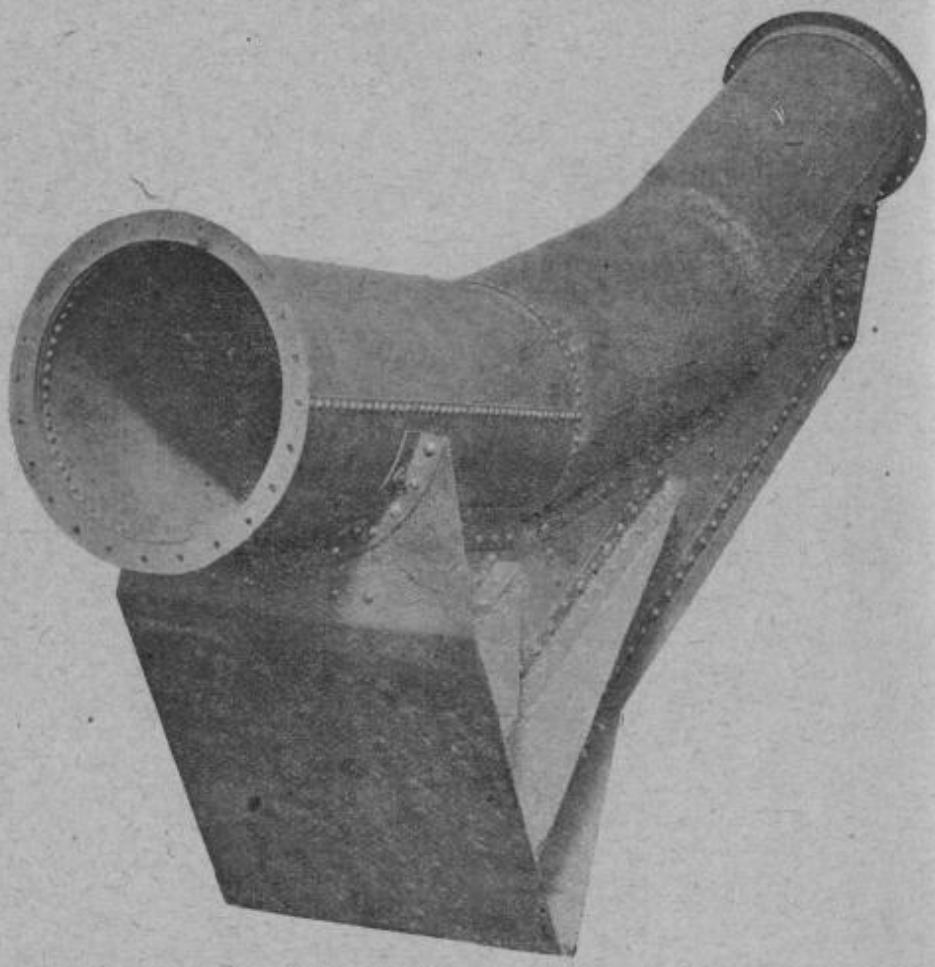


FIG. 226. — Coude avec caisson de butée.

frottement, la formule générale qui permet de calculer les amarrages est :

$$F' = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \times R + P (\sin \alpha - f \cos \alpha),$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui donne le moyen de calculer le massif d'ancrage ou de butée, lorsqu'on ne peut compter sur le rocher comme appui.

Si la disposition le permet, au-dessus et au-dessous du caisson, on fait reposer les tuyaux sur des supports en fonte ou en tôle à glissière permettant les déplacements sous l'influence des variations de la température.

Aux changements de direction, généralement accusés par un coude, on appuie celui-ci contre un massif de maçonnerie capable de résister à la poussée de l'eau (*fig.* 225 et 226).

Il est nécessaire pour un bon équilibre que la direction de la résultante des forces coupe CD au 1/3 au moins de cette base à partir du point D. Pour réaliser cette condition, il convient d'égaler le moment de la force Q par rapport au point D au triple moment de R par rapport au même point (1).

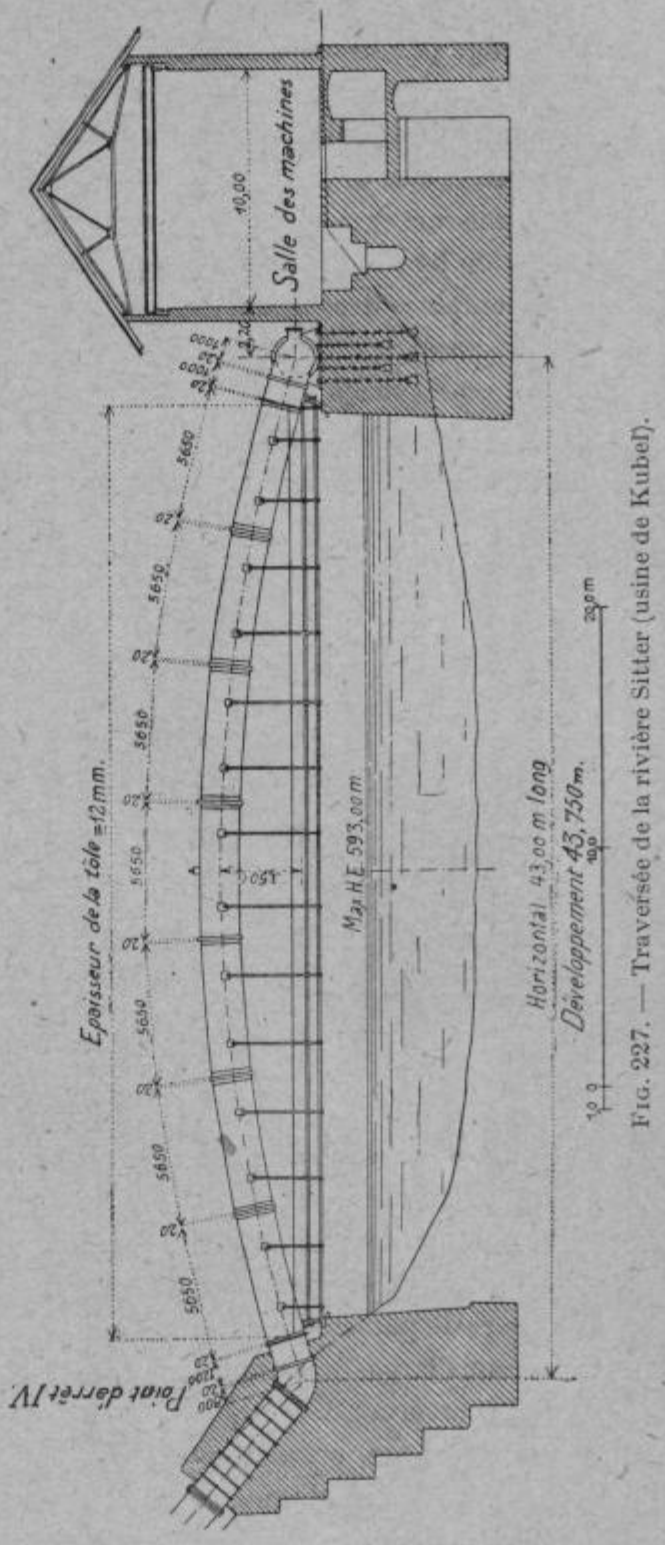


FIG. 227. — Traversée de la rivière Sitter (usine de Kubel).

(1) Il semble que pour peu qu'une conduite soit enterrée ou qu'elle contienne toujours de l'eau, les variations de sa température doivent être faibles et par suite les tensions ou compressions du métal qui en résultent être parfaitement admissibles. Mais comme l'a signalé et expliqué M. Michaud, dans certains cas, il se produit sur les conduites à forte pente des phénomènes particuliers consécutifs de refroidissement et de réchauffement alternatifs qui suffisent pour créer des tensions imprévues et dangereuses dans les angles saillants. Il est donc prudent de disposer, dans tous les cas, des massifs de butée aux dits angles et de ne pas compter sur le fait que les joints boulonnés n'y courent aucun risque de déboîtement comme cela est le cas pour les tuyaux à simple emboîtement et à joints au plomb.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'approche et la mise en place des conduites accrochées aux flancs des montagnes nécessitent parfois des travaux qui réclament le secours d'engins de levage puissants, difficiles à installer dans des endroits peu accessibles, et une habileté consommée de la part des constructeurs des conduites métalliques, qui assument la délicate mission de la mise en œuvre de ces tuyaux, aux dimensions monstrueuses parfois.

Il n'est pas rare que ces travaux se compliquent d'installations de plans inclinés ou de lignes de transporteurs aériens établis spécialement en vue de la mise en place des conduites. Les traversées de routes se font presque toujours en passage inférieur et le plus souvent on les accroche à un pont métallique ou en maçonnerie.

Pour les traversées de rivières, quand le cours d'eau est de faible lar-

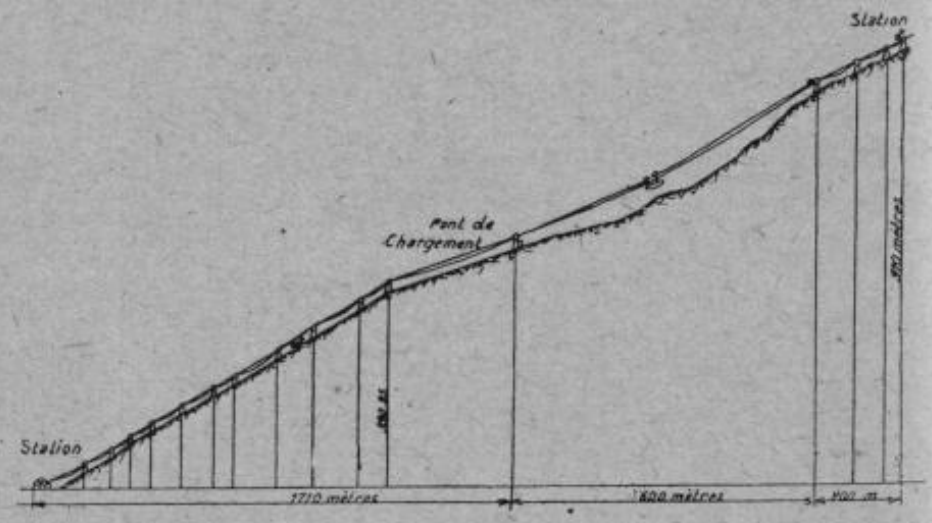


FIG. 228. — Câble de chargement.

geur et qu'il est possible de placer des piles dans son lit, on se contente de calculer la conduite comme une poutre à section circulaire posée sur appuis simples et devant résister à la charge uniformément répartie du poids de l'eau et de son poids propre. Comme dans presque tous les cas la conduite sert de passerelle, on ajoute une surcharge roulante. Lorsque la rivière est plus large, on remplace le calcul de la poutre droite par celui d'une poutre en arc.

Dans d'autres cas, on a trouvé plus économique de supporter la conduite par un pont métallique, ce qui n'oblige pas de renforcer l'épaisseur de la conduite à ces passages.

Les traversées de voies ferrées se font toujours par des passages inférieurs. Les Compagnies exigent la construction d'un pont en maçonnerie et demandent en plus que l'on donne à la tôle, dans la partie de la tuyauterie sous le pont, une épaisseur supplémentaire, de telle sorte que la tôle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en ce point ne travaille qu'à la moitié à peu près de son coefficient habituel.

On cherche pratiquement à opérer la pose des conduites à une température moyenne pour réduire l'effort de tension résultant de l'allongement, mais de préférence par un temps froid, car de cette façon la conduite, sous l'effet des variations de température, travaille à la compression et non à la tension.

Il est bon de munir toute conduite forcée d'un ou plusieurs trous d'homme pour la visite et le nettoyage intérieur et d'une vanne de chasse pour l'entraînement des dépôts de matières en suspension, cette vanne servant, en outre, d'appareil de vidange.

Immédiatement après sa sortie de la chambre de mise en charge, toute conduite, ayant plus de $0^m,80$ de diamètre, doit être suivie d'une cheminée d'air pour éviter qu'un aplatissement se produise, en cas de vide créé par une fuite importante à sa partie inférieure.

La mise en charge doit se faire avec beaucoup de prudence. A cet effet, on évite d'ouvrir en grand, dès le début du remplissage, la vanne située à l'entrée de la conduite pour que l'eau pénètre sans violence ; sans cette précaution on pourrait provoquer des ruptures et empêcher l'expulsion de l'air par les reniflards. Avant la mise en charge, il est bon au préalable de faire couler pendant quelque temps dans la conduite une certaine quantité d'eau que l'on évacue par le robinet de purge, situé à la partie inférieure de

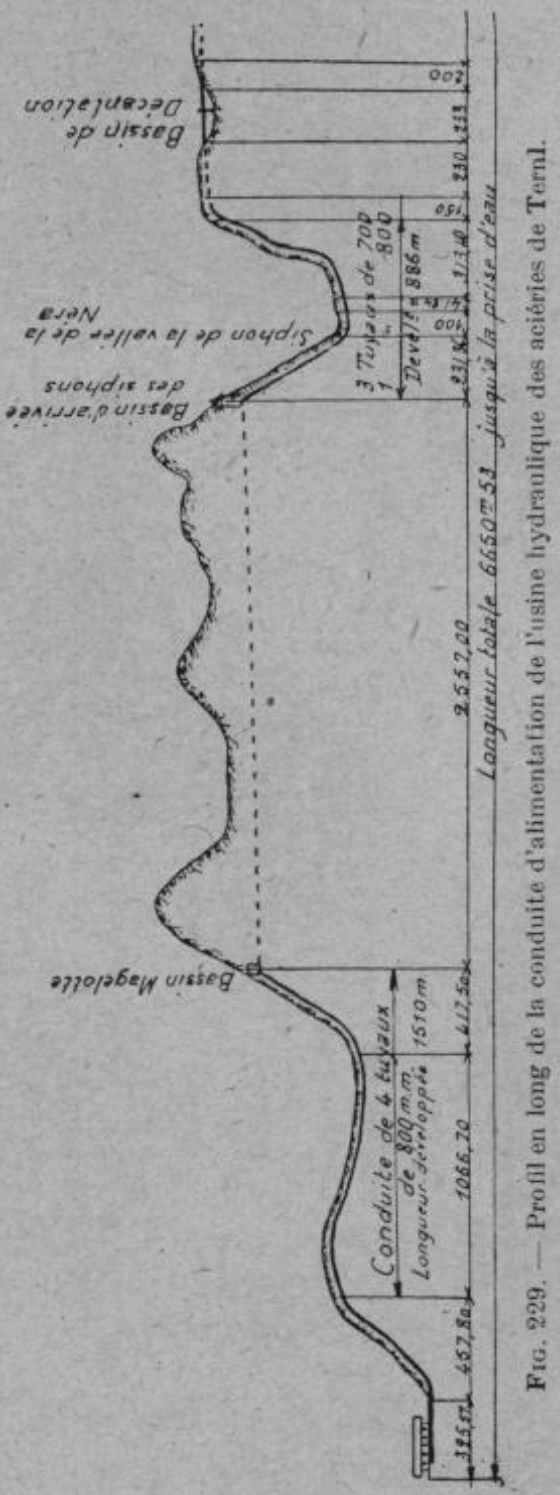


FIG. 229. — Profil en long de la conduite d'alimentation de l'usine hydraulique des aciéries de Terni.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

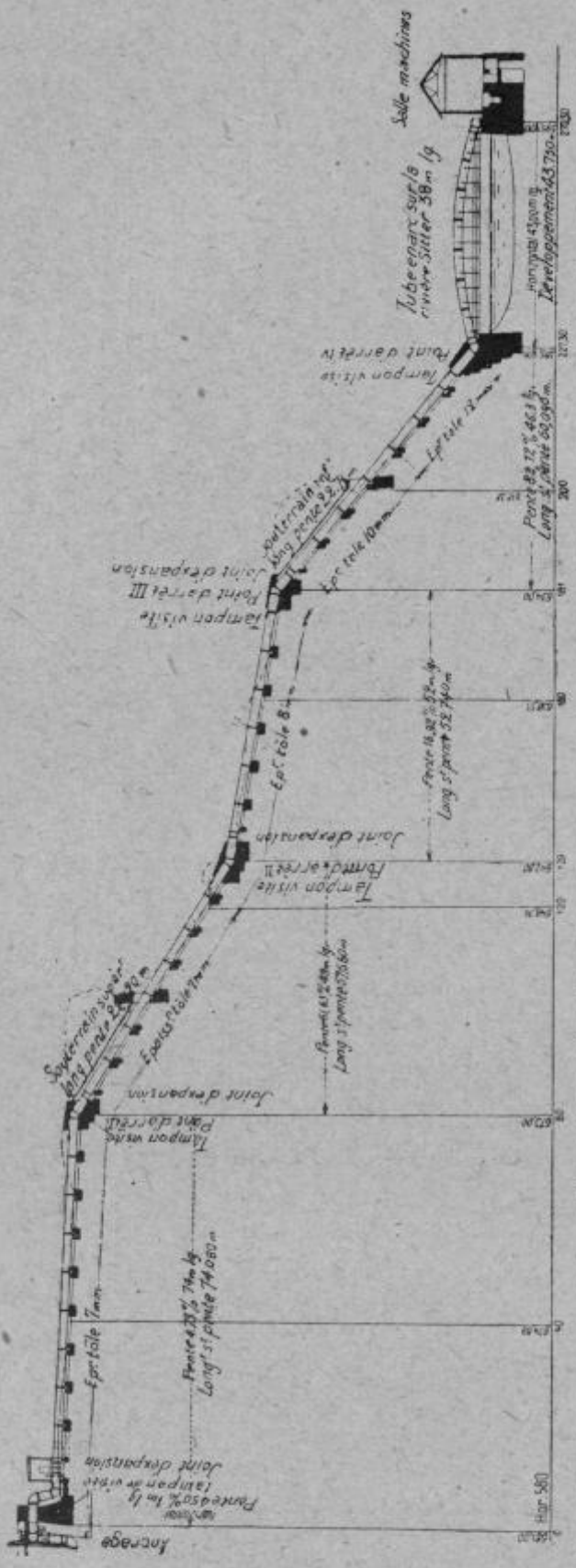


Fig. 230. — Profil en long de la conduite forcée de l'usine de Kubel.

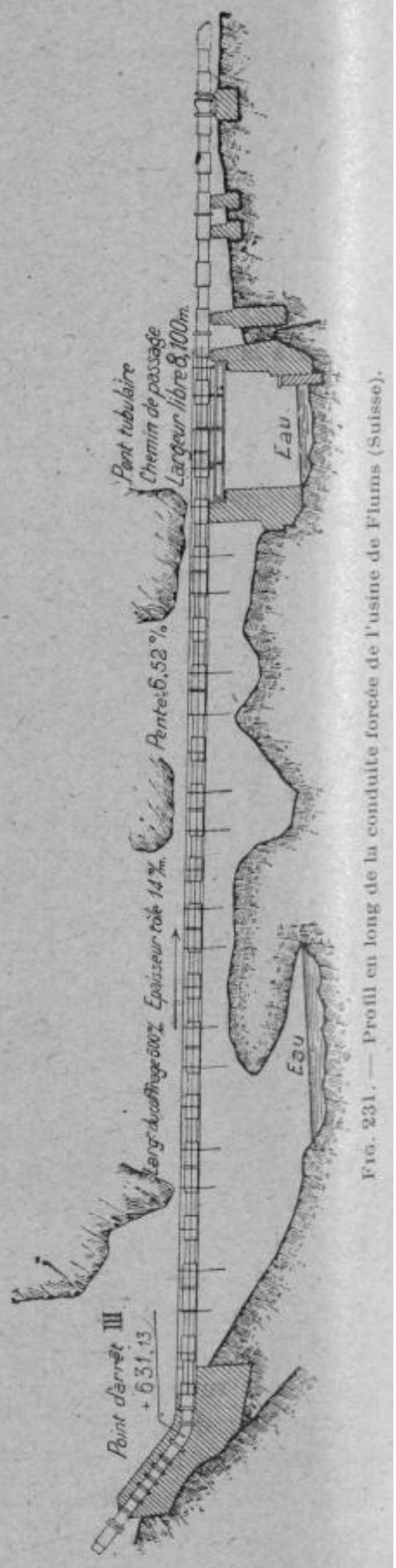


Fig. 231. — Profil en long de la conduite forcée de l'usine de Flums (Suisse).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la conduite, de façon à permettre au métal de prendre la température de l'eau, qui est la température normale de la tuyauterie.

Dans les usines où on interrompt le service en hiver (chemin de fer du Fayet à Chamonix par exemple), il est bon de laisser la conduite constamment en pression, afin de limiter la variation de température de la tuyau-

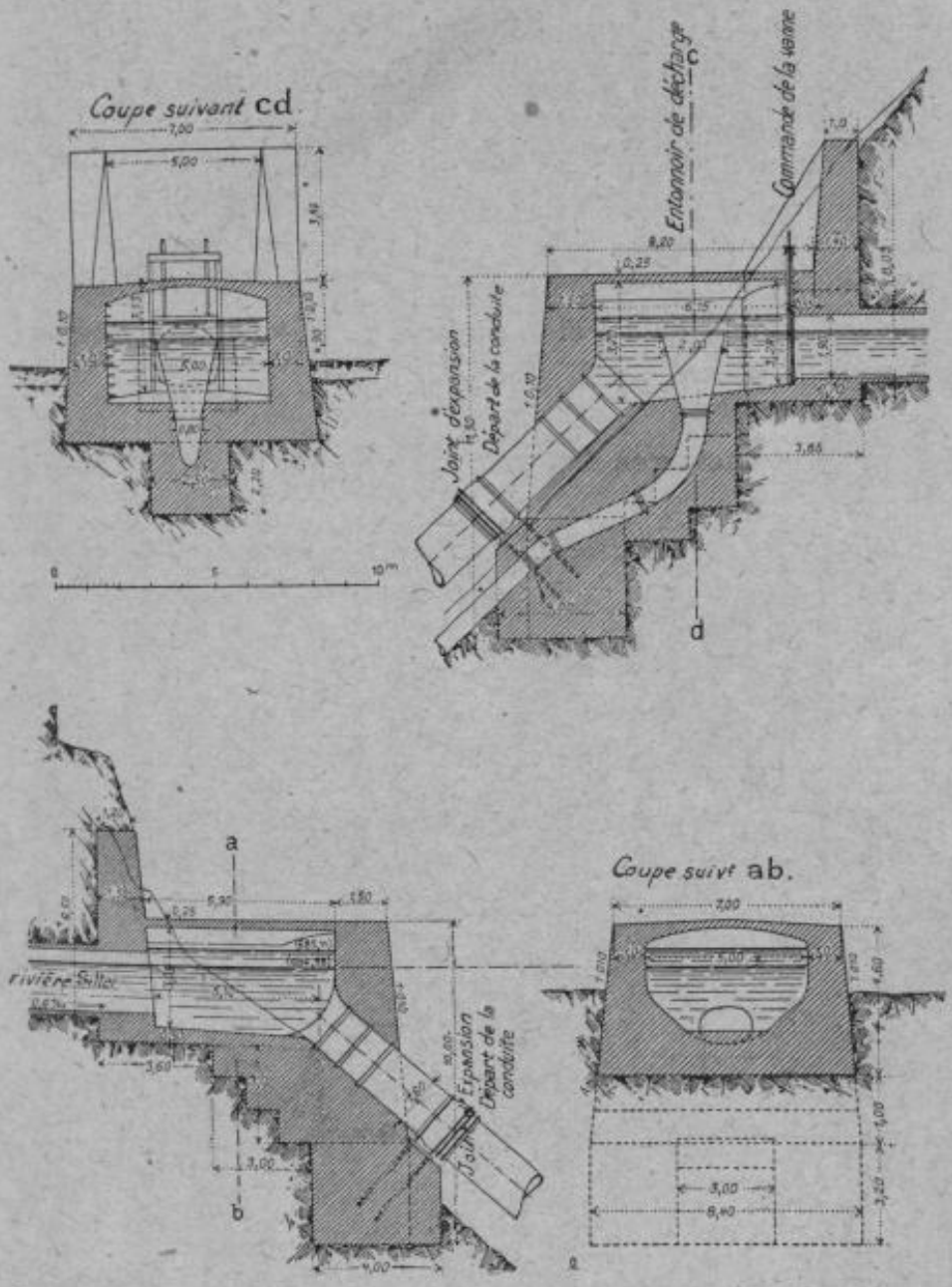


FIG. 232. — Tête aval et tête amont de la conduite-siphon de l'usine de Kubel (Suisse).

terie et, par suite, les déplacements de la conduite. Les turbines ne marchant pas, l'écoulement se fait par des robinets de purge de la conduite et du collecteur, qui restent ouverts de façon à assurer à l'eau contenue dans la tuyauterie une vitesse de $0^m,40$ par seconde pour éviter la gelée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A l'usine hydroélectrique de Capdella (Espagne) on a disposé sur la conduite forcée des robinets pour contrôler la formation éventuelle de glaces.

Il nous semble intéressant de signaler la disposition qui a été prise à l'usine de Vouvry pour procéder à la réparation sur la conduite, à la suite d'un accident provoqué par la fermeture trop rapide de la vanne à commande hydraulique placée au bas de la conduite forcée.

Pour introduire un tuyau neuf à la place du tube avarié, on a dû nécessairement créer le vide voulu pour laisser passer la saillie mâle d'un tube encore en place et celle du nouveau tube. Pour cela il fallait 14 millimètres ; afin de les obtenir, on a déterré la canalisation sur 50 mètres en amont et sur 50 mètres en aval du point en réparation ; les parties déterrées ont été suspendues au moyen de cordes à des bois placés en travers de la fouille, puis on a attendu que la fraîcheur de la nuit ait abaissé de dix degrés la température du métal et contracté celui-ci de 14 millimètres sur 100 mètres de longueur.

80. Appuis et ancrages des conduites. — M. Birault les classe de la façon suivante (*fig.* 233) :

1° *Tuyaux reposant sur deux appuis symétriques par rapport à la verticale.* — Cette classe se subdivise en : *appuis simples*, comprenant eux-

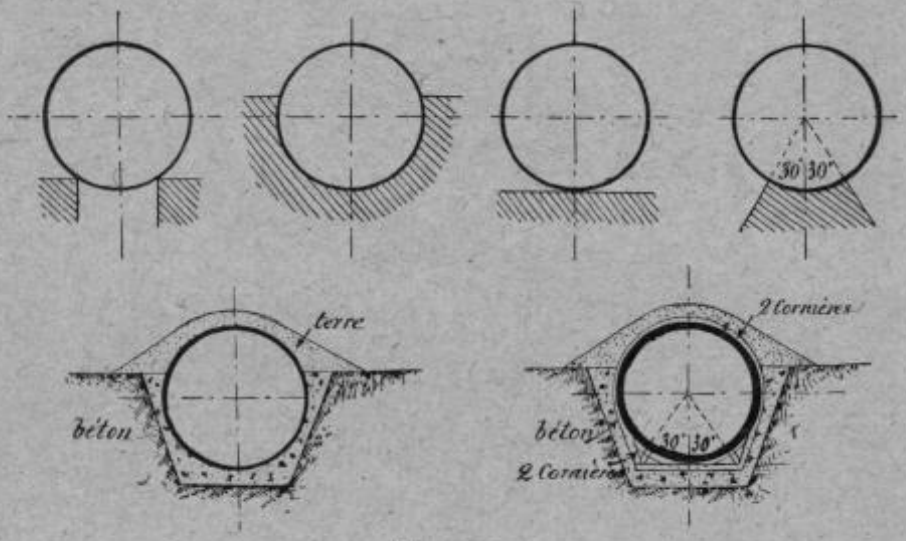


FIG. 233.

mêmes soit des appuis fixes, soit des appuis mobiles horizontalement (bielles articulées ou tiges de suspension, plaques horizontales glissantes, galets mobiles horizontalement), soit des appuis à réactions radiales (par exemple deux rouleaux pouvant tourner librement sous l'action de forces tangentielles qui les sollicitent au contact des parois de la conduite), et enfin des appuis à liaisons quelconques (cas général) ; en *encastrement sur les appuis* (la distance relative des deux appuis est alors rendue invariable

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au moyen d'assemblages rigides s'opposant aux déplacements angulaires des parois en ces points, sous l'action des forces déformatrices) ;

2° *Tuyaux reposant sur une fondation plane* (appuis suivant la génératrice inférieure de contact) ;

3° *Tuyaux reposant sur une fondation circulaire.* — Dans ce cas, les déformations de la conduite sont annulées entièrement par la rigidité du berceau dans toute la zone du contact, les flexions ne s'exerçant que dans la partie supérieure du tuyau, où les parois sont libres dans leurs déformations.

Cette classe se subdivise en *appuis suivant une zone inférieure de contact* et en *canalisation disposée dans un berceau maçonné.*

Supposons une conduite reposant sur un sol résistant ou une fondation plane et suivant sa génératrice inférieure seulement.

Prenons D = 1 mètre et $e = 7$ millimètres. Dans les calculs qui suivent, on ne tient pas compte des trous de rivets à déduire et des renforcements par les cercles de recouvrement des viroles successives.

On a pour une pression d'eau de 50 mètres par exemple :

Tension constante dans les parois $= \frac{50.000 \times 1.000}{2} = 25.000$ kilogrammes par mètre courant.

Travail de tension constant dans l'épaisseur des parois sous l'action de la pression intérieure $= \frac{25.000}{7.000} = 3^{kg},6$ par millimètre carré.

Flexions dues aux forces déformatrices :

$$M = 77,5 \times 1,50 = 116^{kgm},3,$$

en remarquant que $p = 60$ kilogrammes (poids des parois au mètre carré), $R = 0,50$, $\delta = 1.000$ et $z = 1,50$ (valeur maxima).

M est le moment de flexion par mètre courant de conduite.

Le module de résistance étant $\frac{1}{6} \times 0,007^2 = 0,0000082$, on a pour la valeur du travail maximum du métal par suite des flexions :

$$\frac{116,3}{8,2} = 14^{kg},2 \text{ par millimètre carré.}$$

Le travail maximum total est donc égal à : $3,6 + 14,2 = 17^{kg},8$.

Supposons maintenant la même conduite reposant sur une fondation circulaire suivant une zone de 30° à droite et à gauche.

Pour cette valeur :

$$z = 0,84,$$

on a alors :

$$M = 77,5 \times 0,84 = 65^{kgm},1 \qquad \text{et} \qquad \frac{65,1}{8,2} = 7^{kg},9.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite, le travail maximum est : 3,6 + 7,9 = 11^{kg},5 par millimètre carré.

Dans le cas de très grands diamètres, l'on a vu qu'il était préférable d'adopter des armatures transversales. Supposons un tuyau de 3 mètres de diamètre, l'épaisseur de la tôle étant de 7 millimètres, la pression de 30 mètres et l'armature constituée par deux cornières de 100 × 100 × 12, renforcées par un cadre rigide en tôle et cornières à leur partie inférieure (*fig.* 233), et prenant appui sur une zone de 30° de part et d'autre de l'axe vertical de la conduite. Il en existe une par mètre courant, ce qui donne pour la section d'un mètre courant de paroi (tôles et deux cornières d'armature) : 11.512 millimètres carrés.

On a : $\frac{30.000 \times 3,00}{2} = 45.000$ kilogrammes par mètre courant pour la tension dans les parois.

Le travail du métal à la tension $= \frac{45.000}{11.512} = 3^{kg},91$ par millimètre carré.

Et enfin :

$$M = 0,670 \times 1.890 = 1.266^{kgm},3,$$

en remarquant que $p = 90$ kilogrammes (poids des parois au mètre courant), R = 1^{m},50 et $z = 0,670$ (section à 30°). Pour 90°, $z = 0,329$.

Le moment d'inertie des deux cornières reposant sur le sol et qui sont rivées sur la tôle de 7 millimètres du cadre, sur une longueur de 500 millimètres, a pour expression :

$$I = 0,000173 \text{ (1 tôle } 500 \times 7\text{; 2 cornières } 100 \times 100 \times 12).$$

Par suite, on a pour module de résistance :

$$\frac{I}{v} 10^6 = \frac{0,000173}{0,3742} \times 10^6 = 462,$$

la distance de l'axe neutre aux fibres les plus éloignées étant :

$$v = 0,3742.$$

Le travail maximum du métal par millimètre carré est donc de :

$$\frac{1.266}{462} = 2^{kg},74 \text{ (compression)}.$$

Dans la section à 90°, l'armature comprend deux cornières seulement et on a :

$$I = 0,0000042, \qquad v = 0,0706 \qquad \text{et} \qquad 10^6 \frac{I}{v} = 60.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite :

$$M = \frac{0{,}329 \times 1.890}{60} = 10^{kg},30.$$

Le travail maximum total du métal, la conduite étant en charge, se produit donc dans la section de 90°, et sa valeur est inférieure à :

$$R = 3{,}91 + 10{,}30 = 14{,}21 \text{ par millimètre carré,}$$

tension encore admissible, car il reste une marge suffisante au-dessous du coefficient d'élasticité du métal.

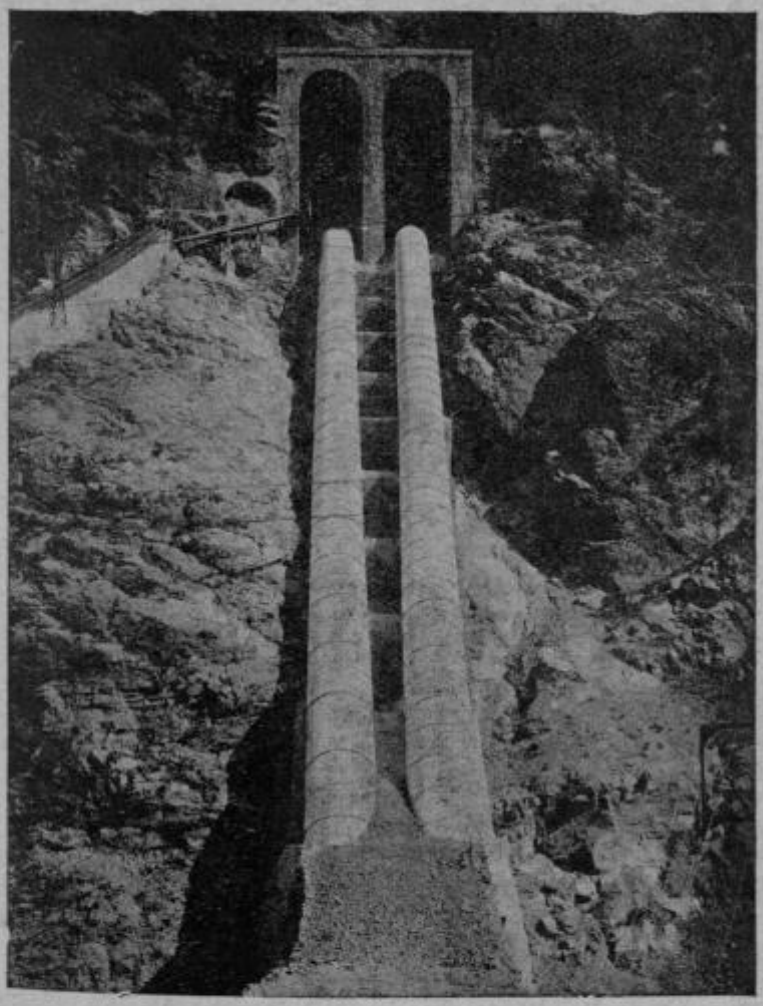


Fig. 234. — Conduites forcées de $2^m,250$ de diamètre (usine de Séchilienne). (J. Joya père et fils, constructeurs).

La partie inférieure du tuyau est de beaucoup la plus fatiguée ; aussi y a-t-il un grand intérêt à appuyer la canalisation suivant une zone d'une certaine largeur. Comme on le voit par la (*fig.* 233), on dispose les conduites de grand diamètre sur des fondations épousant la forme circulaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des tuyaux, embrassant la demi-circonférence et même plus. La rigidité des parois est augmentée par des armatures transversales en fers cornières ou à U qui, comme on le sait, s'opposent aux déformations transversales, armatures que l'on rapproche le plus possible pour éviter les déformations longitudinales entre deux armatures successives. Si ces armatures transversales sont très voisines, le massif de maçonnerie peut, dans ce cas, n'être que plan et discontinu.

Dans les cas où l'on a recours à des appuis espacés, on établit en ces endroits des armatures transversales très robustes, les tôles étant raidies

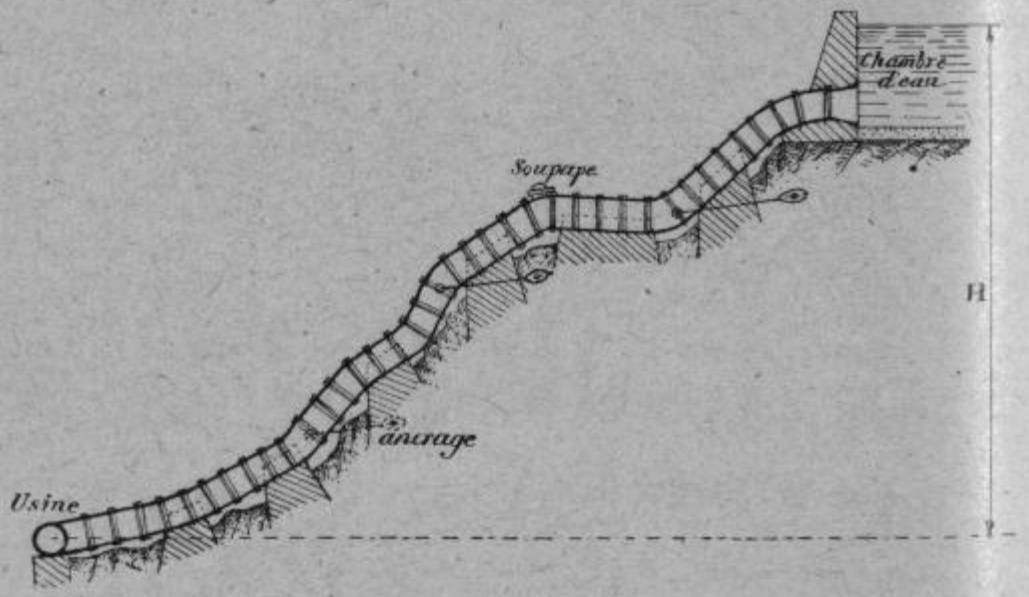


FIG. 235.

par des armatures longitudinales dans l'intervalle de deux armatures transversales successives.

Lorsque les conduites sont appuyées d'une façon continue, c'est-à-dire sur toute leur longueur, on évite les effets des flexions longitudinales entre appuis isolés, et l'on n'a qu'à s'occuper des flexions transversales.

Les tuyaux sont goudronnés à l'intérieur pour éviter leur corrosion. Leur longueur varie entre 6 et 10 mètres pour la commodité du transport ; les joints sont rivés et fixés à même le sol. Au sommet des coudes, on dispose des soupapes à air (*fig.* 235) pour assurer une colonne d'eau solide et continue dans les tubes et, aux fortes rampes, on amarre les tuyaux à l'aide d'ancrages. Les tuyaux disposés aux coudes doivent être particulièrement solides. Pour les chutes dépassant 300 mètres, il est indiqué d'employer des tubes soudés ensemble à recouvrement pour la partie la plus basse de la conduite.

Lorsque la pente est faible et le pays traversé accidenté, une conduite en tuyaux est plus facile d'installation et moins coûteuse que la construction d'un canal ou d'une tranchée sinueuse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

81. Applications numériques. — I. Les chutes d'Orlu [1] sont formées par la rivière l'Oriège et le ruisseau de Gnoles. Les eaux de l'Oriège supérieure fournissent un débit moyen de 580 litres ; celles de l'Oriège inférieure, 2.400 litres, et le ruisseau de Gnoles, alimenté par le bassin du lac de Naguilhes, 780 litres. Par suite, le débit moyen provenant du lac de Naguilhes et du bassin supérieur de l'Oriège est :

$$q = \frac{1.360 \times 8.760}{7.000} = 1.700 \text{ litres},$$

pour 7.000 heures de travail annuel.

La (*fig.* 236) représente schématiquement les dispositions des deux chutes, Oriège supérieure et ruisseau de Gnoles.

1° *Chute d'aval.* — Soient D, le diamètre des conduites ; H, la hauteur

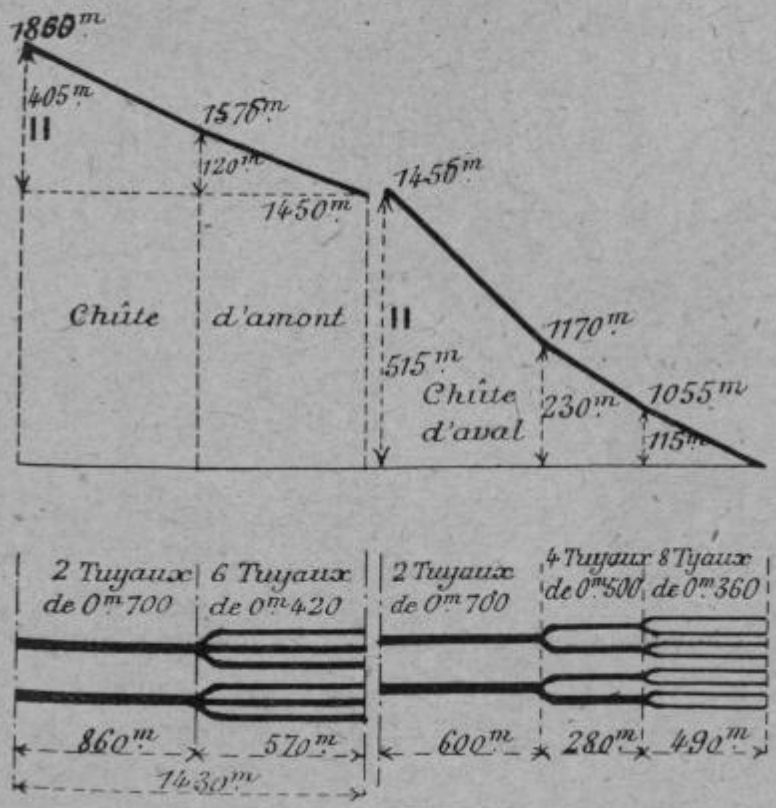


Fig. 236.

de chute = 525 mètres ; l, la longueur totale = 1.370 mètres ; q, le débit maximum de chaque conduite (1 mètre cube) ; h, la perte de charge due

[1] On verra, par la description de l'usine hydroélectrique d'Orlu (§ 316) que l'ingénieur suisse, M. Boucher, a traité le problème par l'adoption d'une seule file de tuyaux, grâce à l'emploi de tuyaux soudés que les constructeurs réalisent très bien de nos jours, pour des pressions atteignant et même dépassant notablement 1.000 mètres. L'avantage économique qu'offre l'emploi des tuyaux soudés est que la tôle dans ce cas peut travailler à 9 kilogrammes au lieu de 7 kilogrammes pour les tuyaux rivés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au frottement de l'eau ; P_l, la puissance disponible sur l'arbre des turbines ; α, le coefficient de rendement des turbines ; Δa, le prix de la chute non aménagée (pour chaque conduite, 125.000 francs) ; Δb, le prix des ouvrages hydrauliques autres que les turbines et les conduites (pour chaque conduite, 125.000 francs) ; Δc, le coût des conduites mises en place, et Δt, le prix de l'installation motrice et électrique avec les bâtiments (par conduite, 250.000 francs).

On a :

$$P_t = \frac{1.000aq}{75}(H - h).$$

Or :

$$h = \frac{0{,}002q^{\frac{15}{8}}l}{D^5}.$$

Et en faisant : $a = 0{,}75$, on obtient :

$$P_t = 10q\left(\frac{H - 0{,}002q^{\frac{15}{8}}l}{D^5}\right) = \frac{5.250D^5 - 28{,}6}{D^5}.$$

On peut prendre :

$$\Delta_c = 28.000ce \text{ moy. } Dl;$$

or :

$$c = 0{,}56\, e \text{ moy.} = 0{,}004 + 0{,}000004\,(HD)^{\frac{4}{3}}.$$

D'où :

$$\Delta c = 90.000D\,(1 + 4{,}27D^{\frac{4}{3}}).$$

Cherchons la valeur de D qui correspond au minimum de l'expression :

$$\frac{\Delta a + \Delta b + \Delta c + \Delta t}{P_t}.$$

Cette valeur s'écrit alors :

$$\frac{D^5\left[500.000 + 90.000D\left(1 + 4{,}27D^{\frac{4}{3}}\right)\right]}{5.250D^5 - 28{,}6},$$

et en simplifiant :

$$\frac{D^5\left[5{,}55 + D\left(1 + 4{,}27D^{\frac{4}{3}}\right)\right]}{D^5 - 0{,}0054}.$$

Si on égale à 0 la dérivée de cette fonction par rapport à D, on obtient :

$$D = 0{,}663.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ces calculs, le débit intervient pour 1.000 litres par conduite (on en a supposé deux), parce qu'on a porté le chiffre de 1.700 à 2.000, afin de prévoir les conduites pour un débit un peu plus élevé.

Au lieu d'avoir deux conduites de $0^m,700$ sur toute leur longueur, qui conduiraient à des épaisseurs très fortes de la tôle dans les parties inférieures de la chute, on a préféré recourir à la disposition représentée par la (*fig.* 236), comportant double-conduite à l'origine et ramifications sur deux autres étages.

La perte de charge totale dans les conduites est donnée par la formule :

$$h = 0{,}002\left[\frac{l_1}{D_1^5}\left(\frac{q}{2}\right)^{\frac{15}{8}} + \frac{l_2}{D_2^5}\left(\frac{q}{4}\right)^{\frac{15}{8}} + \frac{l_3}{D_3^5}\left(\frac{q}{8}\right)^{\frac{15}{8}}\right];$$

et, en appliquant la formule aux diamètres adoptés et indiqués sur la figure :

$$h = q^{\frac{15}{8}}(0{,}0032l_1 + 0{,}0047l_2 + 0{,}0079l_3). \quad \text{Soit :} \quad h = 7q^{\frac{15}{8}}.$$

2° *Chute d'amont.* — Elle est aussi divisée en deux gradins. Avec un certain débit q, on a également :

$$h' = 0{,}002\left[\frac{l_1}{D_1^5}\left(\frac{q}{2}\right)^{\frac{15}{8}} + \frac{l}{D_2^5}\left(\frac{q}{6}\right)^{\frac{15}{8}}\right]. \text{ Soit : } h' = 5q^{\frac{15}{8}},$$

en procédant comme pour la chute aval.

Les courbes de la (*fig.* 237) donnent les puissances concordantes aux divers débits q.

Les ordonnées correspondantes au débit moyen $q = 1.700$ indiquent les puissances respectives suivantes :

chute d'aval = 8.600 HP ;
chute d'amont = 6.740 HP ;

soit, en nombre rond, une puissance de 15.000 HP.

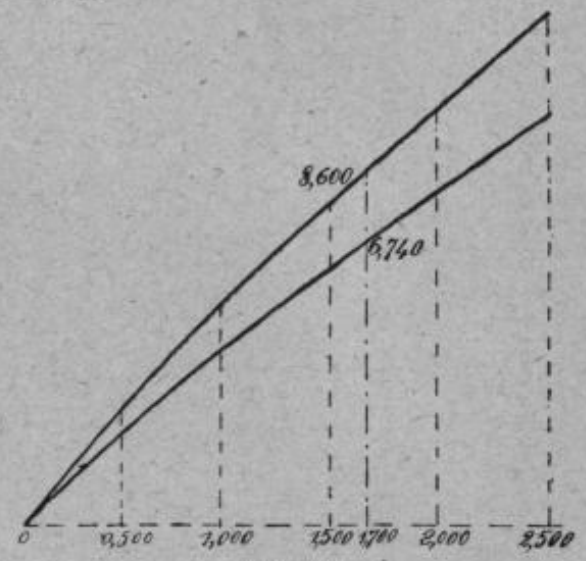


FIG. 237.

Quant à la chute de l'Oriège inférieure, on a vu que le débit moyen était de 2.400 litres ; mais, comme il descend à l'étiage à 1.600 litres et monte entre temps à 3.800 litres, et comme il n'y a pas possibilité de le régulariser, il faut calculer la conduite pour un débit de 3.400 litres, dans le but de réaliser une utilisation moyenne convenable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En procédant comme il a été fait pour les deux cas plus haut, avec :

$$H = 130 \text{ mètres},$$
$$l = 400 \text{ mètres}, \quad q = 3.400 \text{ litres},$$
$$a = 0{,}75, \quad \Delta a = 100.000 \text{ francs},$$
$$\Delta b = 220.000 \text{ francs},$$
$$\Delta t = 280.000 \text{ francs},$$

on trouvera :

$$D = 1^m{,}344, \quad \text{soit : } 1^m{,}350.$$

Pour le calcul de la puissance moyenne de cette chute, en comptant sur une perte de chute totale de 5 mètres ($2^m{,}60$ dans le canal d'amenée et $2^m{,}40$ dans la canalisation, compris les effets des coudes et des contractions), on cherche d'abord la puissance maximum, qui est égale à :

$$\frac{1.000 \times 0{,}75 \times 3{,}4 \times 125}{75} = 4.250 \text{ HP}.$$

Si nous prenons cinq mois d'étiage par an, la puissance moyenne devient :

$$\frac{5 \times 2.000 + 7 \times 4.250}{12} = 3.300 \text{ HP en nombre rond},$$

le chiffre 2.000 correspondant à la puissance d'étiage.

II. Soit une conduite forcée constituée par une seule file de tuyaux réunissant la chambre d'eau au collecteur des turbines. Supposons que la conduite ait 600 mètres de longueur et que nous consentions à perdre 5 0/0 de la chute totale, qui est de 60 mètres.

La perte de charge par mètre sera donc :

$$J = \frac{60 \times 5}{100} : 600 = 0^m{,}005.$$

Et :

$$Jl = 0{,}005 \times 600 = 3 \text{ mètres}.$$

Appliquons la formule Lévy (§ 65) ; en faisant $D = 1^m{,}50$, on aura pour l'expression de la vitesse :

$$U = 20{,}5 \sqrt{0{,}75 \times 0{,}005 \ (1 + 3\sqrt{0{,}75})}, \quad \text{soit :} \quad U = 2^m{,}35.$$

Le débit correspondant aura pour valeur :

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \times 2{,}35 = \frac{\pi \times \overline{1{,}50}^2}{4} \times 2{,}35 = 4^{m3}{,}2 \text{ à la seconde}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La formule Bresse : $D = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{Q^2}{J}}$, fournirait : $D = 1^m,70$.

La puissance sur la turbine sera dans ce cas :

$$N = \frac{QH}{75} \times \frac{75}{100} = \frac{QH}{100} = \frac{4.200 \times 57}{100} = 2,394 \text{ HP},$$

en adoptant 0,75 pour le rendement des turbines, comme cela se fait couramment, et en remarquant que la chute brute est réduite de 60 mètres à 57 mètres par suite du frottement de l'eau dans les tuyaux et de l'effet des coudes.

D'après le (§ 69), la tôle de 5 millimètres conviendra jusqu'au point où le niveau de l'eau sera en contre-bas de $35^m,50$ du niveau maximum de la chambre d'eau (l'épaisseur de 5 millimètres est un minimum pour éviter l'ovalisation du tuyau à vide et au remplissage). Pour une épaisseur de 6 millimètres et R = 8 kilogrammes, on aura $h = 42^m,50$; pour 7 millimètres et R = 8 kilogrammes, $h = 50$ mètres, et enfin, pour de la tôle de 8 millimètres et $R = 7^{kg},90$, on a : $h = 56$ mètres.

III. Soit à déterminer le diamètre d'une conduite de 1.500 mètres de longueur, la chute étant de 80 mètres, le débit à utiliser de 4 mètres cubes à la seconde et la vitesse d'introduction de l'eau dans le moteur hydraulique de 35 mètres à la seconde. Le débit dont nous disposons étant entièrement à utiliser, il sera donc précisément celui que doit absorber la ou les turbines à installer.

La section s de la veine liquide admise à la vitesse que nous nous sommes imposée est donnée par la relation :

$$s = \frac{4^{m3}}{35^m} = 0^{m3},114.$$

La charge capable d'imprimer à l'eau la vitesse de 35 mètres est :

$$h = \frac{\overline{35}^2}{2g} = \frac{1225}{19,62} = 62^m,40.$$

La puissance disponible ou fournie par la chute est :

$$p = 1000 \times 3 \times 62,40 = 185.200 \text{ kilogrammètres, soit : } 2.500 \text{ HP}.$$

En appliquant la formule ci-après pour la détermination du rayon r de la conduite, on a :

$$r = \sqrt[5]{\frac{2f \times s^2 \times h \times l}{\pi^2 (H - h)}};$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

où f (pour parois peu encrassées) $= 0{,}0075$, l est la longueur de la conduite et H la hauteur de la chute, on obtient :

$$r = \sqrt[5]{\frac{2 \times 0{,}0075 \times \overline{0{,}114}^2 \times 62{,}40 \times 1.500}{\overline{3{,}1416}^2 \times (80 - 62{,}50)}} = \sqrt[5]{0{,}1060};$$

d'où $r = 0^{m},62$.

Par suite le diamètre $= 1^{m},24$ et la section $S = 1^{m3},207$.

Le rapport des sections $\frac{s}{S} = \frac{0{,}114}{1{,}207} = 0{,}094$.

La perte de charge $K = 80 - 62{,}40 = 17^{m},60$.

Et le rapport $\frac{K}{H} = \frac{17{,}60}{80} = 0{,}22$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VI

BARRAGES

I. — ÉTABLISSEMENT ET ROLE DES BARRAGES

82. Réglementation des barrages. — Un barrage a pour but de diriger l'eau d'un cours d'eau dans un bief à l'effet de gagner une certaine hauteur de chute. De ce bief l'eau est conduite par un canal d'amenée dans une chambre d'eau, laquelle eau, après avoir actionné les récepteurs hydrauliques, se rend au cours d'eau par un canal de décharge ou de fuite. Par suite de l'établissement d'un tel ouvrage, le bief d'aval n'est nullement influencé au point de vue des variations du niveau de la surface, mais il en est tout autrement pour le bief d'amont, qui peut être sensiblement modifié. Quoi qu'il en soit, une fois le régime permanent établi, le volume d'eau qui s'écoule dans l'unité de temps par le barrage est le même que celui qui s'écoulait par la section du cours d'eau, si le barrage n'est pas destiné à accumuler une certaine réserve d'eau.

Lorsqu'on est en présence d'une rivière ni navigable ni flottable, on est libre d'établir le barrage directement en travers de la rivière et sur une largeur égale à celle du cours d'eau, sous la réserve que la retenue des eaux en amont, obtenue par l'établissement du barrage, ne gêne pas le service des usines existantes sur le même cours d'eau et n'apporte aucun préjudice aux riverains. L'usine à alimenter peut être disposée soit en amont, soit en aval, ou contiguë au barrage.

Nous avons dit que le barrage produit une élévation du niveau d'amont jusqu'à une certaine distance de cet ouvrage, tandis qu'en aval le niveau reste le même. Ce niveau en amont doit être maintenu tel que le barrage le produit pendant l'étiage et les eaux moyennes ; mais, lors des crues, l'eau peut passer par dessus la crête, et l'Administration fixe l'altitude de cette crête. L'opération par laquelle l'Administration détermine la hauteur de retenue est connue sous le nom de *point d'eau* de l'ouvrage régulateur. Ainsi elle impose que la surface de l'eau en amont ne doit pas pouvoir accidentellement s'élever à plus de $0^m,10$ au-dessus du point d'eau,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

limite de la tolérance administrative. Celui-ci est lui-même fixé par cette considération que, pour les besoins des riverains, il faut que l'écoulement des eaux pour les besoins de l'agriculture puisse se produire normalement et qu'en tous les points du parcours le niveau de l'eau du cours d'eau soit maintenu à $0^m,15$ ou $0^m,20$ en contre-bas des parties les plus basses des prairies avoisinant les rives.

Le barrage peut être constitué par un déversoir fixe pour pourvoir à l'écoulement des eaux de crues et par une échancrure munie de vannes, dont la section doit être telle que celles-ci donnent un débit tel que l'eau ne dépasse pas la crête du barrage aux hautes eaux ordinaires. Ces vannes de fond sont plus ou moins relevées suivant que le débit est plus ou moins considérable.

Pour l'usine à créer, il y a lieu de distinguer si elle doit être autorisée ou non. Dans le premier cas, l'altitude du déversoir étant fixée par l'arrêté d'autorisation, l'on est déchargé de tout souci quant à l'établissement d'une autre usine immédiatement en amont. Pour l'usine située en aval, l'on sait que l'altitude du couronnement de son déversoir règle le niveau de l'eau sur ce point. Par suite, la connaissance des deux niveaux que nous venons de considérer fixe la hauteur de la chute dont on peut réellement disposer.

Si l'on est en présence d'une usine non autorisée, pour se rendre compte de la chute disponible dans l'usine que l'on veut aménager, on lève entièrement les vannes de décharge du déversoir, de façon à supprimer entièrement la chute de cette usine. Alors le niveau d'aval de l'usine située en amont peut soit rester stationnaire, auquel cas il est loisible de maintenir l'eau de l'usine, que l'on a en vue, au niveau de la crête du déversoir, soit baisser, augmentant d'autant la chute de cette dernière usine ; dans ce cas, il faut maintenir le niveau de l'eau en dessous de l'altitude de la crête du déversoir et réduire la hauteur de telle sorte que le niveau d'aval à l'usine d'amont descende à la cote inférieure trouvée dans l'expérience précédente, sous réserve des conditions résultant des droits des riverains qui interviennent dans la fixation du niveau de l'eau, pour la protection des propriétés, l'irrigation et le droit de pêche.

L'établissement d'un barrage ou la dérivation plus ou moins complète des eaux par un canal d'amenée ne peut, dans le cas le plus général, être établi sans une autorisation de l'Administration, qui détermine les dispositions et les dimensions des ouvrages à créer, notamment du barrage, du déversoir de superficie, des vannes de décharge, qui constituent ce que l'on appelle les *ouvrages régulateurs*.

Pour les usines à cours d'eau intermittent, l'alimentation a lieu par éclusées, c'est-à-dire par retenues et évacuations d'eau successives. Alors le bief d'amont (canal d'amenée) forme un réservoir subsidiaire du bar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rage, et on applique le régime dit « des étangs », qui consiste à arrêter l'eau pendant le nombre d'heures nécessaires pour remplir le réservoir.

L'usine en marche dépense une quantité d'eau supérieure à celle que débite le cours d'eau, et l'excédent est fourni par le réservoir, qui joue ainsi le rôle « d'accumulateur » ; quand ce dernier est vide, l'usine entre en repos et on procède à nouveau au remplissage du bief.

A défaut d'établissement de retenues régulatrices dans les hautes vallées, ce qui serait le meilleur moyen de remédier à ce fâcheux état de choses, l'existence de barrages mobiles échelonnés le long du cours d'eau permet d'emmagasiner une masse d'eau qui est loin d'être négligeable, surtout au début d'une période sèche.

Les grands barrages réservoirs d'emmagasinement, même lorsqu'ils ont été édifiés en vue de la marche d'une seule usine hydro-électrique, ont une répercussion favorable sur le régime du cours d'eau à l'aval. Si l'usine avait la possibilité de retenir toute l'eau pour remplir sa réserve, le résultat de cette opération serait, il est vrai, d'assécher complètement le cours d'eau à l'aval durant toute la période de remplissage. Mais l'Administration, quand elle autorise la construction d'un semblable ouvrage, a soin de prescrire à l'usinier de laisser en tout temps un volume minimum qu'elle fixe au mieux des intérêts généraux de la vallée.

Dans les usines dont l'écoulement de l'eau doit être constamment maintenu, on assure cette condition, quand l'usine est arrêtée, par une ouverture suffisante des vannes de décharge.

Pour les hautes chutes et lorsque la disposition des lieux s'y prête, on construit un barrage au sommet du déversoir naturel, dérivant d'une cascade par exemple, et le réservoir ainsi constitué forme la chambre d'eau, d'où partent les conduites forcées. Quand l'usine est éloignée du barrage, ou qu'il existe d'autres usines situées sur la même rivière, l'Administration impose la construction d'un déversoir supplémentaire et d'une vanne de décharge à proximité du récepteur hydraulique, permettant, en cas d'arrêt du moteur hydraulique, de faire passer les eaux du canal d'amenée au canal de fuite.

A l'aide des vannes et du déversoir, on arrive à maintenir constant le niveau d'amont pendant l'étiage et la saison moyenne ; ce niveau ne s'élève seulement que pendant les grandes eaux, alors que le niveau d'aval, au contraire, varie constamment avec le débit de la rivière. La différence des niveaux en amont et en aval (hauteur de chute), et par suite l'énergie, varie aux différentes époques de l'année suivant le régime du cours d'eau, régime que l'on peut déterminer soit par des jaugeages directs et nombreux, soit à l'aide de renseignements puisés sur place ou recueillis dans les bureaux des Services des Ponts et Chaussées et des Eaux et Forêts.

Lorsque les barrages pour chutes basses ne dépassent pas 3 mètres,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ces ouvrages sont le plus souvent constitués par un mur en maçonnerie à paroi verticale du côté amont et incliné du côté aval. Si la rivière est torrentielle, on protège cet ouvrage contre les affouillements par des enrochements solides placés à la base, de part et d'autre, et on arrondit le fond.

La crête du barrage doit être parfaitement arasée à la hauteur fixée par le règlement administratif.

On tire la valeur de l'épaisseur h de la lame déversante par rapport à la plus forte crue connue, épaisseur qui constitue la surcharge dont on doit tenir compte dans les calculs d'un barrage, par la formule ci-après, où q représente le volume d'eau, en mètres cubes par seconde, de la plus forte crue, et l la longueur du barrage : $q = 1{,}77 \times lh\sqrt{h}$.

Il est évident que, pour avoir le moins de hauteur de lame déversante, il faut donner une longueur d'autant plus grande au déversoir.

Si la digue a une grande longueur, on donne au mur du barrage la forme d'un arc de cercle dont la convexité est tournée vers l'amont et formant déversoir lorsque le niveau d'amont dépasse le point d'eau. S'il s'agit de créer un réservoir dans une gorge, on construit un barrage en maçonnerie reliant les deux talus de la gorge et on ménage à la crête un déversoir de trop-plein, ainsi qu'un canal à la base (aqueduc) muni d'une vanne pour la vidange.

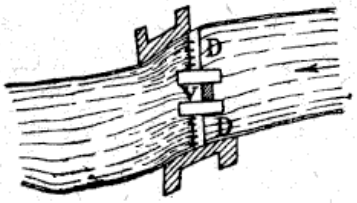


FIG. 238.

A l'origine du canal de dérivation on dispose une ou plusieurs vannes, constituant la passe à gravier, pour la chasse des graviers. Au moyen de chasses, ces vannes enlèvent les dépôts au pied de la murette et entretiennent celle-ci à un chenal profond. En temps de crues la passe à gravier reste ouverte.

Les barrages doivent être très étanches et réaliser diverses conditions que nous examinerons dans les paragraphes suivants ; ils sont assez souvent placés obliquement par rapport aux rives, de façon à présenter, en temps de crues, un débouché considérable pour une faible hauteur de lame d'eau.

En principe, toute usine bien réglementée comporte un déversoir de superficie fixe et un vannage mobile. La retenue, à l'effet de créer une chute d'eau, peut être faite en établissant un vannage de décharge V (*fig.* 238) accolé de deux déversoirs ; mais, dans ce cas, la manœuvre des vannes est incommode, malgré l'adjonction d'une passerelle entre les deux rives. La disposition représentée schématiquement par la (*fig.* 239) est la plus généralement adoptée. Le barrage de retenue B est disposé au droit ou à l'amont de l'usine u, et la prise d'eau se fait au moyen d'un canal d'amenée pu, qui conduit l'eau à l'usine qui en utilise la chute. Le canal de fuite uo ramène les eaux à la rivière en aval du barrage. En N est le déver-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soir de superficie, qui, aux termes des règlements administratifs, doit avoir une longueur au moins égale à la largeur moyenne du cours d'eau. La crête de cet ouvrage est dérasée dans le plan du niveau légal, de telle sorte qu'avec le concours du barrage, qui fonctionne également comme déversoir, on ait une crête de déversement double de la largeur de la rivière. Enfin le vannage de décharge V complète l'installation. Quand

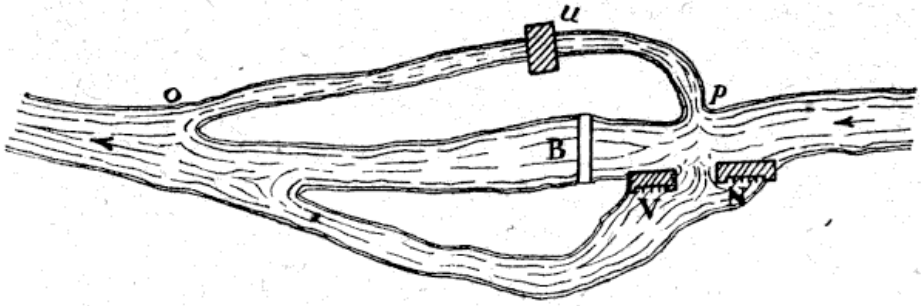


FIG. 239.

les eaux, à l'amont du barrage, sont plus basses que le niveau de retenue, le vannage reste fermé ; on ne l'ouvre que lorsque le niveau est notablement dépassé, c'est-à-dire lors des crues.

Le vannage sert, en outre, à maintenir la pente moyenne du fond du cours d'eau ou, autrement dit, il a pour fonction d'éviter les atterrissements.

Il peut arriver que la disposition des lieux empêche de donner au van-

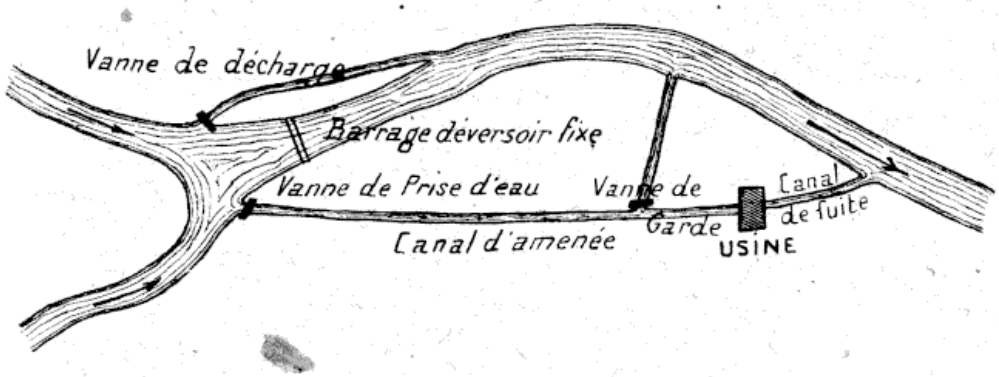


FIG. 240.

nage V un débouché suffisant pour écouler toutes les eaux de crues. Parfois aussi cet ouvrage est loin de l'usine, ce qui rend la manœuvre malaisée en cas de crue soudaine. On peut alors remplacer le vannage unique par deux vannages (*fig.* 240). Le vannage de garde, plus facilement accessible, suffit pour écouler les crues de peu d'importance, tandis que le vannage de décharge n'a besoin d'être levé qu'à des époques espacées.

On dispose parfois les galeries de décharge, une sur chaque rive du cours d'eau (*fig.* 241), pour écouler les crues sans que le barrage soit sub-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mergé. La retenue est limitée de chaque côté du barrage par un mur d'endiguement élevé à la même hauteur que les murs de tête des galeries de décharge.

Le débouché du vannage de décharge se détermine pour permettre l'évacuation de la totalité des eaux de pleines rives, abstraction faite de la partie qui s'écoule par le déversoir. Cependant, dans le cas des cours d'eau torrentiels, l'Administration n'impose pas l'existence des vannes de décharge.

Le déversoir de superficie sert à évacuer les eaux lorsque, le vannage étant fermé, le niveau légal est accidentellement dépassé. Il sert à parer

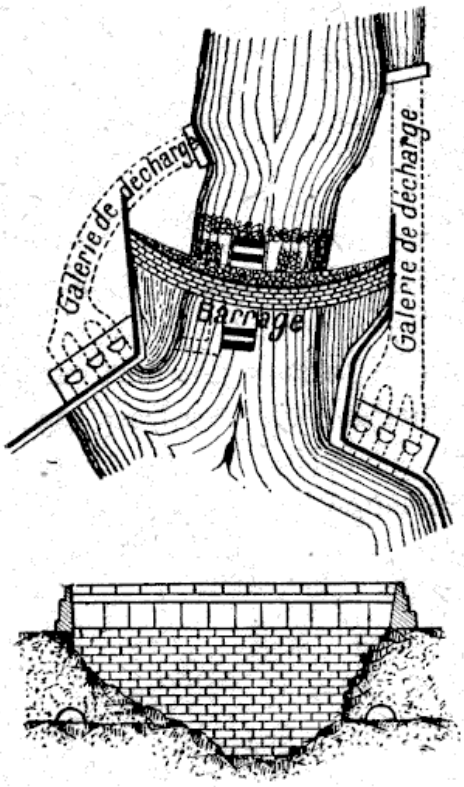


Fig. 241.

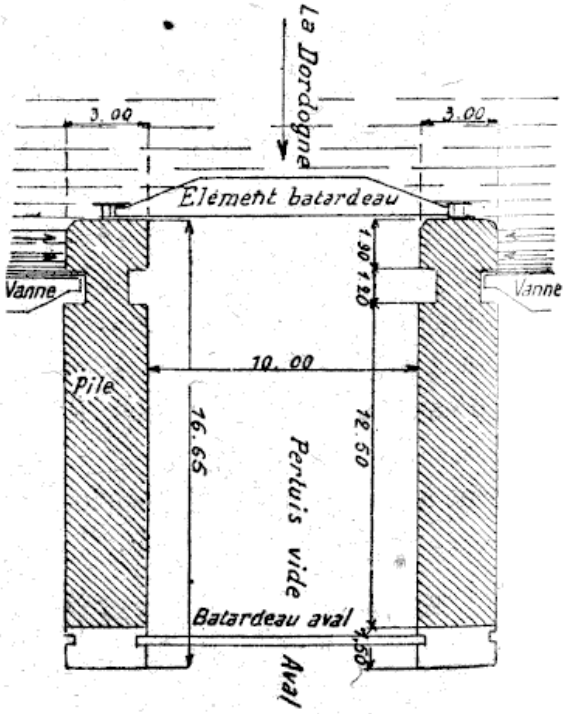


Fig. 242. — Coupe d'un pertuis du barrage de l'usine hydroélectrique de Tuilières.

à la négligence des usiniers dans la manœuvre des vannes de décharge. Quand le déversoir est destiné à l'écoulement des eaux ordinaires non employées par l'usine, une partie de sa crête est alors arasée sur une fraction de sa longueur et à un niveau inférieur à celui de la retenue, pour donner passage aux eaux surabondantes.

Le seuil des vannages s'établit toujours au fond du lit pour profiter de toute la hauteur possible, et leur levée doit dépasser le niveau des plus hautes eaux.

L'arrêté réglementaire fixe l'emplacement des déversoirs, leur longueur et la position de la crête. Les opérations à faire sur le terrain pour le règlement des usines demandent beaucoup de soin et d'exactitude ; il convient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

autant que possible de les faire lors des basses eaux. Elles s'étendent naturellement à l'amont jusqu'à la limite du remous de la retenue à étudier, et en aval jusqu'au point où, le canal de fuite joignant le cours d'eau, l'influence de la retenue cesse entièrement de se faire sentir.

La réglementation d'un barrage existant peut être demandée par l'usinier lui-même, soit qu'il ait en vue de se mettre à l'abri d'une mise en demeure d'avoir à enlever du lit des ouvrages établis sans autorisation, soit qu'il veuille recourir à une reconstruction de ses ouvrages. Elle peut être demandée par des tiers intéressés qui se croient lésés par la trop grande hauteur donnée à la retenue ou par l'insuffisance du débouché des ouvrages régulateurs. Dans ce cas, les ingénieurs procèdent à une réglementation complète du barrage, tout en s'attachant le plus possible à ne pas diminuer la force motrice dont jouit l'usinier.

L'instruction ministérielle du 23 octobre 1851 spécifie que, lorsqu'il s'agit d'établir un barrage dans le lit d'un cours d'eau torrentiel et fortement encaissé, le permissionnaire peut, dans certains cas, être dispensé d'ouvrages régulateurs. Alors il n'existe pas de niveau légal de retenue et on se borne à régler le niveau de la crête du barrage formant déversoir, comme le stipule la circulaire ministérielle du 4 octobre 1892. Par suite, la crête est dérasée à une certaine distance en contre-bas d'un point pris pour repère, celui-ci devant toujours rester accessible aux agents de l'Administration, c'est-à-dire placé au-dessus du niveau des hautes eaux.

L'instruction des demandes de réglementation de ces barrages se fait d'ailleurs de la même manière que dans les autres cas (voir chap. XIV).

83. Digues en terre. — Les barrages peuvent être constitués par des digues en terre, par des murs en maçonnerie, par des murs en béton armé ou par des constructions mixtes.

Le principal avantage des digues en terre (*fig.* 243) est que, grâce à leur grande surface d'appui, elles peuvent être établies sur des sols peu résistants, à la condition toutefois qu'ils soient imperméables. Elles trouvent aussi leur raison d'être dans les régions où la maçonnerie reviendrait à un prix prohibitif. Parfois les digues servent de berges pour les canaux de navigation, d'irrigations et même de canaux d'amenée d'usines hydrauliques (usine de Jonage, § 308).

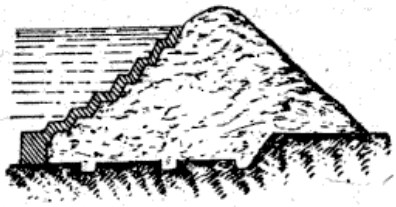


FIG. 243.

Le profil des barrages en terre varie suivant les circonstances locales et la nature des matériaux dont on dispose. En général, le côté amont a une inclinaison de 1 1/2 de base pour 1 de hauteur, dessiné soit par un plan incliné, soit par des gradins en maçonnerie qui constituent le revêtement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour des barrages de faible hauteur, un simple revêtement de pierres ordinaires de $0^m,50$ à $0^m,80$ d'épaisseur est parfois suffisant pour parer aux affouillements ou aux clapotis. Du côté aval, la surface inclinée peut être soit unie (*fig.* 244), soit constituée par une suite de plans inclinés raccordés par des banquettes horizontales (*fig.* 245), dont l'ensemble dessine une courbe ayant sa convexité tournée vers le remblai. Le revêtement du

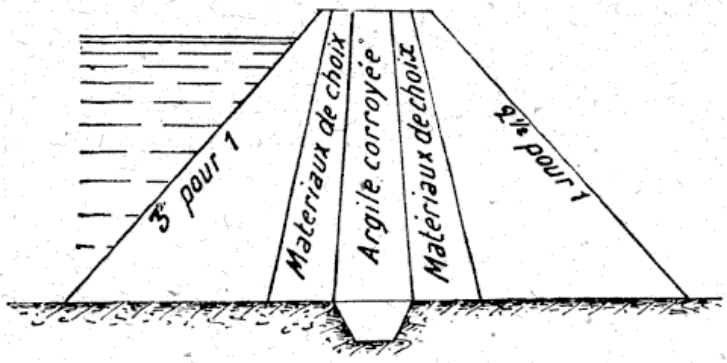


FIG. 244.

talus se fait au moyen de gazon. Les corrois sont plus souvent établis au moyen d'un mélange de sable et d'argile (2/3 de sable pour 1/3 d'argile par exemple) ou de 2 volumes de terre pour 1 de gravier.

Parfois, pour le talus amont, on prend une inclinaison assez raide au sommet et on la diminue ensuite en la faisant très douce vers le bas. De cette façon, lorsque la digue comporte un revêtement maçonné, l'inclinai-

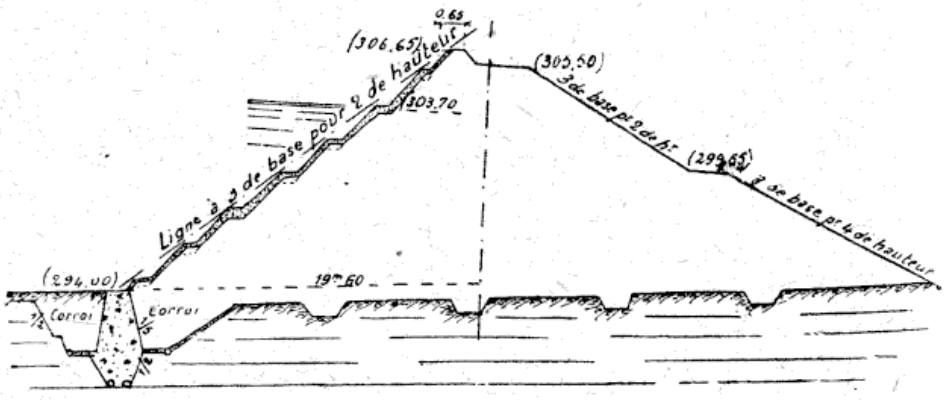


FIG. 245. — Digue-réservoir de Vingeanne.

son très douce vers le bas permet que ce revêtement ne glisse pas sur les terres parfois détrempées, sur lesquelles il repose, et l'inclinaison raide dans le haut pour que les vagues glissant sur ce parement ne dépassent pas le sommet de la digue.

Dans les digues anglaises, on dispose au milieu du remblai une âme en argile (*fig.* 244), et entre le remblai proprement dit, exécuté à l'aide de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

matériaux tout venants, et l'âme en argile, on interpose un remblai spécial formé de matériaux de choix résistants.

Moins le sol est résistant, plus on doit donner d'empattement au massif, afin de répartir la pression sur une très grande surface. Quant aux ouvrages de prise d'eau, ils sont toujours placés en dehors du remblai.

En certains pays, on a recours, pour la confection des digues, aux matériaux les plus divers (métaux, bois, fascines, pierres sèches) qui, judicieusement employés, remplissent parfaitement le but poursuivi. On peut aussi, dans les digues anglaises, remplacer l'âme en argile par un massif de maçonnerie ou même par une construction métallique et faire reposer les remblais eux-mêmes sur des murs, si la fondation le permet.

Quoi qu'il en soit, dans la construction de ces barrages, on doit assurer l'étanchéité des talus, soit par un recouvrement en terre glaise, soit par un revêtement de béton. Il convient, en outre, de drainer convenablement les eaux provenant d'infiltration, au moyen de barbacanes ou de galeries.

Les barrages de ce genre, de grande hauteur, sont nombreux. Le nouveau barrage du Croton (États-Unis) a 50 mètres de hauteur sur 250 mètres de longueur, et le barrage de l'Otay (Californie) a 70 mètres de hauteur. Dans la construction du barrage du lac d'Oredon, à 1.850 mètres d'altitude, on a recouvert le talus d'une première couche de béton reposant sur un pierré ordinaire destiné à produire l'étanchéité ; puis, en avant de ce béton, on a établi un autre pierré devant servir de drain et reposant, à sa base, sur une galerie d'écoulement. Enfin, sur ce pierré, on a disposé un fort revêtement en béton de $1^m,60$ d'épaisseur à la base et $1^m,20$ au sommet, protégé lui-même par une chape en bitume de 2 centimètres d'épaisseur mise à l'abri de la gelée et des chocs des vagues par un troisième pierré de 1 mètre d'épaisseur.

La digue de l'Alamosa River (Californie) a $54^m,86$ de hauteur au-dessus des fondations, $7^m,10$ de largeur à la crête et 235 mètres à la base. Sa longueur est de 152 mètres à la crête, et, sur les 25 derniers mètres, elle n'est que de 12 mètres. Le niveau normal de la retenue est de $3^m,05$ au-dessous de la crête.

Le centre de la digue est composé d'un mélange d'argile sableux, le reste en matériaux quelconques. Un mur central en maçonnerie, de 25 mètres de hauteur, de faible épaisseur, et disposé en plan en forme de voûte, est noyé dans la partie médiane de la digue.

La digue de Tabeaud, aussi en Californie, créant un réservoir de 1.500.000 mètres cubes, a $36^m,90$ de hauteur au-dessus des fondations et sa largeur est de 189 mètres à la base. Le parement amont est incliné à 3/1 et celui d'aval à 5/2.

Les barrages en terre peuvent être établis sur un sol peu résistant, qui serait impropre à supporter un barrage en maçonnerie ; mais ils doivent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être construits imperméables, c'est-à-dire constitués par un remblai parfaitement étanche, empêchant toute filtration d'eau à travers leur masse. Les terres trop argileuses ou trop sablonneuses seront rejetées, et on fera un bon corroi à l'aide de matériaux choisis que l'on pilonnera d'une façon très soigneuse lors de leur mise en place.

Le type de barrage à noyau d'argile a retenu l'attention des constructeurs américains ; car on projette de fonder un ouvrage de ce genre à Gatun pour alimenter le canal à écluses qui doit être construit à Panama. Des essais effectués sur le barrage de Wachusett, imaginé par M. Stearns, on a conclu que la ligne de saturation à l'intérieur de ce barrage, qui limite la hauteur des terres complètement imprégnées d'eau, se tient à une distance assez importante du profil extérieur de la digue. On peut en déduire que l'étanchéité est satisfaisante et qu'il n'y a pas de perte d'eau à travers l'ouvrage.

Parfois le corps de la digue est en pierres, au lieu d'être en terre, et l'âme en fer, au lieu d'être en maçonnerie. Les Américains font les barrages en terre avec des terres de qualité quelconque, mais protégées contre les infiltrations par un diaphragme en tôle absolument imperméable et noyé dans un massif de maçonnerie, ce dernier n'ayant pour effet que de mettre le métal à l'abri des agents d'oxydation.

La digue-réservoir de Villegusien, établie sur le canal de la Marne à la Saône, a été effectuée à l'aide de procédés de construction nouveaux. Sa longueur est de 1.250 mètres, sa plus grande largeur à la base $43^{m},63$, la hauteur au-dessus du sol des fondations, $12^{m},71$ et la capacité du réservoir 8.700.000 mètres cubes.

Le corroyage des terres (350.000 mètres cubes) a été opéré à l'aide d'un rouleau à roues cannelées, ayant une largeur de piste de $1^{m},20$ et un poids de 2.500 kilogrammes en ordre de marche. L'emploi de ces petits rouleaux facilement déplaçables a donné d'excellents résultats et l'expérience a démontré, qu'à égalité de poids par décimètre de jante, les rouleaux avec des roues de faible diamètre corroyaient beaucoup plus énergiquement. Les terres ainsi comprimées ont atteint 2.000 kilogrammes au mètre cube. Quant au mélange des terres, il a été fait très économiquement au moyen de herches canadiennes, avec dents en acier, recourbées et flexibles, qui a permis d'obtenir une étanchéité parfaite.

Le mur de garde a été construit à l'aide de mortier et de gravier comprimé qui a permis d'édifier un véritable monolithe absolument étanche et d'exécution rapide. La compression était faite par couches de $0^{m},12$ à $0^{m},15$, au moyen de savates. L'adhérence parfaite de deux couches entre elles était obtenue en fouettant sur la première, avant de la recouvrir par la suivante, un lait de ciment à consistance crémeuse.

La (*fig.* 246) montre une coupe de la digue de Villegusien sur l'axe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une tour de prise d'eau. Le talus d'amont a été revêtu au moyen de grandes dalles de mortier de ciment Portland moulées et savatées en place; elles ont 0m,20 d'épaisseur et 3 mètres de longueur, séparées par des joints en argile recouverts d'une mince couche de mortier de 3 centimètres d'épaisseur en parement.

A la digue de Villegusien on a supprimé complètement le déversoir isolé de superficie qu'on met d'habitude à l'une des extrémités des digues, en raison de la longueur exceptionnelle de l'ouvrage. Le déversoir a été placé tout simplement au sommet des tours carrées, à l'instar des déversoirs circulaires des écluses. Ce système permet d'écouler des crues de 50 mètres cubes à la seconde. L'étude de la digue de Villegusien est due à M. O. Jacquinot, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Le barrage de Nexaca sur le Rio du même nom (*fig.* 247) est un des plus hauts de tous les barrages en terre actuellement existants. Il a 55 mètres de hauteur, une longueur de 372 mètres et une

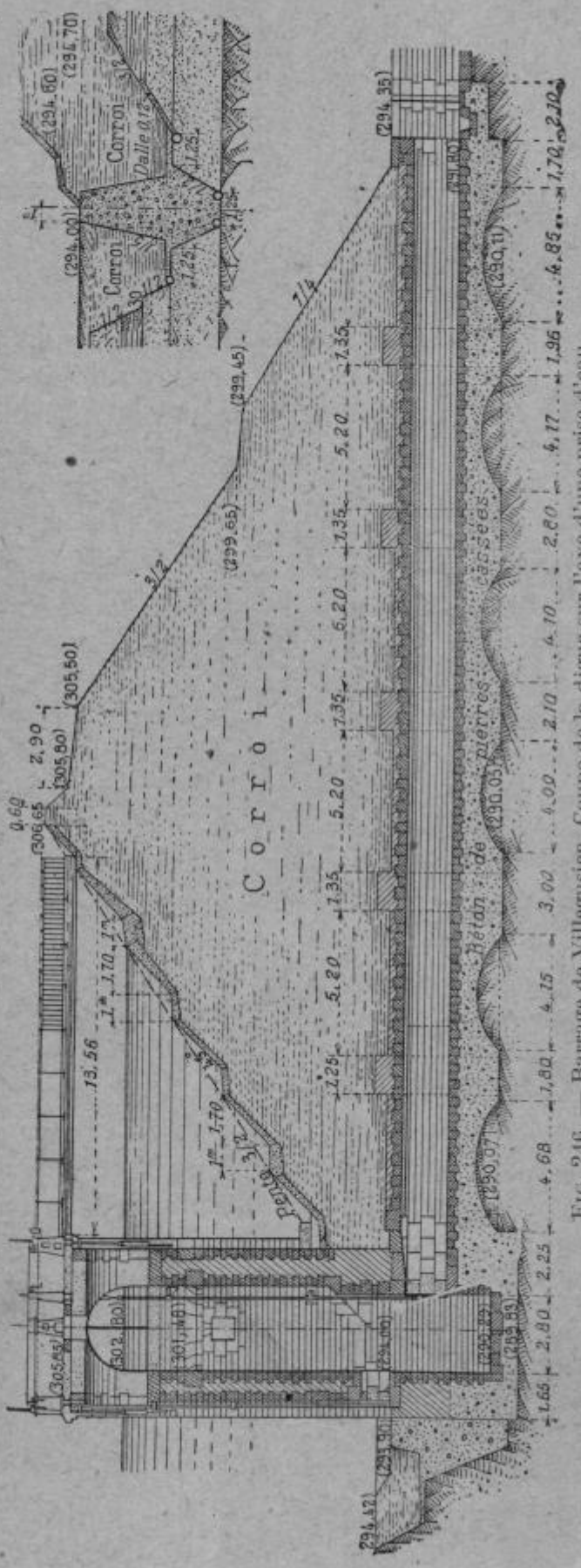


FIG. 246. — Barrage de Villegusien. Coupe de la digue sur l'axe d'une prise d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

largeur maximum de 299 mètres. On disposait d'eau sous la pression de 12 kilogrammes par centimètre carré. Comme matériaux de remblayage, on a trouvé, dans le voisinage immédiat, des graviers calcaires et de l'argile presque pure placés côte à cote, mais non mélangés. On attaquait séparément chacune de ces deux roches qui s'écoulaient dans des sluices différents pouvant être réunis par leur mélange, et dans un sluice collecteur on obtenait des matériaux de porosité déterminée. On put ainsi constituer le centre de la digue d'argile pure (couche *e*), de gravier et argile remblayés hydrauliquement (couches *d* et *f*), de pierraille mélangée d'argile, remblayée hydrauliquement (couche *c*), de pierraille remblayée hydrauliquement (couche *g*) et de pierraille posée à la main ou déchargée par un câble transporteur (couche *b*).

La partie avant *h* du barrage a été faite de matériaux ayant exsudé de l'ouvrage. Des murettes en béton *a* ont été ménagées dans le sol à des distances variant de 28 à 45 mètres. Enfin les deux faces ont reçu un pavage en gros moellons posés dans un bain de mortier au ciment.

Il est reconnu depuis longtemps que le transport par l'eau courante constitue un mode d'évacuation des déblais extrêmement économique. A la suite d'expériences faites pour l'évacuation des déblais de la Culebra par les eaux du Chagres (percée de l'isthme de Panama), où on opérait à l'aide d'une conduite en tôle de 50 centimètres de diamètre, on reconnut que l'eau animée d'une vitesse moyenne de $2^m,40$ pouvait porter ou entraîner régulièrement 1/30 de son volume de déblais tout-venant ; des pierres ayant $20 \times 10 \times 10$ centimètres étaient roulées à une vitesse de $2^m,25$.

Les terres argileuses sont plus facilement transportables que les sables et graviers, car l'argile, qui se met en suspension dans l'eau, agit comme une sorte de lubrifiant pour faciliter l'écoulement des gros éléments. Les meilleurs résultats sont obtenus quand la proportion d'argile est de 25 à 35 0/0 des matériaux à transporter et ces derniers roulent aisément dans des conduites dont la pente n'excède pas 2 0/0. D'ailleurs, le remblayage hydraulique est appliqué avec succès dans les mines pour le transport des remblais du jour au fond dans les quartiers dépilés.

On s'arrange de manière que l'arrivée des matériaux de remblayage se fasse dans une nappe d'eau assez profonde et assez étendue. Dans ces conditions, le dépôt des gros éléments s'effectue assez vite, par suite de la diminution brusque de vitesse ; quant aux éléments plus fins, qui tardent à se déposer, ils subissent une sorte de percolation à travers la masse déjà compacte fournie par les premiers et ils en colmatent progressivement les interstices. Il faut notamment dans l'opération du remblayage hydraulique éviter la formation de lits parallèles, à l'effet d'empêcher la production de chemins d'eau entre les couches, capables de provoquer des glisse-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ments pouvant amener la ruine de l'ouvrage. On conçoit que ce mode de remblayage est beaucoup plus économique que celui habituellement employé pour la construction des digues en terre. Si les travaux sont importants, l'économie de temps et d'argent réalisée couvre très vite les frais d'installation et d'entretien de la tuyauterie et des pompes (1). Le barrage de Tyler, dans le Texas (9m,15 de hauteur et 175 mètres de longueur), et celui de la Mesa, près de San-Diego (19m,80 de hauteur et 145 mètres de longueur de crête), construits, depuis plus de vingt ans, sur ces principes, ont également bien résisté à ce jour.

Depuis l'établissement de ces derniers, d'importants barrages-réservoirs, tels que ceux de la Crane-Valley (Californie) (33 mètres de hauteur et 237 mètres de longueur), de Lake-Frances (Californie) (25 mètres de hauteur et 430 mètres de longueur), de la Snake-River (Idaho, États-Unis), de Wahiawa (*fig.* 248) (îles

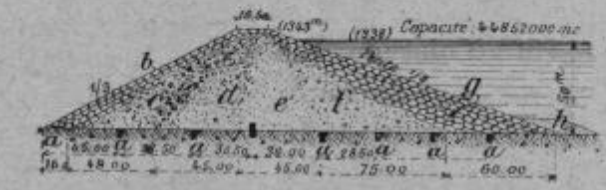


Fig. 247.

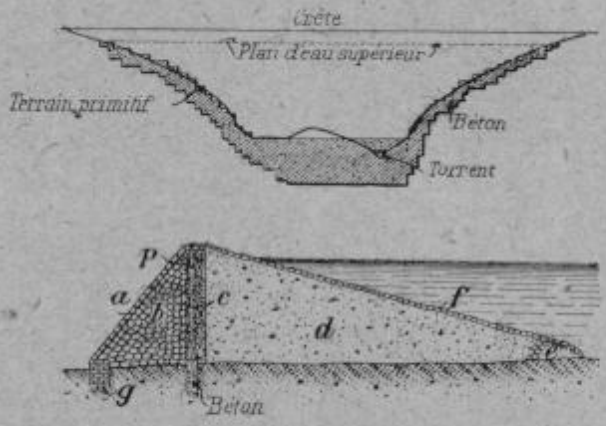


Fig. 248.

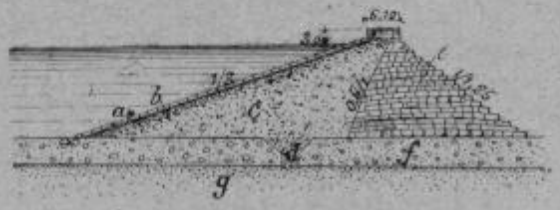


Fig. 249.

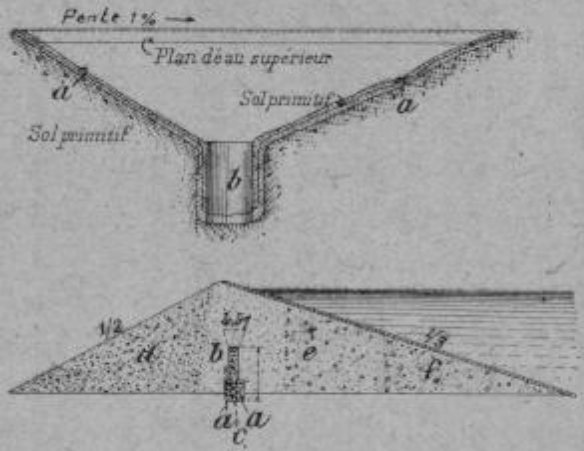


Fig. 247 à 250. — Types de digues-réservoirs.

(1) Les ingénieurs américains, qui ont établi le projet d'achèvement du canal de Panama et qui comporte à Gatum un barrage en terre, pour barrer la vallée de Chagrus, relevant à 31 mètres au-dessus du niveau de la mer le plan d'eau destiné à constituer le lac intérieur formant le bief de partage, ont décidé de recourir à la méthode du remblayage hydraulique pour l'exécution de cet ouvrage, le plus colossal à ce jour, en utilisant les déblais provenant des dragages du canal entre Gatum et Colon. Ce barrage a 44 mètres de hauteur, 25.500 mètres de longueur, 825 mètres d'épaisseur à la base et un volume de 16.207.500 mètres cubes. Son prix de revient est de 45 millions de francs, soit 2 fr. 80 par mètre cube.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sandwich), de Zuni (*fig.* 249) (Nouveau-Mexique) (23 mètres de hauteur et 240 mètres de longueur à la crête), de l'Alamosa-River à Terrare (*fig.* 250) (Colorado, États-Unis) (60 mètres de hauteur et 180 mètres de longueur), ont donné de bons résultats.

Plusieurs barrages avec remblayage hydraulique viennent d'être construits pour l'aménagement de chutes très importantes en vue de la production d'énergie électrique, qui doit être transportée à Puebla et à Mexico, villes situées à une distance d'environ 150 kilomètres du point de production, et aux districts miniers de Pachuca et d'El Oro éloignés de plus de 270 kilomètres.

Un système de revêtement en béton armé, étanche et capable de résister aux chocs des corps flottants, a été imaginé et mis en pratique par M. de Muralt, ingénieur au corps des Ponts et Chaussées hollandais, pour la protection des rivages et des ouvrages maritimes. Sur une moins grande échelle, il pourrait recevoir d'utiles applications dans la construction des digues. Le système de revêtement de Muralt a été décrit dans *le Génie civil* (1) : nous allons nous borner à en indiquer le principe.

M. de Muralt constitue ses revêtements à l'aide de dalles de béton de faible étendue, indépendantes les unes des autres, maintenues en place par un encadrement ou châssis extrêmement robuste, ancré fortement dans le sol des parties à protéger, et recouvrant le bord des dalles en formant couvre-joint. Le châssis, qui est constitué par du métal déployé, joue le rôle d'élément résistant, capable de subir les efforts extérieurs sans dommages, et ceux de la dilatation, sans bris ou déformation sensible. Les dalles en béton armé, enchâssées dans leurs encadrements et indépendantes de ces derniers, constituent l'organe de protection proprement dit. L'armature des dalles est aussi du métal déployé ; elle est entièrement noyée dans le ciment. La confection des dalles et de leur châssis se fait entièrement sur place. Pour construire 100 mètres carrés de revêtement, en dalles de $7^{cm},5$ d'épaisseur, il faut : ciment, 3.500 kilogrammes ; sable, 9 mètres cubes ; gravier, 12 mètres cubes ; métal déployé, 120 mètres carrés (pesant $1^{kg},900$ à 2 kilogrammes par mètre carré) ; eau, 3 mètres cubes ; huile, 10 litres ; journées de salaire, 40.

Le tableau suivant donne les prix de revient des mouvements des matériaux de la digue-réservoir de la Vingeanne sur le canal de la Marne à la Saône :

Il est de grand intérêt d'apporter toute attention à la construction des digues en terre, qui constituent un système essentiellement économique de construction et d'entretien.

Les défaillances auxquelles ont donné lieu ces ouvrages peuvent, mieux connues, être évitées par suite de modifications à apporter dans leur exécution.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mur de garde..	Fouilles.....	89.000	343.000	Cube des corrois 296.000 mètres cubes. Prix de revient d'un mètre cube de corroi en place: $\frac{892.000}{296.000}$ = 2 fr. 80. Pour obtenir 1 mètre cube de corroi à la digue on a exécuté 1m,053 avec emprunts, d'où un retrait de $\frac{53}{1.000}$.
	Maçonnerie de mortier comprimé...	254.000		
Massif de corroi.	Décapage de la digue, essartage des emprunts etc.	104.000	936.000	
	Fouille des chambres d'emprunt, transport et corroyage des terres.	832.000		
Revêtement....	Fouilles et divers..	35.000	304.000	Pour obtenir 1 mètre cube de mortier comprimé en place (joints déduits) on a employé 1m3,13 de sable, d'où un retrait de $\frac{13}{100}$.
	Dalles en mortier de ciment et escaliers.....	269.000		
Tours d'alimentation.....	Terrassements.....	7.000	115.000	Prix de revient du mortier en place au mètre cube de surface couverte : 11 fr. 45 ; arrosage au lait de ciment compris.
	Maçonneries.....	59.000		
	Métaux (vannes, crics, passerelles, grilles)	49.000		
Aqueducs de fuite.....	Terrassements.....	20.000	84.000	Le mètre cube d'eau emmagasiné revient à : $\frac{3.375.000}{9.500.000}$ = 0 fr. 355.
	Maçonneries.....	64.000		
Travaux divers dans le réservoir, entretien des chemins déviés, semis, plantations, aménagements des abords de la digue, etc.....		103.000	103.000	
Rétablissement des communications.		275.000	275.000	
TOTAL POUR LES TRAVAUX.....			2.160.000	
ACQUISITION DE TERRAINS.....			1.215.000	
DÉPENSE TOTALE.....			3.375.000	

C'est ainsi que M. Frontard a pu montrer que les éboulements qui se sont produits aux talus amont dans certaines digues s'expliquent mal par les théories admises jusqu'à présent sur la stabilité des *terres pulvérulentes*.

Les études de M. Résal, confirmées par l'expérience, conduisent à reconnaître la nécessité d'adoucir progressivement les talus dépassant une certaine hauteur, c'est-à-dire de modifier les profils adoptés comme classiques depuis un quart de siècle.

M. Brésal formule la loi suivante : « étant données une certaine nature de terre et une certaine inclinaison du talus, il existe une hauteur dangereuse à partir de laquelle le talus doit être adouci ».

Et M. Frontard appuie cette loi par la suivante : « la hauteur dangereuse varie avec la proportion de gravier contenue dans les terres. »

M. Gaillot s'inspirant de ces données a édifié récemment au canal de Bourgogne la digue de Grosbois, pour contrebuter le vieux barrage en maçonnerie construit en 1835, en donnant au talus de la digue un talus concave à l'amont. Depuis la mise en service, il ne s'est produit aucun éboulement. Il semble donc que la solution pour les digues de grande hauteur doit être cherchée dans la réalisation d'un profil concave à l'amont.

D'après les dernières expériences de M. Frontard, la hauteur dangereuse peut être formulée comme suit pour une inclinaison de 3/2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

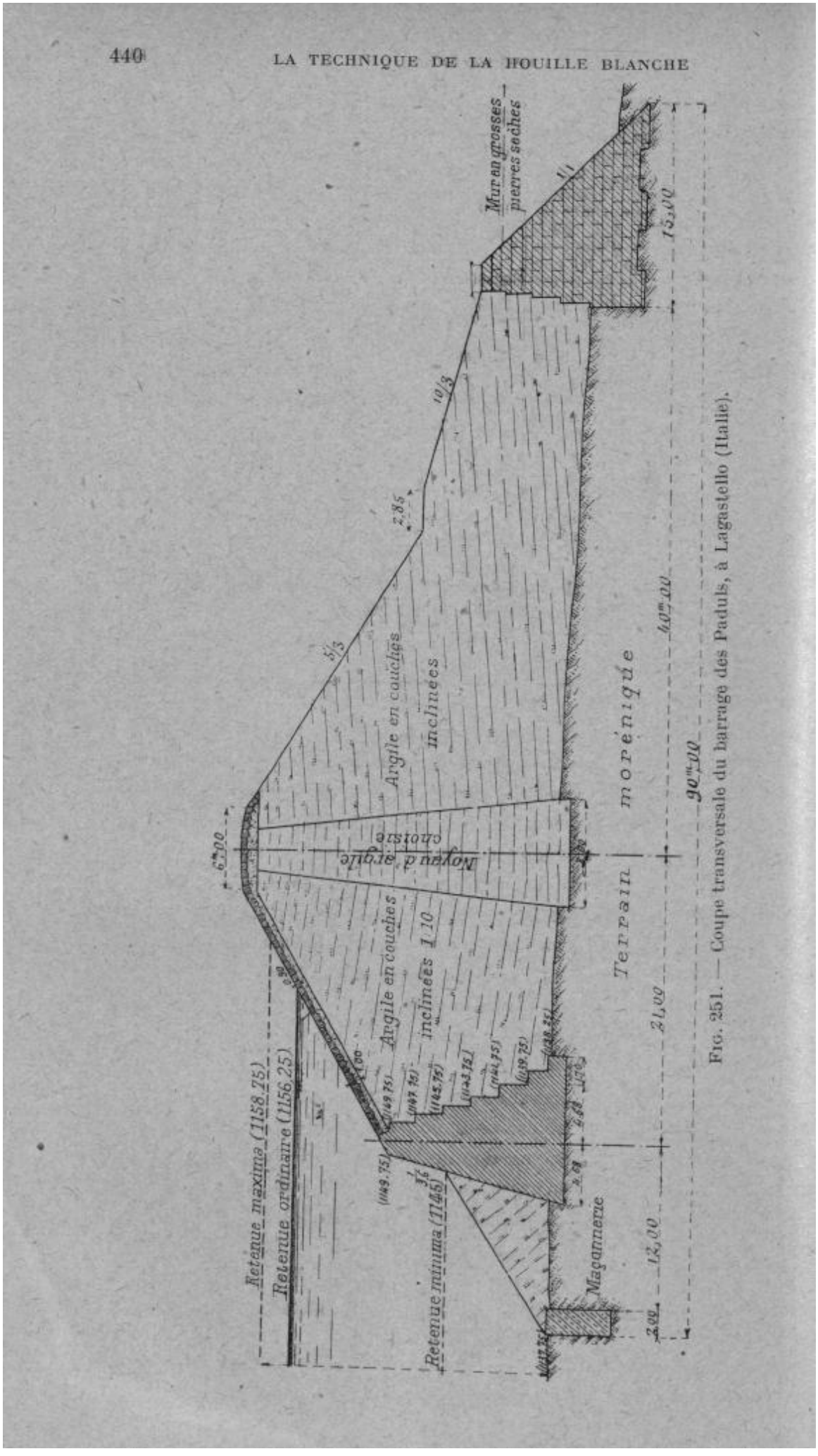


Fig. 251. — Coupe transversale du barrage des Paduls, à Lagastello (Italie).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour une terre contenant	40 à 60 0/0	de gros sable,	16 à 17	mètres
—	—	35 0/0	—	15 à 16 —
—	—	10 à 12 0/0	—	11 à 13 —
—	—	6 0/0	—	7 à 8 —

Au lieu d'augmenter la surface pressée on peut obtenir le même résultat en augmentant la résistance à l'écrasement, en mélangeant par exemple une forte proportion de gravier à la terre du remblai, au pied de la digue. On a ainsi un « béton de terre » qui est le matériau idéal pour les digues de réservoir (Digues de Torcy-Neuf et du Bourdon).

Il n'est pas nécessaire d'exécuter ainsi tout le corps, mais seulement à la base du talus amont, un massif d'autant plus haut que la digue même est plus élevée. D'ailleurs l'adoucissement du talus peut être poursuivi en même temps que l'amélioration des remblais. Malgré que les talus d'aval ne soient pas soumis aux mêmes causes de destruction, les mêmes considérations doivent, pour plus de sécurité, leur être appliquées.

Les remblais corroyés convenant mal pour remplir un rôle de soutènement au pied du talus, on pourrait demander ce rôle de soutènement à de la maçonnerie en la limitant au soutien du pied du talus.

On trouve une application de ce principe dans la construction récente du barrage de l'usine hydroélectrique de Lagastrello, la plus grande de ce genre construite jusqu'à ce jour en Italie (*fig.* 251).

Pour les digues en terre de grande hauteur si on était conduit, par des conditions de stabilité à donner au mur de garde une épaisseur inutile pour le rôle d'étanchéité, qu'il est appelé à jouer, il pourrait être évidé suivant le type qui a été adopté dans les Pyrénées dans la construction de quelques barrages.

84. Barrages en béton ordinaire. — La (*fig.* 252) montre un barrage en béton établi à London (Ontario) pour les usines hydrauliques de

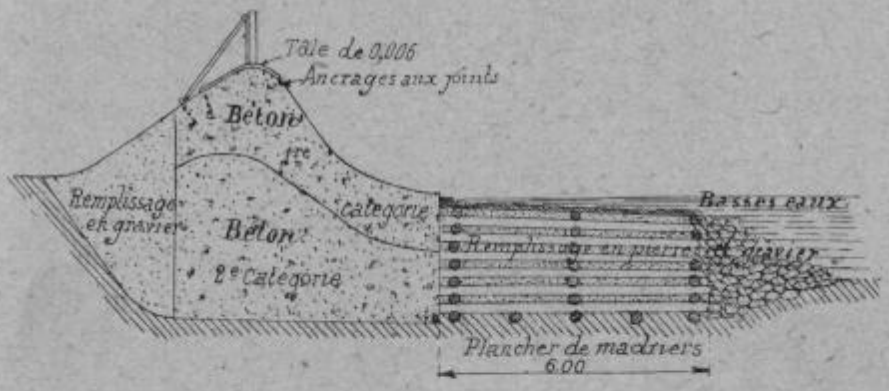


FIG. 252.

ladite ville. Il mesure 105 mètres de long et $5^m,70$ de hauteur au-dessus de sa fondation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a donné au profil une assez grande dimension en largeur, à cause des dangers que fait courir au barrage le passage des glaces. La construction a été faite par tranches de 15 mètres de longueur reliées par joints, composés de feuilles de tôles réunies par un matelas en sable et glaise. Le béton de première classe, qui est revenu à 36 francs le mètre cube, était composé de 1 de ciment pour 3 de sable, 4 de gravier tamisé et 2 de pierre cassée. Pour le béton de seconde classe, les proportions étaient : 1 : 3 : 5 : 3, et il a coûté 34 francs le mètre cube. Le béton repose directement sur un banc d'argile compact, sauf en un point où on a dû consolider une veine de gravier en y incorporant du béton sec.

Le barrage de Mac Call Ferry (États-Unis) est particulièrement intéressant par les méthodes nouvelles qui ont été employées pour sa construction.

Le fleuve, au point où est construit le barrage, a 810 mètres de largeur et son lit est parsemé de nombreuses îles. Le barrage est à cheval sur l'île de Fry et il est longé, en aval, par un pont de service de 600 mètres de longueur qui lui est parallèle et qui supporte quatre voies dont le faisceau se relie, sur la rive gauche, à la voie principale de Pensylvanie à Railroad et aux voies qui desservent l'usine génératrice et les différents chantiers ou ateliers de la rive.

Le barrage, qui a $15^{m},80$ de hauteur, est construit entièrement en béton, sans armature, avec addition de 18 0/0 de blocs de rochers noyés dans la masse. Pour établir le profil on a construit un batardeau partant de la rive gauche et allant à l'île Fry, les eaux passant par le bras droit. Dans le bras gauche, ainsi asséché, on construisit le pont de service et les fondations du barrage. Puis sur cette base, on érigea le corps du barrage par tronçons successifs de 12 mètres, laissant entre eux un vide de même longueur. En même temps, on montait la substructure de l'usine principale avec ses conduites souterraines pour permettre à l'eau de les traverser et d'aller rejoindre le canal de fuite. Cette première partie une fois terminée, on fit sauter le batardeau du bras gauche ; l'eau reprit son cours à travers les ouvrages du barrage en béton et l'on entreprit les travaux dans le même ordre pour assécher le bras droit. Cette deuxième phase, ainsi que la traversée de l'île ont été terminées dans le printemps de 1908. Pour la production des énormes quantités de béton nécessaires pour la construction du pont de service, de l'usine et du barrage, on avait installé un atelier spécial de fabrication du béton. La production par journée de dix heures a atteint 1.350 mètres cubes et le chargement des trains, composés de huit wagons apportant les matériaux aux malaxeurs, était d'environ 12 mètres cubes.

Pour construire le barrage en béton on a employé des gabarits métalliques en vue d'une solidité, d'une facilité de montage et de remplacement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de certaines pièces, beaucoup plus grandes qu'avec les gabarits en bois ordinaires. Les fondations de ce barrage ayant été arasées dans toute la longueur à 1m,50 en contrebas du pied de la courbe formant la face aval, c'est sur cette plate-forme que furent montés les groupes de gabarits correspondant à chaque tronçon.

L'ensemble pour un tronçon comprend cinq fermes semblables, espacées de 3 mètres d'axe en axe. Ces cinq gabarits, entretoisés par des tirants en diagonale, sont fixés à leur base à des points particuliers de la fondation générale du barrage. A l'aval, la fixation est faite au moyen de coussinets de butée scellés dans des massifs de fondation. Une fois les gabarits montés, on fixait le coffrage en bois à leur intérieur et on procédait au coulage du béton.

La première série de tronçons de 12 mètres étant construite, dans toute l'étendue du barrage, pour boucher les vides de 12 mètres, ménagés pour l'eau, on s'est servi d'un système particulier de panneaux mobiles. Chacun d'eux est formé d'un châssis à claire-voie rectangulaire ayant en largeur 1m,20 de plus que l'ouverture à fermer, soit 13m,20 en tout et une hauteur de 4m,80. Ce châssis, une fois descendu contre la face amont de l'ouverture, sa fermeture s'opère en amont à l'aide d'un rideau en forte toile roulé sur un cylindre horizontal qui règne dans toute la largeur du panneau et s'appuie sur un grillage en fil galvanisé. A l'aval le châssis est garni d'un revêtement en madriers cloués horizontalement sur des tasseaux fixés aux cornières, et comme l'eau pourrait passer entre la paroi des maçonneries et le pourtour des châssis, les deux arêtes verticales et l'arête horizontale inférieure sont garnies d'un tube à air que l'on gonfle à l'aide d'une pompe.

Les panneaux une fois en place, on élève la maçonnerie de béton par assises successives de 1m,50 de hauteur ; quand on a terminé une première assise, on remonte les panneaux pour faire une nouvelle assise et ainsi de suite. L'ensemble des panneaux mobiles nécessaires pour un bras n'a coûté que 100.000 francs, au lieu qu'un barrage mobile provisoire complet aurait occasionné une dépense d'environ 2 millions.

Afin de laisser à l'ouvrage la possibilité de se dilater, aux points de jonction des massifs de 12 mètres, on a ménagé des entailles de 0m,90 de profondeur formant rainures qui sont garnies de papier goudronné. L'expérience a montré que peu à peu le papier goudronné est enlevé et qu'il est remplacé par du limon qui forme ainsi un joint élastique.

Avant de s'engager dans le bassin de mise en charge, l'eau retenue par le barrage, traverse une grille brise-glaces en béton avec estacade flottante qui rejette vers le barrage-déversoir tous les débris flottants charriés par le fleuve.

L'usine bâtie entièrement en béton, avec comble en acier est élevée sur le même banc de roches que le barrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

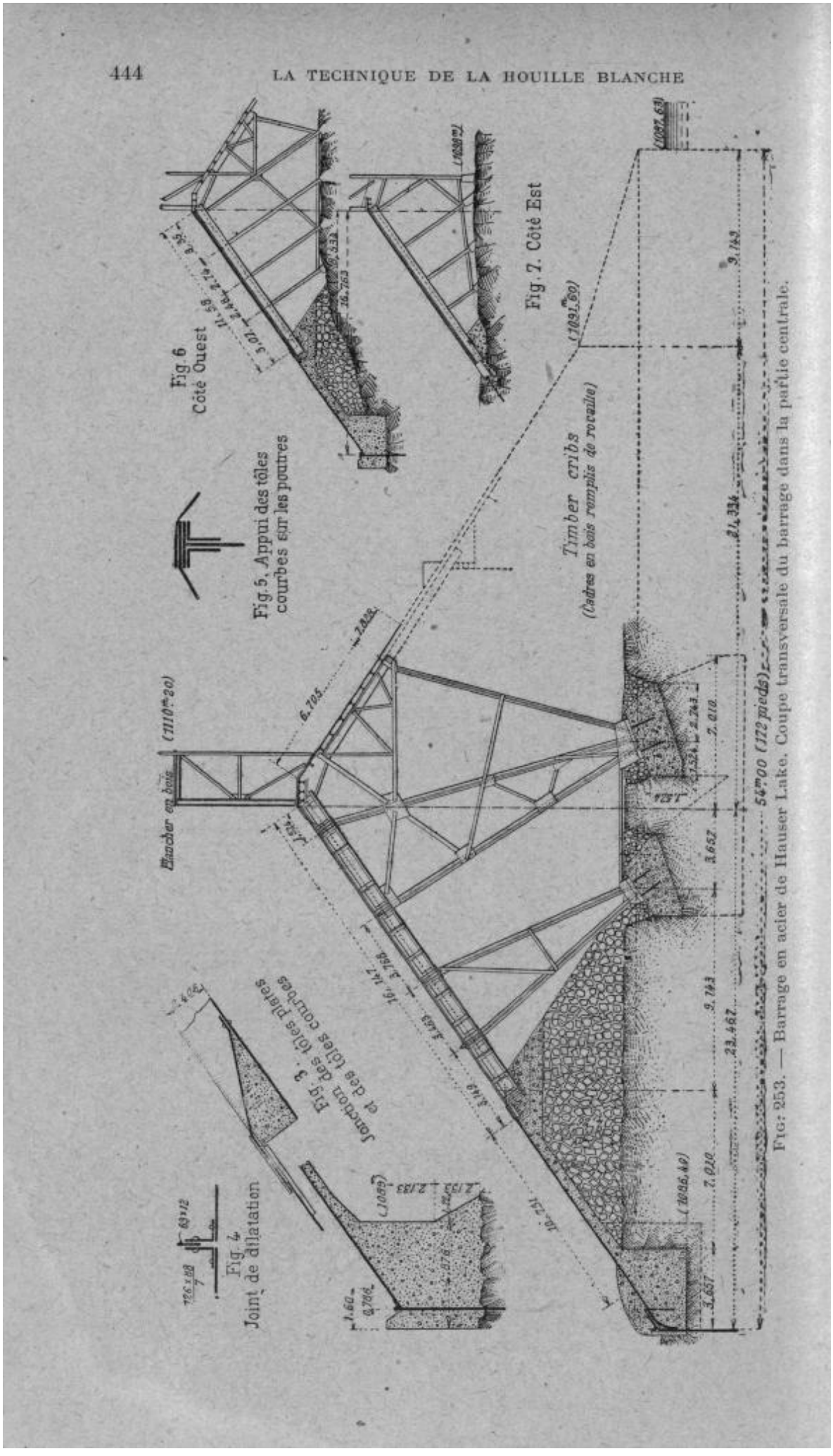


Fig. 253. — Barrage en acier de Hauser Lake. Coupe transversale du barrage dans la partie centrale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

85. Barrages en acier. — Les barrages en acier commençant à devenir de construction courante aux États-Unis, nous donnons, à titre de document, celui édifié à Hauser Lake sur le Missouri et que représentent les (*fig.* 253 à 255) empruntées au *Génie civil*. Cet ouvrage, qui reposait en grande partie sur un banc de gravier, a été, malgré les précautions prises, affouillé par l'eau sous pression qui en a entraîné la destruction.

La retenue opérée était de 20 mètres. Le barrage était constitué par des fermes en acier qui soutenaient un platelage en tôle formant la face amont de l'ouvrage. La charpente métallique s'appuyait sur le sol de fondation en béton régnant d'une façon ininterrompue sur toute la longueur, quoique les fermes fussent espacées entre elles de 3 mètres. Les tôles formant la face amont reposaient sur les supports comme on le voit sur des dessins de détail. A la partie supérieure, ces tôles étaient courbées et leur concavité tournée vers l'amont, tandis qu'elles étaient planes à la partie inférieure. Au pied du barrage on avait disposé

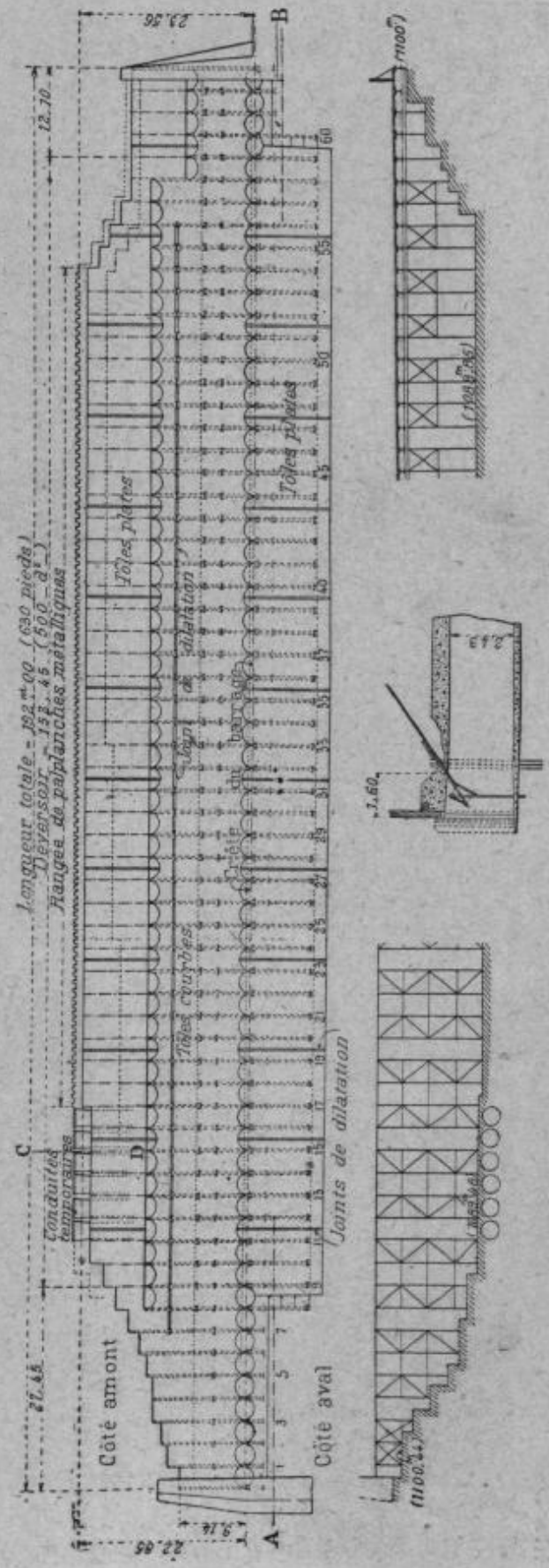
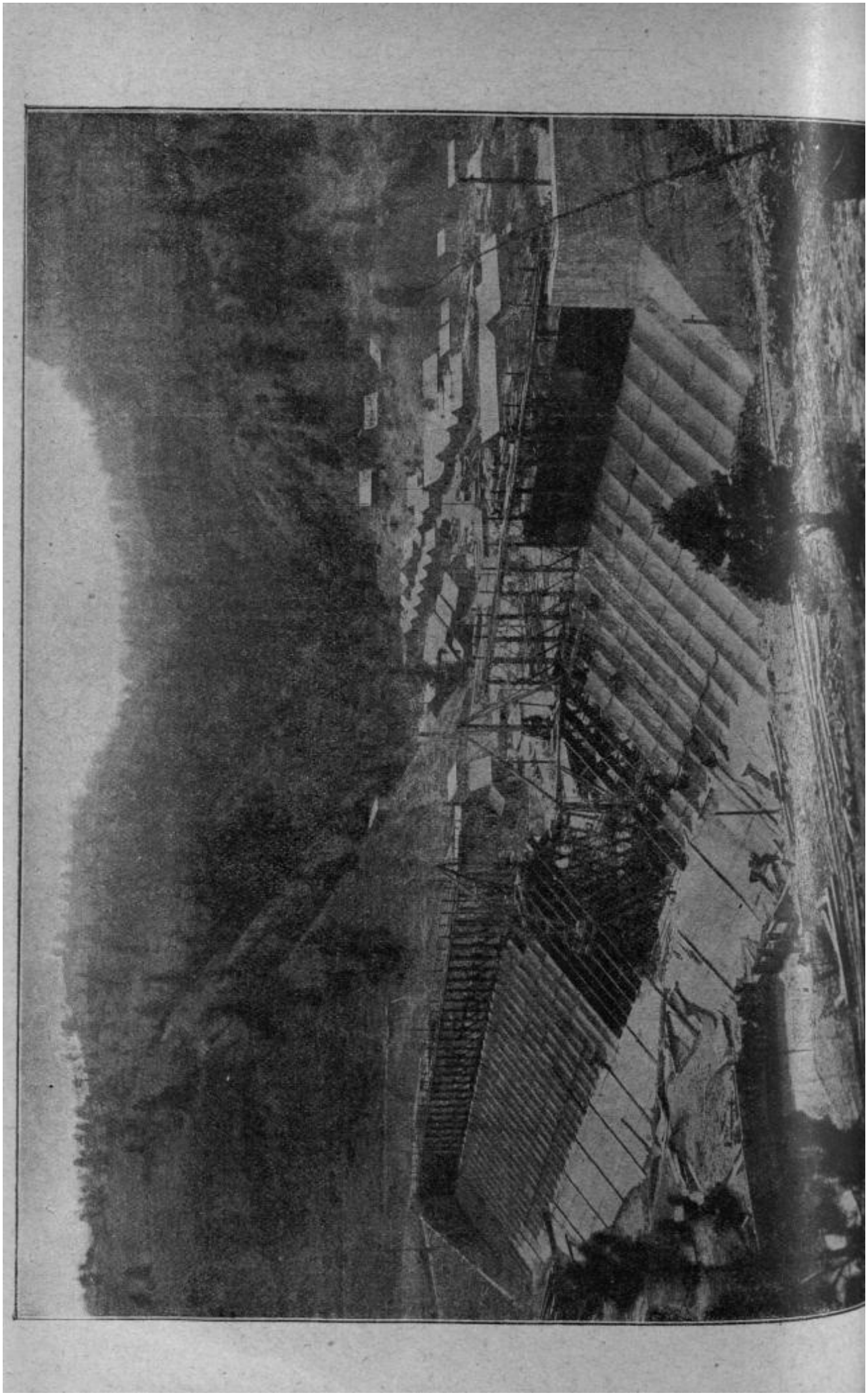


FIG. 254. — Barrage en acier de Hauser Lake. Plan d'ensemble du barrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une feuille de tôle recourbée et rivée contre un rideau vertical en palplanche ; des boulons d'ancrage reliaient même les tôles inférieures à ces palplanches et ces dernières reposaient sur un lit de béton, qui, lui-même, recouvrait un massif d'enrochement sans mortier et se soudait à un massif de béton formant mur de garde et dans lequel était noyée l'extrémité supérieure du rideau en palplanches.

La crête supérieure du barrage était constituée par une charpente métallique spéciale, qui permettait soit de laisser au milieu un déversoir de 150 mètres de longueur pour laisser passer les crues, soit d'obstruer ce déversoir et de relever le niveau du réservoir de 3m,30 pendant les périodes de sécheresse. Il suffisait pour cela de fermer, au moyen de madriers en bois superposés, les différentes ouvertures existant entre les montants verticaux qui constituaient cette charpente de crête. Aux deux extrémités du barrage, l'intervalle existant entre ces montants était d'ailleurs maintenu constamment fermé par des tôles plates.

La face aval du barrage était protégée dans le voisinage de la crête par un platelage en tôle posé sur des poutrelles qui reposaient elles-mêmes sur des poutres inclinées à 11 de base sur 7 de hauteur. Ce platelage métallique était prolongé par un plancher en bois supporté par des poutres prenant appui sur des *timber cribs* ou massifs formés de cadres de bois remplis de pierrailles, système de remblai très employé dans les constructions de ce genre aux États-Unis. Les tôles du platelage de la face amont étaient réunies entre elles, dans le sens de la longueur du barrage, par des joints à recouvrement à l'aplomb des poutres inclinées les supportant.

De distance en distance, entre chaque groupe de quatre fermes, on avait muni les tôles plates, aussi bien celles de la face aval que celles de la face amont, de joints de dilatation constitués par une sorte de soufflet obtenu par l'intercalation de cornières. Dans le sens de la hauteur du barrage, les tôles étaient réunies au moyen de couvre-joints rivés sans joints de dilatation. Tous ces joints avaient été matés comme des joints de chaudières et ne donnaient lieu qu'à de très légères fuites. Cet ouvrage contenait environ 1.700 tonnes d'acier en tôles et en profilés.

Le barrage s'est rompu dans la partie de l'ouvrage fondé sur le gravier, soit que l'ancrage réunissant les tôles inférieures de la face amont du rideau en palplanches se soit d'abord rompu, soit que l'eau se fût simplement frayée un chemin par infiltrations à travers ce rideau ou par dessous lui. Le gravier a été très rapidement affouillé, déterminant l'affaissement de la maçonnerie de pierres sèches, laquelle a entraîné avec elle la partie inférieure de l'une des poutres sur lesquelles reposent les tôles courbes constituant la face amont. La dislocation ainsi produite a occasionné la rupture du joint de dilatation voisin, et la partie métallique, sur 90 mètres de longueur, fut pliée de façon à prendre une direction parallèle au sens

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du courant. Les deux extrémités du barrage fondées sur le rocher ont bien résisté et n'ont presque subi aucune déformation.

L'usine hydroélectrique actionnée par l'eau du barrage n'a pas souffert de l'accident. Elle contient cinq groupes électrogènes de 4.000 HP chacun, produisant du courant à 70.000 volts fonctionnant en parallèle avec l'usine de Ferry Canon, située à 16 milles en amont.

86. Barrages creux en béton armé. — Le ciment armé est utilisé aux États-Unis pour la construction d'un type de *barrages creux* qui, de par sa construction même, est complètement à l'abri des *sous-pressions*. Ce type d'ouvrage consiste en une dalle qui forme le parement amont et est encastrée dans le sol. Le parement aval est également en ciment armé. Quand le barrage doit être fondé sur du gravier ou sur un terrain peu résistant, les contreforts s'appuient sur un radier en ciment armé qui répartit la pression sur toute la longueur de l'ouvrage. De distance en distance, ce radier est percé d'orifices pour la décharge des eaux d'infiltration et à l'effet d'éviter toute sous-pression. En outre, un pareil barrage coûte moins cher qu'un barrage ordinaire, et les Américains ont poussé le côté économique de ce genre d'installation en utilisant le barrage comme *bâtiment de l'usine de force motrice*.

Pour éviter l'effet destructif des glaces sur les barrages creux en béton armé, on ménage et on conserve dans la glace, le long du barrage ou de son voisinage immédiat, une coupure d'une certaine largeur dans laquelle on empêche l'eau de se congeler et qui permet à la couche solide adjacente de se dilater en toute liberté dans la direction normale à cette coupure et au barrage.

Certains barrages construits en ciment armé ont été loin de donner toute satisfaction et nous pouvons citer à ce sujet que l'on a été obligé de reconstruire.

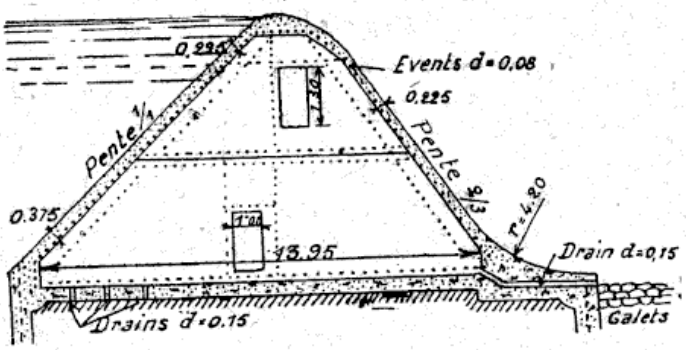


FIG. 256.

L'administration, qui a juste titre s'est préoccupé de tels accidents, paraît n'accorder confiance aux barrages en ciment armé que s'ils ne dépassent pas une hauteur de 12 mètres. A partir de cette hauteur, elle conseillerait de recourir à des ouvrages en maçonnerie.

Le barrage construit (*fig.* 256) sur une dérivation de la Juniata, en amont de Huntingdon (Pensylvanie), s'étend sur une longueur de 114m,30.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et selon la profondeur à laquelle sa base a été construite, a une hauteur variant de 6m,85 à 8m,40. Tous les 3 mètres on a disposé des cloisons perpendiculaires à la direction du barrage. Ces cloisons ont 0m,45 d'épaisseur dans leur moitié inférieure et 0m,35 dans leur moitié supérieure. Elles sont percées de deux ouvertures faisant communiquer les compartiments ainsi formés ; les ouvertures du haut sont réunies par une passerelle de service. Le radier est percé d'orifices de drainage, ce qui permet d'éviter les dégradations que la pression hydraulique pourrait produire en s'exerçant par-dessous, en amont, sur un radier aussi mince. Le parement aval est constitué par un blocage de galets de 0m,30 d'épaisseur et de 7m,30 de largeur, destiné à prévenir les affouillements en temps de crues. Le béton qui a été employé pour le corps de l'ouvrage était à 1 pour 3 et 6 (pierre calcaire cassée de 18 millimètres) ; il était à 1 pour 2 et 4 pour les parements. On n'a employé pour le renforcement que des barres cannelées de 18 millimètres.

Pour la construction on a utilisé un batardeau ordinaire ; on avait laissé pour la fin six compartiments dont le radier seul avait été construit et l'eau passait par ces six compartiments. On a alors appuyé horizontalement des poutres de 0m,20 × 0m,20 sur les cloisons, de façon à former des sortes de panneaux, maintenus appuyés contre eux par la pression et qui ont été calfatés. A leur abri, on a placé les moules en bois et on les a remplis avec le ciment apporté de l'intérieur du barrage. Les drains évacuaient au fur et à mesure les eaux d'infiltration.

En établissant les plans d'une usine hydro-électrique sur le fleuve Patapasco, près d'Ilchester (Maryland. E.-U.), on devait, en raison du niveau très considérable des hautes eaux et de l'étroitesse du lit, utiliser la totalité de sa largeur comme barrage roulant. La compagnie de constructions hydrauliques Ambursen eut l'idée, pour éviter des frais considérables, d'utiliser l'intérieur du barrage pour l'installation de l'usine (*fig.* 257).

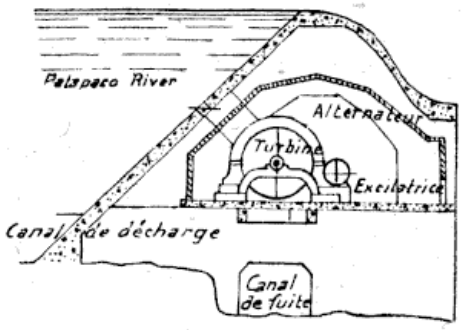


FIG. 257.

Ce barrage a une longueur totale de 67m,20, une largeur à la base de 12m,20 et une hauteur normale au-dessus du niveau aval de 8 mètres environ.

La face aval est coupée verticalement sur une certaine hauteur et percée d'une série de baies. Sur une largeur de 33 mètres, la salle des machines est divisée en deux, dans le sens de la hauteur, par un plancher sur lequel sont installés les groupes électrogènes, et qui est lui-même abrité par une couverture polygonale, pour empêcher la chute sur les machines des gouttes d'eau filtrant à travers la paroi mouillée du barrage. Le local intérieur ainsi isolé con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tient : d'une part, le tableau de distribution, d'autre part, deux groupes de turbines horizontales, système Leffel, faisant 240 tours et accouplées directement chacune à un alternateur triphasé Allis-Chalmers, de 300 kilowatts, 11.000 volts et 60 périodes, ainsi que leurs régulateurs et leurs excitatrices. L'emplacement d'un troisième groupe de même puissance que les deux précédents est actuellement disponible, et d'autres pourraient encore être installés à l'intérieur du barrage en utilisant la longueur totale de ce dernier.

On accède aux machines par une porte latérale s'ouvrant en terre ferme, du côté de l'échelle à poissons dont le barrage est pourvu. Le canal de fuite des turbines et le canal de décharge passent sous le barrage au point correspondant à la partie la plus profonde du lit de la rivière.

La barre américaine dite « crénelée » a reçu son application dans la construction des barrages creux. Un barrage-réservoir de 36 mètres de hauteur de ce genre a été construit à Johnston (Pensylvanie). Mais on a déjà établi plusieurs barrages-réservoirs, basés sur l'emploi de la barre américaine.

Ceux-ci se composent de cloisons verticales, ou contreforts en béton armé, espacées de $4^{m},50$ environ, établies sur la fondation en béton armé aussi, parallèlement à la direction du cours d'eau ; ces cloisons sont destinées à servir de points d'appui au pont ou barrage (partie amont) et au tablier (partie aval), composés tous deux de dalles en béton armé plus ou moins inclinées par rapport à la verticale.

Les différentes cloisons sont pourvues de baies et, au talon du tablier et dans chaque compartiment, se trouve un drain d'écoulement. Ce dernier permet à l'eau d'infiltration d'amont de communiquer avec l'eau d'aval et les baies sont destinées à mettre en relation l'atmosphère avec l'air contenu dans le barrage, à l'effet d'éviter que des sous-pressions se manifestent à l'intérieur de l'ouvrage. L'entretoisement longitudinal est obtenu au moyen de poutres en béton armé reliant les cloisons.

La pression maximum prévue sur la section de la base des contreforts est environ de 11 kilogrammes par centimètre carré et, avec les proportions ordinaires, le radier de fondation, s'il en existe un, permet de ne pas dépasser une pression de $0^{kg},24$ à $0^{kg},36$ par centimètre carré sur le sol. L'épaisseur dans une section quelconque de la hauteur est prévue de manière que la pression soit inférieure à 12 kilogrammes par centimètre carré.

On remédie au cisaillement horizontal dans les contreforts par l'emploi d'armatures placées parallèlement à l'inclinaison du pont. Absorbant à elles seules la plus grande partie des efforts, il ne reste guère sur le béton que $3^{kg},50$ de pression par centimètre carré.

L'effort maximum que l'on se permet, dans ces ouvrages, sur l'acier des barres crénelées, est de 8 à $9^{kg},50$ par millimètre carré. L'épaisseur du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

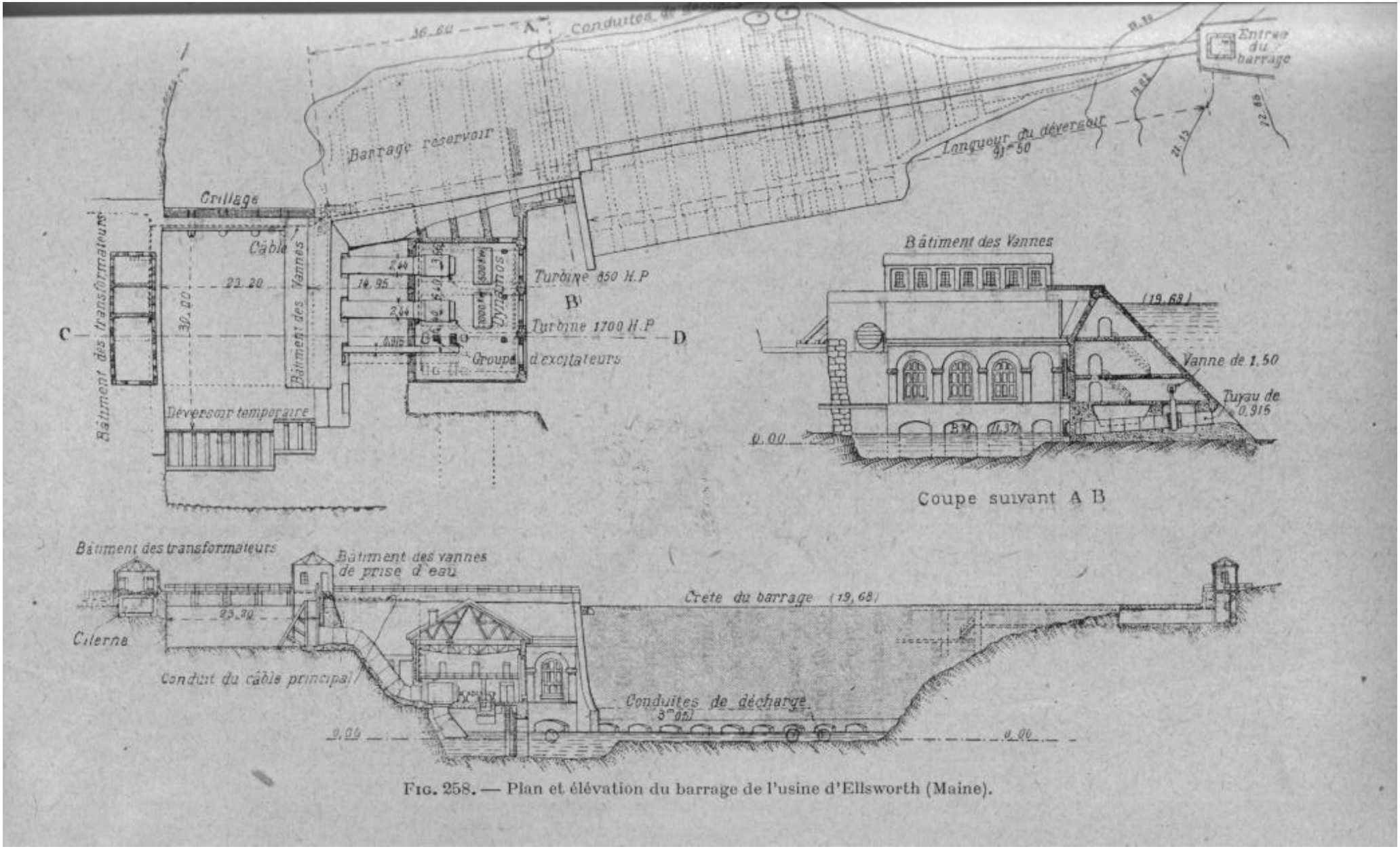


FIG. 258. — Plan et élévation du barrage de l'usine d'Ellsworth (Maine).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pont, qui est une dalle supportée aux deux extrémités et dont la portée effective est prise d'axe en axe des contreforts, varie de la base au sommet, et dans les barrages à déversoir, cette épaisseur est en moyenne de 0m,50.

L'épaisseur du tablier (partie aval) est plus faible ; elle est en moyenne de 30 centimètres. Ce tablier est également formé de dalles renforcées par des armatures.

Aux appuis des dalles sur les contreforts, les extrémités de ces dernières sont formées d'une languette avec encastrements dans lesquels se fixent les dalles, réalisant un joint de dilatation très sûr à chaque contrefort.

L'inclinaison du pont est environ de 45°, mais cet angle n'est pas de rigueur, et elle est déterminée de telle manière que le point de passage de la ligne des pressions sur la base, pour différentes hauteurs d'eau, ne sorte jamais du tiers central.

Enfin, lorsque l'eau atteint son niveau supérieur, supposé de 2 mètres au-dessus du barrage, la ligne des pressions se rapproche de très près du milieu de la base.

La (*fig.* 258) montre l'ensemble du barrage et de l'usine hydro-électrique d'Ellsworth (Maine), dont le barrage est du système que nous venons de décrire.

Le barrage proprement dit est en deux parties : un déversoir de 91m,50 de longueur et 19m,68 de hauteur et un barrage de retenue de 36m,60 de longueur et de 21m,65 de hauteur, contre lequel est construit le bâtiment des turbines. L'épaisseur des dalles du pont est de 0m,35, dans la partie la plus faible, située à 3m,66 au-dessous de la crête, et augmente jusqu'à la base où elle est de 0m,925 ; à la crête cette épaisseur est de 0m,60. Le dosage du béton dans les dalles du pont a été en volume, de 1 de ciment, 2 de sable et 4 de gravier avec cailloux de 25 millimètres, tandis que dans les contreforts, et les parties massives, le dosage fut de 1 : 3 : 6.

Le barrage a été calculé pour une hauteur d'eau maximum de 2 mètres au-dessus de la crête du déversoir ; dans ces conditions la résultante des pressions sur la base coupe la fondation environ à 2 mètres en amont à partir du milieu de cette base. La pression maximum sur les contreforts, espacés de 4m,50 d'axe en axe et d'une épaisseur de 0m,60 à la base et 0m,30 à la crête, est de 11 kilogrammes par centimètre carré. C'est aussi la pression presque uniforme sur la base entière, en raison de la position de la résultante. La compression maximum dans le béton de la dalle du pont est de 35 kilogrammes par centimètre carré et le travail de l'acier des barres crénelées est de 8kg,80 par millimètre carré.

Un pont de service est situé à l'intérieur du barrage, l'entrée se faisant dans une tour de descente située sur la rive gauche. Trois conduites de décharge se trouvent dans la partie basse du barrage ; elles sont destinées à chasser les débris qui pourraient s'accumuler dans le fond et à faire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

évacuer l'eau dans le cas de crues importantes. Les vannes de ces conduites ont 1m,50 de diamètre et elles sont accessibles de l'intérieur du barrage. La prise d'eau de l'usine se fait par une écluse située un peu plus loin que le barrage de retenue et l'eau est fournie aux turbines par des vannes manœuvrées d'un bâtiment spécial.

Selon M. E. Aragon, ingénieur des Arts et Manufactures, à qui nous devons la description du barrage que nous venons de rapporter, la barre crénelée permet d'effectuer économiquement les ouvrages en béton armé, en réduisant non seulement la main-d'œuvre mais également le tonnage des armatures. Pour expliquer la confiance justifiée que les ingénieurs américains ont dans l'emploi des barres crénelées, M. E. Aragon a donné, dans le *Génie civil* (tome III, n° 16), un tableau des essais, faits sur les diverses barres en usage, effectués au Laboratoire d'essais de matériaux de Gross-Lichterfelde-West près Berlin et que nous reproduisons ci-après :

DÉSIGNATION des ARMATURES	POUTRES A L'ÉTAT SEC			POUTRES A L'ÉTAT HUMIDE			POUTRES A L'ÉTAT	
	Compression dans le béton kilog. par cent. car.	Tension dans l'armature kilog. par mm. car.	Cisaillement kilog. par cent. car.	Compression kilog. par cent. car.	Tension métallique kilog. par mm. car.	Cisaillement kilog. par cent. car.	Sec, moyenne des coefficients d'adhérence	Humide, moyenne des coefficients d'adhérence
Ronde unie	52,9	13,9	13,7	50,8	11,4	12,9	0,221	0,213
Ransome	64,2	15,3	14,8	64,1	14,6	15,2	0,231	0,224
Thacher	73,3	19,9	16,9	19,5	19,5	16,6	0,241	0,240
Crénelée (Johnson)	79,0	19,2	19,0	19,8	19,8	18,4	0,322	0,322

Ce tableau fait bien ressortir que la barre crénelée est celle qui donne les meilleurs résultats.

Barrage en bélon armé de Guayabal à Porto-Rico. — Ce barrage sert à emmagasiner les crues de la rivière Jacaguas, en même temps que les eaux de dérivation du Toro-Negro et constitue, d'autre part, le réservoir d'alimentation du canal de Juana Diaz.

Le réservoir formé par ce barrage présente une superficie de 130 hectares avec une profondeur maximum de 30 mètres et une profondeur moyenne de 9m,50.

L'ouvrage est du type évidé Ambursen. Il comprend trois parties distinctes : 1° un barrage de 92 mètres de longueur, en terre avec mur central en béton ; 2° au droit du lit de la rivière un barrage principal en béton armé mesurant 230m,50 de longueur. La longueur totale est donc de 602m,50. La hauteur maximum du barrage, depuis le point le plus bas des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

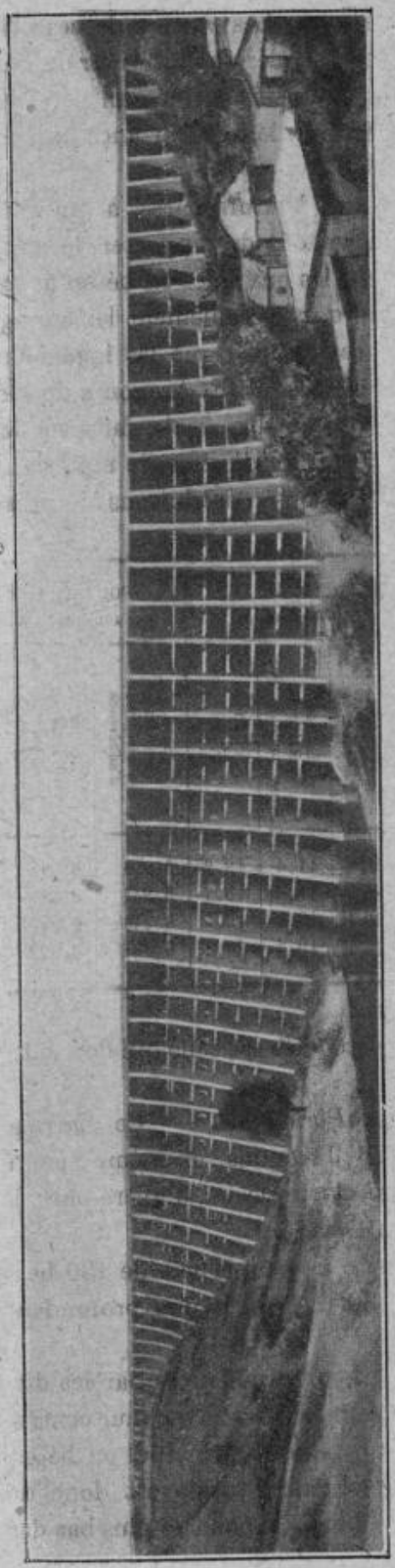


FIG. 259. — Vue du barrage en béton armé, de Guayabal (Porto Rico).

fondations jusqu'au sommet du parapet est de 42 mètres. La chaussée a 4m,60 de largeur (*fig.* 259 et 260).

Le barrage principal en béton armé comprend une série de murs ou contreforts placés perpendiculairement à la direction longitudinale du barrage. Ces contreforts espacés d'environ 5m,50 d'axe en axe, divisent la longueur du barrage en travées et présentent du côté amont un fruit très prononcé sur lequel s'appuie un tablier étanche qui supporte la charge des eaux.

L'épaisseur des contreforts diminue jusqu'au sommet en formant des redans au niveau desquels les contreforts sont reliés par des poutres en béton armé, espacées horizontalement de 7m,30. La partie haute des contreforts s'étend au delà du tablier de façon à soutenir, à l'aplomb de celui-ci, les poutres qui supportent la chaussée. Cette dernière est donc constituée par une sorte de viaduc en béton, dont les contreforts prolongés du barrage constituent les piles.

Le barrage comprend, au niveau du lit de la rivière, deux tuyaux de décharge de 0m,60 de diamètre, munis de vannes, et quatre autres de charges semblables, situées environ 2 mètres plus haut.

Le prix de revient moyen du mètre cube de béton, pour l'ensemble de l'ouvrage, a été de 14,13 dollars et il a été employé 33.745 mètres cubes.

Barrage à arches mulliples en béton armé. — En Amérique on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a été amené pour les barrages en béton armé à incliner le mur proprement dit à 45° vers l'aval, l'extrémité des contreforts n'étant plus que légèrement inclinée en sens inverse.

L'ouvrage forme une structure cloisonnée en partie, couverte par le mur de barrage proprement dit, qu'on a pu fermer parfois complètement pour abriter à l'intérieur l'usine hydroélectrique. Plus de 70 barrages ainsi cloisonnés ont été construits sous le nom de barrage Ambursen, principalement aux États-Unis. Afin de mieux utiliser la résistance du béton armé constituant le rideau du barrage, on a eu l'idée de remplacer la struc-

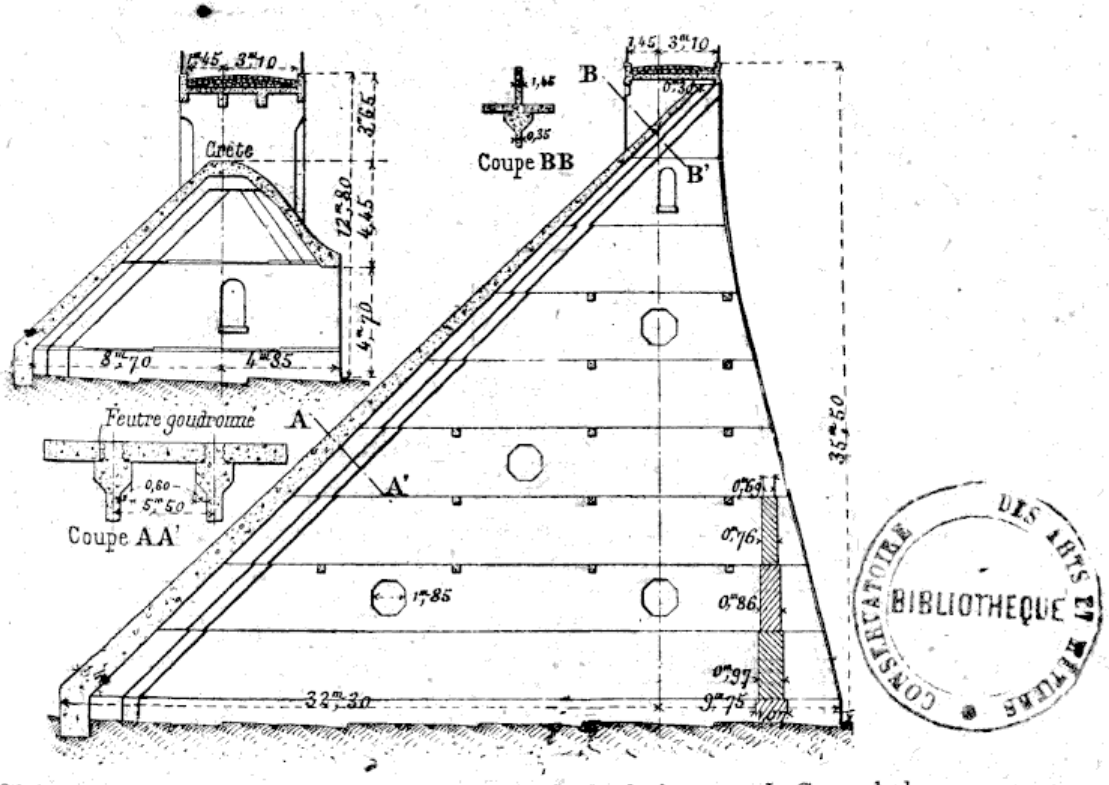


Fig. 260. — Coupe transversale de la partie principale du barrage de Guayabal.

ture plane appuyée sur deux contreforts par une structure cylindrique, ce qui correspond à substituer une voûte à un plancher. Plusieurs barrages de ce genre existent aux États-Unis (barrage de la Big Bear Walley (Californie), barrage du lac de Gem dans la Serra Nevada).

Le premier barrage de ce genre, en France, est celui qui a été établi sur la Sélune (Manche) pour former un réservoir de 36 hectares de superficie et une chute de 12 mètres, destiné à alimenter l'usine hydro-électrique de la Société des forces de la Sélune, prévue pour une puissance de 5.000 chevaux avec réserve thermique de 1.000 chevaux (*fig.* 261).

Le plan de naissance de la voûte est incliné à 45° ; il représente le parement imperméable du barrage. Le voile transversal, qui réunit entre eux les contreforts, exerce sur le sol des fondations une pression bien plus forte à l'amont qu'à l'aval, au contraire de ce qui se passe dans les barrages de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maçonnerie où il est fort difficile d'éviter les efforts de tension près du parement amont.

Dans le cas d'infiltrations abondantes, dans le voile, l'eau s'écoule entre les contreforts sans compromettre la stabilité de ces derniers.

L'ouvrage mesure 129 mètres de longueur et 15 mètres de hauteur. Il se compose de trois parties : le rideau étanche formé de voûtes inclinées à 45°, les contreforts verticaux et le radier étanche à l'amont couvrant le fond et les flancs de la vallée sur une certaine longueur contiguë au pied du radeau.

Les voûtes, au nombre de 17, ont 5 mètres d'ouverture sur lesquelles est posée directement une chape dans le voisinage de sa clé et jusqu'aux reins.

Les contreforts sont perpendiculaires au rideau et espacés de 5 mètres d'axe en axe. Leur empattement a été calculé de manière à réduire à 7 kilogrammes la pression exercée sur le roc.

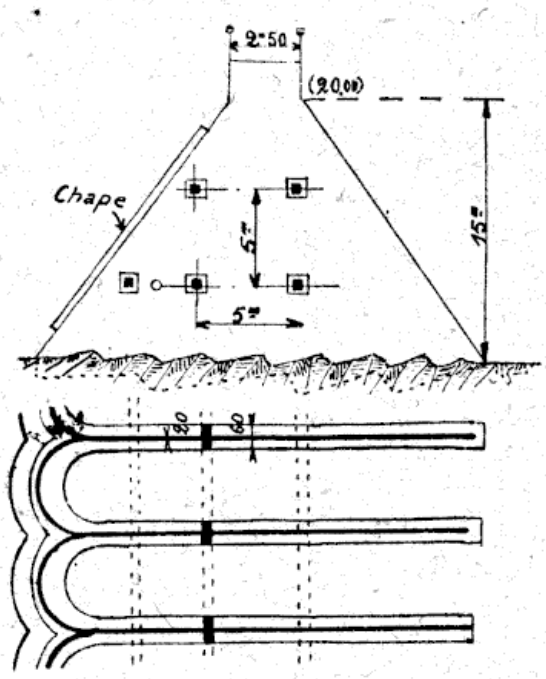


FIG. 261.

Les ouvrages de décharge consistent, d'une part, en cinq déversoirs disposés sur le côté gauche du barrage et à sa partie supérieure, fermés au moyen de vannes; d'autre part, de deux tunnels disposés à la partie inférieure pour l'évacuation des crues et fermés par deux groupes de vannes.

En outre en avant et au-dessus des vannes inférieures sont installées deux vannes circulaires horizontales, dont la manœuvre est assurée à l'aide de cylindres dont le sommet dépasse le plan d'eau et dont la partie inférieure maintient l'obturateur sur son anneau.

C'est la première fois que l'on applique ce genre de vannes à des réservoirs d'usine hydraulique. Ces vannes cylindriques sont commandées de la passerelle par des treuils.

Au sujet de l'usine nous n'en donnerons qu'une description succincte.

Le canal d'amenée à ciel ouvert n'a que 25 mètres de longueur ; il permet un débit de 20 mètres cubes et aboutit à une chambre-réservoir d'où les conduites forcées amènent les eaux à quatre turbines horizontales de 2.500 chevaux chacune.

Une réserve thermique de 1.000 chevaux complète l'installation. Cette usine dessert une région agricole jusqu'alors assez déshéritée ; elle servira

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à développer le mouvement industriel dans les régions de Saint-Malo, de Granville, d'Avranches et de Mortain.

87. **Barrages mobiles.** — En dehors de leur application à des installations de force motrice, les barrages mobiles sont nécessaires dans un grand nombre de fleuves pour les rendre navigables, en relevant leur niveau d'eau pendant l'étiage et en permettant de laisser libre la largeur du cours d'eau au moment des crues. Les modes de construction en usage sont fort nombreux.

On peut les répartir en deux groupes : ceux qui se relèvent du lit à la surface et ceux qui s'abaissent de la surface au lit.

En général, les conditions imposées à un barrage mobile sont différentes dans chaque cas, suivant la nature du cours d'eau, le niveau d'eau des crues et de l'étiage, le sable et les graviers qui sont charriés : mais toutes ces circonstances conduisent à exiger d'un barrage la réalisation des trois conditions principales suivantes : 1° lorsque la vanne est abaissée, le barrage doit être parfaitement étanche ; 2° quand la vanne est relevée, le barrage doit laisser libre passage aux crues, aux graviers et aux glaces ; 3° la manœuvre de levage de la vanne et réciproquement sa mise en place doivent pouvoir se faire avec une sécurité absolue avec l'emploi du minimum de force et avec une vitesse en rapport avec les circonstances.

La condition de libre passage des crues, des graviers et de la glace exige, lorsque le barrage est levé, qu'aucun organe important du barrage ne reste dans le lit du cours d'eau où il serait exposé aux détériorations causées par les matériaux charriés.

Sur les torrents ou les fleuves roulant des graviers et des glaces, on ne peut faire usage des *barrages à aiguilles*, car les fermettes rabattues dans le cours d'eau seraient vite usées par les apports mouvants ; d'autre part, ce système ne convient que pour les faibles retenues d'eau (1).

Les *barrages à panneaux*, pivotant autour d'un axe horizontal fixé sur un radier établi dans le lit de la rivière, ne sont pas d'un meilleur emploi que les barrages à aiguilles.

Le barrage mobile à fonctionnement automatique *Bezner* consiste à placer entre les deux panneaux contre le radier une tige guidée, reliée, en plusieurs points, par des câbles ou organes analogues, à l'extrémité libre du panneau d'aval. Par déplacement longitudinal de cette tige, on produit

(1) Les deux systèmes rivaux pour la manœuvre des aiguilles sont le système belge ou à échappement et le système français de l'aiguille à crochet. Sur les cours d'eau torrentiels des Alpes, la Durance, le Drac, la Romanche, etc., on rencontre un grand nombre de barrages volants, appelés *cabrettes*, établis entièrement en bois et dont la forme rappelle un peu celle des barrages à aiguilles. La hauteur de ces barrages est toujours assez faible et, vu la forte pente du cours d'eau, ils ne produisent aucun remous appréciable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une traction ou un relâchement des câbles ; la crête du barrage se trouve ainsi élevée ou abaissée. Les organes de commande comportent les dispositifs placés entre les panneaux et l'appareil de levage (treuil) installé sur la rive. Les dispositifs mobiles placés entre les panneaux peuvent être montés sur la crête de tout barrage fixe. A l'extrémité libre du panneau d'aval sont fixés des câbles qui passent ensuite sur des galets et sont reliés à la tige par leur autre extrémité. Tant que cette tige est maintenue par le treuil, le barrage est fermé ; si la tige est rendue libre, le barrage s'ouvre et se pose à plat contre le radier. La tige est automatiquement libérée à l'aide d'un flotteur ou d'un dispositif analogue, à choisir suivant les circonstances. Pour la fermeture du barrage, la tige est attirée par le treuil ; cette fermeture peut, du reste, être totale ou partielle.

Des dispositifs de barrage d'après le système Bezner ont été appliqués à Markersdorf, près Chemnitz, où le fleuve a environ 20 mètres de largeur ; la hauteur du barrage est de 35 centimètres environ. Un autre barrage a été construit à la station électrique de Haigerloch sur une longueur de 22 mètres et une hauteur de barrage de 50 centimètres.

Le *barrage à rideaux*, système Cameré, supprime ces inconvénients : il permet d'obtenir des retenues de 4 à 5 mètres de hauteur et ne laisse en temps de crue aucun organe dans le fleuve. Cependant le seuil en ressaut, que ce système nécessite, expose celui-ci à l'usure des graviers charriés et à un entretien difficile. L'ouvrage consiste, en principe, en des rideaux à lames de bois, formant barrage, qui se déroulent sur des supports verticaux s'appuyant, d'une part, en bas, sur un seuil en ressaut dans le lit de la rivière, et d'autre part, en haut, sur un axe fixé sous un tablier métallique.

Lors des crues, on retire les rideaux en les enroulant à l'aide d'un treuil et on relève ensuite les supports en les rabattant sous le tablier, de façon qu'il ne reste aucun organe en dehors des piliers en maçonnerie qui peuvent être espacés.

Ce système a reçu de nombreuses applications et nous en décrivons quelques-unes dans le Tome II de cet ouvrage.

Le barrage de Folton (Calédonie) porte à son sommet une immense fermeture à volets ou barrage en planches, de 55 mètres de longueur, manœuvré par des appareils hydrauliques. Quand ce barrage additionnel est levé, il donne un surcroît de débit de 10 millions de mètres cubes d'eau dans le bassin supérieur. Le barrage proprement dit a 140 mètres de longueur, et le sommet des culées est à 30 mètres au-dessus des fondations.

La (*fig.* 262) représente un barrage muni de vannes à bascules, installé sur la rivière de Kalamazaco (États-Unis). Une seule vanne suffit pour évacuer les eaux ordinaires et les eaux de crues, les autres vannes complémentaires ne servant qu'en cas de rupture d'autres barrages situés en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

amont. La manœuvre de ces vannes se fait du haut de la passerelle, au moyen d'un treuil que l'on déplace sur une voie pour la commande des autres vannes.

Le corps du barrage-déversoir est constitué par des cribs en charpente

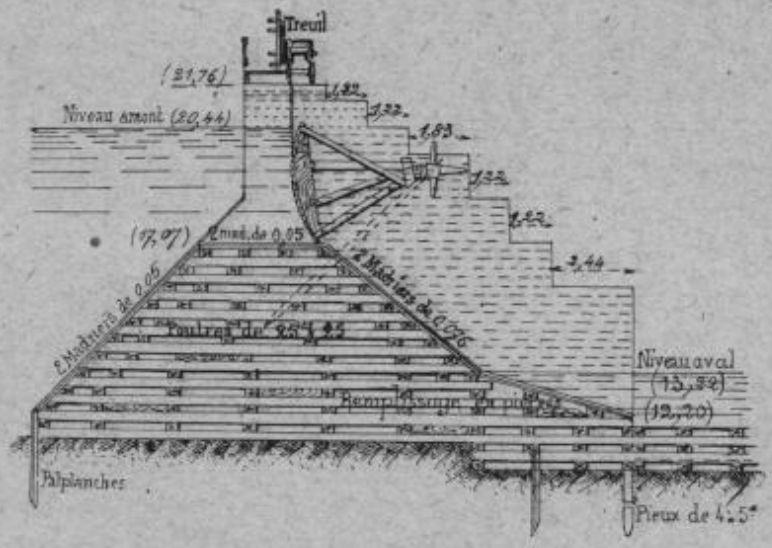


FIG. 262.

remplis d'enrochements dont les interstices sont garnis de gravier. L'étanchéité est obtenue au moyen de revêtements en planches sur chaque face des cribs. Vu la perméabilité du sous-sol, deux lignes de palplanches, qui entourent l'ouvrage de tous côtés, redescendent jusqu'à une profondeur de $2^m,45$ au-dessous du niveau inférieur des cribs. Pour éviter les affouillements qui pourraient se produire à l'aval du déversoir, on a installé une sorte de plate-forme en charpente, de 30 mètres de longueur et de 6 mètres de largeur, qui est retenue au moyen de chaînes attachées aux cribs.

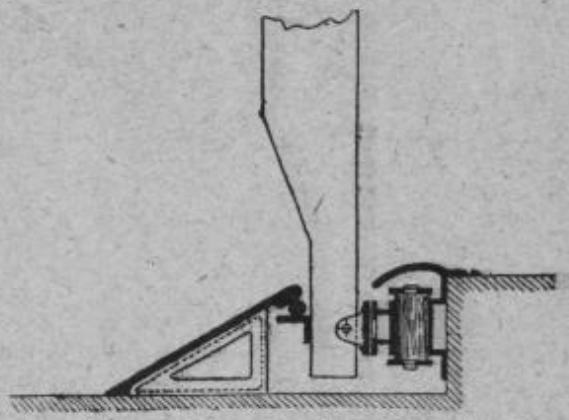
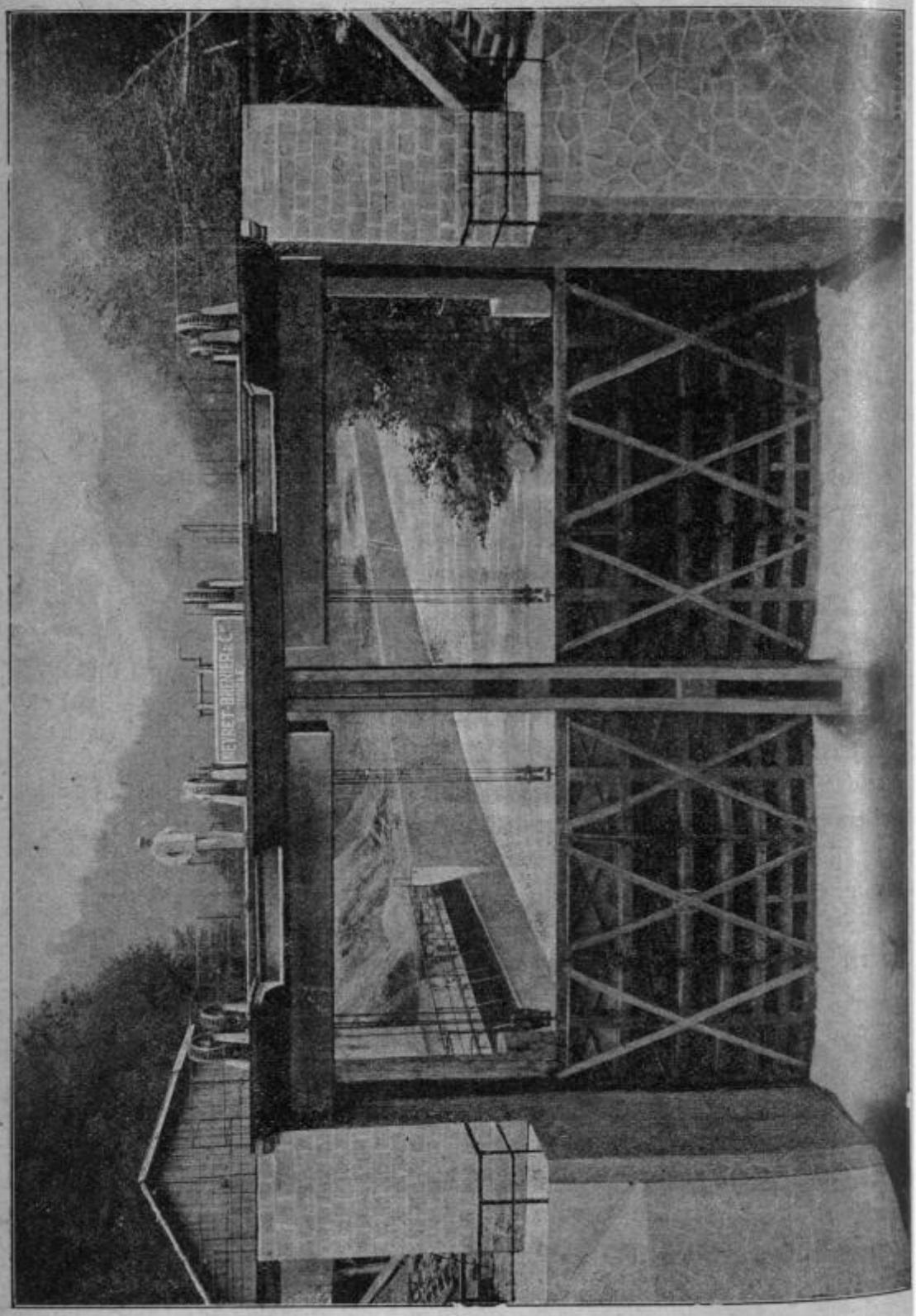


FIG. 263. — Shéma des dispositifs Stoney.

Les barrages à *grandes vannes verticales*, s'appuyant sur des culées ou sur des piliers en maçonnerie, sont très souvent employés. Pour diminuer le frottement des vannes, suspendues par des chaînes, on les fait rouler sur des trains de galets et, pour réduire l'effort de levage, on équilibre en partie le poids de la vanne à l'aide d'un contrepoids. Ce système a été adopté en particulier dans les barrages de Chèvres (§ 298)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tambours de roulement fixés aux extrémités du cylindre et portant les

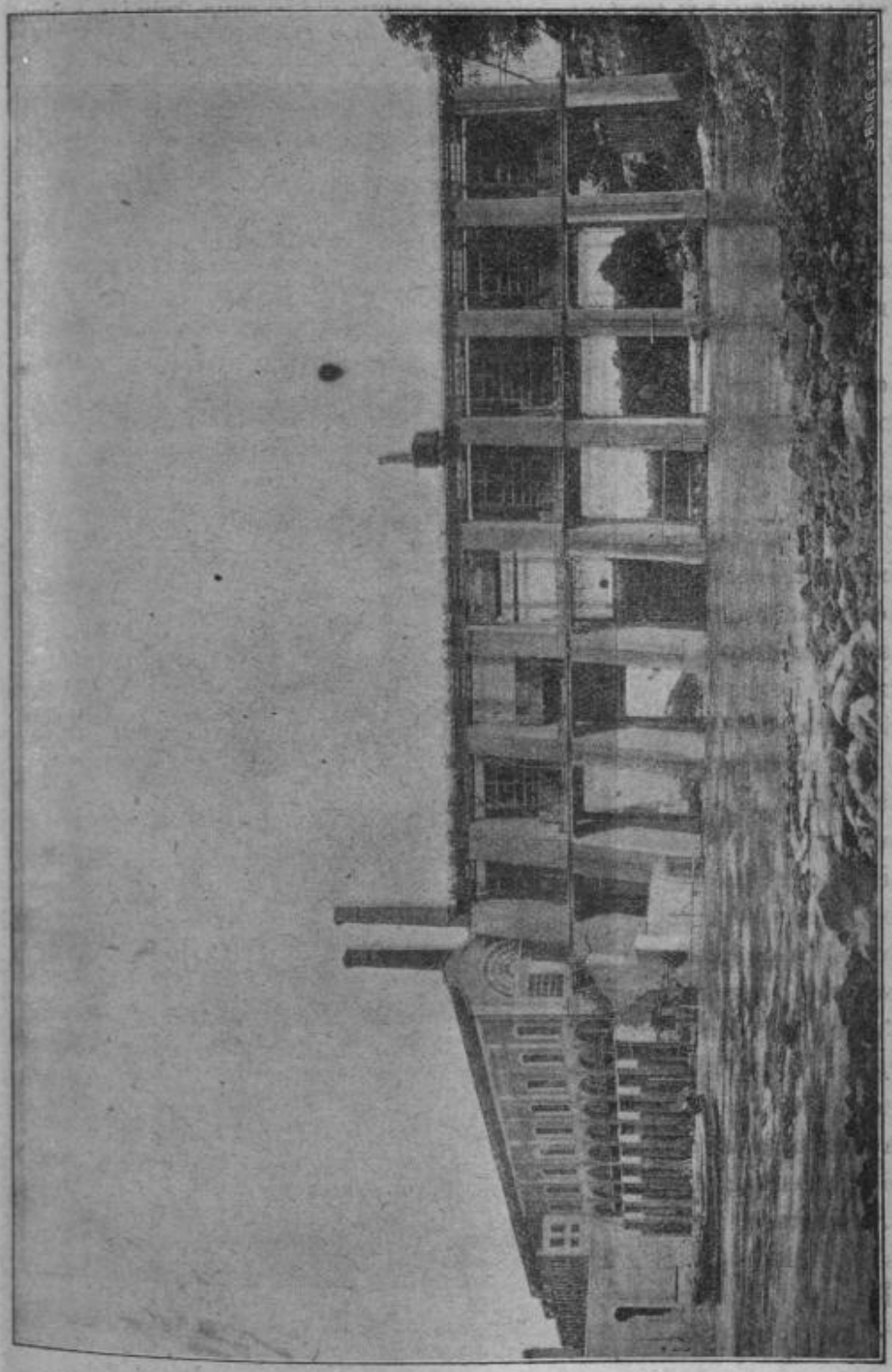


Fig. 267. — Barrage de l'usine hydro-électrique de Tuilières (Dordogne) (Neyret, Beylier, constructeurs).

couronnes de roulement, les couronnes dentées et les couronnes sur lesquelles s'enroulent les câbles ou chaînes de manœuvre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Barrage de l'usine de Saint-Julien-de-Maurienne (Savoie). — Ce barrage de 30 mètres d'ouverture réalise une retenue de 3 mètres de hauteur pour les eaux ordinaires et de 5 mètres pour les plus fortes eaux, pour une puissance à l'usine de 18.000 HP (6 groupes électrogènes de 3.000 HP). L'étanchéité du joint latéral est obtenue à l'aide d'une collerette en tôle mince fixée sur le barrage et garnie, à l'amont, de bois qui s'appliquent exactement sur les murs des bajoyers. Cette collerette sert, en outre, de coursier, servant de déversoir des eaux passant par-dessus le barrage. Le profil longitudinal des parties du barrage en contact avec le seuil est arrêté d'après les déformations qui résultent d'une part de la flexibilité du poids propre de l'appareil et d'autre part de la dilatation inégale du cylindre sous l'action de la chaleur solaire.

Le libre passage des eaux de crues, graviers et glaces est assuré par l'écoulement du trop-plein du bief supérieur par dessous le barrage et, parce que une fois le barrage relevé hors de l'eau, il ne reste plus aucun obstacle dans celle-ci tendant à réduire la section de passage. Il en résulte une chasse et une aspiration simultanées

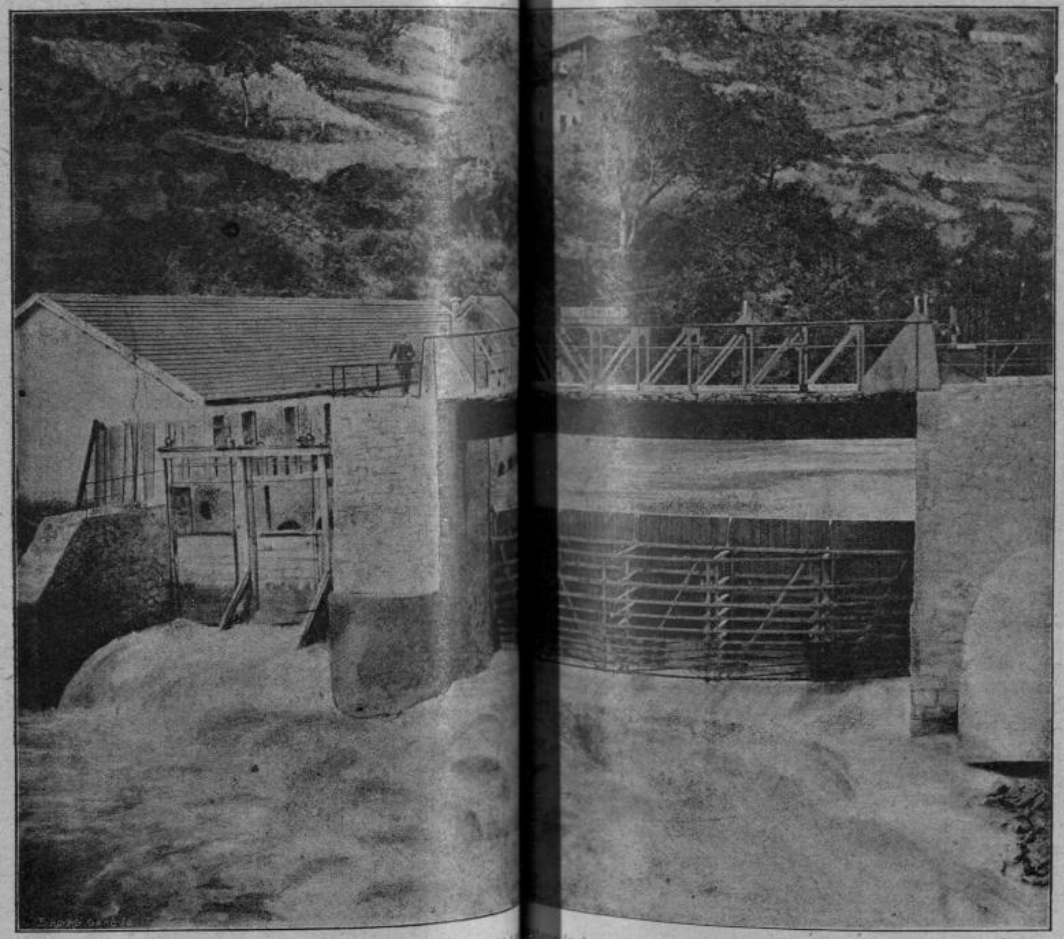


Fig. 268. — Vanne-barrage de 16 mètres de portée et [illegible] (usine de la Praz) (Neyret et Brenier, constructeurs).

de toutes les matières à proximité du barrage qui nettoient le lit de la rivière.

Pour réduire les résistances au mouvement pendant les manœuvres, le déplacement du barrage se fait par roulement des extrémités sur les bajoyers, en ayant soin d'équilibrer toutes les forces par rapport au point de contact. L'écoulement de l'eau par le barrage s'effectuant par dessous et sous charge, un faible déplacement du barrage en modifie considérablement le débit et le réglage se produit de cette façon avec le minimum de travail possible pour la manœuvre.

Les chemins de roulement sont droits sur toute leur longueur et inclinés à 70° sur l'horizontale, de sorte que la stabilité sous la poussée de l'eau du bief d'amont est tout à fait satisfaisante. Pour éviter la tendance du soulèvement par les crues qui émergent le barrage dans le bief d'aval, on a percé le cylindre de trous sur toute sa surface aval ; il s'ensuit que l'eau du bief inférieur n'a qu'un effet insignifiant au point de vue de l'allégement de l'appareil mobile, qui ne peut plus être soulevé par les crues introduites dans le barrage même.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La caractéristique du barrage de Saint-Julien-de-Maurienne, construit par la maison A. et H. Bouvier, de Grenoble, est l'emploi d'un rideau inférieur cycloïdal et l'adoption d'une seule commande mécanique à une

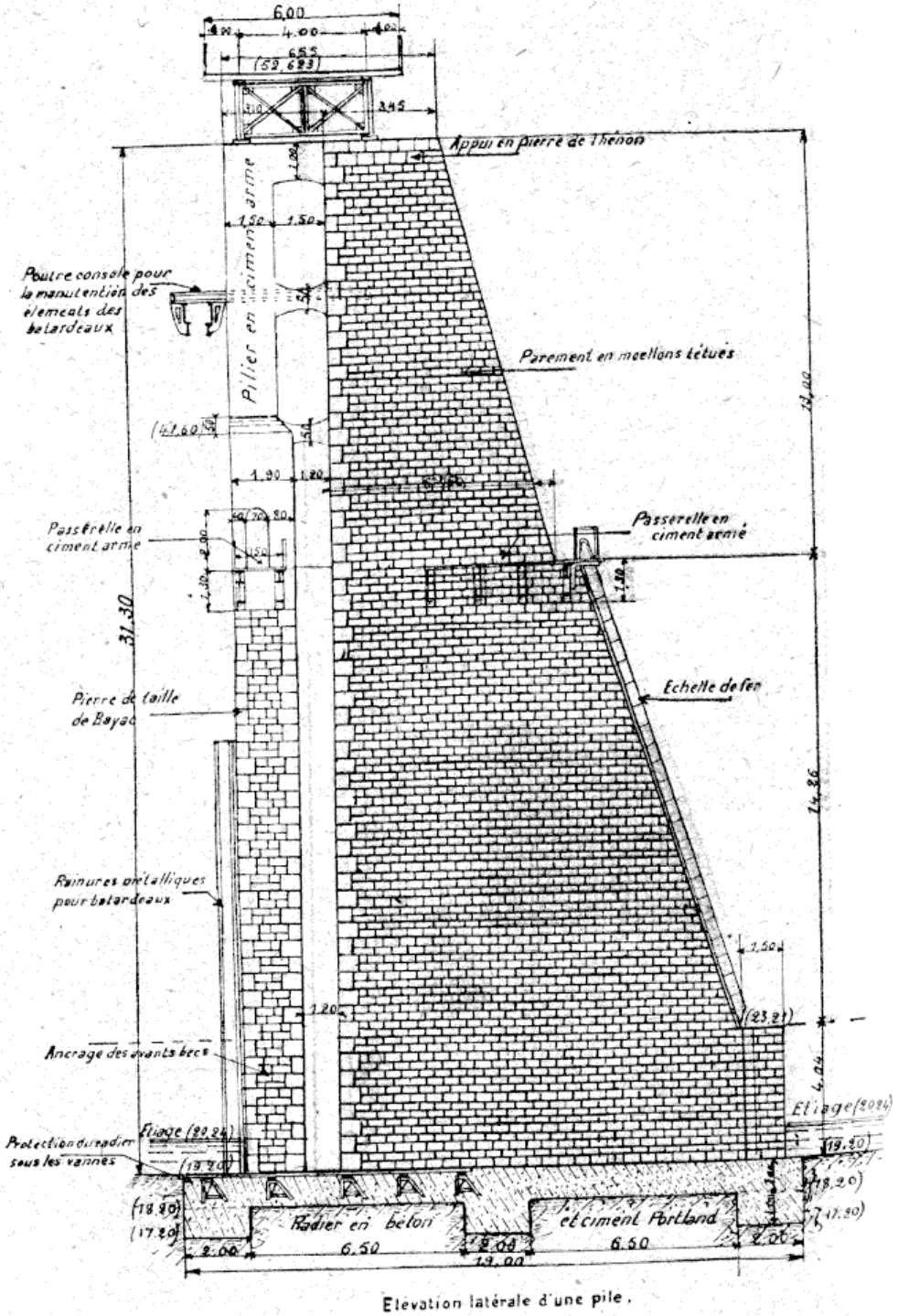


FIG. 269. — Barrage de l'usine hydroélectrique de Tuilières.

des extrémités du barrage, l'autre étant assujettie dans sa crémaillère par la pression latérale, en même temps que son mouvement est assuré par l'emploi d'une chaîne galle de retenue s'enroulant sur l'extrémité du bar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rage en sens inverse de la chaîne de commande sur le bout opposé. La chaîne de retenue est attachée à une de ses extrémités sur la circonférence du barrage et de l'autre à un point fixe à la partie supérieure de la maçonnerie.

L'adoption du rideau cycloïdal consiste surtout à réduire les efforts dans les manœuvres.

Les (*fig.* 272 et 273) montrent l'équilibre des forces agissant sur le type de barrage réalisé à Saint-Julien-de-Maurienne d'après l'étude spéciale qu'en a donnée M. Rousselet dans le *Bulletin technologique* (août 1909).

Les avantages réels du barrage à rideau cycloïdal sont : réduction du diamètre du cylindre-barrage, possibilité de relever les chaînes de ma-

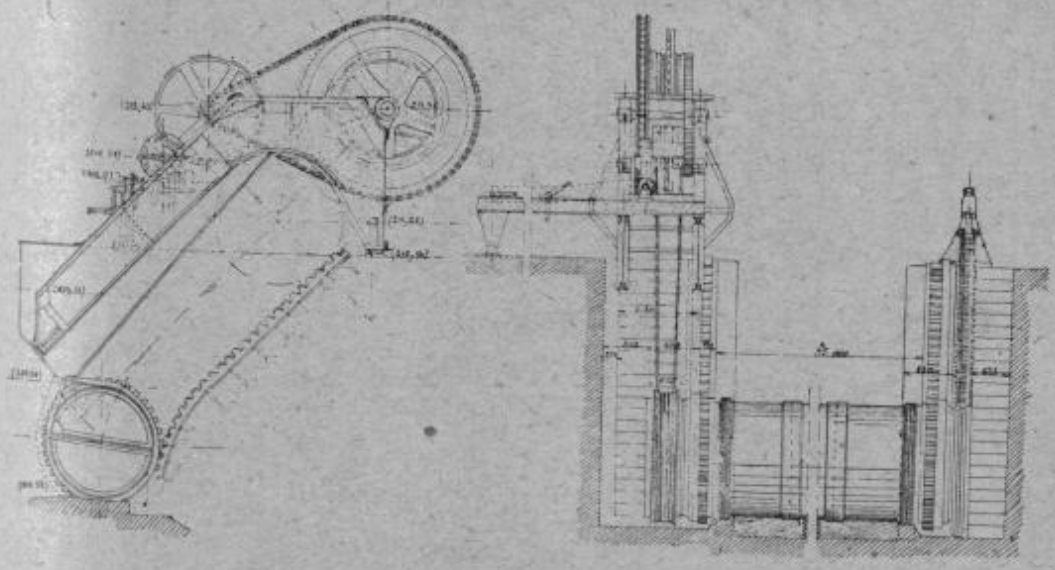


Fig. 270.

nœuvre du barrage, passant autour de celui-ci, au-dessus des eaux ordinaires du bief d'aval, afin d'en permettre plus facilement la visite de toutes les parties, suppression de la tendance au soulèvement du cylindre-barrage par la charge des eaux d'amont.

La charge à laquelle le barrage de Saint-Julien-de-Maurienne a à résister se compose du poids propre du cylindre, soit 60 tonnes, plus le poids propre de l'eau, soit 4,7 tonnes, moins la poussée verticale de l'eau de bas en haut égale à 19 tonnes ; il reste donc pour la résultante des forces verticales, 45,7 tonnes. D'après les données, citées plus haut, la poussée horizontale de l'eau a pour valeur :

$$\frac{3^2}{2} \times 30 = 135 \text{ tonnes.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

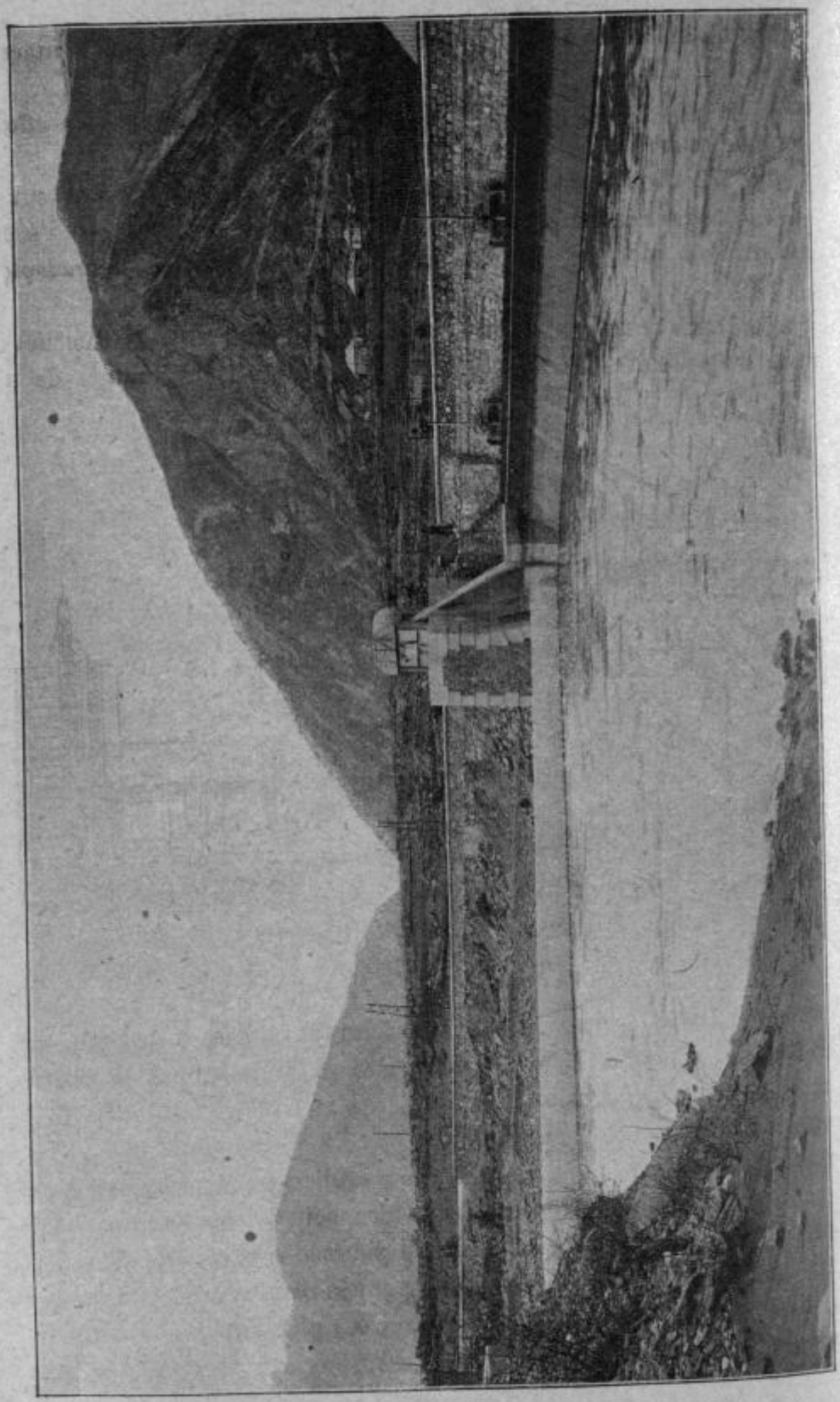


FIG. 271.—Barrage cylindrique de l'usine de Saint-Julien-de-Maurienne. Le barrage vu d'amont vient d'être descendu dans le lit de la rivière.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite, la résultante générale est :

$$\sqrt{\overline{45,7}^2 + \overline{135}^2} = 143 \text{ tonnes},$$

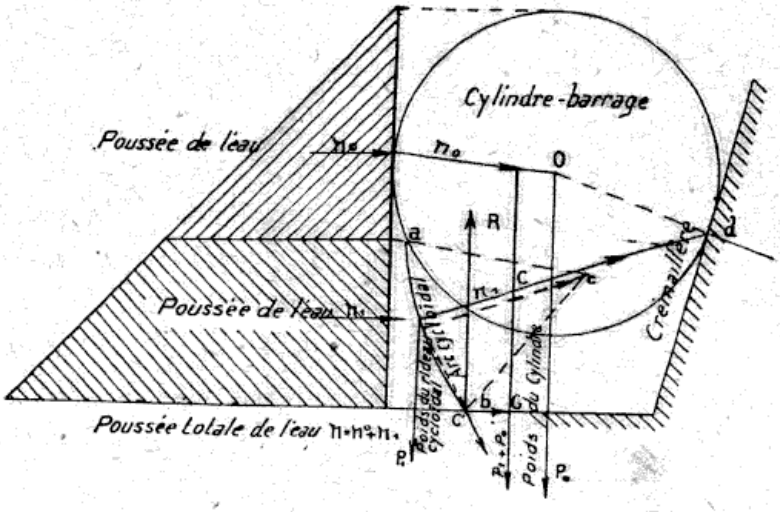


Fig. 272. — L'arc de cycloïde repose sur le seuil.

soit par mètre courant du barrage :

$$\frac{143}{30} = 4{,}767 \text{ tonnes}.$$

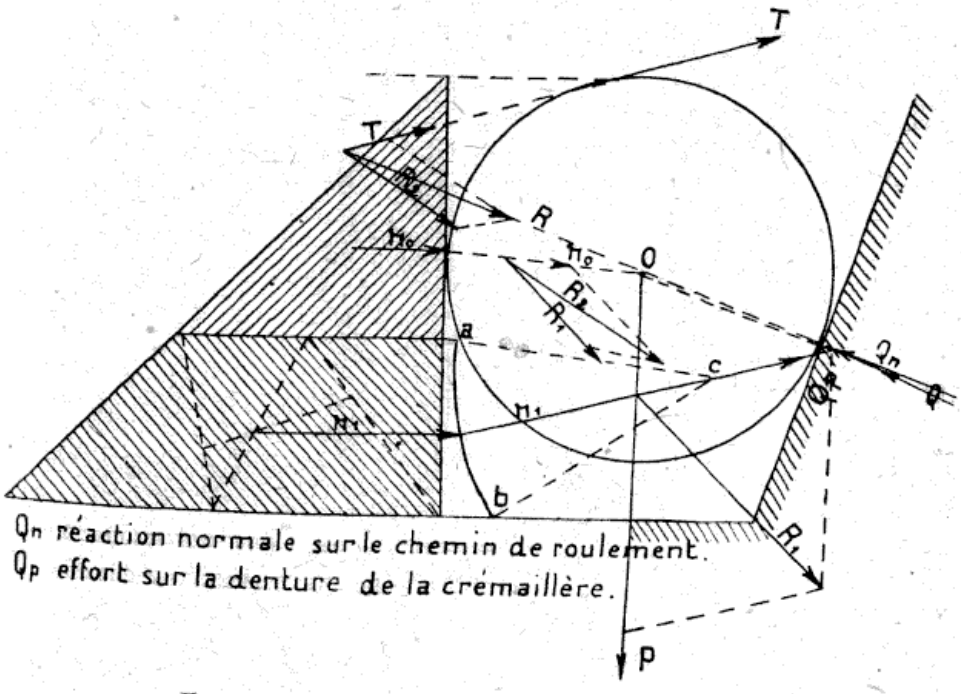


Fig. 273. — L'arc de cycloïde a quitté le radier.

Dans le cas où l'eau s'élève jusqu'à 2 mètres au-dessus du cylindre, ce dernier chiffre atteint une valeur de 11,1 tonnes.

Les calculs montrent que les taux de fatigue du métal sont : à la flexion,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

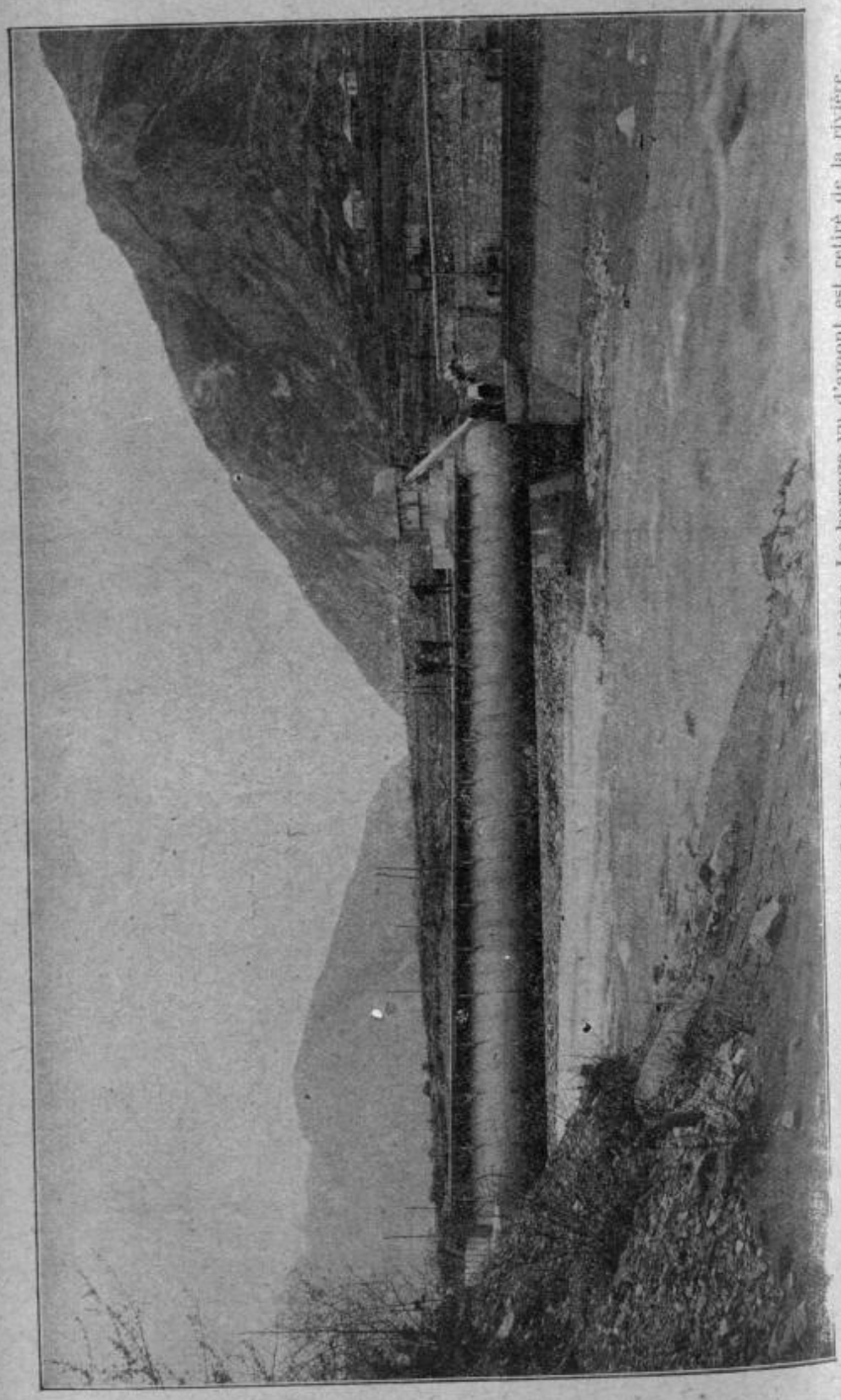


FIG. 274. — Barrage cylindrique de l'usine de Saint-Julien-de-Maurienne. Le barrage vu d'amont est retiré de la rivière.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour le cas des crues, 1 t/cm²,759 ; à la torsion, 0 t/cm²,025 ; flexion et torsion combinées, 0 t/cm²,755 ; au cisaillement, 0 t/cm²,067, et au cisaillement et torsion combinés, 0 t/cm²,259.

Le treuil de manœuvre (*fig.* 275) est à une seule noix et à engrenages cylindriques. Le treuil agit sur une chaîne de levage attachée d'un bout sur la circonférence du barrage, l'autre extrémité au delà du pignon-galle de commande comportant l'attache du contrepoids. Une chaîne de sécu-

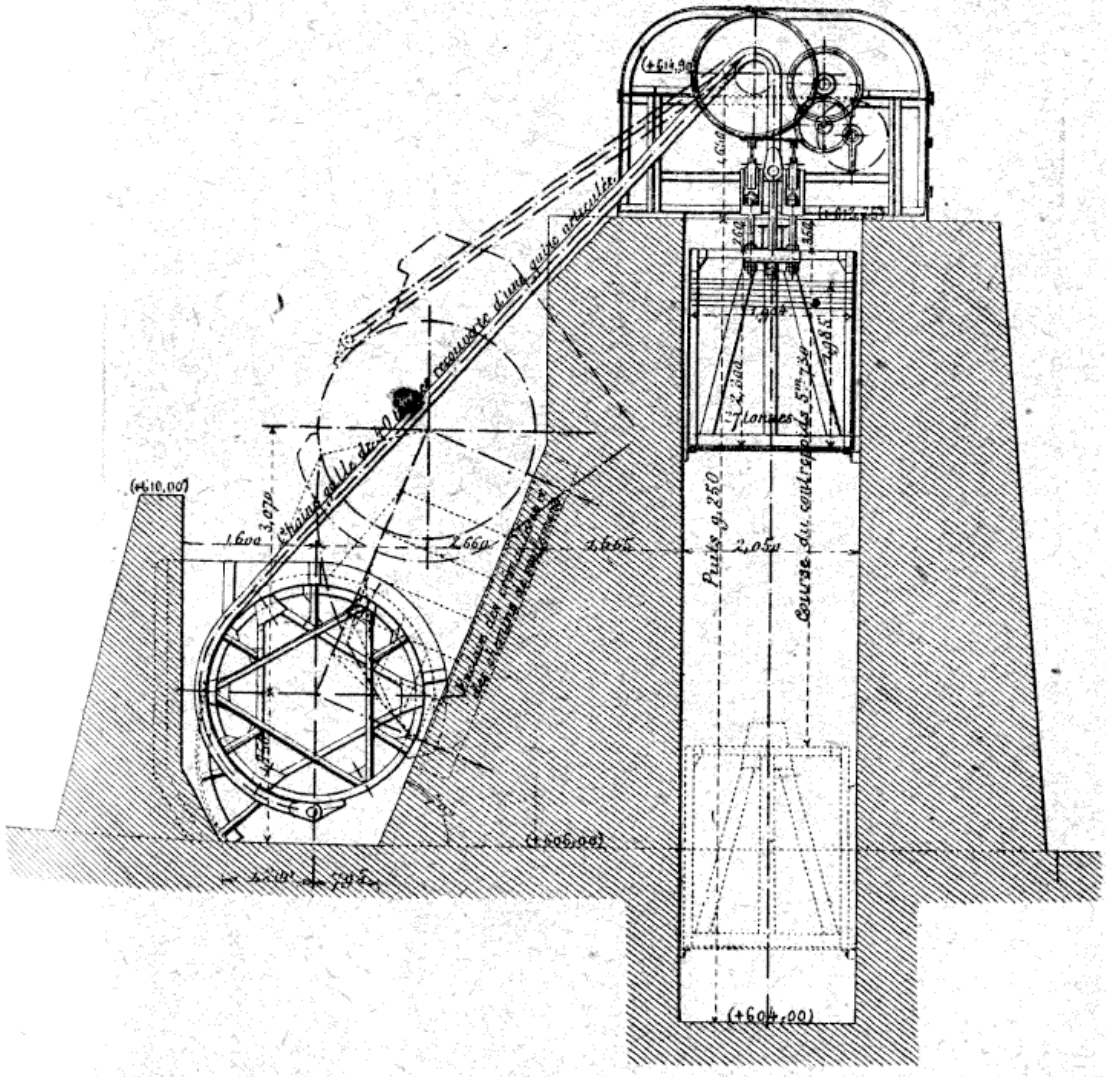


FIG. 275.

rité est en outre enroulée autour de l'extrémité opposée du barrage dans le sens opposé à celui de la chaîne motrice ; cette dernière s'enroule autour du barrage lorsque celui-ci opère son mouvement de montée et se déroule lorsqu'il descend, son extrémité supérieure étant ancrée au haut du chemin de roulement sur les maçonneries. Le contrepoids d'équilibre du barrage possède un dispositif qui permet de détacher la chaîne de suspension du cylindre et du contrepoids dans le cas où elle nécessiterait une réparation ou pour toute autre cause.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

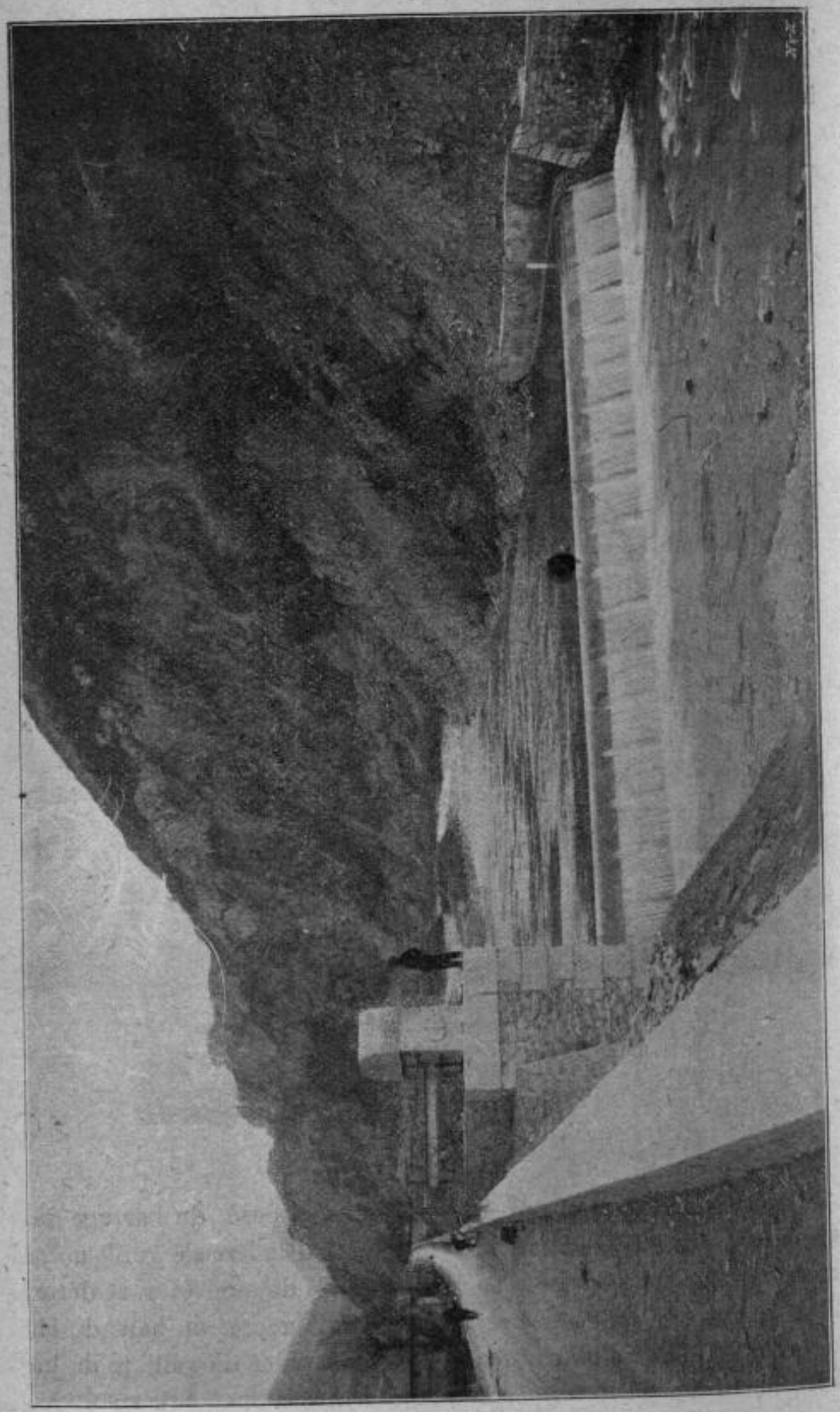


Fig. 276. — Barrage cylindrique de l'usine de Saint-Jean-de-Maurienne. Le barrage en service est vu d'aval.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Barrage à deux cylindres concentriques à manœuvre automatique. — M. Rousselet a fait breveter une disposition de barrage mobile cylindrique comportant deux cylindres concentriques, le cylindre intérieur devant servir de centrage des couronnes de roulement sur les bajoyers. La longrine forme joint avec le barrage, de façon que le contact s'effectue sur la génératrice passant par l'extrémité d'un rayon incliné à 45° sur l'horizontale, côté amont du barrage dont la (*fig.* 277) donne la disposition schématique.

Le cylindre intérieur roule seul par ses extrémités sur les bajoyers pendant le mouvement d'ouverture et de fermeture du barrage, cette ouverture s'effectuant en soulevant le barrage au-dessus du lit de la rivière.

Ce barrage cylindrique est en partie équilibré par un ou deux contrepoids constants et aussi par un contrepoids variable (*fig.* 278), consistant en un bac en tôle que l'on remplit d'eau à volonté pour obtenir la prépondérance de la somme des contrepoids sur le poids du barrage, ce qui permet de relever ou d'abaisser celui-ci par le simple remplissage ou par la vidange du contrepoids variable, un treuil avec frein étant disposé sur le mécanisme pour régler à volonté le mouvement de montée ou de descente. Ce treuil permet encore de manœuvrer le barrage à la main, dans le cas où il ne serait pas possible d'emplir le bac formant contrepoids variable.

Ce système de barrage ne comporte pas de crémaillères, mais seulement les chemins de roulement qui leur sont accolés. La sécurité réside simplement dans l'emploi de chaînes suspendues et de retenue de grande force.

L'inventeur attribue aux barrages à deux cylindres les avantages suivants : résistance constante au mouvement de montée, équilibrage par un contrepoids dans les deux sens de manœuvre, absence de pression des eaux du bief d'amont sous le cylindre, disposition de la partie inférieure des chaînes de manœuvre toujours au-dessus des eaux du bief d'aval, sauf pendant les crues.

Types divers. — Le système de barrage mobile à hauteur d'eau réglable, imaginé par M. F. Camagni, se compose de panneaux inclinés dont la partie basse est à l'aval. Ces panneaux peuvent tourner autour d'axes horizontaux passant dans des supports fixés sur les deux rives et qui sont appuyés par le bas sur un seuil au fond du cours d'eau. Un certain volume d'eau, venant d'amont dans un coffrage et par des ouvertures percées dans le panneau, sert de lest à ce dernier, formant ainsi un poids qui fait équilibre à la poussée de l'eau d'amont quand le niveau est au maximum permis. Lorsque le niveau a tendance à s'élever, la poussée devient prépondérante et le panneau se soulève, perdant un peu de sa charge d'eau et laisse ainsi passer l'eau d'amont entre son bord inférieur et le seuil.

La (*fig.* 279) montre les types de barrages mobiles installés sur la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

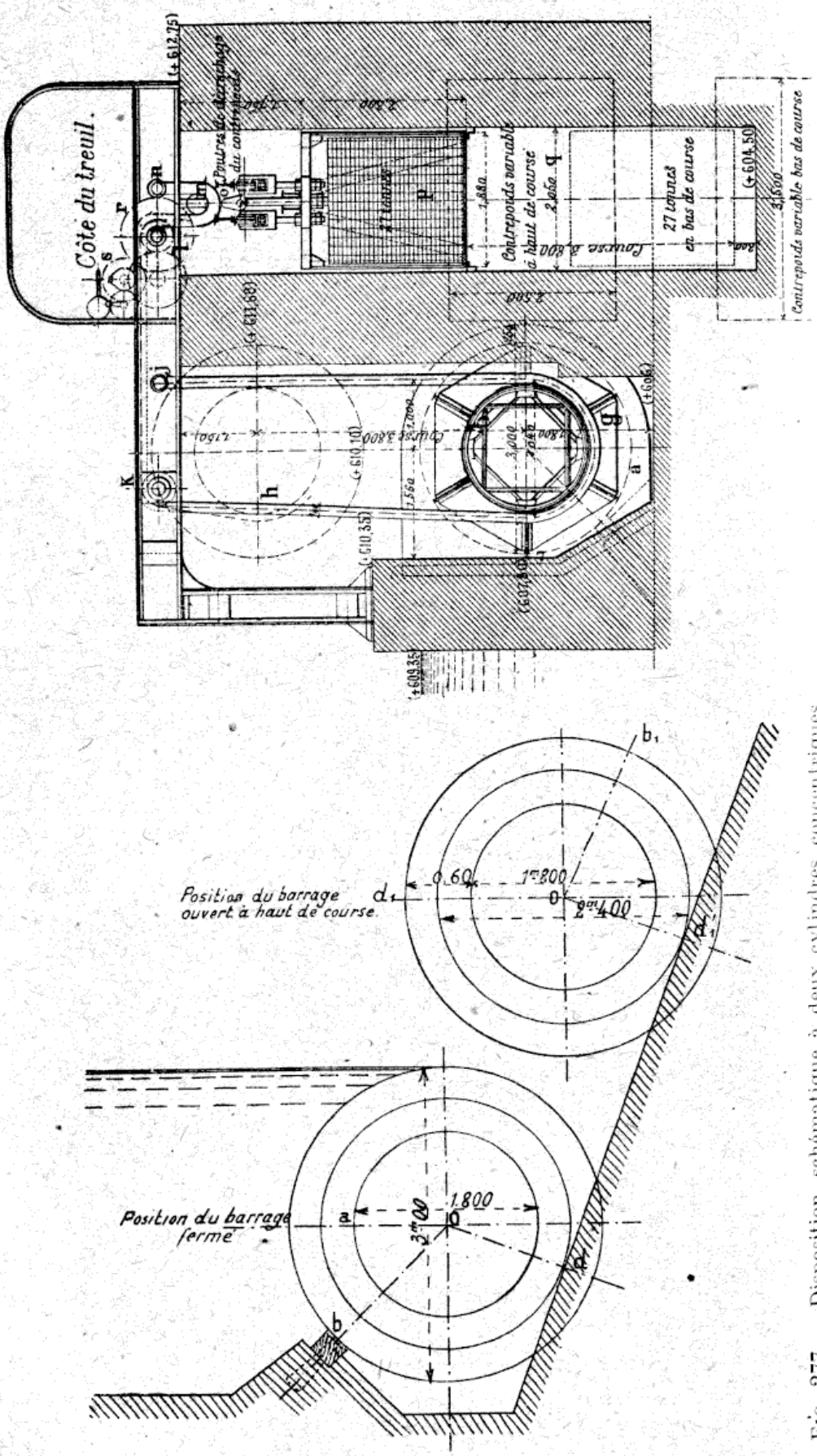


Fig. 277. — Disposition schématique à deux cylindres concentriques avec longrine d'appui à l'aval du barrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mohawk River. Ils sont constitués par des rouleaux, fixés sur leurs faces aval et portés par des montants ordinaires articulés à charnières et se rabattant du côté aval des passerelles. Ces montants sont écartés de 15 pieds et les panneaux supportés par leurs milieux en faisant saillie de 7,5 pieds de chaque côté. Ils sont manœuvrés par des chaînes et des treuils, à la façon ordinaire.

M. Wolfschütz, professeur à l'École technique supérieure de Brün, a étudié un barrage mobile entièrement métallique pour rivière canalisée, présentant certaines particularités. La retenue qu'il opère est de $3^m,50$ au-dessus du niveau normal et la cote maximum des crues est de 6 mètres.

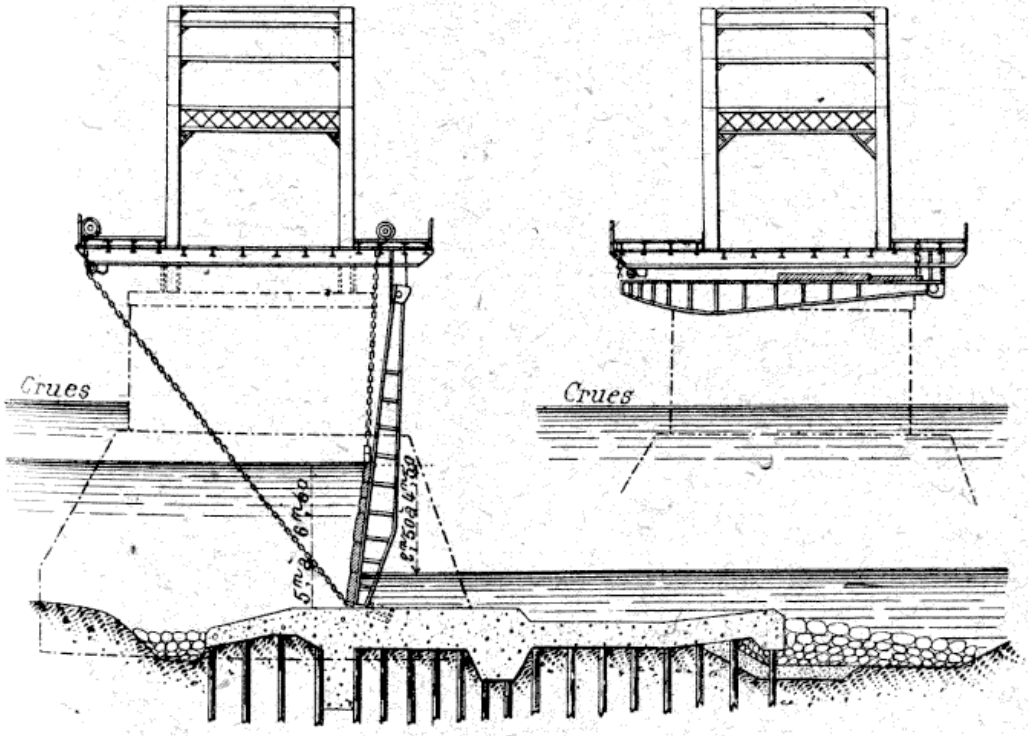


FIG. 279.

Le corps de l'ouvrage est constitué par un caisson creux de 25 mètres de longueur, solidement établi en fers profilés et en tôles, hermétiquement fermé et que l'on peut à volonté, au moyen d'une pompe, remplir d'eau ou vider. Il a une hauteur telle qu'il permet la résistance exigée et il est suspendu à l'extrémité de deux poutres métalliques formant balanciers et mobiles autour de deux axes tournant dans des paliers, installés dans des niches ménagées dans les bajoyers. Il est équilibré par deux contrepoids en béton, fixés chacun à l'extrémité libre de l'un de ces balanciers.

Le barrage peut momentanément être ouvert pendant les fortes crues ou pour laisser passer de grandes masses de glaces charriées. Pour produire la dénivellation, on remplit d'eau le caisson qui entraîne son contrepoids et descend jusqu'au niveau du lit de la rivière. Pour le relever, il suffit de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vider de nouveau cette eau et alors les poutres reposent sur deux tampons à ressort.

Pour éviter la congélation, par les temps froids, de l'eau introduite dans le corps de l'ouvrage, et pour assurer le fonctionnement en tout temps, on fait manœuvrer alors l'appareil par un moteur disposé *ad hoc*.

La (*fig.* 280) représente un type de barrage mobile conçu par M. Karl Hromas et pouvant opérer une retenue de 3 mètres. Le corps du barrage est constitué par deux poutres en caisson superposées A et B, dont la première A repose sur le lit de la rivière. Ces poutres sont munies à chacune de leurs extrémités de deux galets roulant sur deux rails courbes C, fixés sur les bajoyers. Elles sont équilibrées chacune par deux contrepoids entièrement indépendants et mobiles dans les puits verticaux Q pratiqués dans chacun de ces bajoyers. Enfin les rails C sont presque verticaux à leur partie inférieure et presque horizontaux à leur partie supérieure. Les

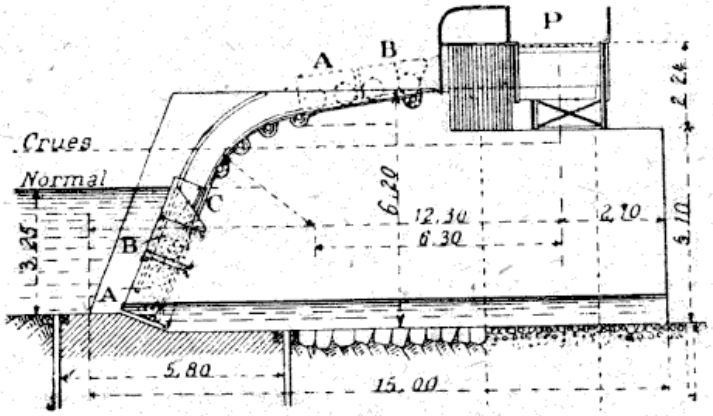


FIG. 280.

deux caissons A et B sont commandés chacun indépendamment par un treuil à bras ou à moteur, installé au milieu d'une passerelle P.

Le système de barrage mobile étudié par MM. Prasil frères, de Prague, a son corps constitué par une poutre de section triangulaire, suspendue à deux balanciers, équilibrée par des contrepoids, et terminée à l'avant par une surface cylindrique donnant toujours une poussée résultante passant par l'axe de rotation du barrage, qui est aussi celui de cette surface. D'autre part, le corps du barrage supporte une série de montants courbes, fixes ou rabattus à volonté, entre lesquels sont rivées des tôles formant des panneaux, ces derniers déterminant le niveau de la retenue. La manœuvre du barrage et des panneaux mobiles se fait à bras au moyen d'un treuil en temps normal, et de deux treuils auxiliaires que l'on embraye pour lever le barrage en cas de forte résistance de sa part, par suite d'une gelée par exemple. Les chaînes de ces treuils auxiliaires s'attachent directement au corps du barrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La chaîne du treuil principal est ancrée par ses deux bouts en deux

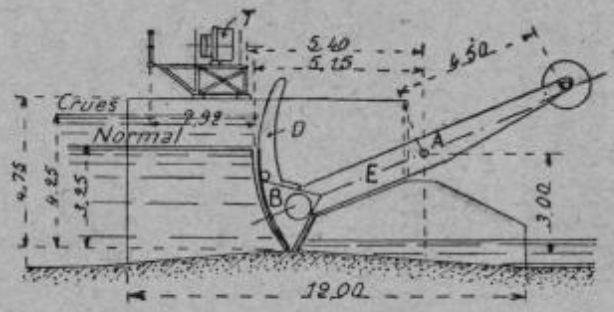


Fig. 281.

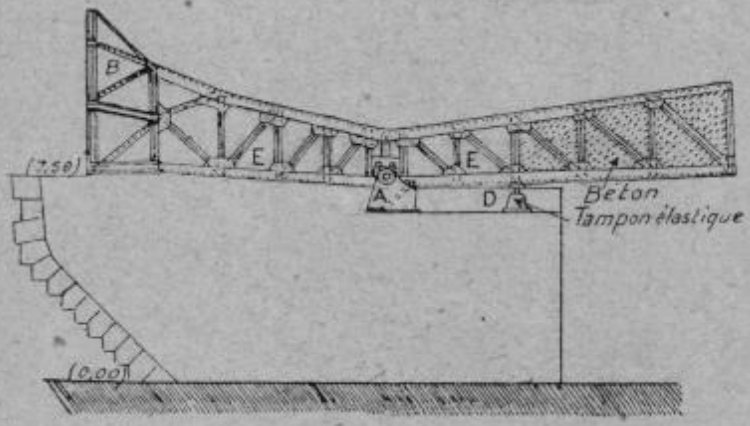


Fig. 282.

points du corps et passe sur les galets de guidage disposés de telle sorte

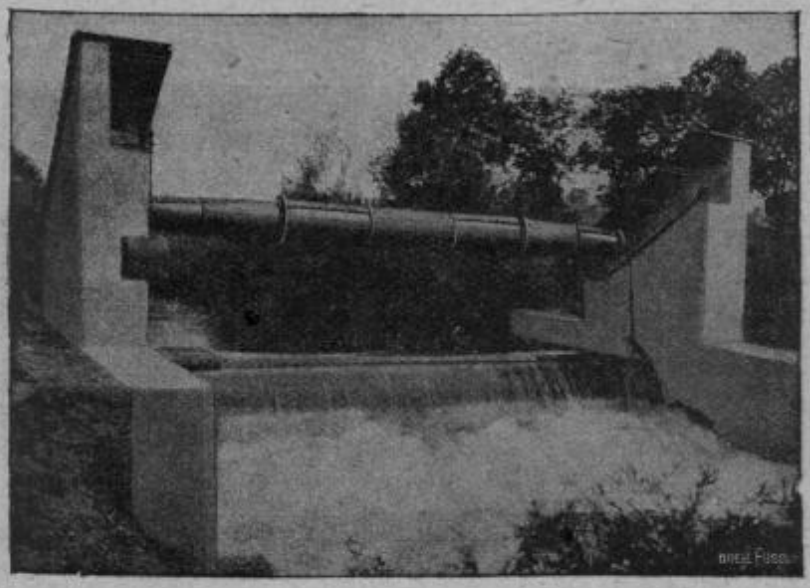


Fig. 283. — Barrage automatique Singrün.

que cette chaîne suffit à elle seule pour provoquer la levée ou l'abaisse-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

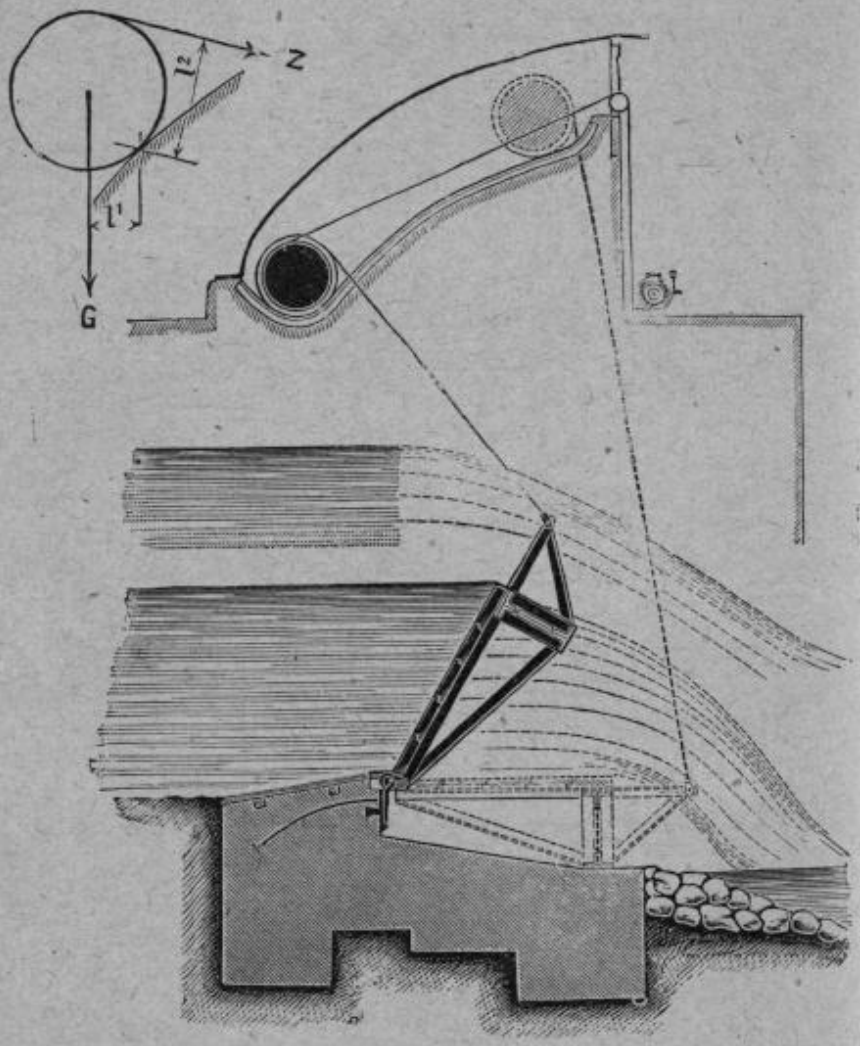


FIG. 284.

FIG. 285. — Barrage automatique servant en même temps de vanne de flottage (Installé à Grafeneau, Bavière).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et d'Avignonet (§ 317) (*vannes Stoney*) (*fig.* 263 à 265) et de Tuilières (304) (*fig.* 266 à 269).

Barrages à cylindres. — Partant de la conception de substituer le frottement de roulement sur les piliers au frottement de glissement, M. Kœchlin, ingénieur à Mulhouse, a imaginé un barrage mobile constitué par un corps cylindrique roulant sur des rails ou crémaillères établis aux deux extrémités dans la maçonnerie, système qui a reçu quelques applications en Allemagne et dans les Alpes (usine de Saint-Michel de Maurienne sur l'Arc, chute de 3 mètres).

Un de ces engins, installé à Schweinfurt sur le bras principal du Main, consiste en un cylindre en tôle de 2 mètres de diamètre et 37 mètres de longueur [le barrage a 35 mètres de portée et 2 mètres de hauteur (*fig.* 270)] qui s'engage de 1 mètre de chaque côté dans la maçonnerie.

Les conditions d'établissement étaient particulièrement difficiles ; l'ouvrage devait, en effet, pouvoir être ouvert assez rapidement pour laisser passage aux débâcles subites de glace, et refermé également sans perte de temps, pour ne pas entraver le fonctionnement de l'installation de force motrice.

Le cylindre est hermétiquement clos, pour ne pas laisser pénétrer l'eau, sauf dans deux chambres établies dans sa partie supérieure, aux deux extrémités. Lorsque le niveau aval ne dépasse pas 1 mètre au-dessus du radier du barrage, le poids du cylindre est suffisant pour contrebalancer la poussée. Si, au contraire, le niveau aval dépasse cette limite, l'eau pénètre dans les deux chambres d'eau, et la stabilité est assurée.

Le barrage est garni, à ses deux extrémités, de couronnes dentées qui roulent, au levage, sur des crémaillères à diverses inclinaisons et disposées dans la maçonnerie des culées. De cette manière l'effort de levage devient presque constant puisque, à mesure que la poussée de l'eau diminue, la pente de la crémaillère décroît également. Cette manœuvre se fait d'un seul côté de la rivière.

Le rouleau est toujours appuyé contre la crémaillère et n'a jamais tendance à la quitter.

Par surcroît de précautions et pour empêcher que le cylindre ne vienne à rouler en bas, s'il arrivait, par suite d'un accident, à manquer les dents de la crémaillère, une chaîne à maillons est fixée, d'une part autour de la couronne du cylindre, d'autre part à la maçonnerie, sur la rive opposée à celle où se trouve le mécanisme. Elle est enroulée en sens inverse de celle du levage et sa longueur réglée au moyen d'un dispositif interposé au point d'ancrage. Elle se déroule quand le cylindre descend et s'enroule autour de lui pendant la montée.

Les deux câbles de manœuvre sont enroulés sur des tambours concentriques et de même diamètre, garnis de flasques s'adossant les unes aux autres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

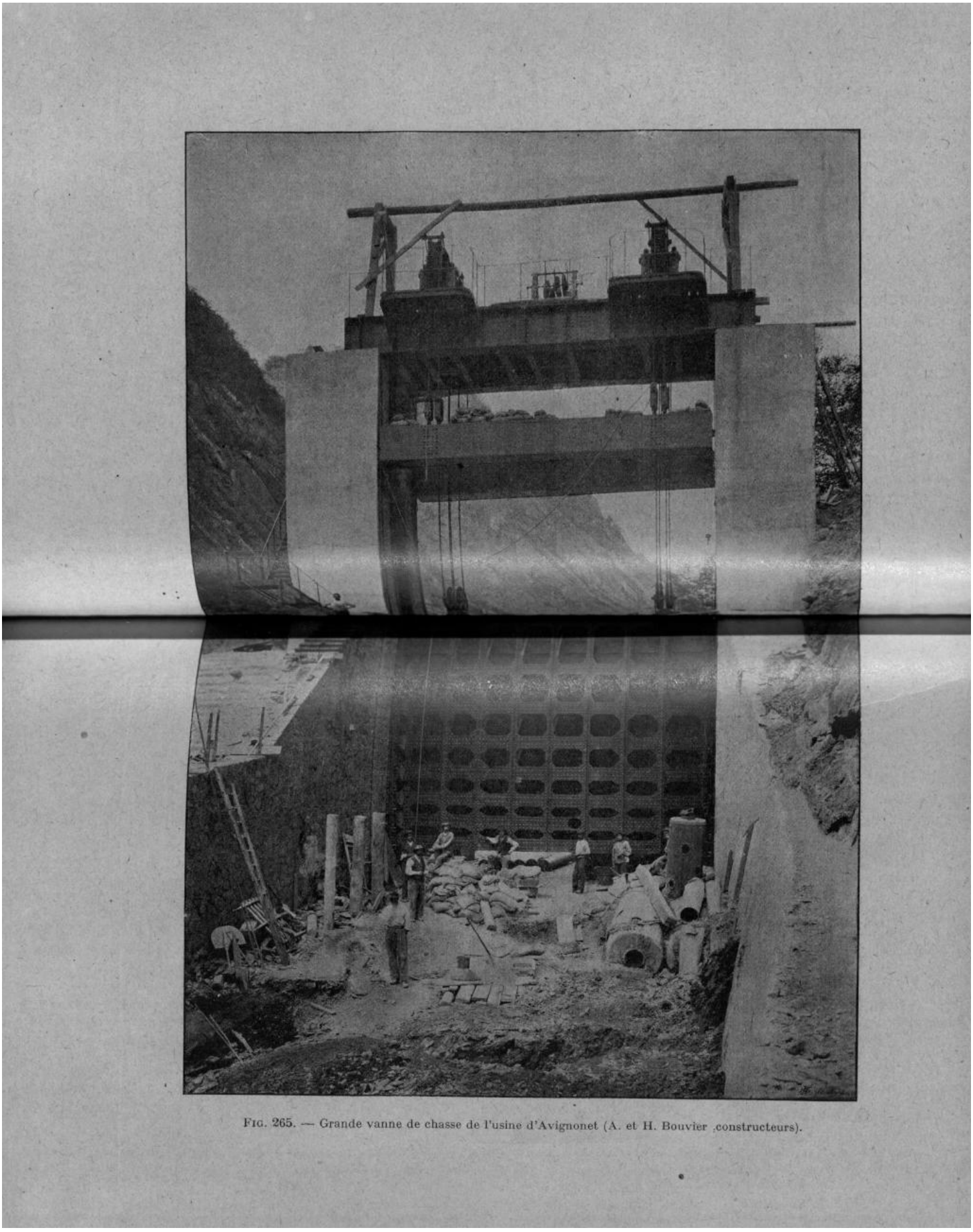


Fig. 265. — Grande vanne de chasse de l'usine d'Avignonet (A. et H. Bouvier ,constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour enlever le cylindre au-dessus du niveau des hautes eaux, un moteur électrique actionne le treuil, lequel possède en outre quatre manivelles qui permettent de faire ce levage à la main (1).

L'étanchéité du barrage est assurée, sur le seuil, par une traverse en chêne contre laquelle le cylindre vient reposer et, sur les côtés, par des bandes de tissu de chanvre fixées à des consoles des deux côtés du barrage et venant épouser les découpures de la maçonnerie.

Dans les barrages établis sur la Bode, à Niembourg, le corps de retenue se compose d'un bouclier qui opère la fermeture proprement dite du barrage, d'un cylindre porteur auquel est fixé le bouclier et qui transmet les pressions exercées à des disques placés aux extrémités ; ceux-ci reportent à leur tour les efforts sur les voies de roulement et sur les maçonneries et permettent en même temps, au moyen de roues montées sur leur axe,

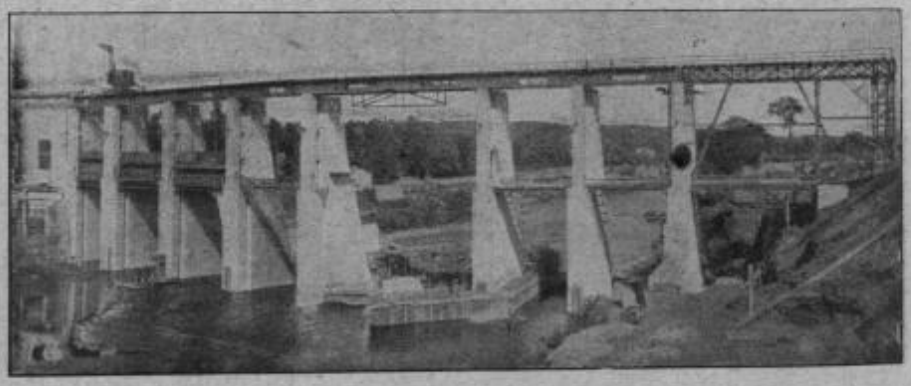


FIG. 266. — Barrage de Tuilières, pendant sa construction.

d'effectuer le mouvement de roulement. Latéralement, l'étanchéité est obtenue au moyen de tôles minces qui sont assujetties aux extrémités des tambours et parallèlement aux parois des maçonneries, de façon à fermer complètement tout joint au droit des encoches pratiquées dans les murs. Leurs bords libres sont garnis de lattes en bois que la pression de l'eau presse contre les maçonneries.

M. René Kœchlin a étudié un projet de barrage à rouleaux cylindriques sur le Rhin, à Mulhouse, permettant d'avoir à l'étiage une retenue de 3 mètres. La largeur du Rhin à Mulhouse est de 180 mètres.

Les barrages à tambour peuvent s'appliquer aux grandes hauteurs de retenue. Pour une très grande hauteur de retenue et une faible portée, la vanne peut se composer d'un tablier plan ou bombé dirigé vers l'amont, d'un cylindre de plus faible diamètre supportant les efforts de torsion et de flexion et relié convenablement au tablier amont, et enfin de deux

(1) *Calcul et construction des appareils de levage*, par E. PACORET. Encyclopédie scientifique des aide-mémoire. Gauthier-Villars, éditeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment du barrage, suivant le sens dans lequel on l'enroule. Ce treuil unique est suffisant dans les circonstances normales, parce que la résistance à vaincre est indépendante de la hauteur de l'eau en amont du barrage.

L'installation doit comporter en outre des moyens d'évacuation pour l'eau entrée accidentellement par un point défectueux dans l'intérieur du corps.

Barrages à secteur. — Ce genre de barrage mobile, fréquemment employé aux États-Unis, consiste en des panneaux mobiles en forme de secteur cylindrique en tôle pleine maintenus par une charpente appropriée et susceptibles d'être abaissés et relevés en tournant autour de leur axe horizontal, pour créer une retenue d'eau de quelques mètres de hauteur (*fig.* 281 et 282).

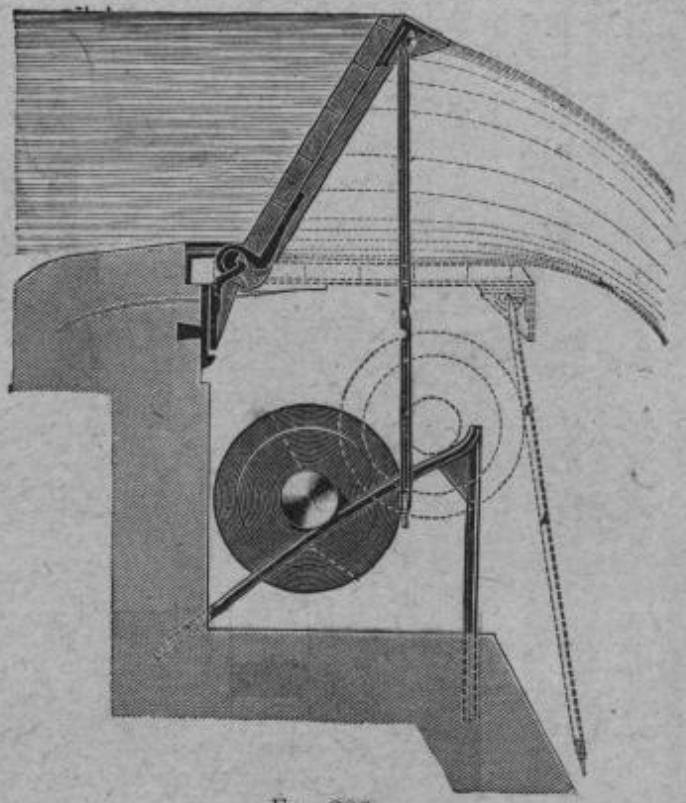


Fig. 286.

Dans la construction des barrages-déversoirs de Lockport (Illinois E.-U.), les crêtes mobiles sont constituées par des secteurs creux dont l'angle au centre est de 45°. Ces secteurs tournent autour de l'axe horizontal fixe du cylindre dont ils font partie, axe qui est placé sur la face aval du barrage. Quand la crête mobile est abaissée, le secteur est logé dans un évidement de même forme du barrage et la crête de celui-ci est un plan horizontal de 7m,80 de largeur (rayon du secteur). Quand il est levé à sa hauteur maxima, il est tout à fait sorti de cet évidement ; la crête est alors une arête qui est de 5m,50 plus haute que la crête précédente.

On a installé sur le Landwehrkanal (Allemagne), côte à côte, un barrage à secteur et un barrage à cylindre du genre de celui décrit plus haut, fonctionnant tous deux dans les mêmes conditions. L'étanchéité est bonne dans les deux cas ; mais le relevage prend deux fois plus de temps pour le cylindre que pour les secteurs. Pendant les gelées, la manœuvre a été difficile pour l'un et l'autre appareil. M. Eger, qui a eu l'occasion de faire des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

études comparatives de ces deux genres de barrages, conclut en faveur des barrages à secteur, les considérant plus avantageux à divers points de vue.

Des dispositifs ont été indiqués pour maintenir la constance du niveau réglementaire en amont d'un barrage. A cet effet la maison Singrün pro-

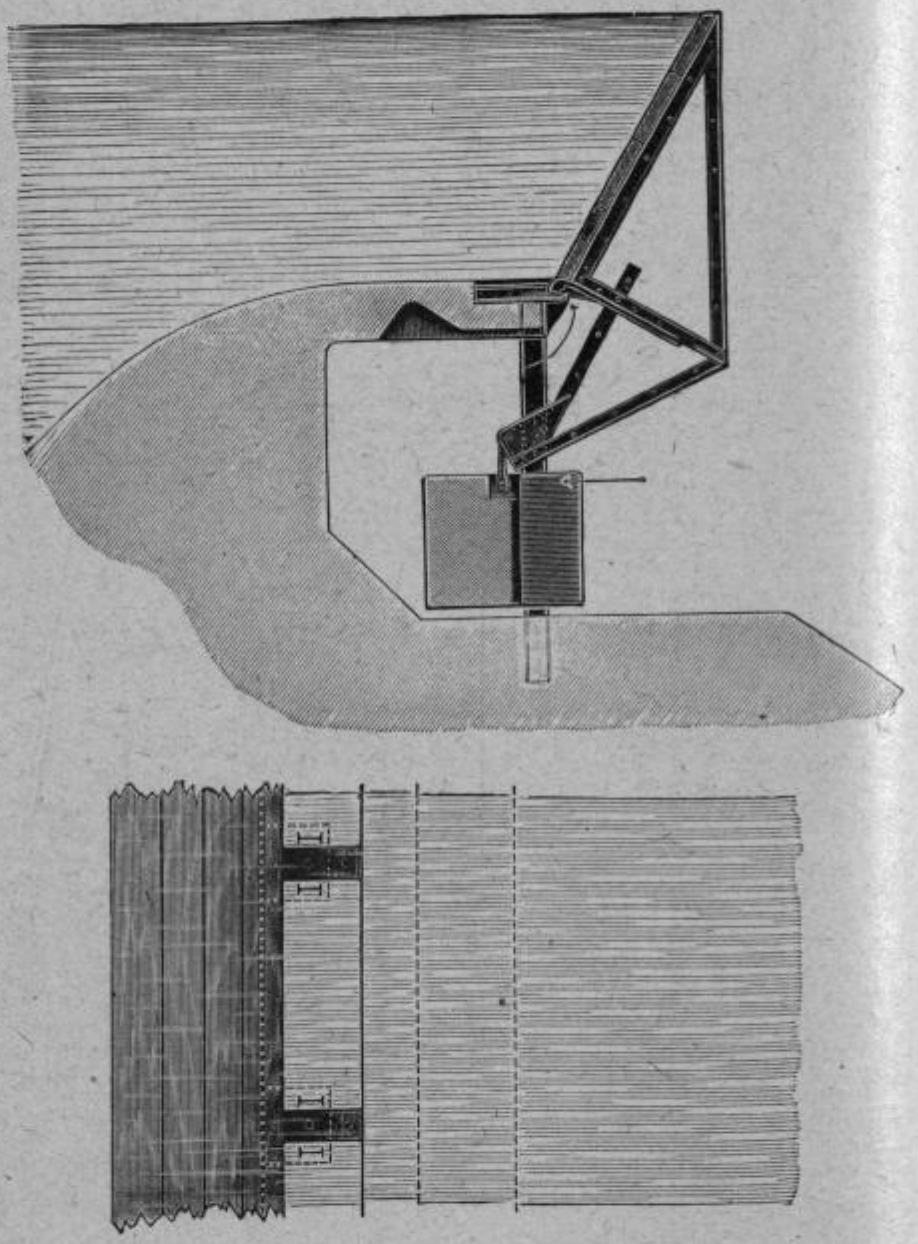


FIG. 287.

pose l'emploi de vannes dont l'automacité du fonctionnement est assurée par l'action directe de l'eau ou d'un siphon automatique absorbant l'eau en excès.

Les vannes automatiques (*fig.* 283 à 285) se composent d'un clapet articulé à sa partie inférieure et retenu à son extrémité supérieure par des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

câbles s'enroulant d'autre part sur un cylindre-contrepoids qui peut se déplacer sur deux chemins de roulement séparément installés sur chaque rive. La tension provenant de l'eau et agissant sur le clapet tend à faire monter le contrepoids. Il y a équilibre de l'appareil si les mouvements du poids propre G du rouleau et de la tension des câbles par rapport au point de contact du rouleau et de la courbe sont égaux ($Gl_1 = Zl_2$). Supposons maintenant que le débit de la rivière augmente si le niveau doit rester constant, il faut que le clapet s'abaisse pour laisser passer l'eau en excès, en même temps que le contrepoids se déplace jusqu'à ce que le système retrouve une position d'équilibre ($G'l'_1 = Z'l'_2$) assurée par une nouvelle direction convenable de la courbe, car le niveau tendant à s'élever la pression sur le clapet augmente ainsi que la tension des câbles. L'équation d'équilibre est rompue au profit de Z. Le rouleau se met donc en mouvement de lui-même ; si le débit diminue, on aura

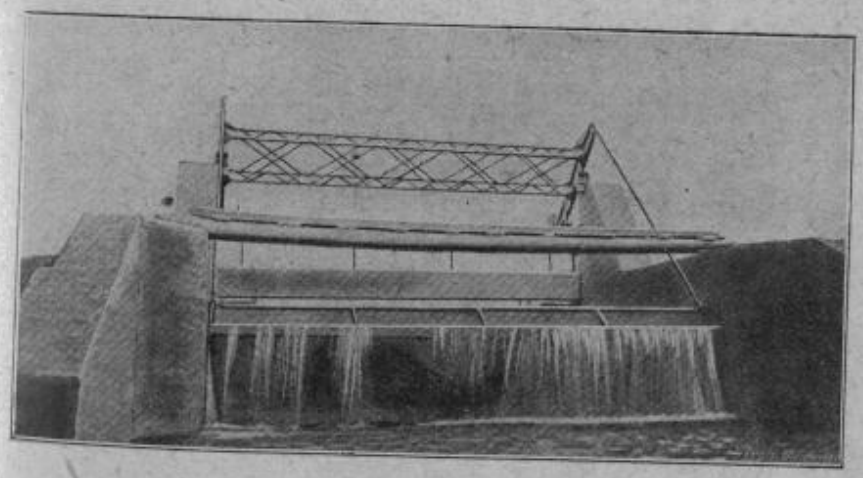


Fig. 288. — Barrage automatique à balancier (Installé à Gildeberg, Suisse)

naturellement un mouvement inverse. Cet appareil est dit automatique par contrepoids à rouleau supérieur.

Dans l'appareil automatique par contrepoids à rouleau inférieur (*fig.* 286), ce dernier est logé en aval et en contrebas de la cloison mobile. Les poussées sur la cloison réagissent, en distance de 1 à 2 mètres, tangentiellement à la circonférence du rouleau. L'articulation se fait sur couteaux protégés contre toute possibilité de dérangement.

Enfin dans l'appareil à contrepoids inférieur (*fig.* 287 et 288), la cloison est équilibrée par un contrepoids suspendu à un levier qui se loge en contrebas du fond du canal d'amenée. Une élévation du niveau d'amont fait baisser la cloison mobile qui déverse le trop-plein, mais elle est ramenée aussitôt à sa position normale par l'effet du contrepoids et le niveau est rétabli. Pour le débit maximum, la cloison prend la position horizontale, et laisse la section de passage de l'eau entièrement libre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La première disposition s'établit pour une lame d'eau de 1m,80 à 2 mètres et pour des longueurs allant jusqu'à 16 mètres ; la deuxième s'applique à des barrages de longueur quelconque, mais pour une lame d'eau ne dépassant pas 1 mètre d'épaisseur et un volume maximum de 4 à 5 mètres cubes par seconde et par mètre courant de barrage.

La solution au moyen des siphons permet de rejeter dans un canal de

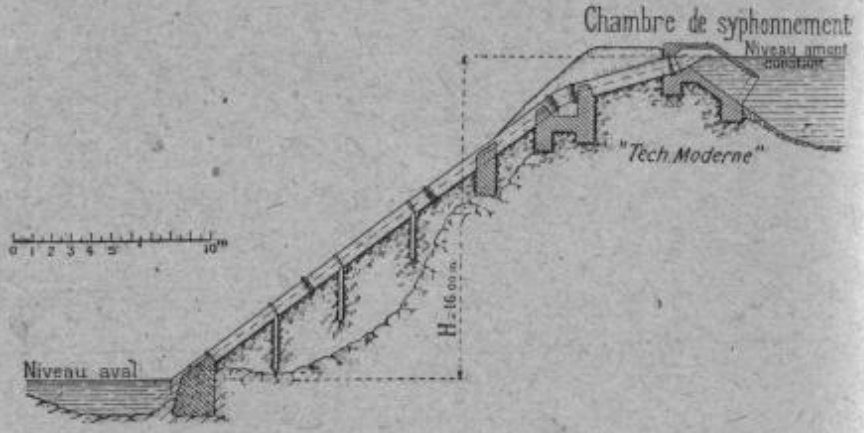


Fig. 289. — Siphon automatique.

fuite l'eau en excès au-dessus de la cote fixée, et ceci avec la vitesse correspondant à la hauteur de chute dont on dispose. La difficulté est de réaliser l'amorçage automatique sous une forme assez simple.

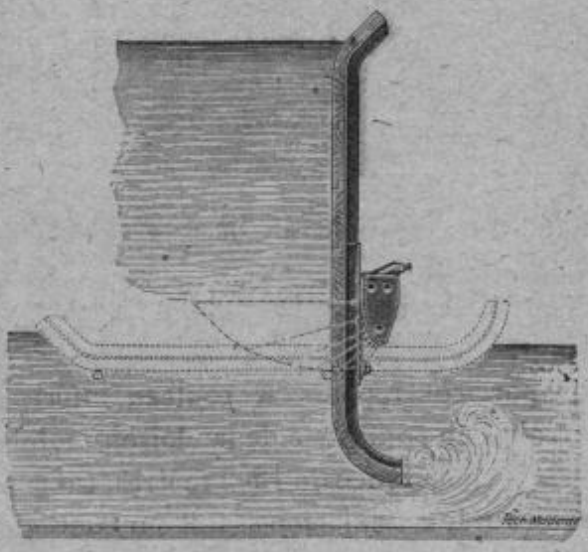


Fig. 290. — Clapet automatique.

La (*fig.* 289) montre un exemple de ce siphonnement. Lorsque le niveau d'amont tend à s'élever l'eau se déverse dans le conduit par toute la périphérie de son ouverture supérieure comme par un déversoir ordinaire. Par suite du vide partiel qui y est produit le niveau s'élève à l'intérieur, le déversement augmente, l'entraînement de l'air aussi et le vide se produit ; la chambre se remplit d'eau, le siphon est amorcé. Il se désamorce au contraire dès que le niveau descend au-dessous de la cote fixée.

La différence de niveau entre l'amont et l'aval est mise à profit par les établissements Singrün pour l'actionnement d'un clapet automatique dont le but est de permettre de laisser échapper d'un bief un volume d'eau déterminé, soit constant, soit variable et cela quelle que soit la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

hauteur du niveau d'amont. L'appareil (*fig.* 290 à 292) se compose d'un vannage assujetti à rester tangent à une courbe de façon que les pressions d'eau sur le clapet en dessous et en dessus du point de contact s'équilibrent. L'ouverture laissée libre à la partie inférieure varie suivant les positions de l'appareil ; elle augmente quand le clapet s'incline, c'est-à-

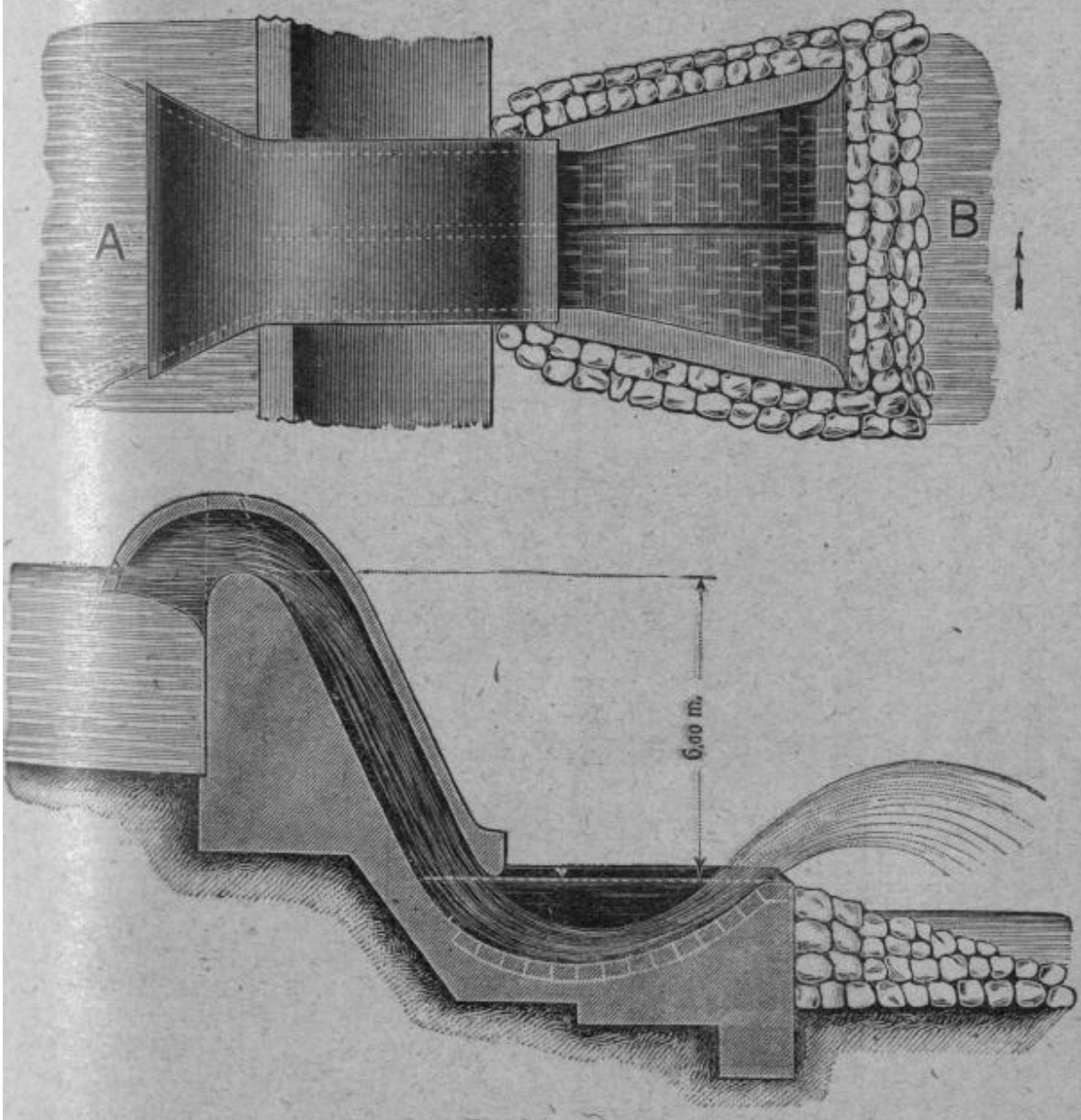


FIG. 291.

dire quand le niveau descend et que la vitesse de sortie diminue. Ainsi la vitesse et la section d'ouverture varient en sens inverse.

L'appareil (*fig.* 29[illegible]) est destiné à assurer le réglage automatique du niveau des biefs, pour écluses ordinaires. L'amorçage s'effectue suivant le principe posé par M. Hirsch. La commande par l'aval est réalisée sim-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plement par un flotteur agissant sur le premier tronçon flexible de l'amorceur, qui est constitué au moyen d'un tube en cuivre doué d'une flexibi-

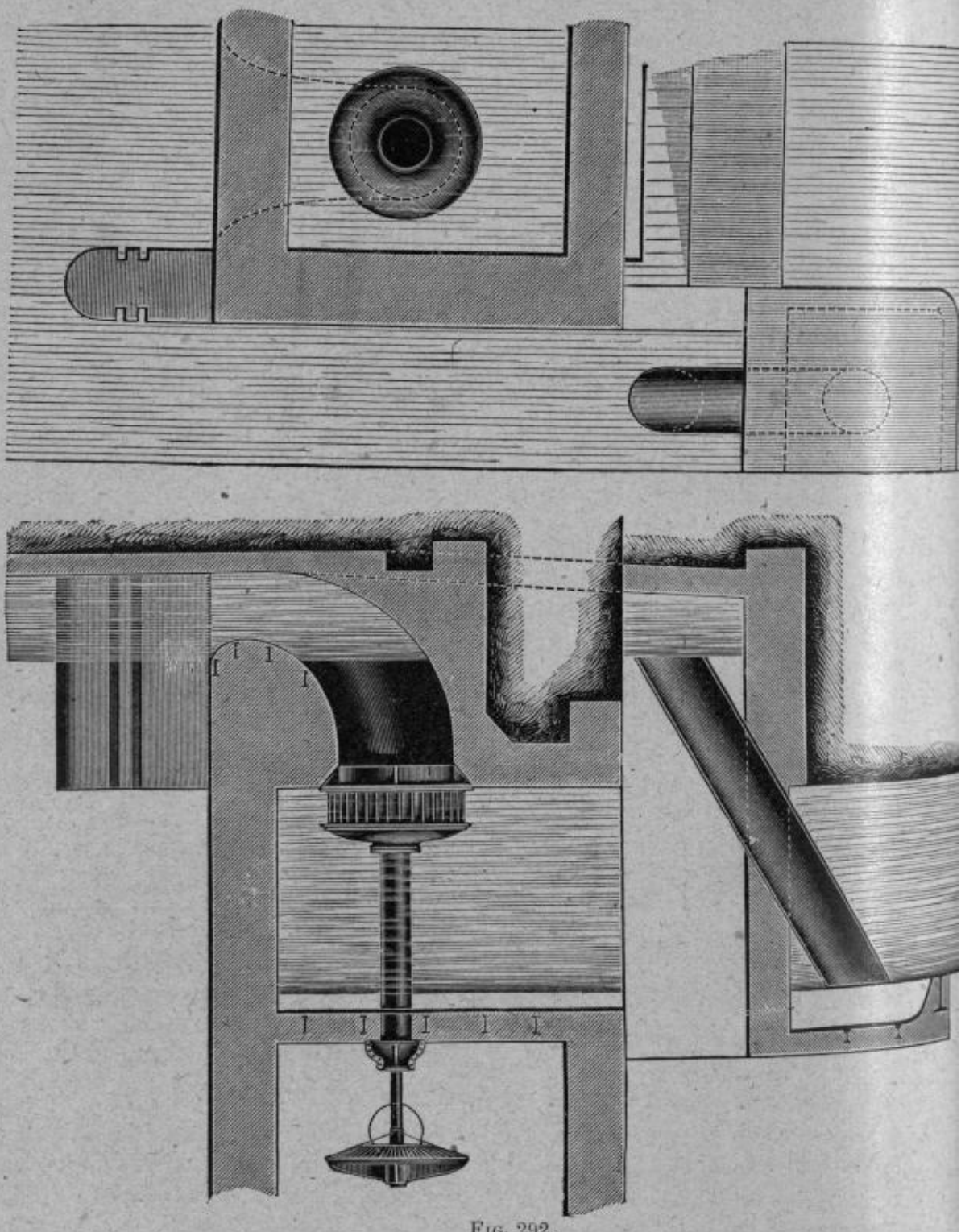


FIG. 292.

lité égale à celle d'un boyau de caoutchouc. Le flotteur, placé dans le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puits communiquant avec le bief d'aval agit sur un bras métallique oscillant qui relève ou descend la bouche de l'amorceur. L'effort à exercer à cette fin est peu important.

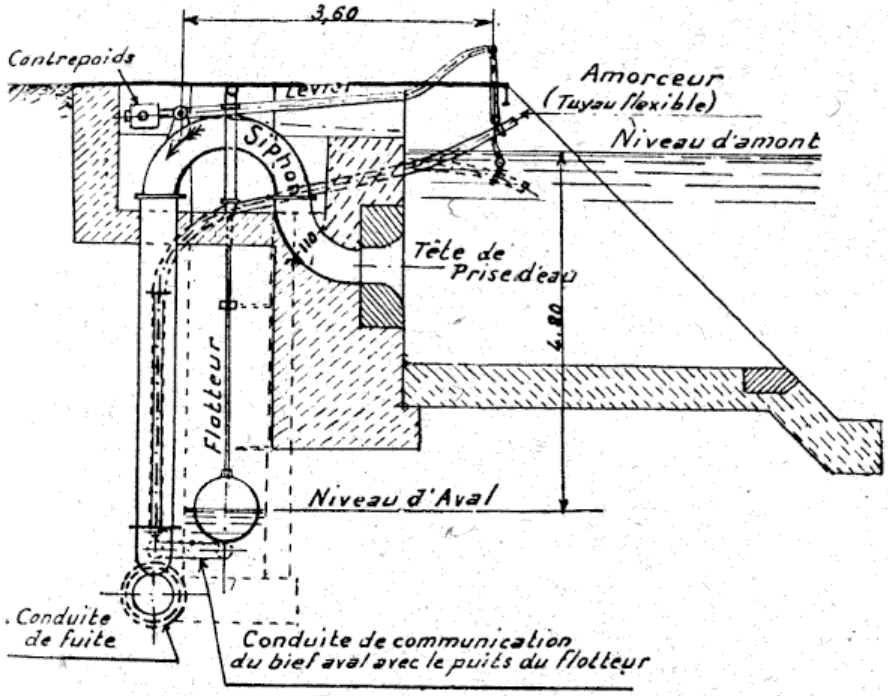


FIG. 233. — Alimentateur siphon pour le réglage automatique du niveau des biefs.

Cet appareil paraît fournir une solution sérieuse du problème du réglage automatique des biefs des canaux.

II. — GROS BARRAGES EN MAÇONNERIE

88. **Conditions d'établissement des ouvrages.** — La nature du lit du cours d'eau est un facteur important dans la détermination des matériaux qui doivent constituer le barrage. Quand on a affaire à des roches solides, on peut le construire directement avec les mêmes matériaux et la maçonnerie posée directement sur le lit. Si celui-ci est en terre dure, la maçonnerie doit être établie sur des fondations profondes ; mais au cas où le lit est du sable, la maçonnerie a besoin de reposer sur des pieux noyés dans un béton.

On doit distinguer entre les barrages de grande hauteur ou de grande retenue et les barrages de faible hauteur. Les premiers demandent, pour présenter une garantie absolue, à être établis sur le rocher ou, à défaut, à l'air comprimé et, dans ce dernier cas, à une profondeur telle que les effets de sous-pression ne soient plus à redouter. Une bonne fondation est une question capitale dans l'établissement d'un barrage, car on sait que la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pression de la masse d'eau retenue désagrège le fond du lit, en chassant les sables qui agglutinent les galets ; la fondation pouvant se trouver minée de ce fait, il y a lieu de la garantir.

Dans tous les cas, on doit s'assurer par des sondages de la solidité du terrain sur lequel reposera l'ouvrage à établir.

Parfois on construit le barrage simplement à l'aide de caisses en bois remplies de pierres qui peuvent, dans certains cas, remplacer avantageusement la maçonnerie. On a pu ainsi conserver de tels ouvrages pendant vingt-cinq années et reconnaître qu'ils étaient encore aptes à servir longtemps.

Dès que les murs qui constituent le barrage ont une certaine longueur, la forme en courbe des barrages s'impose, afin de remédier aux effets de la dilatation sur lesdits murs.

La forme en courbe (courbe convexe à l'amont) est d'ailleurs plus résistante à l'action du courant qu'une droite, et le rayon de la courbe dépend de l'écartement des points d'appui ainsi que des dimensions des contreforts de butée qui jouent le rôle de culées de voûte. La forme cintrée permet en effet de reporter horizontalement une partie de la poussée de l'eau sur les flancs des parois, dans lesquelles le barrage est encastré. Cependant, lorsque les barrages ont une grande longueur et une grande épaisseur, et que les points d'appui ne sont pas constitués par des parois indéformables, la forme courbe en plan n'a pas un grand intérêt au point de vue de la solidité, mais elle est très efficace pour s'opposer aux effets de la dilatation, d'autant plus importants que le mur a plus de longueur.

Le barrage de Livet, d'un développement de 30 mètres (§ 349), est divisé en trois arcs formant voussoirs qui s'appuient sur des piliers intermédiaires de 10 mètres de hauteur sur 3 mètres de largeur, un des bajoyers du pertuis et l'ancrage dans les berges de la rive droite formant culées. L'ensemble donne en plan un arc de cercle de 60 mètres de rayon à la crête du barrage. On a exécuté d'abord les piliers, puis les arceaux latéraux, enfin l'arceau central.

Dans l'étude de l'établissement d'un barrage, on admet qu'une tranche de 1 mètre de longueur doit pouvoir résister seule à la poussée de l'eau, comme si elle n'avait aucune liaison avec les parties adjacentes, et sans tenir compte du supplément de résistance procuré par la forme en courbe, qui devient ainsi une garantie de plus.

Au point de vue du profil d'un barrage, les calculs ont pour but de s'assurer que la pression en un point quelconque du parement d'aval ne dépasse pas la limite que peuvent supporter les matériaux employés et qu'un point quelconque du parement d'amont n'est pas soumis à des efforts d'extension, mais au contraire de compression.

En effet les bonnes maçonneries peuvent supporter sans inconvénient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des efforts de compression de 10 kilogrammes par centimètre carré alors qu'elles ne résistent pas en général à un effort d'extension de 1 kilogramme à $1^{kg},5$ par centimètre carré. Elles ne doivent pas travailler à la traction à plus de $0^{kg},2$ à $0^{kg},3$, car il faut bien éviter de confondre cette résistance avec celle des mortiers, qui est d'ordre plus élevé. La résistance de la maçonnerie dépend seulement de l'adhérence du mortier avec les pierres.

Les efforts d'extension sur le parement amont peuvent donner naissance à des failles ou fissures dans la maçonnerie et, par suite, à des sous-pressions engendrées à l'aval et sous l'ouvrage par l'eau retenue à l'amont, qui tendent à renverser les parties de l'ouvrage situées au-dessus d'elles.

M. Maurice Lévy préconise, pour parer au danger des sous-pressions, de munir la face amont du barrage d'une série de pilastres à base carrée d'environ 2 mètres de côté et espacés entre eux d'environ 2 mètres aussi, puis d'accoler un mur continu, appelé *mur de garde, écran ou masque*, aux faces amont de ces pilastres, de sorte que les intervalles compris entre les pilastres, d'une part, le mur de garde, d'autre part, forment des puits carrés, à angles arrondis, sur toute la hauteur de l'ouvrage.

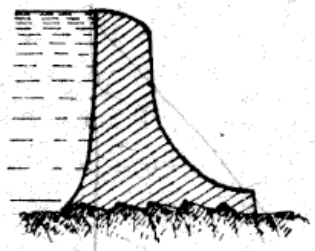


Fig. 294.

De cette façon, l'eau qui peut provenir d'une fissure quelconque débouche dans ces puits où elle s'écoule, au lieu de produire une sous-pression et cette eau peut être recueillie dans un drain, longeant tout le barrage, et enfin évacuée par le canal de vidange du réservoir.

M. Pelletreau a proposé d'établir des contreforts sur le parement aval et au droit des naissances des voûtes verticales de manière à renforcer les tranches verticales du corps du barrage, sur lesquelles se concentre la pression de l'eau.

Enfin on a aussi indiqué de disposer en avant du mur principal une série de voûtes en ciment armé s'appuyant sur des contreforts destinés à répartir sur le mur la pression des voûtes (voir barrages évidés).

Le profil pratique d'un barrage comporte d'abord à la partie supérieure un tracé à parements verticaux (*fig.* 294) et dans lequel la maçonnerie ne doit être soumise qu'à des pressions inférieures à la limite admise, et sur tout le reste du profil une forme se rapprochant autant que possible d'un profil d'égale résistance.

Les dimensions ainsi obtenues devront être suffisantes pour que le mur ne puisse pas, sous l'influence de la poussée horizontale, glisser sur sa base de fondation ou même sur l'une quelconque de ses assises. Pour le tracé de la courbe supérieure du profil transversal, il est déterminé par la parabole d'écoulement calculée pour les fortes crues, et on raccorde cette courbe par une contre-courbe tangentielle à la précédente et au lit du tor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rent à l'aval du barrage. Il est bien de fractionner l'ouvrage de telle sorte qu'une rupture, venant à se produire malgré tout, n'ait pas pour résultat d'abaisser le niveau d'amont à tel point qu'il en puisse résulter une interruption de service. Ce résultat peut être obtenu au moyen d'arceaux intermédiaires opposant chacun sa résistance propre au courant du torrent, ces arceaux s'appuyant sur des piliers de section convenable et le tout enrobé dans la forme finale de l'ouvrage à l'aide de remplissages en béton de ciment, arasés suivant le profil transversal du barrage.

Pour éviter les affouillements à l'aval de l'ouvrage et les effets de la sous-pression, on constitue quelquefois, au moyen d'une double courbure dans le profil transversal du barrage, un matelas d'eau qui amortit la chute, la vitesse à la crête du barrage étant augmentée alors qu'elle est à peu près nulle à l'aval. Le matelas d'eau à l'aval doit avoir de 1 mètre à $1^{m},50$ de hauteur.

Un pertuis d'une section suffisante de débouché libre est nécessaire avec le système de barrage fixe pour l'évacuation des apports qui encombrent rapidement le bassin d'amont. En le munissant de vannes, on a l'avantage de retenir complètement tout le débit pendant la période des basses eaux où les apports n'ont qu'une importance relative. Ces vannes permettent, en outre, de créer des courants de fond qui déblaient rapidement le radier ; on les soulève à cet effet de $0^{m},30$ à $0^{m},50$ seulement, et en quelques minutes la chasse est opérée.

Il convient de prolonger le radier du pertuis vers l'amont et l'aval en lui donnant une pente de $0^{m},30$ par mètre pour faire produire au courant de chasse tout l'effet qu'on en attend. Le radier doit être établi à un niveau notablement inférieur à celui du lit à l'amont du barrage, pour créer un rappel de tous les apports sur ce point.

Pour construire un barrage, il faut d'abord procéder à une dérivation provisoire du cours d'eau dans une des berges de la rivière, suffisante pour assurer l'écoulement de celle-ci, puis on barre le cours d'eau dans sa partie médiane. Pour cela on établit deux ou plusieurs batardeaux et on construit les parties du barrage à droite et à gauche des intervalles ménagés par ces bâtardeaux, ainsi que les parties en prolongement à édifier sur les rives, généralement constituées par des rochers.

On édifie le plus souvent ces bâtardeaux en maçonnerie pour qu'ils puissent davantage résister aux crues susceptibles de se produire pendant le cours des travaux. Les fondations du barrage une fois terminées, on remplit à l'aide d'un bon béton les vides entre les bâtardeaux et le mur-barrage.

L'emploi des bâtardeaux n'est indiqué que lorsque les parois latérales et le fond de la fouille sont constitués par du rocher bien étanche, sinon on a recours à un barrage provisoire établi sur pieux et palplanches.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La plupart des barrages ont leur crête disposée pour recevoir l'assiette d'un chemin de service ou d'une voie charretière bordés de deux parapets. De plus, on édifie à proximité du barrage une construction servant de logement aux préposés à la surveillance de l'ouvrage, ainsi qu'un atelier de réparations et un magasin pour assurer le fonctionnement régulier des vannes et autres appareils.

Pour l'établissement des fondations, il y a lieu de procéder, par de nombreux sondages, à une reconnaissance aussi minutieuse que possible de la nature du sol, à l'effet de s'assurer non seulement de la résistance et de la compacité des terrains d'appui, mais surtout pour reconnaître s'il existe des bancs d'argile, auquel cas l'endroit choisi ne peut convenir pour l'implantation de l'ouvrage.

On forme les murs des fondations par assises successives de $0^m,80$ à 1 mètre de hauteur, le parement aval étant toujours largement maintenu en avance.

En général, les noyaux des barrages sont établis en maçonnerie ordinaire avec mortier de chaux hydraulique (350 kilogrammes par mètre cube de sable), sable de rivière et roche du pays. Si on se trouve obligé d'employer du sable artificiel, il faut le faire passer au crible avec trous de 6 millimètres. La proportion de mortier entrant dans la maçonnerie doit être supérieure à 35 0/0, qui correspond aux mesures de construction ordinaires. Les parements vus, tant à l'amont qu'à l'aval, ainsi que les piédroits et l'intrados des voûtes des aqueducs (quand il y en a), se construisent avec des moellons têtués, par assises réglées, dressées d'équerre dans les lits et joints sur au moins $0^m,15$ et ayant de $0^m,30$ à $0^m,45$ de longueur de queue.

Avec de bons matériaux, on peut faire travailler les maçonneries à la compression, sans danger d'accident, jusqu'à une limite de 12 kilogrammes par centimètre carré, à condition cependant que le sol offre une grande sécurité ; sinon on réduit le taux du travail dans les parties basses du mur, c'est-à-dire à la base de l'ouvrage. Quant à la résistance au glissement, il faut vérifier si la poussée de l'eau est supérieure au produit de la maçonnerie par le coefficient de frottement de maçonnerie sur maçonnerie, ce coefficient variant de 0,70 à 0,75. Cette condition doit être réalisée dans n'importe quel joint de l'ouvrage ainsi que sur la ligne de base du barrage, et on ne tiendra pas compte, pour ce dernier cas, du surcroît de stabilité résultant de l'encastrement de cette base dans le terrain naturel. Il y a lieu de veiller à ce que la construction des barrages se fasse dans des conditions de température aussi régulière que possible, et que les pressions unitaires dans les diverses sections du massif ne varient pas brusquement de l'une à l'autre. Pour empêcher la production de fentes, il est bon de ménager dans la maçonnerie des joints de dilatation verticaux, traversant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tout le mur, garnis avec du goudron ou du bitume et présentant des ressauts ou des rainures pour ne pas affaiblir la construction comme le ferait un joint en « coup de sabre ».

M. Breuillé, ingénieur des Ponts et Chaussées, a entrepris d'importantes recherches en vue de mesurer la perméabilité de la pierre à bâtir et des mortiers à l'intérieur des barrages, ainsi que les pressions intérieures que fait naître l'eau retenue à l'intérieur des maçonneries. Le lecteur les trouvera expliquées dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (années 1898 et 1899). Plus récemment, M. Badwin-Viseman et M. Ellms ont fait connaître le résultat de leurs travaux, desquels il résulte que pour la pierre, comme pour les mortiers de ciment ou de chaux hydraulique, quand l'action de l'eau est continue (barrages-réservoirs), les débits diminuent et les pressions intérieures augmentent. Si l'action est discontinue, les pressions intérieures augmentent bien encore avec le temps, et tendent, comme dans le premier cas, vers la pression extérieure de l'eau qui s'exerce sur les blocs, mais les débits augmentent avec le temps pour les pierres, et diminuent pour les mortiers.

La Société Française de défenses fluviales vient d'exécuter sur la Romanche et sur le Drac des travaux qui méritent une attention spéciale. En particulier le barrage établi à Saint-Georges-de-Commiers sur le Drac constitue une nouveauté qui paraît apporter une solution intéressante des barrages maçonnés.

En principe, le corps de la maçonnerie est établi à l'aide de blocs dits *galvions* « *Pulvis* » qui ont la forme d'un prisme droit à section rectangulaire, constitué par une armature en grillage galvanisé que l'on remplit de cailloux. Ces matériaux déposés convenablement et reliés entre eux par de fortes ligatures en fer permettent d'exécuter rapidement et économiquement des travaux importants.

Dans la construction des barrages des rivières à grandes variations de débit et éventuellement à fort charriage de glace, il y a lieu, pour concilier les intérêts de la navigation et de l'industrie, de régler le niveau de la retenue avec toute la précision possible ; d'assurer la rapidité de la manœuvre et d'en augmenter la sécurité en établissant les engins de manutention sur les ouvrages fixes.

Il importe d'obtenir l'ouverture aussi rapide que possible de toute l'étendue du barrage et surtout des rivières à crues subites ou charriant des glaces en grande quantité. Il est désirable de pouvoir retirer de l'eau toutes les parties mobiles de l'ouvrage.

Les barrages à tambour ont l'avantage de permettre le passage des glaces en une certaine quantité sans abaisser sensiblement le niveau d'amont. Les barrages fixes sont recommandables pour les rivières larges et sujettes à de fortes embâcles quand le niveau du bief supérieur ne doit pas être maintenu avec précision.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au défaut des barrages fixes, qui ne permettent pas de régler la retenue, on peut y remédier, dans certains cas, en rendant amovible la partie supérieure ou en établissant un barrage mobile à côté du barrage fixe.

L'étude d'un barrage doit être accompagnée d'observations sur le mode de congélation et de passage des glaçons dans la rivière ; elle réclame aussi la connaissance des conditions de résistance de l'ouvrage au choc des glaces.

On construit maintenant des barrages de très grande hauteur. Le nouveau barrage de Croton, pour l'alimentation de New-York, bien que ne retenant l'eau qu'à $45^m,70$, a une hauteur de maçonnerie de $90^m,52$. Les maçonneries enfouies dans le sol sont bien supérieures à celles de la superstructure. Le barrage Roosevelt, dans l'Arizona, devant retenir 1.600 millions de mètres cubes, a $70^m,50$ de hauteur de maçonnerie, dont 64 mètres pour la retenue.

89. **Barrages-réservoirs.** — Les barrages-réservoirs ont pour but non seulement de créer la chute, mais encore d'emmagasiner l'eau et d'en régulariser le débit. Ils tiennent ainsi en réserve l'excédent de l'eau nécessaire aux faibles heures de consommation de la journée, qu'ils restituent sous forme d'appoint au débit du cours d'eau pendant les heures de forte consommation. Aux époques d'étiage, ils peuvent assurer un débit journalier moyen bien supérieur à celui qui correspond à l'étiage naturel ; ainsi ils servent à atténuer les dégâts causés par les grandes eaux (crues), en emmagasinant momentanément une partie du débit maximum. Ils sont en outre des bassins de décantation, car leurs grandes dimensions présentent un champ plus efficace au dépôt des sables, en raison de la faible vitesse de l'eau dans ces réservoirs.

La création des barrages-réservoirs est indispensable pour la bonne exploitation de certaines usines, entre autres celles qui assurent des services de traction et d'éclairage, dont la puissance est extrêmement variable suivant les moments de la journée, variations qui vont parfois de 1 à 20. Il faut donc que le réservoir puisse assurer l'écoulement de l'eau dans les mêmes proportions.

Dans l'industrie des chutes d'eau de montagne, la construction des barrages donne lieu à des travaux toujours délicats d'exécution et très considérables.

Le projet de barrage conçu par M. Wilhelm, en vue de la régularisation d'une chute d'eau sur la Durance, comporte des travaux évalués à plus de 18 millions. La hauteur utile du barrage est de 50 mètres, correspondant à une capacité du réservoir de 200 millions de mètres cubes.

Ce réservoir, rempli à l'époque des crues de printemps, permettra d'augmenter le débit d'étiage en vue des irrigations. Il sera ensuite rempli de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nouveau avec les pluies d'automne de façon à relever l'étiage d'hiver de 20 à 30 mètres cubes journaliers.

Ils atteignent parfois des dimensions considérables. M. P. Bunet cite un réservoir construit en Amérique, dont la hauteur au centre atteint 64 mètres de hauteur et la largeur à la crête 400 mètres, représentant un volume de maçonnerie de 350.000 mètres. Il a été exécuté en béton cyclopéen (1 partie de ciment, 3 de sable et 5 de cailloux).

Les barrages les plus courants sont ceux où la lame déversante est astreinte à passer par-dessus la crête de l'ouvrage ; ils sont souvent désignés sous le nom de « barrages à gueule bée » ou de « barrages sans revanche ».

Certaines usines hydrauliques ont adopté le système à « déversoir latéral » avec barrage fixe de retenue et pertuis de chasse pour éviter l'engorgement du canal de dérivation par les apports du torrent, les interruptions de service qui peuvent être occasionnées par ces derniers et tous les frais d'entretien inhérents au système à gueule bée. On obtient de cette façon une décantation partielle des sables en suspension dans l'eau, en n'admettant que celle de surface.

Le barrage de Livet, dont il a déjà été question, est de ce genre.

Pour éviter une surélévation du lit et une modification au régime d'écoulement de l'eau en amont de la prise, en raison des brusques variations de débit, on est souvent amené à construire un barrage mobile de préférence à un simple seuil (usine de la Pomblière).

Le barrage à *rideau en bois* a été appliqué à l'usine hydroélectrique des forces motrices du Fier, près du pont de Brasilly (Haute-Savoie) (§ 318), à cause de l'extrême variabilité du débit de la rivière qui faisait craindre qu'un barrage en maçonnerie ne résistât pas à la violence des crues, et aussi parce que ce système de barrage est facile à établir, à réparer et peu coûteux. Il a été fixé sur une large fondation en béton encastrée dans les affleurements de la roche et arasée un peu en dessous du niveau de l'eau à l'étiage (*fig.* 295). Sur cette fondation on a élevé des fermes en fer, ancrées au moyen de boulons de scellement dans des puits traversant le béton et creusés à 5 mètres de profondeur dans la roche. Le rideau réunissant les fermes est composé de troncs de sapin (vargues) équarris sur deux faces seulement. La solidité de ce barrage repose sur les boulons d'ancrage des fermes travaillant tout le long du banc de roche de base.

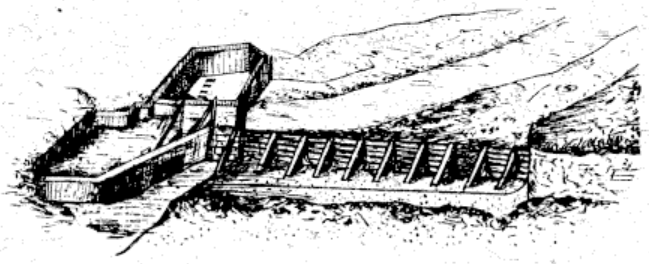


FIG. 295.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les palées du barrage ont été constituées par des poutres en tôlerie ($0^m,40 \times 0^m,40$) remplies de béton, et l'ensemble de chacune d'elles a la forme d'un chevalet ou d'un 4 reposant sur un massif de béton édifié sur le fond rocheux du lit. Sous l'effort de la pression de l'eau d'amont le système tend à tourner autour de A (voir § 318), mais il en est empêché par l'amarrage du talon D, effectué au moyen de deux forts boulons de 80 millimètres de diamètre et de 4 à 5 mètres de longueur, scellés dans le roc. On a dû recourir à des procédés spéciaux de forage pour creuser les chambres de scellement de ces boulons.

Pour amortir la chute de l'eau et des galets entraînés par celle-ci, on

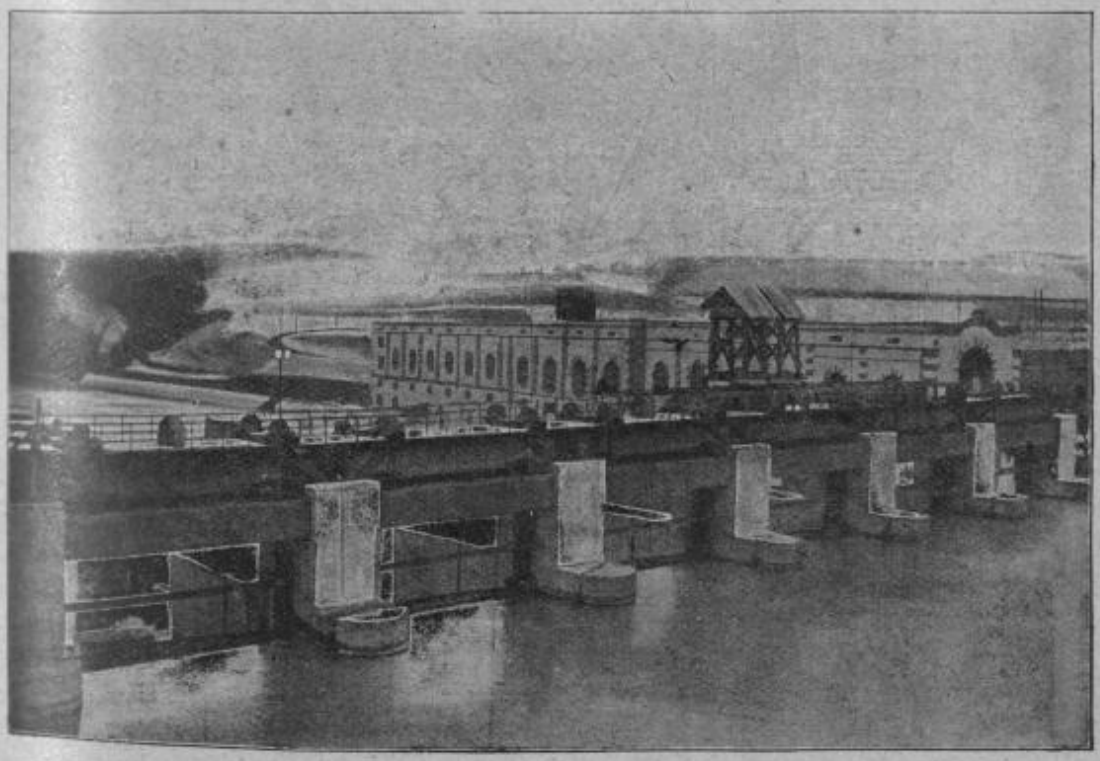


FIG. 296. — Barrage de Chèvres et usine hydroélectrique fournissant l'énergie à Genève

peut raccorder les barrages en aval par une doucine avec un radier en forme de cuvette. A l'usine des Chavants, sur l'Arve (Haute-Savoie), le barrage a été consolidé en amont par un radier incliné à $0^m,30$ par mètre et qui part du fond de la rivière pour aboutir au sommet du barrage ; ce plan incliné est destiné à faciliter l'évacuation, en temps de crues, des dépôts de sable et de graviers entraînés par les eaux. Pour éviter que les apports ne s'accumulent contre la prise d'eau, on a établi parallèlement à cette prise d'eau un mur de garde, de manière à constituer un chenal de $2^m,50$ fermé par une vanne de même largeur. Dès qu'une crue se manifeste, cette vanne peut être ouverte de façon à écouler l'eau en excès et à pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duire une chasse continue qui enlève les dépôts accumulés le long de la prise d'eau.

Le barrage utilisé pour l'aménagement de l'usine hydro-électrique de Prémont, sur la rivière l'Arc (Savoie), sort des moyens ordinairement employés. En raison de circonstances particulièrement difficiles et à défaut d'emplacement nécessaire, la rivière étant bordée d'un côté par la voie ferrée et de l'autre par la route nationale, on a été obligé d'établir

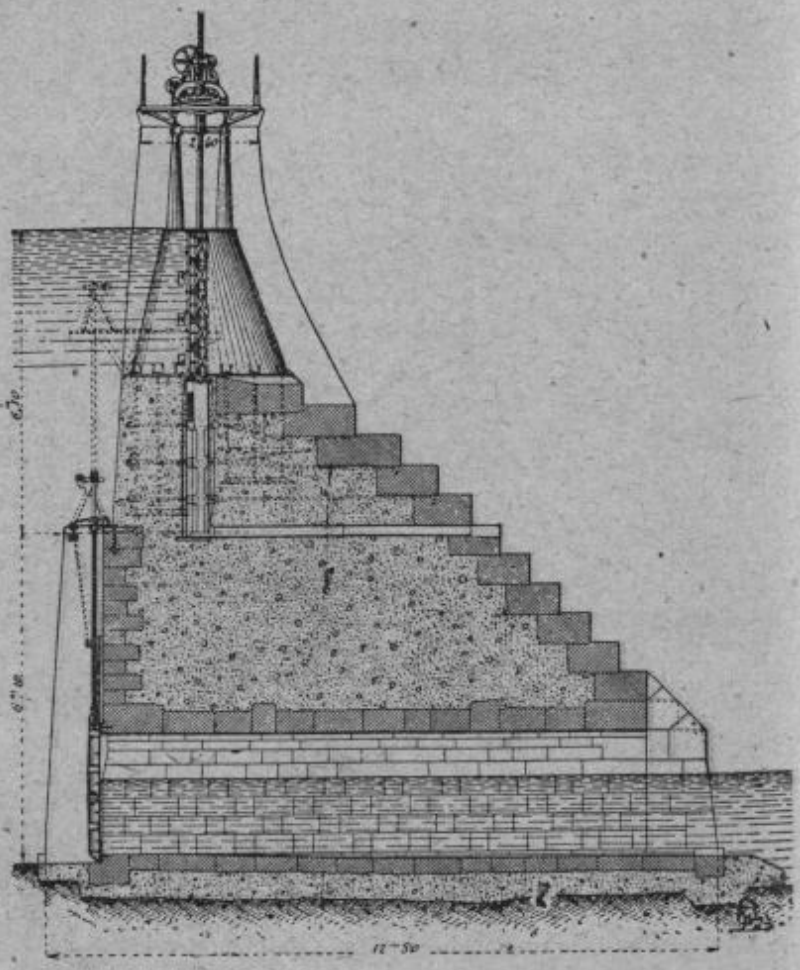


FIG. 297. — Barrage du Goulburn.

l'ouvrage dans le lit même de la rivière, de façon à réduire le moins possible la section. A cet effet, on a construit un caisson en tôle très solide de 20 mètres de longueur, 4 mètres de largeur et 1^{m},20 de hauteur, sa surface supérieure perforée de trous de 12 millimètres. L'appareil a été descendu et installé dans les parois des rives du rocher, l'extrémité de gauche obturée par un garnissage en maçonnerie et l'extrémité de droite, ouverte, communiquant à une chambre de vannes établie dans une cave sous la route.

La hauteur de la lame déversante est telle qu'en périodes de basses

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

eaux un homme peut marcher sur les tôles perforées. En basses eaux, l'eau est propre, et dans les hautes eaux le volume et la vitesse des eaux qui passent par-dessus les tôles perforées sont beaucoup plus considérables que ceux des eaux qui les traversent. De ce fait, les corps étrangers sont en majeure partie entraînés. La surface filtrante totale est de 80 mètres carrés présentant 25 0/0 de vide, soit 20 mètres carrés, ce qui, pour un débit de 5 mètres cubes, ne fait que $0^{m},25$ de vitesse de l'eau au

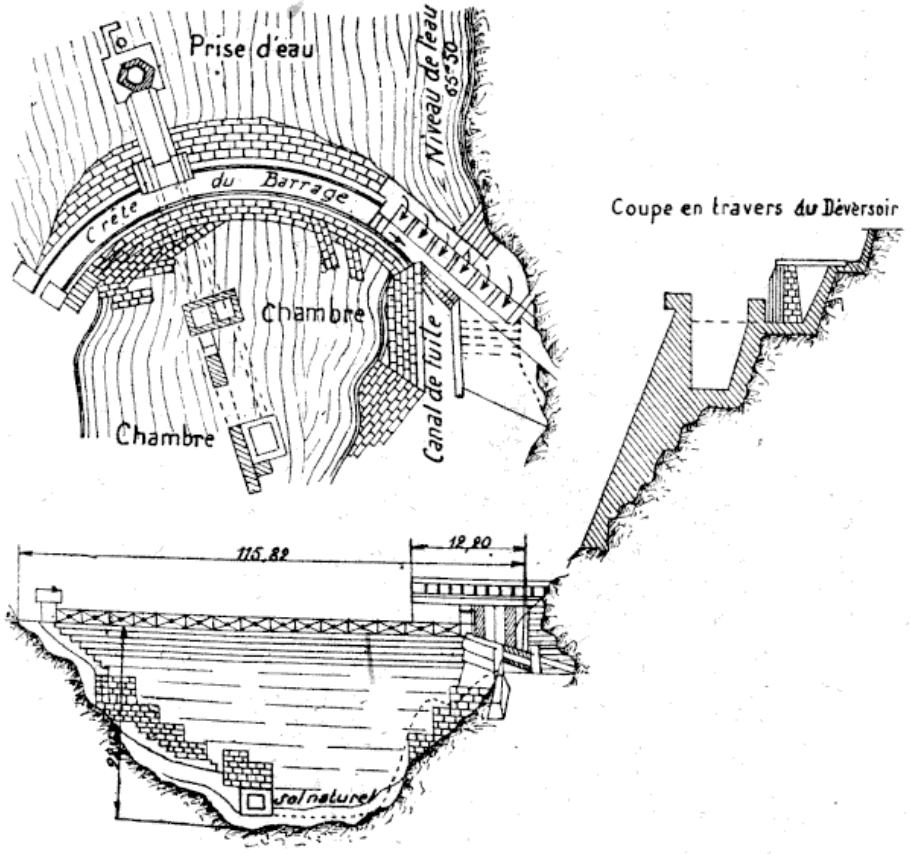


FIG. 298.

passage des cribles. Donc, si les trois quarts des orifices, par exemple, venaient à être bouchés par des graviers, le quart restant débiterait encore le volume normal avec la vitesse de 1 mètre, correspondant à une charge de 5 centimètres, laquelle dépasse en moyenne 15 centimètres.

Pour éviter une surélévation de niveau en temps de crues, on a pratiqué sur la rive droite un souterrain de décharge, qui a sa tête amont à l'amont du barrage et sa tête amont à son aval. Chacune de ces deux têtes est munie d'une grande vanne qui est fermée en basses eaux.

Le barrage de l'usine hydroélectrique de la Sioule (Puy-de-Dôme) établi dans une gorge étroite, comporte deux réservoirs, l'un à droite, l'autre à gauche du côté du barrage. Le bâtiment des machines est élevé sur le lit même de la Sioule (§ 319).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'appareil de prise d'eau du barrage de la rivière de Goulburn (Australie) (*fig.* 297) consiste en des tuyaux placés à 6m,10 en contre-haut du fond du lit de la rivière, traversant horizontalement le corps du barrage et se terminant, à l'amont, au fond de chambres obturées par des portes métalliques qu'on ouvre ou ferme de manière à envoyer la quantité d'eau voulue. Dans la partie inférieure du corps du barrage on a ménagé six tunnels, qui ont servi à l'écoulement des eaux pendant la construction de l'ouvrage et qui permettent de vider le réservoir quand cela est jugé nécessaire

Le barrage américain de retenue représenté par la (*fig.* 298), construit sur la rivière de la Sweetwater (Californie), comporte un déversoir indépendant du barrage et qui est divisé en sept compartiments fermés entièrement ou partiellement au moyen d'un rideau de planches. Un canal de fuite fait suite au déversoir, lequel se compose d'une série de cascades de 0m,90 de hauteur.

La prise d'eau consiste en une tour creuse en maçonnerie de 0m,90 d'épaisseur de mur, affectant la forme d'un hexagone régulier de 1m,80 de diamètre et dont le couronnement est à 1m,20 en contre-haut du niveau de la retenue. Six ouvertures, formées chacune d'un tuyau en fonte et placées à 3 mètres au-dessous les unes des autres, permettent de prendre l'eau à une hauteur quelconque. Ces ouvertures sont fermées, en temps ordinaire, au moyen de soupapes que l'on peut manœuvrer du haut de la galerie que supporte le couronnement de la tour. Deux autres ouvertures sont placées l'une en amont et au pied de la tour, l'autre au sommet du tunnel qui donne passage à l'eau à travers le barrage. Ce tunnel est relié à une conduite en tôle commandée par un robinet-vanne. Deux autres conduites en fonte traversent également le barrage pour aboutir dans la partie inférieure de la chambre de manœuvre ; elles permettent d'effectuer la vidange complète de la tour.

L'eau ne doit pas surmonter la digue même. S'il arrive une crue, le réservoir étant plein, les déversoirs et les appareils de vidange peuvent débiter une quantité double du débit de la plus grande crue observée.

L'appareil de prise d'eau est, dans quelques cas, constitué par un ou plusieurs puits, dont la paroi, du côté de la retenue, est percée de barbacanes, de façon que l'eau puisse toujours pénétrer dans l'aqueduc de prise, quelle que soit la hauteur des dépôts de fond dans le réservoir, sans les entraîner.

Le barrage du Haniz (*fig.* 299) appartient à ce genre de construction : les puits qui mettent en communication les barbacanes, espacées de 1 mètre d'axe en axe, avec les galeries de prise d'eau, sont à parements intérieurs verticaux. En plan, chacun de ces puits a 3 mètres de longueur sur 1 mètre de largeur et est continué dans sa partie inférieure par deux tuyaux en fonte qui se rendent dans la chambre de manœuvre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le barrage-réservoir de Chartrain (Loire), établi sur le ruisseau la Tâche, affluent du Renaison, qui se jette dans la Loire, forme un réservoir pouvant recevoir 5 millions de mètres cubes d'eau correspondant à une surface du plan d'eau de 24 hectares. Le bassin hydrologique a une superficie de 1.400 hectares.

Le barrage a 54 mètres de hauteur et celle de la retenue, comptée depuis le déversoir jusqu'au fond de la vallée, est de 46 mètres. Le parement amont est vertical sur 30 mètres de hauteur ; celui d'aval a $0^{m},70$ par mètre d'inclinaison au sommet et $0^{m},95$ à la base, raccordé par un arc de cercle de 88 mètres de rayon. Le mur proprement dit a une épaisseur de 2 mètres au niveau du déversoir (à 1 mètre au-dessous du couronnement)

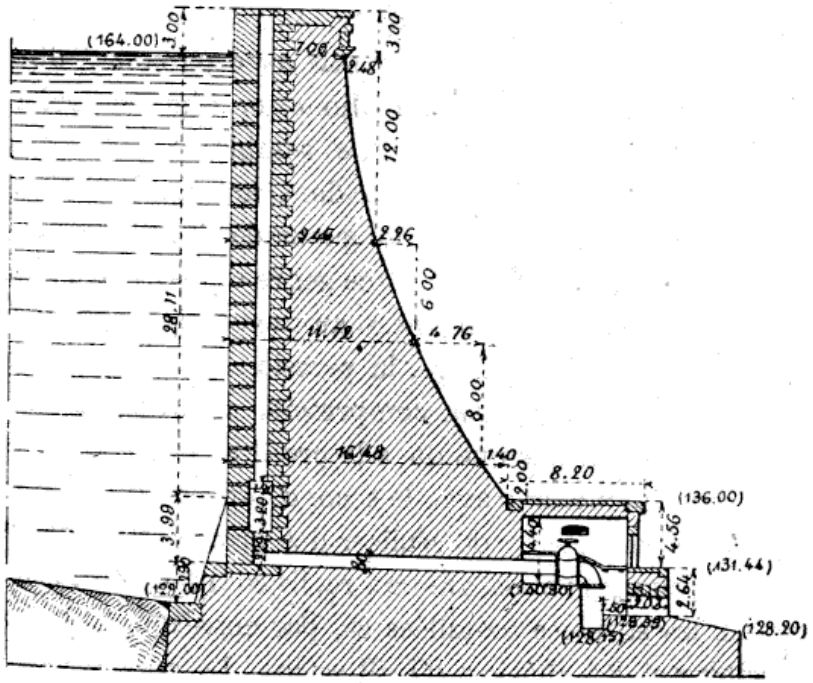


FIG. 299. — Barrage du Haniz.

et $41^{m},30$ à la base. La largeur maxima de la fondation est de $47^{m},50$. Une route de 4 mètres de largeur termine le couronnement, reposant du côté aval sur des voûtelettes de $6^{m},50$ d'ouverture et $5^{m},50$ de hauteur.

En plan le barrage est établi suivant un arc de cercle de 400 mètres de rayon, et la longueur de l'ouvrage suivant l'axe du couronnement est de 241 mètres. La maçonnerie est constituée avec des moellons granitiques et mortier de chaux hydraulique ($0^{m3},900$ de sable et 340 kilogrammes de chaux hydraulique). Le poids du mètre cube de maçonnerie est de 1.600 kilogrammes, soit 2.800 kilogrammes de moellons et 1.800 kilogrammes de mortier.

Le mur du déversoir forme bajoyer d'un canal de décharge, qui a 5 mètres de largeur sur 4 mètres de profondeur ; le déversoir est com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mandé par un système de vannes dont le seuil est à 3m,75 en contre-bas de l'arête du déversoir. On peut ainsi maintenir le niveau normal à 2 mètres plus bas que le déversoir, de manière à réserver aux crues la capacité de 500.000 mètres cubes qui leur est destinée.

La prise d'eau se fait au moyen de deux tuyaux de fonte, de 0m,450 de diamètre, situés à 4m,25 au-dessus du fond de la vallée, et par un troisième de 0m,30 placé à 2 mètres au-dessous des deux premiers.

90. Barrages évidés. — Les barrages avec puits, dont nous avons parlé au paragraphe précédent, peuvent s'établir d'un seul bloc, et alors les puits ont pour fonction de drainer les infiltrations ; dans ce cas, on ne fait aucune distinction entre les murs accolés (masques ou écrans), et on les considère comme un seul mur évidé.

Le barrage peut ainsi être construit soit avec parement discontinu, le vide d'un puits étant compensé par l'adjonction d'un contrefort au droit de ce puits, soit avec parement continu et semblable à celui d'un barrage ordinaire, au vide d'un puits correspondant un supplément d'épaisseur uniformément répartie sur toute la longueur de l'ouvrage.

M. Bellet, qui a étudié spécialement ce genre de barrage, estime que ces deux procédés conduisent sensiblement au même résultat pour un même volume de maçonnerie. En charge, la pression élastique est la même à l'amont dans ces deux cas, et la compression maxima est un peu plus forte dans le second procédé que dans le profil évidé du premier ; à vide, les conditions sont meilleures avec le second procédé qu'avec le premier.

Les contreforts permettent de réaliser des profils transversaux d'égale résistance, ou à peu près : mais, par contre, ils compliquent la construction et augmentent les surfaces mouillées et, par conséquent, le nombre des fissures possibles et les chances d'infiltration. Le second système laisse bien subsister un point faible au droit de chaque joint, mais il a l'avantage d'être plus commode à construire et de diminuer la surface mouillée.

Dans tous les cas, on doit compenser les évidements provenant des puits pratiqués dans la maçonnerie par un renforcement de l'ouvrage, soit au moyen d'un contrefort, soit par une surépaisseur régulière, ce qui permet de drainer les infiltrations qui pourraient se produire, de façon à voir toujours une pression élastique à l'amont supérieure ou au moins égale à celle de l'eau.

91. Calculs et capacités des réservoirs. — La variabilité des saisons plus ou moins pluvieuses et des quantités d'eau que donne chaque pluie peut faire affluer à certaines époques, dans un réservoir, une quantité d'eau supérieure à sa capacité. D'autre part, une crue subite peut se déclarer au moment où le réservoir serait plein. De là l'utilité, comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nous l'avons déjà dit, d'accoler au barrage un déversoir de superficie ayant son seuil placé au niveau normal de la retenue et disposé de façon à écouler le trop-plein des crues sans produire d'affouillement au pied du barrage.

On accompagne dans ce cas le déversoir d'un canal de fuite destiné à recueillir les eaux de crues et à les rejeter au cours d'eau, à l'aval du barrage ; ce canal doit être établi de telle sorte qu'il ne puisse nuire à la solidité de l'enracinement du barrage.

Si on est bien fixé sur la valeur et la durée des plus grandes eaux, on peut se rendre compte de la surélévation produite par une de ces crues, et par suite déterminer la longueur du déversoir. Par exemple, si x est le débit de cette crue et t sa durée, le volume total sera présenté par xt.

Une partie de ce volume passera par le déversoir et le surplus s'emmagasinera dans le réservoir, dont elle aura pour effet de surélever le niveau ; soit h la surélévation produite ; appelons V la capacité du réservoir correspondant à cette surélévation et Q' le débit du déversoir pendant le temps t. On a :

$$xt - Q't = V. \tag{1}$$

Si L est la longueur du déversoir, on obtient pour son débit sous la hauteur h :

$$Q = Kh^{\frac{3}{2}}L.$$

Posons :

$$Q' = 0{,}40Q,$$

alors l'expression (1) devient :

$$xt - 0{,}40Qt = V.$$

Si l'on remplace dans cette expression Q et V par leurs valeurs en fonction de h, on a une équation qui ne renferme plus que cette inconnue h et qui permet de la calculer en procédant par tâtonnements. On doit aussi examiner s'il reste une *revanche suffisante* pour tenir compte de l'action des vagues.

Il est intéressant de déterminer la durée des crues ordinaires et extraordinaires pour produire un relèvement tel que le débit du déversoir soit égal à leur débit moyen. Dans ce cas on évalue la capacité du réservoir pour les dites, et on détermine le temps qu'une crue d'un débit moyen égal à Q mettrait à remplir les capacités correspondantes par la formule :

$$t = \frac{V}{0{,}60}Q, \qquad \text{pour} \qquad x = Q(^1).$$

(1) M. Bodenscher (*Zeits. des oesterr. Ing. Ver.*, du 19 juin 1908) et M. G. Ganassini (*Monitore Technico* du 10 avril 1908) ont donné dans ces publications des études analy-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous donnons, ci-après, les calculs qui ont été faits par M. Girardet pour déterminer la manière d'utiliser au mieux la puissance emmagasinée dans un réservoir. Le cas traité concerne l'usine de Sauviat (§ 331).

Le réservoir a pour dimensions : 15 hectares quand il est plein, 7 hectares à vide et 10 mètres de lame d'eau utilisable. Si l'on suppose le profil de son fond régulièrement décroissant, sa capacité utile est d'environ 1.100.000 mètres cubes.

La valeur du débit de la période d'extrêmes basses eaux varie entre $3^{m3},5$ et $7^{m3},6$. Ce dont il faut tenir compte c'est de la valeur moyenne des débits journaliers de la Dore pendant cette période ; le réservoir ayant pour premier rôle de régulariser ce débit, cette valeur moyenne est de $5^{m3},150$ pour la Dore et 400 litres pour le Miodex (1).

La puissance utilisée par l'usine provient : 1° de l'utilisation directe des eaux de la Dore ; 2° de l'utilisation des eaux du réservoir qui est alimenté par le surplus des eaux de la Dore et ensuite par les eaux du Miodex.

Nous allons supposer, pour simplifier le problème, que la société exploitante étant obligée de laisser en aval un débit de 2 mètres cubes dans la Dore, on emploie ce volume en chevaux de 24 heures. Les 2 mètres cubes seront pris, naturellement, sur le canal qui pourra toujours les donner. Le restant sera en chevaux de 10 ou 12 heures.

Le débit de 2 mètres cubes donne, sous 29 mètres de chute :

$$29 \times 2 \times 10 = 580 \text{ HP de 24 heures.}$$

Il reste en moyenne $3^{m3},150$ par seconde, soit :

$$3{,}15 \times 86{,}400 = 272.160 \text{ mètres cubes,}$$

qui se déversent journellement dans le réservoir. De plus celui-ci reçoit encore l'apport du Miodex, soit :

$$0{,}4 \times 86.400 = 33.560 \text{ mètres cubes par jour.}$$

Le réservoir ayant une capacité de 1.100·000 mètres cubes pouvant être épuisés en 50 jours met à la disposition de l'usine :

$$\frac{1.100.000}{50} = 22.000 \text{ mètres cubes par jour,}$$

---

tiques d'un très grand intérêt sur la capacité des réservoirs à déversoirs. On y trouvera le calcul de la quantité d'eau qu'emmagasine un réservoir d'une surface donnée, et muni d'un déversoir de section connue, en tenant compte des crues, pour une certaine variation de débit du cours d'eau qui l'alimente et la durée que le nouveau régime met à s'établir.

(1) La Dore, pendant dix mois de l'année, a un débit de 20 mètres cubes ; lors de l'étiage, du 25 août au 15 septembre, le débit descend à 5 mètres cubes et même à 1 mètre cube pendant les années exceptionnelles de sécheresse. Le Miodex donne 1.500 à 2.000 litres, sauf pendant l'été où son débit peut devenir presque nul.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soit au total par jour :

$$272.160 + 33.560 + 22.000 = 327.720 \text{ mètres cubes.}$$

La hauteur de chute moyenne du réservoir n'est pas représentée comme on pourrait le croire par la dénivellation de la conduite (19 mètres) plus la moitié de la lame d'eau utilisable (5 mètres), elle est un peu plus élevée et pour deux raisons : d'abord parce que le réservoir, à la cote 5, a déjà perdu plus de la moitié de son volume d'eau, et que, d'ailleurs, la première moitié du volume d'eau a une plus grande énergie que la seconde, puisqu'elle est plus élevée. On a donc été conduit à adopter $25^{m},70$ pour hauteur moyenne.

On dispose donc de $327^{m3},720$ par jour, sous 25,70 de chute. Supposons ce volume d'eau employé en chevaux de 10 heures, ce volume donnera une puissance moyenne décomptée pour 10 heures :

$$\frac{327.720}{10 \times 3000} \times 25,70 \times 10 = 2.400 \text{ HP.}$$

C'est-à-dire qu'en basses eaux, par des années de sécheresse ordinaire, l'usine serait capable de donner sur l'arbre de ses turbines : 1° une puissance de 580 HP de 24 heures ; 2° une puissance moyenne de 2.400 HP pendant 10 heures.

L'eau de la Dore peut être envoyée soit dans le réservoir soit directement dans une chambre de mise en charge. On peut donc utiliser l'eau directement sans la faire passer dans le réservoir, ce qui est dangereux dans les grandes sécheresses.

En temps normal la Dore se déverse dans le réservoir. Le trop plein du canal s'écoule dans le lac par un déversoir latéral et l'alimente pour les heures de fortes charges.

Dans la chambre qui ne communique qu'avec le réservoir, l'orifice de départ des conduites est placé à 12 mètres au-dessous du niveau normal du lac et, dans celle qui communique aussi avec le bypass, l'orifice n'est qu'à 6 mètres. Ces profondeurs sont insuffisantes, car elles ne permettent pas d'utiliser une couche d'eau assez grande, étant obligé de laisser au-dessus de ces orifices au moins 2 à 3 mètres pour éviter la formation d'un entonnoir et l'entraînement de l'air dans les conduites.

III. — CALCUL DES BARRAGES. — MÉTHODES DIVERSES

92. Généralités. — La première méthode qui a paru en France pour le calcul des barrages a été celle de M. de Sazilly, perfectionnée par M. Delocre. Il n'était pas question, à ce moment, d'effort de cisaillement suivant une direction quelconque, ainsi que des efforts agissant sur des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sections verticales. Puis vinrent les méthodes de MM. Bouvier, Guillemain, Hétier et Pelletreau, Clavenad et finalement la plus complète et la plus rationnelle de toute, celle de M. Maurice Lévy. Dans ces dernières méthodes, on s'est préoccupé des sections obliques ; mais, à l'exception de M. Lévy et de M. Clavenad, les auteurs n'ont tenu compte que des pressions normales, M. Bouvier considérant la section normale à la courbe des pressions, MM. Guillemain, Hétier et Pelletreau recherchant parmi les sections obliques celle qui donne la plus grande pression normale.

La méthode Lévy est la seule qui permette d'expliquer qu'il puisse exister des efforts de traction à l'aval, en charge, comme dans le profil en rectangle.

Les ingénieurs dont les noms suivent ont aussi publié d'importants travaux sur les barrages : MM. Méry et Belanger, Chigot, Barbet, Ruffieux, Cadart, Dumas, Langlois, Vandeuren, etc.

M. Pelletreau a montré la nécessité de tenir le centre de pression pour les barrages-réservoirs, que le réservoir soit plein ou vide, à l'intérieur du tiers central d'une section horizontale quelconque, afin d'éviter tout effort de tension des maçonneries, et il a appelé l'attention sur les profils triangulaires, qu'il a étudiés d'une manière complète. M. Maurice Lévy a trouvé que la répartition des pressions suivant la loi dite « du trapèze » était rigoureusement exacte dans un profil triangulaire et que, dans les autres profils, elle se rapprochait d'autant plus de cette loi que la forme du profil différait moins de celle du triangle.

Il a, de plus, démontré que la pression verticale par unité de surface sur le parement amont, lorsque le réservoir est plein, ne doit en aucun point être inférieure à la pression statique de l'eau, pour que cette eau ne puisse pas pénétrer par les joints accidentellement ouverts et exercer une sous-pression à l'intérieur des maçonneries du barrage.

M. Cadart a étudié l'influence du massif qu'il est nécessaire d'ajouter en haut du barrage à tout profil triangulaire, lorsque ce massif s'élève au-dessus du niveau de la retenue, qui est le cas le plus ordinaire, et, à moins que le barrage ne soit de très petite hauteur, il a démontré qu'un barrage à parements rectilignes pourvu d'un massif de couronnement de faible largeur doit avoir un parement amont à fruit (1).

D'après M. P. Vandeuren, le profil triangulaire à parement d'amont vertical ne peut satisfaire aux conditions de stabilité résultant de la considération des sous-pressions.

93. Conditions de stabilité. — Dans l'établissement d'un barrage, on doit déterminer les conditions de stabilité, de résistance au glissement,

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, 1902. E. Bernard, éditeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'équilibre de rotation, de résistance à l'écrasement et de variation de section du profil selon la forme qu'il reçoit.

Soit un mur ayant la forme représentée par la (*fig.* 300), lequel doit résister à la poussée de l'eau qui agit sur l'un de ses côtés. Appelons y la distance du plan d'eau à une section AB déterminée dans le corps de l'ouvrage. La partie du mur au-dessus de cette ligne, soit AMNB, doit être en équilibre sous l'action des forces qui agissent sur elle, qui sont, d'une part, la poussée horizontale F de l'eau appliquée au tiers de la hauteur de l'eau à partir de CD, le poids N de la partie du mur considéré, le poids π de l'eau qui appuie sur le parement en contact avec l'eau et enfin les réactions tant verticales qu'horizontales développées sur la section AB par la partie inférieure du mur sur la partie supérieure.

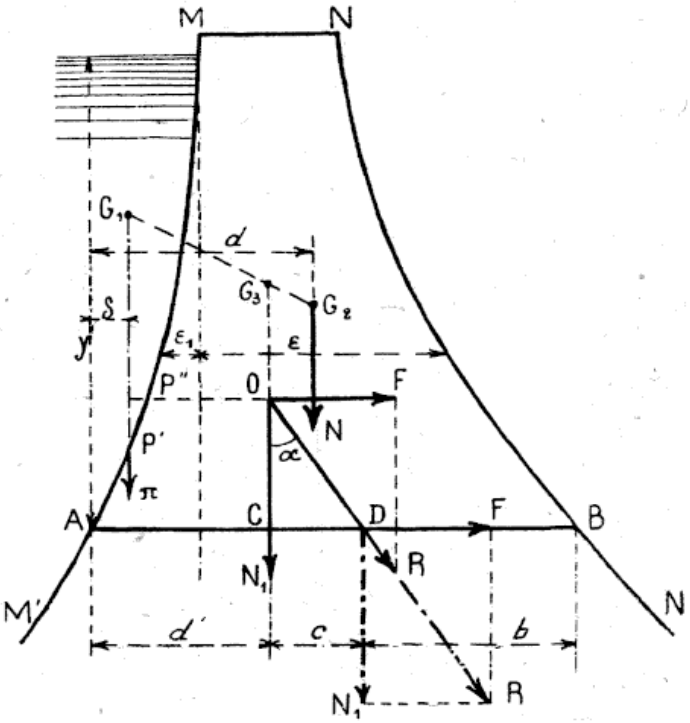


FIG. 300.

Soient G_1, le point d'application de la force π, δ la distance de la direction de cette force au point A, G_2 le point d'application de la force N, et d la distance de cette force au même point A ; la résultante de N_1 de N et de π est appliquée au centre de gravité fictif G_3 et sa distance d' au point A est fournie par la relation :

$$d' = \frac{\pi d + Nd}{\pi + N}.$$

La force verticale N_1 et la poussée horizontale F se composent entre elles, à leur point de rencontre O, pour donner la résultante R qui coupe la base AB au point D, et qui fait avec N_1 un angle α tel que : $\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{N_1}$.

Si l'on appelle c la distance CD et b la distance du point D au point B, il vient :

$$c = OC \operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{3} \times \frac{F}{N_1} \qquad \text{et} \qquad b = e - (d + c).$$

Pour que la partie AMNB du mur ne puisse être renversée sous l'action

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de F, et ne vienne à basculer autour de l'arête B, il faut que le moment de renversement de l'ouvrage, c'est-à-dire le moment de F par rapport à B, soit inférieur au moment de stabilité, soit au moment de N_1 par rapport à B, autrement dit que l'on ait :

$$N_1 (b + c) - F \times \frac{y}{3} > o,$$

qui se réduit à : $b > o$.

Le point de rencontre D de la résultante R et de la base AB ne doit donc jamais sortir de l'intérieur de cette base. Au point D, de la base AB, la résultante R peut se redécomposer en ses composantes primitives F et N_1.

La force horizontale F doit être annihilée par la cohésion des maçonneries et par le frottement exercé sur AB par la pression de la partie supérieure du mur sur la partie inférieure. Pour augmenter les conditions de sécurité, on ne tient pas compte de la cohésion et l'on suppose que le frottement s'oppose seul à la poussée de l'eau. De sorte que, si l'on désigne par f le coefficient de frottement, l'on doit avoir :

$$(N + \pi) f \geq F \quad \text{ou} \quad \operatorname{tg} \alpha \leq f.$$

Si cette condition est remplie, la partie AMNB du mur ne pourra pas glisser sur sa base horizontale AB.

La force verticale N_1 doit être annihilée par la résistance des maçonneries. Or la pression développée par N_1, en un point quelconque de la base AB, peut se déterminer par la loi du trapèze, que nous traitons au paragraphe suivant ; nous reportant à la formule (1) du dit paragraphe il vient :

$$n = n' + \frac{n'' - n'}{e} x,$$

les x étant comptés à partir du parement amont A.

La pression minimum n' sur le parement amont et la pression maximum n'' sur le parement aval sont données par les relations :

$$n' = \frac{N_1}{e}\left(\frac{6b - 2e}{e}\right) = \frac{N_1}{e}\left(6\frac{b}{e} - 2\right) \quad \text{et} \quad n'' = \frac{N_1}{e}\left(\frac{4e - 6b}{e}\right) = \frac{N_1}{e}\left(4 - 6\frac{b}{e}\right).$$

MM. Bouvier, Guillemain et Maurice Lévy ont montré que cette valeur de n'' ne donnait pas la véritable pression maximum et que celle-ci devait être :

$$n_1' = n'' (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) \text{ (Bouvier)} \quad \text{et} \quad n_2'' = n'' (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) \text{ (Lévy)},$$

β étant l'angle que fait le parement aval avec la verticale sur le joint considéré.

Lorsque l'eau n'agit pas sur le mur (réservoir vide), la force verticale ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

poids de la maçonnerie AMNB étant appliquée à une distance d du parement amont, les pressions normales n'' à l'aval et n' à l'amont ont pour valeur :

$$n'' = \frac{N}{e}\left(\frac{6d - 2e}{e}\right) = \frac{N}{e}\left(6\frac{d}{e} - 2\right) \qquad \text{et} \qquad n' = \frac{N}{e}\left(\frac{4e - 6d}{e}\right) = \frac{N}{e}\left(4 - 6\frac{d}{e}\right).$$

Il faut donc, pour que la maçonnerie du mur ne soit nulle part écrasée, que la pression maximum, aussi bien en charge qu'à vide, soit inférieure à la résistance limite qu'on assigne pratiquement aux maçonneries. Dans les ouvrages importants on s'attache à ce que la pression n' en charge soit au moins égale à celle de l'eau, de manière à empêcher absolument toute introduction d'eau dans la maçonnerie. Il est bon lorsque le mur est à vide que la force N passe au moins au tiers de la base à partir du parement amont.

94. **Loi du trapèze.** — Un barrage peut être considéré comme une poutre encastrée à une de ses extrémités et la loi du trapèze représente la loi suivant laquelle varie, dans chaque section horizontale, la valeur de la résistance de la maçonnerie au moment fléchissant dans cette section. Soit ABCD un solide de forme trapézoïdale (*fig.* 301) ayant comme pro-

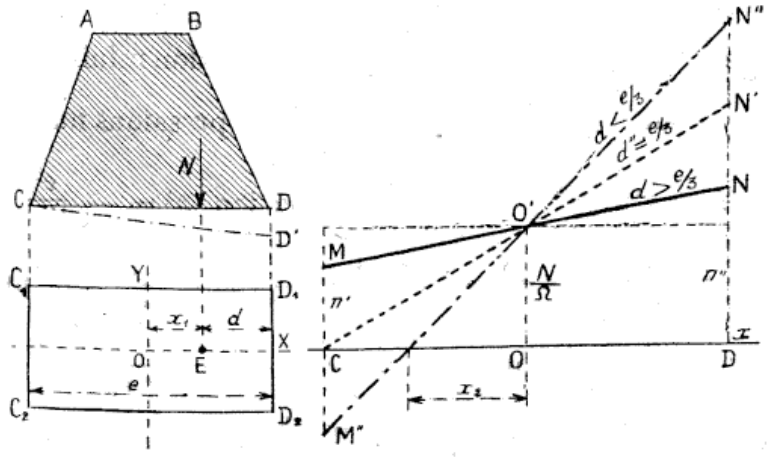


FIG. 301.

jection horizontale un rectangle $C_1D_1D_2C_2$. Sous l'action d'une force verticale N, appliquée en un point de la base, celle-ci tend à prendre une position CD′ et si le point E se trouve sur l'axe OX, et à une distance de l'axe x, de l'axe OY, en tout point du rectangle situé sur une parallèle à OY et d'abscisse x, la pression n est représentée par l'équation suivante, dans laquelle Ω est la section de la base :

$$n = \frac{N}{\Omega}\left(1 + \frac{12xx_1}{e^2}\right).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette expression est l'équation d'une droite représentant la loi de variation de la pression.

La ligne des pressions nulles est donnée par la relation : $x = -\frac{e^2}{12x}$.

Le minimum de pression a lieu avec le minimum de x, soit pour $x = -\frac{e}{2}$ c'est-à-dire sur l'arête C_1C_2 et sa valeur est :

$$n' = \frac{N}{\Omega}\left(1 - \frac{6x_1}{e}\right) = \frac{N}{\Omega}\left(\frac{6d - 2e}{e}\right).$$

d étant la distance du point E à l'arête D_1D_2.

Le maximum de pression a lieu en même temps que le maximum de x, soit pour $x = \frac{e}{2}$, c'est-à-dire sur l'arête D_1D_2 et sa valeur est :

$$n'' = \frac{N}{\Omega}\left(1 + \frac{6x_1}{e}\right) = \frac{N}{\Omega}\left(\frac{4e - 6d}{e}\right).$$

La demi-somme $\frac{n' + n''}{2}$ de la pression minimum et de la pression maximum est égale à la pression moyenne $\frac{N}{\Omega}$.

Pour toute valeur de $x_1 < \frac{e}{6}$, c'est-à-dire $d > \frac{e}{3}$, la ligne des pressions nulles se trouve en dehors du rectangle et la pression minimum n' est partout positive. Pour $x > \frac{e}{6}$ et $d < \frac{e}{3}$ la ligne des pressions nulles se trouve à l'intérieur du rectangle et elle a pour équation : $x = -\frac{e^2}{12x_1}$.

Pour toute valeur de x comprise entre $-\frac{e}{2}$ et $-\frac{e^2}{12x_1}$, la pression est positive et pour toute valeur de x comprise entre $\frac{e^2}{12x_1}$ et $-\frac{e}{2}$ la valeur de la pression est négative, c'est-à-dire qu'il y a traction au lieu d'y avoir compression. Enfin pour $x_1 = 0$, $d = \frac{e}{2}$, c'est-à-dire lorsque le point d'application de la force N se trouve au centre de gravité de la base, $n' = n'' = \frac{N}{\Omega}$ et la pression est partout égale à la pression moyenne.

L'ordonnée à l'origine 00' est égale à la pression moyenne et le coefficient angulaire de la droite a pour valeur : $\frac{12Nx_1}{e^2\Omega}$.

Pour $x_1 = 0$, $d = \frac{e}{2}$, la pression est partout égale à la pression moyenne, de sorte que la ligne des pressions est parallèle à l'axe des x.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour $x_1 < \frac{e}{6}$ et $d > \frac{e}{3}$, on obtient la droite MN, et la pression n est partout positive et plus grande que 0. Pour $x_1 = \frac{e}{6}$ et $d = \frac{e}{3}$, on a la droite CN', et la pression n est nulle en c et égale à $\frac{2N}{\Omega}$ en N'. Pour $x > \frac{e}{6}$ et $d < \frac{e}{3}$, on obtient la droite M'' N'', et la pression est négative jusqu'à ce que $x = x_2 = -\frac{e^2}{12x_1}$ où la pression est nulle.

Si l'on transporte les axes de manière qu'ils passent par c, l'équation de la droite devient :

$$n = n' + \left(\frac{n'' - n'}{e}\right) x = P + Qx. \quad (1)$$

Si l'on découpe dans la longueur du barrage une tranche de 1 mètre de longueur, la section Ω de la base de cette tranche est égale à $e \times 1$ mètre, de sorte que les valeurs de la pression minimum n' et de la pression maximum n'' peuvent s'écrire, pour cette tranche :

$$n' = \frac{N}{e}\left(\frac{6b - 2e}{e}\right) = \frac{N}{e}\left(6\frac{b}{e} - 2\right) \quad \text{et} \quad n'' = \frac{N}{e}\left(\frac{4e - 6b}{e}\right) = \frac{N}{e}\left(4 - 6\frac{b}{e}\right).$$

La loi du trapèze conduit pour un mur en forme de rectangle à un surcroît de stabilité pour le profil triangulaire (le profil triangulaire à parement amont sensiblement vertical est le profil type des barrages modernes) ; elle satisfait à la théorie mathématique de l'élasticité lorsque le niveau de l'eau affleure le sommet du triangle, que le parement amont soit vertical ou incliné. Il en est de même à vide. Pour les profils intermédiaires entre le triangle et le rectangle, pour le profil trapézoïdal, par exemple, la loi du trapèze donne des résultats qui se rapprochent d'autant plus de l'exactitude que la forme du profil est elle-même plus rapprochée du triangle et que le sommet de celui-ci est plus près du niveau de l'eau.

Le rectangle emploie un volume de maçonneries double de celui du triangle, tout en lui étant inférieur au point de vue de la stabilité. Il ne s'emploie donc que pour le couronnement des ouvrages.

95. Construction graphique (1).. — On commence par dessiner le profil du barrage à une échelle quelconque, puis on divise la hauteur en un certain nombre de parties, autant que possible égales, et l'on cherche la position des centres de gravité g'_1, g'_2, g'_3, g'_4, etc. des massifs de maçon-

(1) *Barrages en maçonnerie et murs de réservoirs*, par H. Bellet. A. Grattier et Jules Ray, éditeurs, à Grenoble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nerie compris entre le sommet et le joint I et entre les différents joints ainsi que les centres de gravité g_1, g_2, g_3, g_4, etc., des trapèzes curvilignes, qui représentent le poids de l'eau agissant sur les différents tronçons du parement amont, puis on calcule les poids correspondants p'_1, p'_2, p'_3,

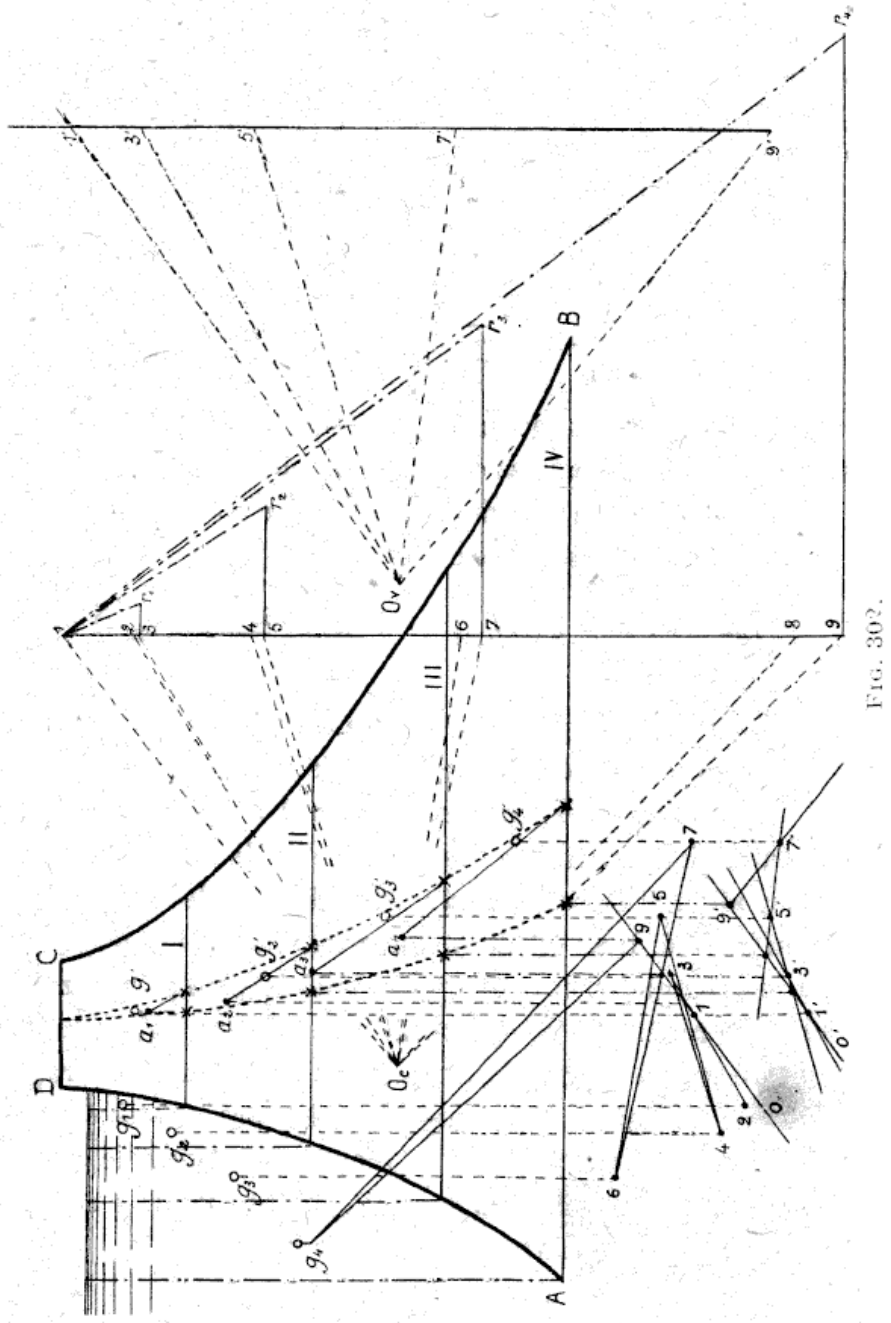


FIG. 302.

p'_4, etc., et p_1, p_2, p_3, p_4, etc. Dans la (*fig.* 302) l'échelle des hauteurs n'est que la moitié de celle des longueurs.

Pour tracer la courbe des pressions à vide, on porte sur une verticale 1′9′, et à la suite les unes des autres, des longueurs proportionnelles aux poids p' :

$$(1',3') = mp'_1\,;\ (3',5') = mp'_2\,;\ (5',7') = mp'_3\,;\ (7',9') = mp'_4,\ \text{etc.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puis on prend comme pôle un point O_v, arbitrairement choisi et l'on mène les vecteurs O_v1', O_v3', O_v9', et on trace ensuite les verticales passant par les centres de gravité g'_1, g'_2... et, par un point $1'$, situé sur la verticale de g', on mène la droite $0'1'$ parallèle à O_v1', ainsi que $1'3'$ parallèle à O_v3'. Du point $3'$ intersection de $1'3'$ avec la verticale du centre de gravité g'_2, on mène ensuite $3'5'$ parallèle à O_v5', puis $5'7'$ parallèle à O_v7'. Enfin du point $7'$, situé sur la verticale du dernier centre de gravité, on trace $7'9'$ parallèle à O_v9' qui termine le polygone des forces. Le point d'intersection de $0'1'$ et $3'5'$ donne le point de passage de la résultante de p'_1 et p'_2. Une ligne de rappel indique par suite immédiatement le point de passage de la courbe des pressions à vide sur le joint II. De même le point d'intersection de $0'1'$, de $5'7'$ et de $0'1'$ avec $7'9'$ donne les points de passage de cette même courbe sur les joints III et IV.

Pour la courbe des pressions en charge, on porte sur une verticale (1,9) des longueurs successivement proportionnelles à p et p' telles que :

$$(1,2) = mp_1\,;\ (2,3) = mp'_1\,;\ (3,4) = mp'_2\,;\ (4,5) = mp_2 \ldots$$

Puis comme précédemment on choisit un pôle arbitraire Oc et l'on trace le polygone des forces 1 $Oc9$. On construit ensuite le polygone funiculaire (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), en menant successivement $O1$ parallèle à $Oc1$, puis (1,2) parallèle à $Oc2$, puis 2,3 parallèle à $Oc3$ et ainsi de suite. Par le point 8 situé sur la verticale du centre de gravité du dernier trapèze des eaux, on mène (8,9) parallèle à $Oc9$ qui ferme le polygone des forces.

Le point d'intersection de 01 et de (2,3) donne le passage de la résultante de p_1' et de p_1 (par suite de la petitesse du poids p_1, ce point se confond avec la figure sur le point 1). En portant au-dessus du joint 1 une longueur égale au tiers de la hauteur de l'eau au-dessus de ce joint, on obtient le point a d'application de la poussée F_1. De même, le point d'intersection de 01 et de (4,5), donne le point de passage de la résultante de p_1, p_1', p_2 et p'_2, ce qui détermine le point a_2. Enfin le point d'intersection de 01 et de (8,9) permet d'avoir le point de passage de la résultante des forces verticales agissant sur la base et par suite le point a_4. Cette résultante est représentée sur le polygone des forces de gauche par la longueur (1,9).

Si enfin par le point 9 du polygone des forces on mène horizontalement une longueur $(9,r_4)$ proportionnelle à la poussée F_4 de l'eau agissant sur toute la hauteur du barrage, la droite $(1r_4)$ donne la direction et indique en même temps la grandeur et la résultante des forces auxquelles est soumis le barrage. Il suffit donc de mener par a_4 une parallèle à $(1r_4)$ pour déterminer sur la base AB le point de passage de la courbe des pressions en charge. Les points de passage de cette même courbe sur les autres points s'obtiennent de même en portant horizontalement par 3,5 et 7 des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

longueurs proportionnelles à F_1, F_2, F_3 et en menant par a_1, a_2, a_3 des parallèles à $1r_1$, $1r_2$ et $1r_3$.

M. Thiery a donné la formule suivante permettant de déterminer d'une façon rapide l'épaisseur moyenne x d'un profil de barrage, quand on connaît la hauteur h, le fruit n adopté pour le parement aval, le coefficient N de résistance permanente à la compression (7 kilogrammes) et le poids ω de 1 mètre cube de maçonnerie (2.250 kilogrammes) :

$$\frac{x}{h} = \frac{-3Nn + 2\sqrt{N\left[3N\left(n^2 + \frac{1000}{\omega}\right) - h\,(n^2 + 4000)\right]}}{2\,(3N - 4\omega h)}.$$

Si on fait $n = 0{,}50$, on déduit de cette formule : $\frac{x}{h} = \frac{1}{3}$.

Pour la base supérieure b, on aura : $b = \frac{h}{2}\left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2}\right)$

Et pour la base inférieure : $B = \frac{h}{2}\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{2}\right)$.

96. Méthode Lévy. — La circulaire ministérielle du 15 juin 1897 relate les formules établies par M. Maurice Lévy, inspecteur général des Ponts et Chaussées, relatives aux barrages-réservoirs. Les principes posés par cet éminent ingénieur sont les suivants : qu'en aucun point du parement d'amont la compression de la maçonnerie ne puisse être inférieure à la pression de l'eau, de façon que, si même une fissure est formée, l'eau ne puisse y pénétrer ; que, suivant aucune ligne droite ou courbe tracée dans une section transversale du barrage, et en aucun point de cette ligne, il ne puisse y avoir tendance au glissement ou écrasement de la maçonnerie, ou effort de traction sur les mortiers, et qu'en particulier il ne puisse se produire de soufflures ou tractions tendant à séparer les parements d'aval du corps de barrage.

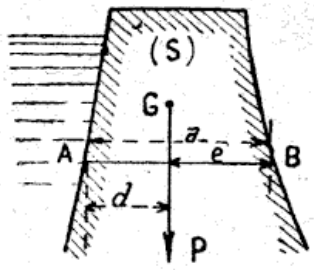


Fig. 303.

Soient : a la largeur d'un joint horizontal quelconque AB, S la surface de la partie du barrage située au-dessus de ce joint, d la distance de l'extrémité amont du joint à la verticale passant par le centre de gravité G de la surface (S), et D le poids du mètre cube de la maçonnerie sèche (*fig.* 303).

Quand le réservoir est vide, le joint AB supporte par mètre courant le poids P de la maçonnerie sèche qui a pour valeur : $P = SD$, lequel agit en c à la distance d de l'extrémité amont du joint, et on a, en appliquant la loi du trapèze :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour la pression moyenne sur le joint AB : $\frac{P}{a}$.

Pour la pression à l'extrémité amont A : $\frac{4a - 6d}{a} \times \frac{P}{a}$.

Pour la pression à l'extrémité aval B : $\frac{6d - 2a}{a} \times \frac{P}{a}$.

Lorsque le réservoir est plein d'eau, le poids du mètre cube de maçonnerie doit être diminué de 100 kilogrammes pour tenir compte de l'effet nuisible des eaux d'infiltration qui viennent suinter sur le parement aval. On posera donc : $D_1 = D - 100$ kilogrammes. Le joint AB (*fig.* 304) supportera, par suite, par mètre courant : d'une part, le poids P de la maçonnerie de la digue qui a pour valeur $P = SD_1$ et qui agit à la distance d ; d'autre part, le poids π de l'eau du réservoir qui presse sur le parement amont du barrage et qui agit à une distance δ de l'extrémité amont du joint, c'est-à-dire qu'il supporte par mètre courant un poids total P_1 qui a pour valeur : $P + \pi$, et dont la distance d' à son extrémité amont est donnée par la relation :

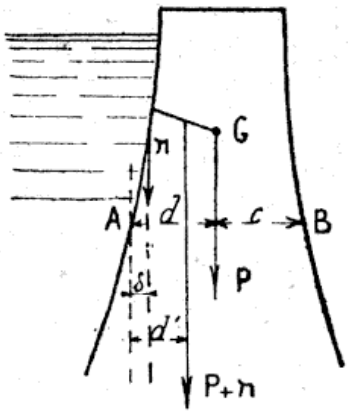


FIG. 304.

$$d' = \frac{Pd + \pi\delta}{P + \pi}.$$

La partie du barrage située au-dessus du joint AB reçoit, d'autre part (*fig.* 305), la poussée Q par mètre courant de l'eau du réservoir qui agit à une hauteur h au-dessus de ce point, et la résultante R des deux forces P′ et Q peut rencontrer le joint AB au point D. Cette résultante fait avec la verticale un angle α qui a pour valeur :

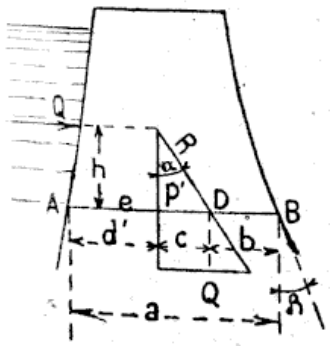


FIG. 305.

$$\text{tang } \alpha = \frac{Q}{P'}.$$

Si l'on appelle c la distance de son point d'application au point c', on a :

$$c = h \text{ tang } \alpha.$$

Et la distance $b = BD$ du point d'application de la résultante R à l'extrémité aval du joint a, par suite, pour expression :

$$b = a - (d' + c).$$

Ainsi la résultante R, qui agit sur le joint horizontal AB, peut se décom-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

poser en deux forces, une composante horizontale Q et une composante verticale P′ qui a son point d'application en D à la distance b de l'extrémité aval B du joint. La composante horizontale Q doit être détruite par la cohésion des maçonneries et par le frottement ; on fera abstraction de la cohésion des maçonneries, et l'on admettra qu'il faut qu'il n'y ait pas glissement, c'est-à-dire que tang α soit plus petit que le coefficient de frottement. Quant à la composante P′, elle se répartit sur le joint horizontal AB, et, en appliquant la loi du trapèze, on a :

Pour la pression moyenne sur le joint AB : $\frac{P'}{a}$.

Pour la pression à l'extrémité aval B : $\frac{4a - 6b}{a} \times \frac{P'}{a}$.

Et pour la pression à l'extrémité amont A : $\frac{6b - 2a}{a} \times \frac{P'}{a}$.

Mais la pression qui se produit sur le joint horizontal à son extrémité aval B, et que l'on désigne par p, n'est pas la pression la plus forte que la maçonnerie ait à supporter en ce point, car il y a à calculer la pression maximum maximorum que la maçonnerie peut avoir à supporter en B sur le parement aval.

Cette pression a pour valeur, d'après M. Maurice Lévy :

$$\frac{p}{\cos^2 \beta} = p\,(1 + \operatorname{tang}^2 \beta),$$

β étant l'angle que fait le parement aval avec la verticale (*fig.* 306) ; et, d'après M. Bouvier :

$$\frac{p}{\cos^2 \alpha} = p\,(1 + \operatorname{tang}^2 \alpha).$$

Pour appliquer ces formules, on aura à calculer :

1° Les surfaces S et les distances d de leur centre de gravité à l'extrémité amont des joints ; 2° les poids P et P_1 de la maçonnerie du barrage pour les deux densités D et D_1 ; 3° les valeurs de π et de δ pour la retenue normale et pour la surélévation maximum que pourront produire les effets réunis des crues et des vagues ; 4° enfin les valeurs de P′ et d' dans ces deux cas. Ces résultats sont consignés dans des tableaux que l'on dresse à cet effet.

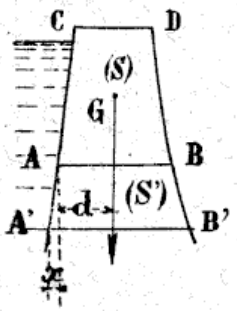


FIG. 306.

Si nous supposons que la section du barrage est divisée en rectangles dont la position du centre de gravité est immédiatement connue et qu'on veuille déterminer les moments de ces surfaces partielles, on procédera comme suit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour le joint AB, la valeur S de la surface ABCD, celle du moment M de S par rapport à l'extrémité amont A de ce joint sont connues, et l'on tire d (*fig.* 305) de la formule : $d = \frac{M}{S}$.

Pour passer au joint suivant A′B′, dont l'extrémité A′ se trouve à une distance x de l'extrémité A du joint précédent, on a à calculer le moment M de la surface A′B′DC ou S + S′ par rapport à l'extrémité A′, moment qui a pour valeur : M′ = Sd + Sx + moment de S′ par rapport à V.

Mais Sd = M ; il suffit donc, pour obtenir M′, d'ajouter Sx à la valeur déjà trouvée pour M et la valeur de S′ par rapport à A′.

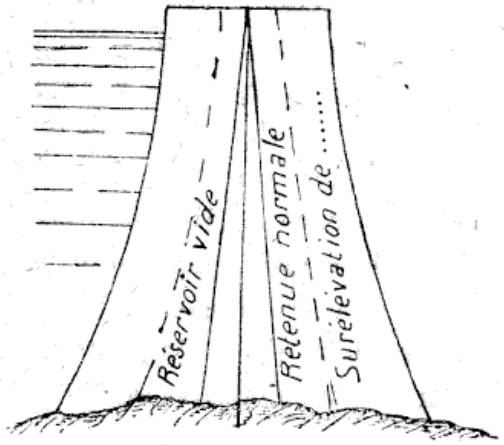


FIG. 307.

Les demandes à l'appui de l'établissement d'un barrage doivent être accompagnées d'une épure de stabilité, comme l'indique la (*fig.* 307) et de tableaux résumant les calculs pour chacun des joints que comporte l'ouvrage tant pour la retenue normale que pour la surcharge qui sont : tableau I, calculs de S et de d ; tableau II, calculs de P et de P_1 ; tableau III, calculs de π et de πd; tableau IV, calculs de P′ et de d' ; tableau V, calcul des pressions à vide et tableau VI, calcul des pressions et tang α en charge.

Les deux tableaux terminaux ont trait à l'inscription des pressions aval et amont.

Pressions à l'amont sur les joints horizontaux.

RÉSERVOIR EN EAU		RÉSERVOIR
Surélévation de	Retenue normale	VIDE

Pressions à l'aval sur les joints horizontaux avec indication en regard de la pression maxima sur le parement aval.

RÉSERVOIR	RÉSERVOIR EN EAU	
VIDE	Retenue normale	Surélévation de
.....	.. { Bouvier / Lévy	.. { Bouvier / Lévy

On trace en traits pleins les courbes de pression et en traits pointillés les courbes qui passent par les tiers des joints horizontaux.

Si on assimile le calcul des barrages à celui d'une poutre pleine supportée par deux appuis, et en faisant intervenir l'hypothèse d'après laquelle les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sections transversales d'une poutre, planes avant la déformation, restent telles après, d'ailleurs confirmée par Navier, il semble tout naturel d'appliquer la *loi du trapèze*, basée sur l'hypothèse que nous venons de noter, pour le calcul des pressions normales sur les diverses sections horizontales faites au travers d'un barrage.

D'après M. H. Bellet, la loi du trapèze donne à l'amont des résultats favorables à la stabilité, lorsque le sommet du triangle se trouve plus élevé que le niveau de l'eau (pour le profil triangulaire) et que ces résultats doivent se rapprocher d'autant plus de ceux trouvés pour le triangle ou pour le rectangle que le profil considéré se rapproche plus de l'un ou de l'autre de ces deux profils particuliers.

Pour ce qui est des conditions de stabilité à l'aval, il semble que, dans tous les cas, la règle du trapèze doit donner des résultats favorables. La méthode de M. Lévy permet donc de calculer un barrage en maçonnerie avec autant de précision qu'une résistance des matériaux.

La circulaire du 15 juin 1897, dont le but principal était de faire procéder à la revision des conditions de stabilité des barrages *existants*, ne donne aucun renseignement sur la fixation des dimensions à adopter pour un ouvrage projeté. Dans ces conditions, on peut être conduit à de nombreux tâtonnements avant de trouver un profil répondant aux conditions imposées. La pratique a permis de reconnaître qu'on évite cet inconvénient en choisissant une section transversale établie comme suit :

Soit h la hauteur verticale connue du mur au point le plus profond de la vallée à barrer. Prenant pour épaisseur à la base une longueur B′C′ égale à la hauteur AB′ (*fig.* 308), le profil théorique sera représenté par le triangle B′AC′. Mais, en pratique, il faut donner une certaine épaisseur au mur en couronne et, aussi, le surmonter d'un parapet pour éviter les effets des vagues du réservoir. On prend généralement AD égal au 1/10 environ de la hauteur et l'on donne au parapet AH une hauteur de 1 à 3 ou 4 mètres suivant les circonstances locales. Quant au parement aval, on lui donnera à la partie supérieure la forme d'un arc de cercle tangent à la verticale DI en D et à ligne AC′ en un point J′ tel qu'on ait I′D = I′J′. Le profil sera alors représenté par le polygone mixtiligne B′AHH′DJ′C′.

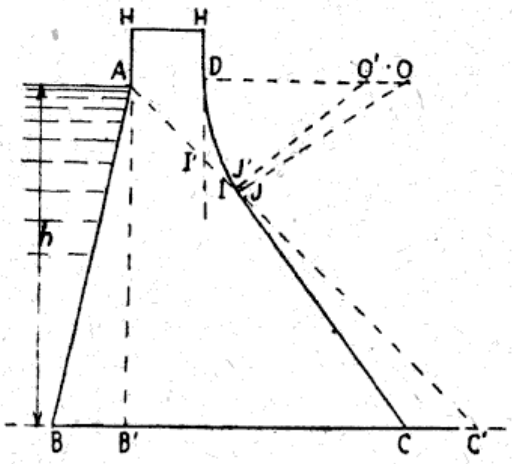


FIG. 308.

Si le mur a une grande hauteur, il serait difficile de construire verticalement le parement d'amont ; il est préférable de lui donner un certain

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fruit, ce qui, non seulement facilite sa construction, mais encore place les maçonneries dans de meilleures conditions de résistance, attendu qu'alors on utilise le poids de l'eau du réservoir pour rapprocher la ligne des pressions (réservoir plein) du milieu de la digue. Un fruit de 0,10 à 0,20 est suffisant ; dans ces conditions, il n'est pas utile de donner à la base une largeur supérieure à la hauteur verticale de l'ouvrage. On ramène dès lors le point C′ en C (CC′ = BB′) et le profil final devient BAHH′DJC. On peut affirmer que, dans ce cas, les conditions de stabilité requises seront remplies et que la pression par centimètre carré sur la base ne dépassera pas le chiffre de 12 kilogrammes auquel on considère comme prudent de limiter cet effort, quand le sol de fondation présente les qualités d'incompressibilité et d'inaffouillabilité requises pour l'établissement d'un barrage de grande hauteur.

97. **Méthodes Bouvier et Guillemin, Peltreau et Heltier, Wegmann.** — *a) Méthode Bouvier et Guillemain.* — Soit à déterminer la pression maximum subie par un point O, par exemple, du parement aval du barrage.

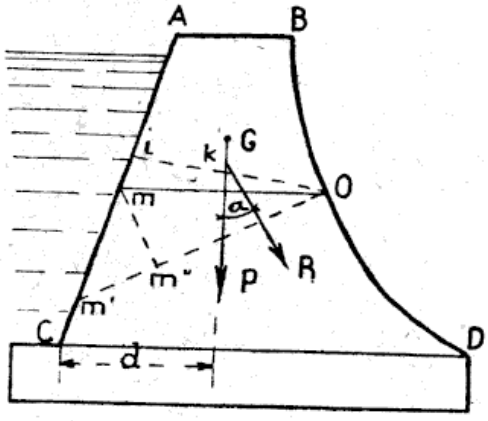


FIG. 309.

Considérons le massif AB*m*O (*fig.* 309), limité inférieurement par la ligne horizontale O*m*, et les massifs ABO*i* et ABO*m*′, définis par deux lignes inclinées telles que O*i* et O*m*′.

La résultante R des forces agissant sur le massif ABO*m* sera, en valeur absolue, plus grande que la résultante R′ des forces agissant sur le massif ABO*i*, puisque dans ce dernier cas on n'a à tenir compte ni du poids des maçonneries du triangle *m*O*i* ni des pressions d'eau exercées en *mi*.

Si on répartit successivement les deux forces R et R′ suivant O*m* et O*i*, d'après la loi du trapèze, on trouvera pour la pression en O une valeur plus grande dans le premier cas que dans le second.

Passons maintenant au massif *m*′ABO ; de toutes les droites partant de O et situées au-dessous de O*m*, c'est la ligne *mm*″, parallèle à *k*R, qui représentera le joint fictif qui aura à supporter la plus forte valeur de la pression en *m*, R intervenant dans ce cas avec sa valeur absolue et la distance *z*O étant d'ordre aussi petit que possible.

Par suite, la distance *d* atteint son maximum, de même la pression au point C, que nous appellerons P*m*.

Si on désigne par *a* la longueur du joint O*m*, la pression oblique R a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour valeur : $\frac{P}{\cos \alpha}$, et M. Bouvier considère qu'elle se répartit sur une longueur $Om'' = a \cos \alpha$ et par suite la pression maximum au point O devient :

$$P_m \times \frac{1}{\cos^2 \alpha} = P_m (1 + \tang^2 \alpha),$$

P_m ayant pour valeur : $\frac{6d - 2a}{a} \times \frac{P}{a}$.

Ainsi la considération des joints obliques conduit à augmenter, dans certains cas, les dimensions à donner au profil transversal du barrage.

M. Guillemain estime qu'il y a lieu de considérer la section Om' comme supportant le poids de toute la partie du mur m'ABO et la poussée de l'eau sur toute la hauteur du parement amont Am', et non simplement les forces agissant au-dessus de la ligne horizontale Om. Cette considération a pour effet de donner au profil une surépaisseur à la partie inférieure du parement aval et à construire le barrage suivant la forme caractéristique de la (*fig.* 310), qui représente un type établi par la méthode de M. Guillemain. On détermine le parement d'aval (l'épaisseur au couronnement étant connue) en donnant à chaque assise *ab* une largeur suffisante pour qu'aucune des sections obliques, telles que *ac*, *ad*, *ae*, etc., que l'on peut imaginer dans le mur rayonnant autour d'une même arête de renversement *a*, ne présente des conditions de résistance inférieures à celles qu'on déterminerait en s'occupant de la base. Les amorces de courbes en pointillé du parement aval représentent les courbes de ce même parement, telles qu'elles devraient être pour différentes hauteurs inférieures à la hauteur maximum du profil représenté en trait plein.

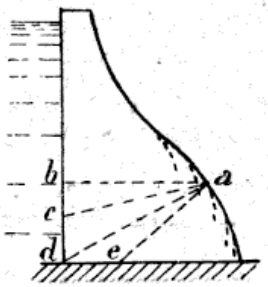


FIG. 310.

Il peut arriver que, pour une section oblique, la résultante des forces appliquées au barrage au-dessus de cette section fasse avec la normale à la direction de ce joint un angle supérieur à l'angle de frottement ; alors, dans ce cas, comme le frottement seul ne suffit pas, il faut faire intervenir la résistance des maçonneries au cisaillement pour empêcher tout glissement suivant la section oblique envisagée.

b) Méthode Pelletreau et Hélier. — M. Pelletreau, comme MM. Guillemain et Bouvier, fait reposer sa méthode sur l'abstraction de la composante horizontale de la force à laquelle l'ouvrage doit résister. De plus, il admet que le mur résiste par son propre poids à la flexion et qu'une force

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

oblique qui agit sur une section de mur produit un danger pour l'écrasement équivalent à celui que donnerait la composante normale au plan.

La méthode consiste à décomposer la hauteur du barrage (*fig.* 311) en quatre zones, limitées chacune par des lignes droites tant pour le profil aval que pour celui amont. Ainsi la première zone supérieure a son parement amont vertical et celui aval oblique. La pression qu'elle supporte, nulle au sommet, croît pour atteindre la limite R, à une certaine distance de ce sommet. Le profil est calculé pour le barrage en charge d'eau. La courbe des pressions passe par le 1/3 médian de la section, et la répartition des pressions se fait comme nous l'avons indiqué plus haut. La deuxième zone est limitée inférieurement au joint où la courbe des pressions, le barrage étant en eau, sort du 1/3 médian. Dans cette deuxième zone, on calcule la pression maxima amont en supposant le réservoir vide et celle en aval en le supposant plein, les deux courbes de pression restant dans le 1/3 médian. Dans ce cas, la pression maximum au point B est :

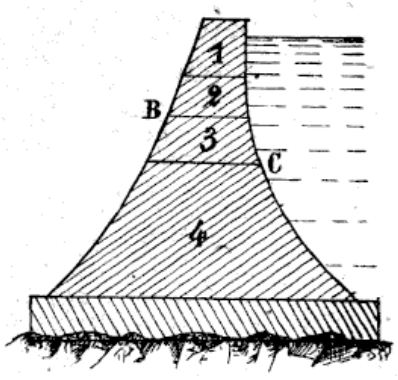


FIG. 311.

$$P_1 = \frac{6d - 2a}{a} \times \frac{P}{a}.$$

La troisième zone est limitée au joint où la courbe des pressions du barrage, supposé vide, sort du 1/3 médian. La pression maximum au point C est :

$$P_2 = 2\,\frac{P}{3d}.$$

Pour le calcul de la pression maximum dans le cas du réservoir vide, on répartit la pression sur la partie aval du joint de longueur $3d$.

Dans la dernière zone, les deux courbes de pression sont l'une et l'autre en dehors du 1/3 médian. On opère d'ailleurs comme pour la troisième.

M. Hétier, à l'encontre de M. Pelletreau qui estime que la tension ne peut atteindre en aucun cas la limite de sécurité quand la formule des compressions est satisfaite, admet que l'effort de glissement peut amener la ruine de l'ouvrage.

La conclusion pratique à tirer des formules de M. Hétier est que, lorsque le barrage dépasse une hauteur de 35 mètres, il est nécessaire de tenir compte des pressions dans les sections obliques. Le profil qu'il obtient se rapproche de celui de M. Guillemain.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c) Méthode Wegmann. — Les formules établies par cet ingénieur américain ont trait à des barrages ne dépassant pas 60 mètres, par conséquent s'appliquant largement à la généralité des cas et elles ont pour but de faciliter les calculs longs et laborieux auxquels l'étude de ces ouvrages donne lieu.

On divise le profil du barrage en un certain nombre de sections limitées par des plans horizontaux équidistants (*fig.* 312) et on applique les deux formules ci-après qui fournissent le moyen de connaître la longueur d'un joint quelconque lorsqu'on a la valeur du joint immédiatement supérieur :

$$x = a + \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{Q}\left(\frac{l+x}{2}\right)h} + c, \text{ valeur du joint inconnu,}$$

et :

$$y = \frac{q\,(4x - 6m) + lh\,(x - l) + x^2\,(h - \mathrm{R})}{6q + h\,(2l + x)}.$$

Les indications de quelques-unes des valeurs entrant dans ces formules se reconnaissent à l'inspection de la figure ; pour les autres, Q est le poids de la maçonnerie au-dessus du joint x ; M, le moment de la poussée horizontale de l'eau par rapport à un point quelconque du joint x, qui est égal à $\frac{d^3}{\delta}$ (d, profondeur de ce joint au-dessous du plan d'eau ; δ densité des maçonneries = 2 1/3) ; q, le poids de la maçonnerie au-dessus du joint l, et R, la valeur de pression limite. P_1 et P sont les courbes de pression dans le cas du réservoir plein et du réservoir vide.

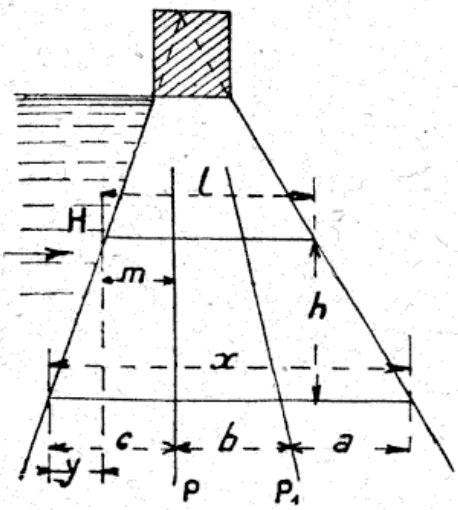


FIG. 312.

Ces formules, qui ne tiennent pas compte de la force des vagues et du choc des corps flottants, conduisent à un profil satisfaisant aux conditions ordinaires, à savoir : lignes de pression restant constamment dans le tiers médian du profil maxima des compressions supportées par les maçonneries et le sol des fondations ne dépassant pas ainsi les limites de sécurité, frottement du mur sur les fondations ainsi que le frottement de l'une sur l'autre de deux tranches du mur séparées par un plan quelconque horizontal, suffisants pour s'opposer à tout glissement.

En ce qui concerne les vagues, la partie supérieure du barrage doit présenter l'épaisseur nécessaire pour résister à leur choc ; en général on en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tient compte dans le calcul du travail de la maçonnerie, pour la masse du mur, en supposant les vagues capables de produire un effet statique équivalent à une charge d'eau dont la hauteur est égale à la moitié du plan d'eau moyen entre le sommet des vagues et leur creux.

Le profil théorique des barrages calculés d'après la méthode Wegmann affecte la forme d'un triangle rectangle ayant sa face amont verticale. Pour l'épaisseur du couronnement, M. Wegmann prend 1/10 de la hauteur totale du barrage.

Le travail maximum des maçonneries à la compression est supposé de 14 kilogrammes par centimètre carré, et on a vu que la densité des matériaux était de 2,33.

98. Courbes des pressions dans un profil normal. — M. l'ingénieur R. Ruffieux a donné les moyens pratiques ci-après pour l'obtention des courbes et des équations de ces mêmes courbes dans un profil normal.

Soient (*fig.* 313) : OBB′O′, un profil normal dans lequel on a réduit l'épaisseur théorique de la partie rectangulaire, et surmonté la partie triangulaire d'un couronnement de petite section transversale σ ; OAB, une section horizontale à une profondeur h au-dessous de l'eau ; S et s, les surfaces A′O′OA et CAB des parties rectangulaires et triangulaire situées au-dessus de cette section ; x_1 la distance positive ou négative du centre de gravité de la surface δ à la ligne d'action de la résultante des poids des parties S et s.

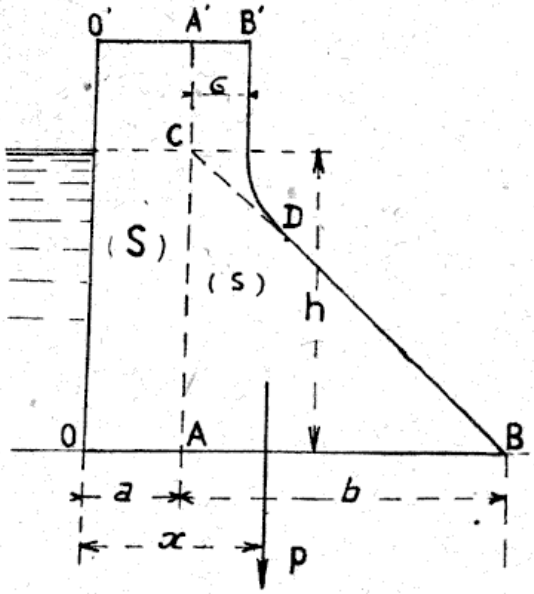


FIG. 313.

On peut arriver à déterminer très rapidement les points des courbes des pressions situées au-dessous du plan horizontal qui passe par le point D où le parement aval de la surface σ rencontre celui de la surface s. L'équation de la courbe des pressions à vide est la suivante :

$$(1) \qquad x = \frac{a}{2} \pm \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{3}\right)\frac{s}{S+s} + \frac{\sigma x_1}{S+s+\sigma}.$$

Les différents points de la courbe des pressions en eau sont situés à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'aval des points correspondants de la courbe à vide, à une distance de ces points égale à :

$$\varepsilon = \frac{h}{3} \frac{Q}{\Delta (S + s + \sigma)} \quad (1)$$

Si tang $a = \sqrt{\frac{1}{\Delta}}$, la valeur de ε se réduit à :

$$\varepsilon = \frac{b}{3} (S + s + \sigma);$$

a, angle que fait CD avec CA, et Δ, densité des maçonneries du barrage. Il y a intérêt, à tous les points de vue, à donner à σ la plus petite valeur possible ; le point D sera donc en général très peu au-dessous du niveau de la retenue, et la connaissance exacte des courbes des pressions au-dessous de ce point sera suffisante pour les déterminer entièrement dans l'étendue du barrage. L'aire de la surface σ étant alors calculée une fois pour toutes, celles de S et de s se déduisant immédiatement des diverses valeurs que l'on donne à h, et x_1 pouvant se mesurer sur une épure avec une exactitude suffisante, les équations (1) et (2) permettent de déterminer très rapidement les courbes de pression.

Ces courbes diffèrent très peu de celles que l'on obtient avec un profil normal théorique, qui seraient des arcs d'hyperboles très voisins de leurs asymptotes.

99. Barrages en voûtes. — Pour le calcul de ces ouvrages, on pourra consulter les savants mémoires de MM. les ingénieurs Pelletreau et R. Ruffieux, parus dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (1er trimestre 1897 et 1er trimestre 1901).

Les conclusions données par M. R. Ruffieux sont intéressantes à consigner. D'après cet ingénieur, les deux systèmes, au point de vue technique, limités à l'emploi des maçonneries sont à peu près équivalents. Cependant l'effet des variations de température serait peut-être plus à craindre dans un barrage en voûtes, surtout le réservoir étant vide ; mais, à ce point de vue, un renforcement général ou partiel par des armatures métalliques permettrait au barrage de défier toutes les variations de la température.

Mais il peut arriver, si les poussées d'amont en aval par les voûtes ne se répartissent pas uniformément sur toute la largeur des piles, que le travail y soit supérieur, dans certains profils, à celui que donnerait le calcul ; il faut, dans ce cas, réduire ce dernier à une valeur assez faible pour qu'il n'en résulte rien d'inquiétant pour la résistance des piles.

Le *barrage continu* serait peut-être préférable au barrage en voûtes, en cas de disparition complète de l'ouvrage entre deux profils déterminés. Pratiquement, l'exécution de voûtes verticales d'épaisseur très faible et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de grande hauteur serait plus difficile que celle d'un barrage ordinaire ; il n'y aurait donc intérêt à adopter ce système que s'il conduisait à une économie notable. Tel est le cas lorsque l'ouvrage est destiné à servir simplement de barrage et non de viaduc, et il y a tout intérêt à donner aux voûtes la plus grande ouverture possible et à réduire l'épaisseur des piles au minimum compatible avec leur stabilité.

On pourrait, d'autre part, obtenir des barrages continus plus économiques que les murs à profil constant, en faisant varier l'angle au sommet de la partie triangulaire suivant la profondeur de la vallée, le long du barrage ; mais il semble peu probable que ce système soit moins coûteux qu'un barrage en voûtes.

Les *barrages curvilignes* travaillent comme les voûtes des ponts en maçonnerie. Leur forme la plus ordinaire est celle d'un arc de cercle.

Dans ces ouvrages, il faut évidemment que les appuis soient absolument fixes et de toute solidité. Il est évident, en outre, que la maçonnerie ne doit être nulle part soumise à des efforts plus élevés que ceux qu'elle peut pratiquement supporter.

La tendance moderne est d'assimiler les voûtes des ponts en maçonnerie à des arcs en matériaux élastiques encastrés, méthode qui a été préconisée par M. J. Résal. Cette méthode est applicable aux barrages curvilignes lorsque l'épaisseur du barrage est très petite par rapport au rayon moyen.

Trois profils peuvent être employés pour les barrages curvilignes : profil avec parement aval vertical et le profil est dit amont, profil avec deux parements hyperboliques et profil à parement amont vertical et le profil est dit aval.

Si on désigne par s le raccourcissement, rapporté à l'unité de longueur, d'un élément d'arc de cercle de la voûte, par n_1 la pression élastique normale aux éléments de cylindres qui composent la voûte, par E le coefficient d'élasticité longitudinale de la maçonnerie et par $\frac{1}{\nu}$ le coefficient de contraction transversale, ce raccourcissement est donné en chaque point par la relation :

$$Es = p - \frac{1}{\nu}(n + n_1);$$

p pression élastique normale par unité de surface, n pression normale aux sections horizontales.

Le barrage ne pouvant pas se déplacer à la base, on peut avoir une valeur approchée de la partie de la pression de l'eau qui fait travailler le barrage comme une voûte, en écrivant que le raccourcissement moyen s_m est nul et en posant approximativement :

$$Es_m = p_m - \frac{1}{\nu}(n_m + n_{1m}) = 0.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La valeur de p_m, dans l'hypothèse où la voûte ne subit aucune déformation, est égale à : $H_1 \frac{r_e}{e}$; H étant la composante de la pression de l'eau qui fait travailler le barrage comme une voûte, e la largeur de la base et r_e le rayon du cercle d'extrados. La valeur de n_m est égale à $\frac{N}{e}$, N étant la résultante des pressions verticales qui agissent sur la base ; quant à celle de n_{1m}, on peut la considérer comme approximativement égale à la demi-somme des valeurs extrêmes de n_1, c'est-à-dire :

$$n_{1m} = \frac{a'H + (n' - a'H)\,\mathrm{tg}^2\beta_1 + n''\,\mathrm{tg}^2\beta}{2};$$

H hauteur de l'eau au-dessus de la base, β et β_1 les angles d'inclinaison à la base des deux parements, a' un coefficient par lequel il faut multiplier la poussée horizontale de l'eau qui fait travailler le barrage comme une voûte, pour tenir compte des dépôts accumulés devant le parement, n' et n'' pressions à l'extrados et à l'intrados. Si l'on pose $n' = \gamma H$ et si l'on remarque que l'on a : $n'' = 2\frac{N}{e} - n'$, il vient :

$$H_1 = \frac{H\left[a'\left(1 - \mathrm{tg}^2\beta_1\right) - \gamma\left(\mathrm{tg}^2\beta - \mathrm{tg}^2\beta_1\right)\right] + 2\frac{N}{e}\left(1 + \mathrm{tg}^2\beta\right)}{2\nu a'\frac{r_e}{e}}.$$

La pression contre laquelle le barrage a à résister par son propre poids est, pour chaque section horizontale : $\lambda = y - y_1$, et à la base elle est par suite : $H_2 = H - H_1$. Au fur et à mesure que l'on remonte de la base au sommet, la valeur de λ diminue par rapport à celle de y_1, celle-ci restant seule en compte à la crête.

Pour des barrages curvilignes établis dans des gorges étroites (cas le plus usuel) il paraît plus que suffisant de s'imposer la condition $\gamma = 0$, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas de traction à l'amont en charge (γ peut même devenir négatif lorsque la gorge de la vallée est très étroite). Quant à la valeur de ν elle peut varier de 3 à 4.

100. Efforts à admettre dans le travail des matériaux. — Les dimensions d'un barrage-réservoir doivent être calculées comme si la hauteur de l'eau atteignait le couronnement et régler le déversoir de telle façon que, en cas de crues, le niveau maximum de l'eau reste inférieur au couronnement.

Assez généralement on admet que la largeur au couronnement est le dixième de la hauteur de la retenue. Il est prudent pour le calcul des barrages en charge d'attribuer à la maçonnerie un poids inférieur de 100 kilo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grammes par mètre cube à son poids réel (circulaire ministérielle du 15 juin 1897). Mais à vide, la maçonnerie doit être calculée avec son poids réel.

Lorsque le parement aval du barrage est soumis à une contre-pression par suite des remblais humides de remplissage qui appuient sur les deux parements, on doit calculer les parties de l'ouvrage enfouies dans le sol comme soumises, d'une part, à la compression de l'eau et, d'autre part, à un supplément de poussée due aux terres détrempées.

La capacité du réservoir croît comme le carré de la hauteur de retenue dans le cas d'une vallée à section rectangulaire et comme le cube de cette même hauteur dans le cas d'une section triangulaire, alors que les pressions développées dans la maçonneries ne croissent que proportionnellement à la hauteur du mur et de la retenue.

Pour la détermination des efforts maximum à admettre à la base d'un barrage, il y a à considérer la résistance du terrain et la résistance des matériaux à employer. Si le mur repose sur le rocher suivant une surface sensiblement horizontale, la pression supportée par ce rocher n'est égale en chaque point qu'à la pression normale n. Ainsi les roches dures peuvent supporter une compression maximum de 20 kilogrammes. Au point de vue des matériaux, on arrive avec des mortiers éminemment hydrauliques à des résistances à la traction de 15 kilogrammes et à 25 kilogrammes pour le mortier de ciment ; ceci limite pour le béton la compression maximum à 60 ou 100 kilogrammes. Par suite, pour un barrage du type normal, à profil sensiblement triangulaire, la hauteur maximum ressort à 40 mètres pour le ciment et à 25 mètres environ pour la chaux. Pour les hauteurs plus grandes, il faut avoir recours, pour augmenter la résistance au cisaillement, au béton armé ou plutôt à la maçonnerie qui est la seule pratique pour les grandes hauteurs, surtout la maçonnerie de blocage au béton, avec joints divisés autant que possible suivant les lignes isostatiques où le cisaillement est nul.

Pour les barrages de grande hauteur, on construit le mur avec de la chaux pour les parties où la pression est inférieure à 10 ou 12 kilogrammes par centimètre carré et avec du ciment pour les autres. Si on veut avoir un mortier bien compact, aussi imperméable que possible, il faut que le volume de la pâte présente un volume au moins égal à celui du vide du sable.

Les barrages établis en plan suivant un arc de cercle sont tels que la flèche soit au moins égale au 20^e de la largeur de la vallée. Mais, pour les ouvrages de très grande longueur, il est préférable de construire le mur suivant plusieurs arcs de cercle, à la manière des voûtes d'un pont, en ménageant un renforcement de l'ouvrage à la jonction de deux arcs consécutifs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

101. Coût des barrages. — Les barrages du Gouffre-d'Enfer, de Chartrain, de Ternay et de l'Urft ont fait revenir le coût du mètre cube d'eau emmagasiné aux prix respectifs de 1 fr., 0 fr. 47, 0 fr. 34 et 0 fr. 10. Ceux du Sodom et de Bog Broock à 0 fr. 12 et 0 fr. 11.

Au surplus, nous donnons à cet égard des prix d'installation aux (§§ 103 à 118), et en outre le lecteur peut se référer aux descriptions d'usines aménagées que nous donnons dans le tome II de cet ouvrage.

Tous les profils que l'on peut imaginer, pour une même retenue et une même largeur de la vallée ont même base. Dans tous les cas le volume des maçonneries est proportionnel au carré de la largeur de la vallée. Pour des gorges étroites, l'économie réalisée sur le cube des maçonneries peut être considérable. De plus, la largeur à la base étant plus faible que dans le cas d'un barrage rectiligne, la dépense pour les fouilles se trouve réduite ainsi.

Prix de revient du barrage réservoir de l'Echapre (année 1897)

	Francs.
Déblai de terre ou pierrailles, 6.997^{m3},80 à 0^{fr},90	6.298,82
— de rocher, 35.297^{m3},38 à 2^{fr},75	97.067,79
— en tunnel, 394^{m3},36 à 6^{fr},00	2.366,16
— transporté à plus de 100 mètres, 11.225^{m3},06 à 0^{fr},10	1.122,51
Enlèvement des arbres et broussailles dans le lit de l'Echarpre, 2.376 heures à 0^{fr},25	831,60
Épuisement	1.376,50
Maçonnerie ordinaire, 51.408^{m3},41 à 16^{fr},50	848.238,76
— de moellons piqués, 6^{m3},55 à 50^{fr},00	327,50
— de pierre de taille, 366^{m3},17 à 118^{fr},50	43.391,14
Parements vus de la dite, 1,631^{m2},75 à 13^{fr},50	22.028,62
— vus de moellons piqués, 31^{m2},80 à 9 fr.	286,20
Plus-value pour parements vus de la maçonnerie ordinaire, 4.891^{m2},92 à 2^{fr},50	12.229,80
Plus-value pour parements vus de moellons têtués pour douille et bandeau des arcatures, 260^{m2},54 à 3^{fr},00	781,62
Ciment prompt employé aux rocaillages, 428.900^{kg} à 8 fr. les 100^{kg}.	34.312,00
Enduit en ciment prompt de 0,05 d'épaisseur, 4.538^{m2},86 à 6^{fr},00.	27.233,16
Dito de 0,03 d'épaisseur, 754^{m2},19 à 2^{fr},50	1.885,47
— demi lent, 3.771^{m2},55 à 2^{fr},33	8.787,71
Dallage en ciment brut Vicat, 2.747^{m2} à 3^{f},50	96,14
Chape de 0,05 avec mortier de chaux hydraulique, 403^{m2},97 à 2 fr.	807,94
Béton de chaux hydraulique, 63^{m3},06 à 22^{fr},00	1.387,32
Maçonnerie de ciment brut Lafargue, 496^{m3},66 à 30^{fr},66	15.227,60
Cintres divers	2.575,67
Pavés d'échantillons maçonnés, 427^{m2},80 à 11 fr.	4.705,80
Fers forgés et ouvrés, 8.023^{kg},06 à 0^{fr},65	5.214,99
Tuyaux en fonte de 0,400, 8,970^{kg} à 40 fr.	3.588,00
Fonte pour surépaisseur des tuyaux, 7.953^{kg},72 à 40^{fr},88	3.251,48
Robinets vannes de 0,400, 5 à 700 fr.	3.500,00
A reporter	1.148.920,30

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Report	1.148.920,30
Divers	87,75
Sable de la Loire, 3.785^{m3},52 à 1^{fr},30	4.921,19
Plus-value pour dito, 1.800^{m3} à 2^{fr},54	4.572,00
TOTAL	1.158.501,24
RABAIS 25 0/0	289.625,31
RESTE	868.875,93
Dépenses diverses en cours d'exécution, épuisements, surveillance, indemnités à l'entrepreneur	129.199,72
TOTAL	998.075,65

Le prix du mètre cube d'eau emmagasiné ressort à un peu moins de 1 franc.

Dépense du barrage-réservoir de Cotatay (année 1901)

Acquisition des terrains	106.215^{fr},16
Travaux :	
Barrage proprement dit	654.601 ,16
Déversoir de superficie	15.980 ,90
Canal de décharge	15.903 ,19
Tunnel et prise d'eau	45.735 ,29
Chambre des robinets	14.723 ,50
Aqueduc et bassin de jauge	40.273 ,45
Chemin de ronde	11.596 ,53
Chemin d'accès	23.557 ,68
Dérivation provisoire	11.439 ,76
TOTAL	833.811^{fr},54
Indemnités et imprévus	98.733 ,05
	932.554^{fr},59

Le prix revient à un peu moins de 1 franc le mètre cube d'eau emmagasiné.

102. Utilisation des barrages pour la production de l'énergie électrique en vue des usages agricoles. — Ce n'est pas seulement dans les pays de montagne, où sont installées de grandes usines hydro-électriques, que la force motrice des chutes d'eau est susceptible d'être mise à profit. L'aménagement des parties moyennes et inférieures des rivières, par l'établissement de barrages de faible hauteur, est aussi d'un avantage appréciable, l'énergie ainsi créée pouvant servir non seulement à l'éclairage des divers bâtiments des fermes, mais encore à la mise en mouvement de nombreuses machines agricoles, des pompes des services d'adduction d'eau et des engins de toutes sortes utilisés dans la petite industrie rurale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. L. Mougeot, ministre de l'Agriculture, dans une circulaire du plus haut intérêt (6 janvier 1904), a appelé l'attention des agriculteurs et des industriels sur les avantages qu'ils pourraient retirer de l'adaptation des chutes aux usages agricoles. De plus, il engageait les fonctionnaires et les agents des services hydrauliques et des améliorations agricoles à prendre une certaine initiative pour entraîner les intéressés dans la voie de cette utilisation.

Dans le but de favoriser les travaux dont il s'agit, le Gouvernement accorde des subventions aux intéressés, sur leur demande, dans les conditions prévues par l'arrêté ministériel du 25 juillet 1903, relatif à la participation financière de l'État aux entreprises d'améliorations agricoles.

Pour utiliser les chutes créées sur les rivières navigables par les barrages des sas d'écluse, M. H. Chanoît, ingénieur des Arts et Manufactures, propose, à l'effet de ne gêner en aucune façon le service de la navigation, l'installation d'usines hydroélectriques flottantes disposées sur un bac amarré à l'aval de la pile centrale du barrage. Le bac contiendrait une chambre d'eau et une petite pompe à air pour l'amorçage d'un siphon adducteur. L'amorçage étant opéré, l'eau s'élèverait dans la chambre de mise en charge au niveau de l'eau en amont du barrage, et, les vannages des turbines étant alors ouverts, tout se passerait comme dans une installation faite sur la terre ferme. Nous reviendrons sur ces questions dans le tome III de cet ouvrage.

IV. — TYPES DE BARRAGES-RÉSERVOIRS DE GRANDE CAPACITÉ

103. Barrage-réservoir du Gouffre-d'Enfer (Loire) (Pl. V, *fig.* 1). — Ce barrage fut établi au défilé du dit Gouffre-d'Enfer sur la commune de Rochetaillée, dans le triple but de préserver la ville de Saint-Étienne des inondations, de compléter le volume d'eau nécessaire à l'alimentation de la dite ville, et de restituer aux usines établies sur le Furens l'eau qui leur avait été enlevée par le captage des sources.

Cet ouvrage a 52 mètres de hauteur à l'amont, au-dessus du fond de la vallée (à la cote 732,82) et 56 mètres à l'aval. Il est établi en plan suivant un arc de cercle de 252 mètres de rayon et sa longueur est de 100 mètres au niveau de la chaussée, qui est établie à la cote 785,82. Le profil est du type dit d'égale résistance établi par M. Delocre. Il a été projeté de manière que la pression minimum fût à peu près constante sur les parements et n'excédât nulle part, d'une façon sensible, $6^{kg},50$ par centimètre carré pour des maçonneries pesant 2.300 kilogrammes au mètre cube. Ce barrage, calculé par la méthode de M. Bouvier, donne plus de 8 kilogrammes de pression et atteint 13 avec celle de M. Maurice Lévy.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La retenue normale est de 47 mètres et la retenue maximum est réglée par un déversoir de 10 mètres de longueur. En outre, un canal spécial, qui longe le réservoir sur toute sa longueur, dérive, à son entrée dans le réservoir, le supplément des crues qui ne peut être emmagasiné dans celui-ci. La vidange et la prise d'eau s'effectuent par un tunnel de 185 mètres de longueur, percé dans le rocher, qui débouche à 8 mètres au-dessus du fond et dans lequel sont disposées trois conduites en fonte, dont deux servant à l'alimentation de Saint-Étienne et l'autre desservant les usines établies sur le Furens.

La capacité du réservoir créé est de 1.620.000 mètres cubes et la dépense totale s'est élevée à 1.590.000 francs, dont 902.000 francs pour le mur du barrage, ce qui, pour les 40.000 mètres cubes de maçonnerie de ce dernier, met à 22 fr. 50 le prix de revient du mètre cube de maçonnerie.

104. Barrage du Lignon (Loire) (Pl. V, *fig.* 2). — Ce barrage est destiné à créer une réserve de 7 millions de mètres cubes. Il a 30 mètres de hauteur au-dessus du rocher, sa largeur $4^{m},60$ au couronnement et $26^{m},94$ à la base sur le massif de fondation. Le parement amont présente, sur toute sa hauteur, la courbure d'un arc de cercle, tangent à la verticale au niveau du couronnement et de 80 mètres de rayon. Le parement aval est profilé, sur 8 mètres de hauteur à partir du sommet, par une ligne droite inclinée à 1/5, puis se continue par un arc de cercle de 120 mètres de rayon.

Les dépôts de vase fluide, qui viennent se déposer au pied du mur, sont évacués par une prise d'eau inférieure qui rend à l'aval du barrage le débit à restituer à la rivière ; la prise d'eau pour l'alimentation de Saint-Étienne est pratiquée à 5 mètres au-dessus. Cet ouvrage est l'œuvre de M. G. Reuss, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

105. Barrage-réservoir du Couzon (Loire) (Pl. V, *fig.* 3). — Les dimensions de ce barrage, que l'on a mis 23 années à construire, sont particulièrement considérables. Il est constitué par une digue en terre avec écran en maçonnerie.

La capacité du réservoir qu'il constitue est de 1.450.000 mètres cubes, occupant une superficie de 13 hectares. La hauteur de la retenue au-dessus du lit est de 32 mètres et l'épaisseur de la digue de 118 mètres dans le sens de la vallée.

L'épaisseur, à la base du massif amont, est de 52 mètres, celle du massif aval de 66 mètres. Le mur écran du milieu a 200 mètres de longueur et 33 mètres de hauteur, avec une épaisseur de $6^{m},82$ à la base et $4^{m},90$ au couronnement. Un tunnel de vidange traverse tout le massif du barrage suivant la ligne du thalweg de la vallée du Couzon. A ce tunnel sont super-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PLANCHE V. — **Types de barrages-réservoirs**

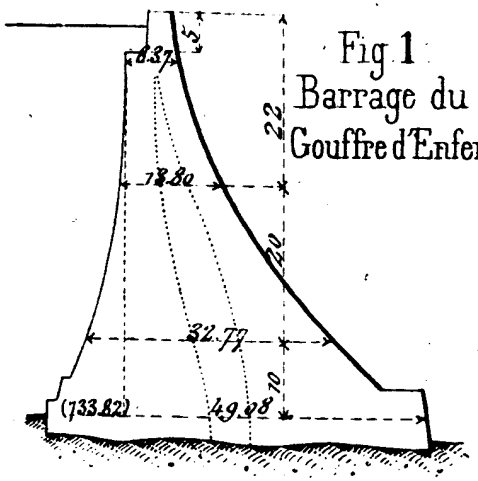


Fig. 1
Barrage du
Gouffre d'Enfer

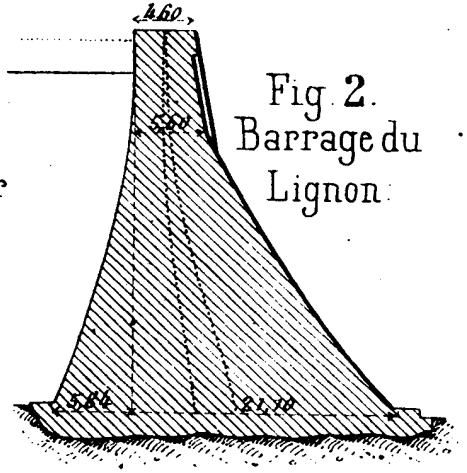
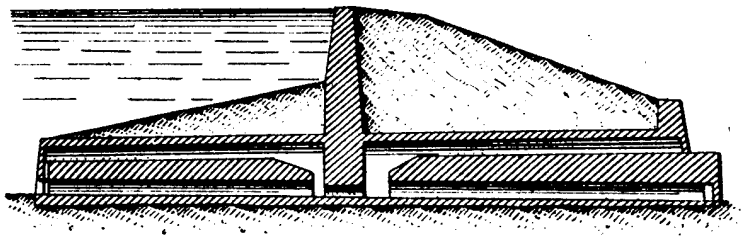


Fig. 2.
Barrage du
Lignon

Fig. 3.
Barrage du Couzon.



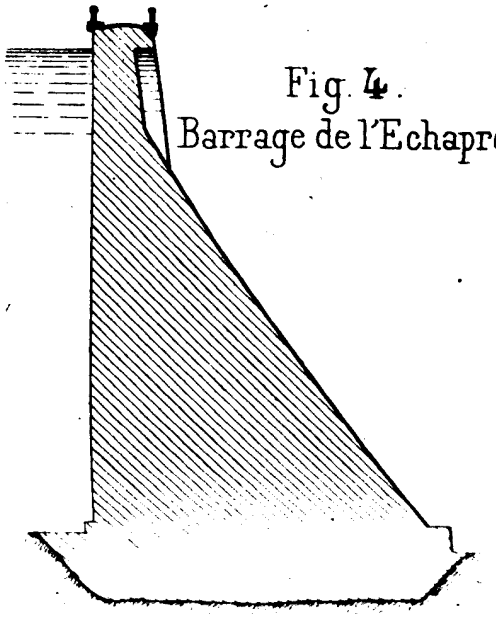


Fig. 4.
Barrage de l'Echapre

Fig. 5. Barrage du Ternay.

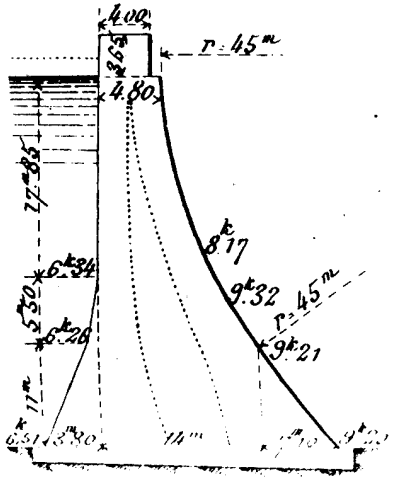
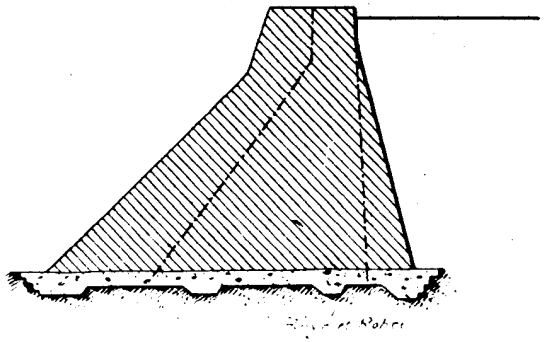


Fig. 6.
Barrage de la Gileppe



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

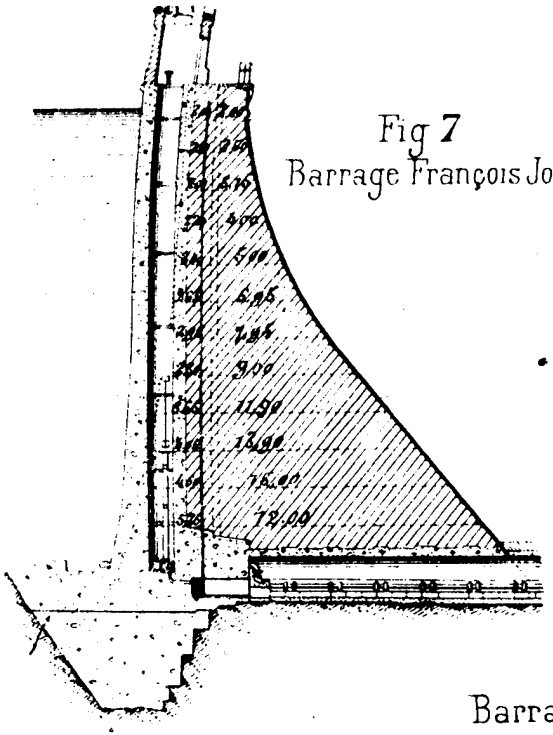


Fig 7
Barrage François Joseph

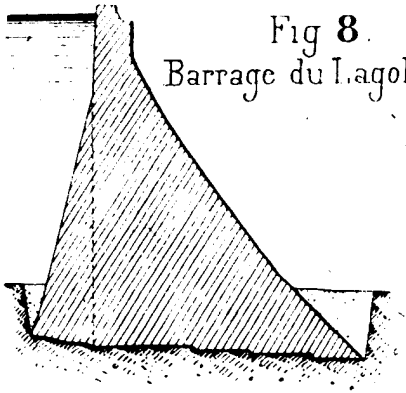


Fig 8.
Barrage du Lagolungo

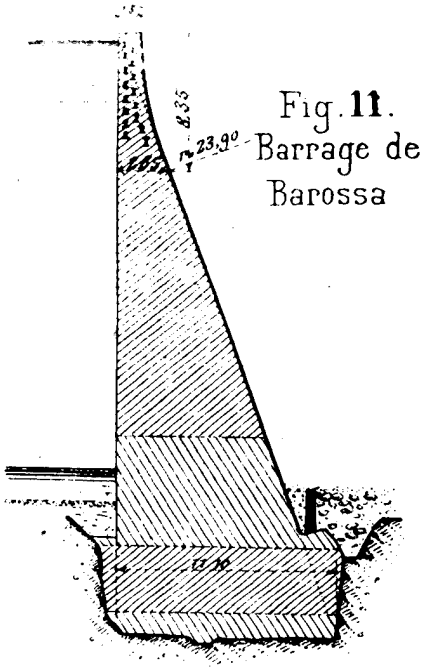


Fig. 11.
Barrage de Barossa

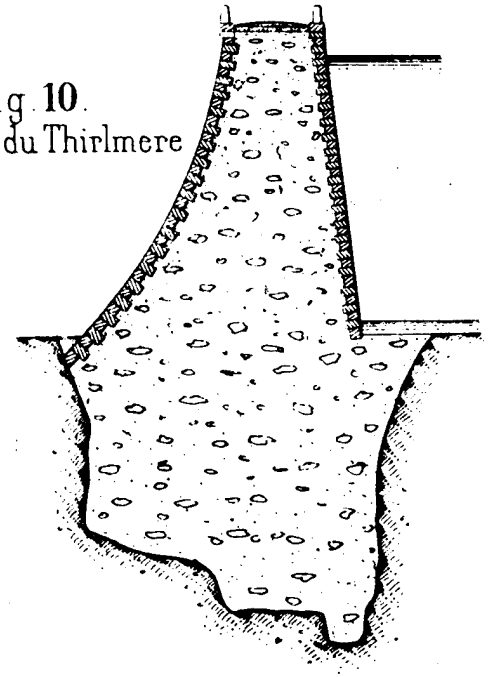


Fig. 10.
Barrage du Thirlmere

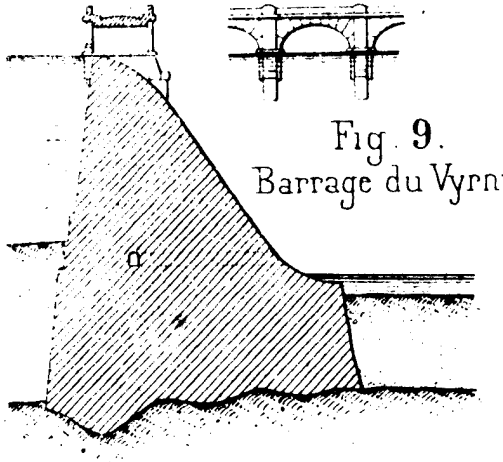


Fig. 9.
Barrage du Vyrnwy

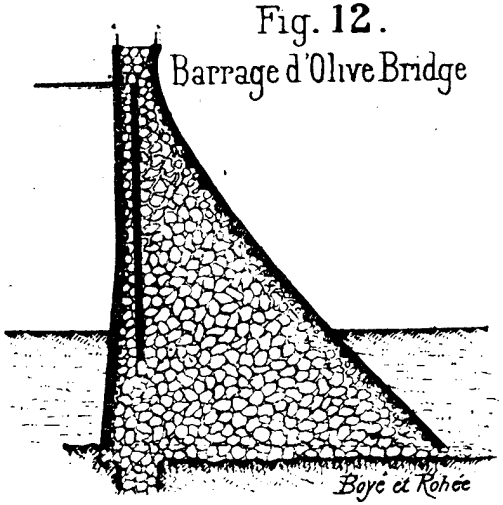


Fig. 12.
Barrage d'Olive Bridge

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

posées : à l'amont, la galerie de prise d'eau, à l'aval, une galerie conduisant aux vannes de distribution de l'eau. Le barrage est muni de deux déversoirs évacuateurs de crues de 40 mètres de longueur totale. En outre une vanne peut laisser échapper par un tunnel une certaine quantité d'eau. Depuis sa mise en charge, cet ouvrage a nécessité un certain nombre de réparations, qui démontrent que ce genre de barrage n'est pas précisément recommandable.

106. Barrage-réservoir de l'Échapre (Loire) (Pl. V, *fig.* 4). — Il est établi à une distance de 3 kilomètres de la ville de Firminy, sur l'Échapre, affluent de l'Ondaine ou Ondenon. Le réservoir créé a une capacité de 950.000 mètres cubes et reçoit les eaux d'un bassin hydrologique de 1.440 hectares.

Le barrage est disposé en plan suivant un arc de cercle de 350 mètres de rayon et présente un développement de 165 mètres au couronnement et de 45 mètres à la base. Il a 37 mètres de hauteur au-dessus du lit et crée une retenue de $35^{m},30$. La largeur est de 27 mètres à la base (au niveau du lit) et de $4^{m},19$ au sommet. Les fondations ont été descendues à des profondeurs qui varient entre 7 et 13 mètres. Le parement amont est vertical sur 30 mètres de hauteur et l'inclinaison du parement aval vers la base est de 0,76 par mètre. La pression maximum est de 11 kilogrammes par centimètre carré. La maçonnerie a été faite à l'aide de moellons de granulite du poids de 2.630 kilogrammes au mètre cube, et d'un mortier dosé à raison de 360 kilogrammes de chaux du Teil par mètre cube de sable de la Loire.

Il est muni d'un déversoir de crues de 31 mètres de longueur. Le trottoir aval de la route que supporte le couronnement de l'ouvrage est en encorbellement sur des arceaux de 4 mètres d'ouverture, de 11 mètres de hauteur totale et de 0,90 de profondeur maximum. Les pilastres ont $1^{m},20$ d'épaisseur et sont inclinés à 1/8. La prise d'eau se fait au moyen d'une conduite passant en souterrain dans le rocher de fondation de la rive gauche de la vallée. L'étanchéité résulte de l'exécution d'un enduit au mortier de ciment fouetté, auquel est superposé un second enduit à la pâte de ciment.

107. Barrage-réservoir du Ternay (Ardèche) (Pl. V, *fig.* 5). — Le mur de garde qui surmonte le corps du barrage proprement dit a une hauteur de $3^{m},65$ et la retenue d'eau opérée a $34^{m},35$ de profondeur. La galerie de vidange qui traverse le mur du barrage a 2 mètres de large sur $3^{m},50$ de hauteur et renferme deux tuyaux de $0^{m},40$ de diamètre, qui débouchent dans le réservoir en traversant un massif de maçonnerie de $6^{m},40$ d'épaisseur. En outre du déversoir, le barrage est muni de deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

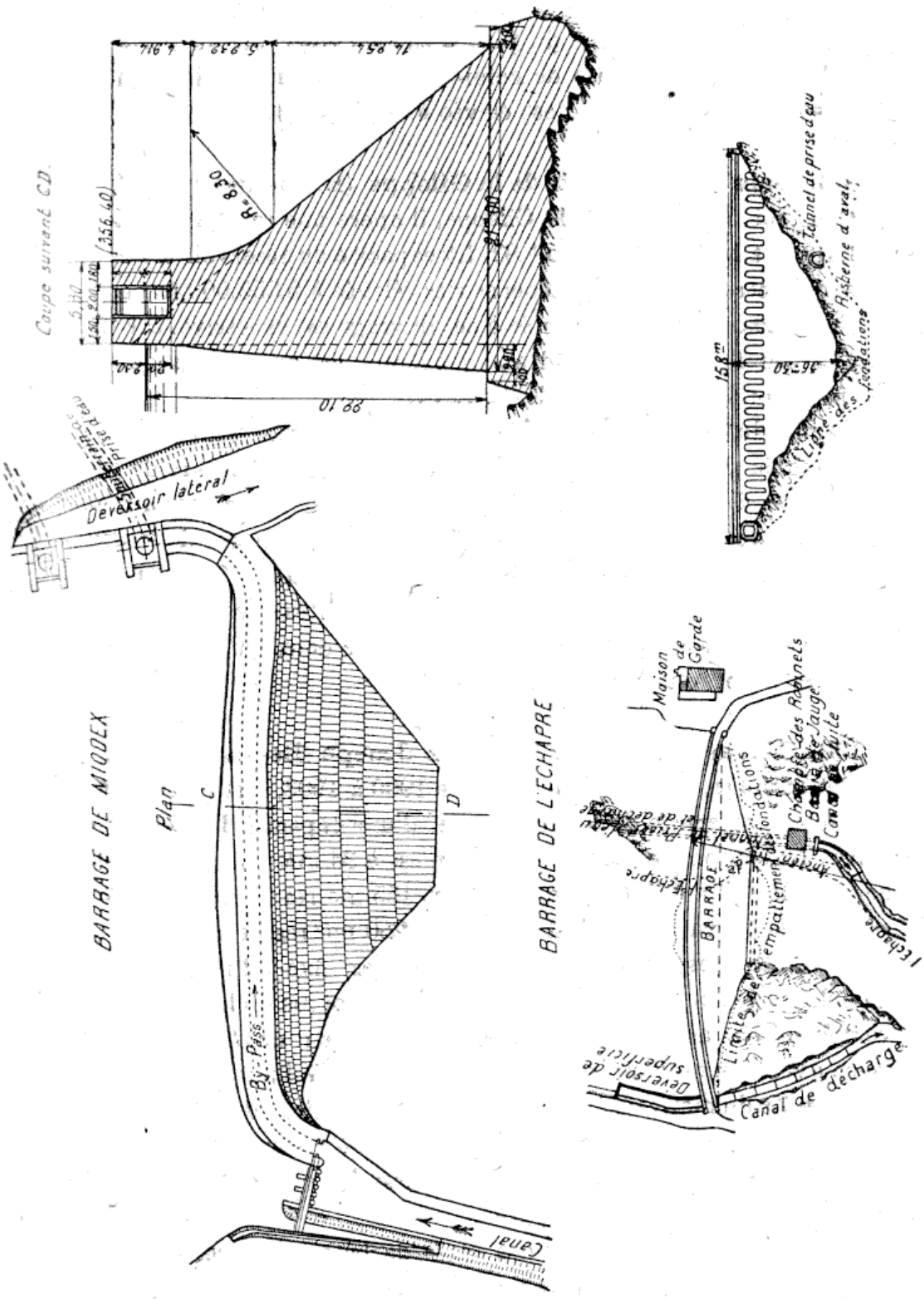


FIG. 314. — Barrage de l'Échapre. Barrage de Miodex (usine de Sauviat).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

canaux, dont le seuil est à 6m,25 en dessous du déversoir. Ces canaux sont fermés en temps ordinaire par des vannes et ils servent à évacuer rapidement les crues. La surface du plan d'eau du réservoir du Ternay est de 30 hectares et la capacité de celui-ci est actuellement de 3 millions de mètres cubes. La dépense s'est élevée à 1.020.000 francs.

108. Barrage-réservoir de la Gileppe (Belgique) (Pl. V, *fig.* 6). — Construit sur la rivière la Gileppe, il opère une retenue de 45 mètres. Sa largeur à la base est de 65m,82. La capacité du réservoir est de 14 millions de mètres cubes et la dépense s'est élevée à 5.550.000 francs.

L'épaisseur que l'on a donnée à cet ouvrage est excessive, car les traits mixtes qui figurent sur le dessin montrent les dimensions qu'exigerait l'application de la méthode de M. Lévy.

Le mur du barrage repose sur une couche de béton qui atteint jusqu'à 7 mètres de profondeur. Il est établi en plan suivant un arc de cercle de 500 mètres de rayon et son développement est de 82 mètres à la base et de 235 mètres au sommet. Le couronnement a 15 mètres de largeur et il est établi à 2 mètres au-dessus des déversoirs, qui ont 27 mètres de longueur et qui sont disposés à chacune des extrémités, dans le prolongement du mur. La prise d'eau est faite au moyen de deux galeries percées dans le rocher et contournant le barrage.

109. Barrage-réservoir François-Joseph (Bohême) (Pl. V, *fig.* 7). — Cet ouvrage, qui a été construit de 1900 à 1903, sert à créer un réservoir d'une superficie de 5,6 hectares et d'une capacité de 700.000 mètres cubes. Le couronnement de ce barrage est à 34 mètres au-dessus du fond de la vallée ; il a 4 mètres de largeur et 155 mètres de développement ; il est disposé suivant un arc de cercle de 250 mètres de rayon. Le niveau maximum de l'eau, réglé par un déversoir, est fixé à 2 mètres au-dessous du couronnement. Au niveau le plus bas du sol naturel, la largeur transversale du barrage est de 30 mètres et sa longueur de 52 mètres. Le parement aval ressemble un peu à celui des profils Guillemain et Hétier.

Par suite du mauvais état du rocher, les fondations du béton ont dû être descendues en certains endroits jusqu'à 16 mètres au-dessous du fond de la vallée. L'étanchéité du barrage est assurée par un revêtement d'asphalte et de goudron sur le parement amont, et il est protégé contre le choc des corps flottants par des blocs de béton disposés en avant. En outre, comme la pression élastique normale à l'amont en charge est inférieure à la pression de l'eau, on a ménagé sur la partie amont du barrage un certain nombre de tuyaux de drainage analogues à ceux des barrages allemands, et espacés de 2 mètres les uns des autres. Ils communiquent par leur base avec une conduite principale de drainage qui évacue à l'aval

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les eaux d'infiltration. La prise d'eau s'effectue à trois hauteurs : 21, 24 et 27 mètres, au moyen de tuyaux et de vannes disposés dans une tour verticale accolée au parement amont.

110. Barrage-réservoir du Lagolungo (ITALIE) (Pl. V, *fig.* 8). — Sur le Gorzente, cours d'eau du versant nord de l'Apennin Ligure, la società del Acquedotto de Ferrari Galliera a établi deux barrages dits des *Lavezze* et du *Lagolungo*. Comme la dénivellation qui existe entre le réservoir inférieur des Lavezze et la ville de Gênes est d'environ 600 mètres, la dite société fait passer l'eau dans les turbines d'une usine hydroélectrique, avant de la faire servir à l'alimentation de Gênes.

Le réservoir du Lagolungo, d'une capacité de 4.440.000 mètres cubes, est établi immédiatement au-dessus de l'extrémité amont du réservoir des Lavezze. Le barrage a 43 mètres de hauteur. Le parement aval est vertical sur 6 mètres de hauteur, puis incliné de $0^m,44$ par mètre sur 5 mètres, de $0^m,60$ sur 5 mètres, de $0^m,74$ sur $18^m,50$ et enfin de 1 mètre sur le reste de la hauteur. Le couronnement, large de 5 mètres, est surmonté d'un mur de garde rectangulaire de $2^m,50$ de largeur au sommet, 5 mètres à la base et de $4^m,25$ de hauteur.

Un déversoir de crues, de 18 mètres de longueur, est établi sur la droite du barrage, à 3 mètres au-dessus du niveau de la base du mur de garde. En outre 4 tuyaux de fonte, situés respectivement à 5, 10, 20 mètres et $32^m,80$ au-dessous du couronnement et munis de vannes à l'aval, permettent de faire couler l'eau du réservoir du Lagolungo dans celui des Lavezze, ou bien de diriger cette eau directement dans la galerie transalpennine au moyen d'une conduite spéciale de 1.700 mètres de longueur. La pression sur le parement aval en charge est de 8 kilogrammes.

Enfin on a établi un second déversoir au même niveau que le premier, à l'effet de réduire à $0^m,60$ la surélévation du niveau maximum des eaux en temps de crues. Un système de barrage mobile, établi sur les déversoirs, permet, en outre, de conserver ce niveau maximum pendant un certain temps, ce qui augmente encore la capacité du réservoir de 200.000 mètres cubes, de telle sorte que la capacité utile des deux réservoirs, c'est-à-dire celle qui est utilisable au-dessus de la prise d'eau de la galerie transalpennine, ressort à 6,5 millions de mètres cubes, ce qui permet de compter sur un débit régulier et continu de 600 litres à la seconde.

111. Barrage-réservoir de Vyrnwy (GRANDE-BRETAGNE) (Pl. V, *fig.* 9). — Ce barrage établi en travers du Vyrnwy, affluent de la Severn, sert de point d'appui à un pont-route de $5^m,79$ de largeur, entre les piles duquel s'écoulent les eaux de trop plein. Il crée un immense réservoir d'une superficie de 454 hectares et de 55 millions de mètres cubes. La hau-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur totale du mur du barrage proprement dit est de 43m,92, mais la hauteur de retenue au-dessus de l'ancien lit de la rivière n'est que de 25m,60. A l'aval la hauteur moyenne du niveau de l'eau de la rivière, au-dessus de la fondation, est de 13m,73. La plus grande largeur à la base est de 35m,73. Des drains ont été établis dans le corps du barrage pour éviter toute sous-pression. La dépense de cet ouvrage s'est élevée à 12 millions de francs.

112. Barrage-réservoir du Thirlmere (GRANDE-BRETAGNE) (Pl. V, *fig.* 10). — Ce barrage est destiné à surélever de 15 mètres les eaux du lac de Thirlmere (Cumberland), de manière à pouvoir emmagasiner 36 millions de mètres cubes. L'ouvrage est construit en béton, composé d'une partie de ciment pour cinq parties de sable ou gravier. Dans la masse du gravier sont noyés de gros blocs de rochers. Les parements sont en pierre de taille appareillés, de 0m,60 d'épaisseur ; celui d'amont est incliné de 8 0/0, celui d'aval est disposé suivant un arc de cercle de 30m,50 de rayon. La hauteur maximum du mur est de 34m,67, les fondations descendant jusqu'à 17m,84 de profondeur. La largeur est de 15m,78 au niveau du sol et de 4m,88 au sommet, qui est à 1m,83 au-dessus du niveau de la retenue maximum.

113. Barrage de Barossa (AUSTRALIE) (Pl. V, *fig.* 11). — Il a été construit en 1901-1903 sur la rivière Para et se compose d'un mur en béton de forme triangulaire. Le parement aval est incliné à 1 mètre de base pour 2m,69 de hauteur. Le barrage a 29 mètres de hauteur au-dessus du lit, une largeur de 1m,37 à la crête et de 11m,10 à la base. Il est établi en plan suivant un arc de cercle de 60m,95 de rayon ; la corde est de 112m,70 au niveau du couronnement, qui a un développement de 143m,86.

La maçonnerie a été faite, à l'aide de blocs de gneiss noyés dans du béton et écartés entre eux d'au moins 15 centimètres. Les différents bétons provenant de dosages divers de ciment sont indiqués par les sens des hachures, sur la figure, aux différentes hauteurs de l'ouvrage. A 4m,50 environ au-dessous du sommet, les blocs de gneiss furent remplacés par des rails cintrés du poids de 28 kilogrammes au mètre courant. En disposant le barrage en forme de voûte, et en le calculant comme tel, on a pu réaliser une notable économie. La dépense s'en est élevée à 850.000 francs seulement, alors qu'elle avait été estimée à 1.125.000 francs pour un barrage ne résistant que par son propre poids.

D'après certaines observations faites sur cet ouvrage, on a constaté que, pour une variation de température de 31°, la flèche augmentait de 21 millimètres, ce qui correspond à un allongement de l'arc de 37 millimètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

114. Barrage-réservoir d'Olive Bridge (Amérique) (Pl. V, *fig.* 12). — Ce barrage que l'on a établi sur l'Esopsus River a une longueur de 1.500 mètres au sommet, une hauteur maximum de 44 mètres au-dessus du sol et de 67 mètres au-dessus des fondations, et une largeur de 8 mètres au sommet et 58 mètres à la base. Diverses digues en terre servent à barrer plusieurs dépressions de terrain. Le lac que forme ce réservoir et un autre qui lui est accolé ont une capacité de 458 millions de mètres cubes. L'aqueduc que les eaux de ces réservoirs alimentent, de 120 kilomètres de longueur, peut débiter 2 millions de mètres cubes par jour. La dépense s'est élevée à environ 60 millions de francs.

115. Nouveau barrage du Croton (New-York) (1). — Ce très important ouvrage, le plus considérable existant à ce jour, a exigé pour son

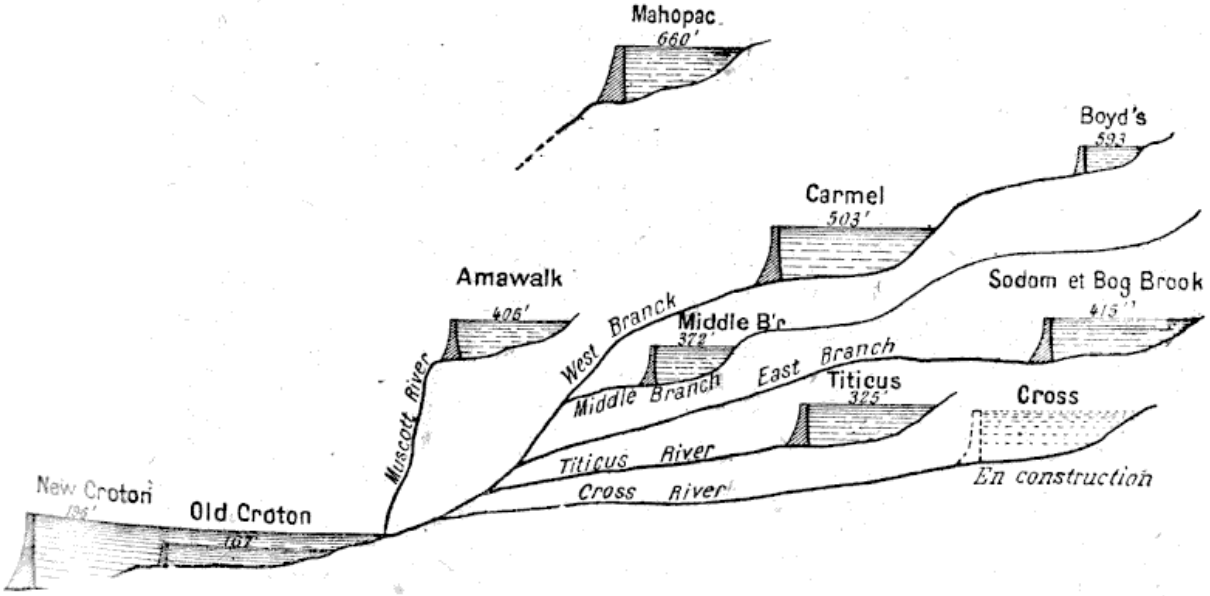


Fig. 315. — Schéma indiquant les positions respectives en élévation des principaux barrages servant à l'alimentation de la ville de New-York.

édification l'enlèvement de 1.700.000 mètres cubes de déblais et la mise en place de 636.000 mètres cubes de maçonnerie. Commencé en 1892, il n'a été achevé qu'en 1907. Il a coûté environ 38 millions de francs. C'est à l'ingénieur américain Wegmann qu'a été confié la détermination du profil, lequel a appliqué la méthode française, et c'est un ingénieur français,

(1) Les autres barrages-réservoirs servant à l'alimentation de la ville de New-York sont dénommés : Croton Lake (2.726.000 mètres cubes de capacité), Sodom (18.487.000 mètres cubes), Bog Broock (15.693.000 mètres cubes), Titicus (27.134.000 mètres cubes), Carmel (34.000.000 mètres cubes), Amawalck (29.000.000 mètres cubes), Middle Branch (15.000.000 mètres cubes), Boyd's Corner (10.000.000 mètres cubes), Mahopac Lake (1.900.000 mètres cubes) et divers (5.000.000 mètres cubes). Les réservoirs fournissent au total 158.940.000 mètres cubes d'eau. La construction du Sodom est revenue à 0 fr. 12 par mètre cube emmagasiné et celle du Bog Broock à 0 fr. 11.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

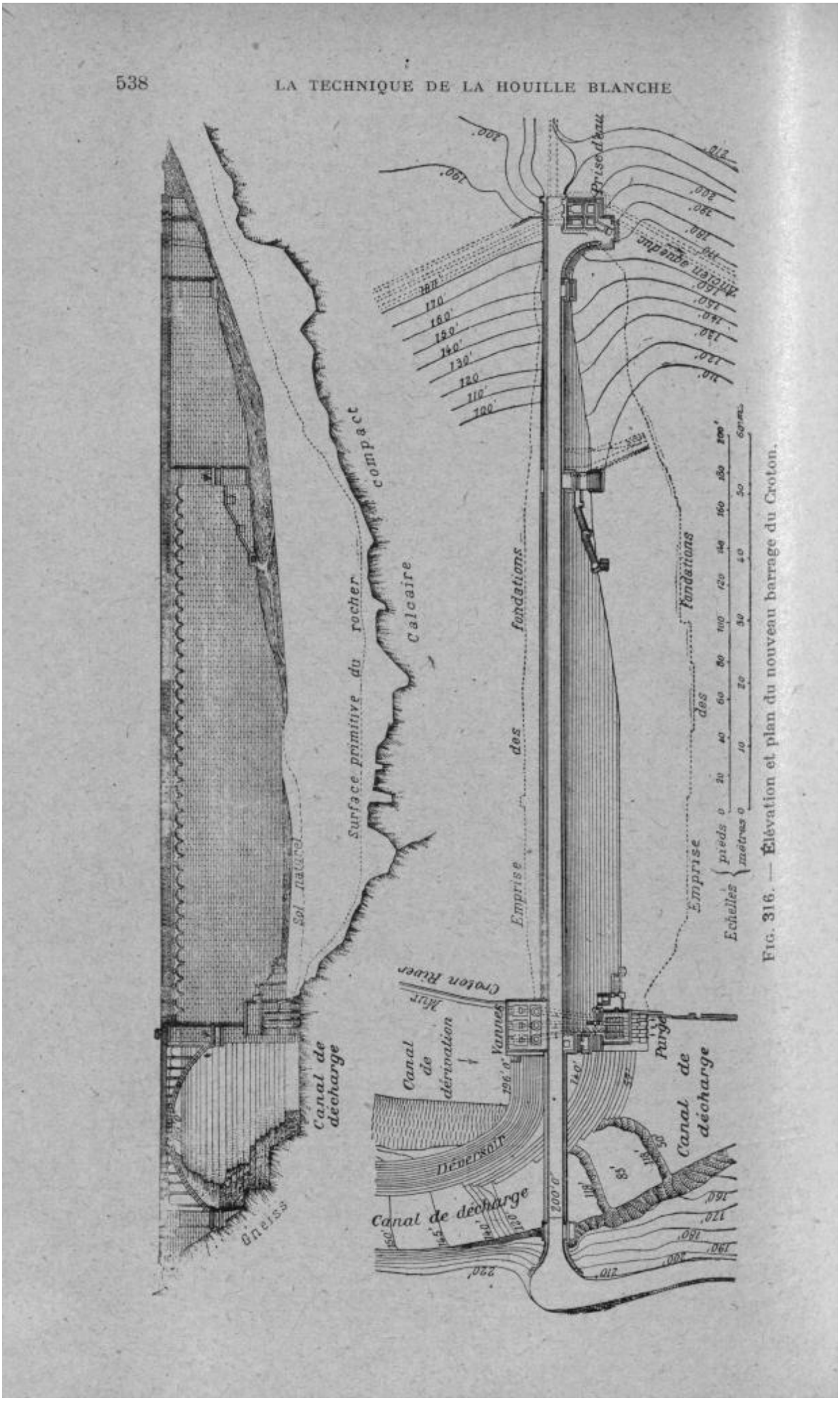


FIG. 316. — Élévation et plan du nouveau barrage du Croton.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. A. Fteley qui a fait procéder aux études et dirigé les premières phases de la construction de cet ouvrage remarquable.

La retenue créée par le barrage a une surface de 1.400 hectares sur 30 kilomètres de longueur et une capacité de 122 millions de mètres cubes. Sa plus grande hauteur (fondations comprises) atteint 90m,52 et sa plus forte épaisseur à la base (*fig.* 315 à 317) est de 62m,79 ; sa longueur

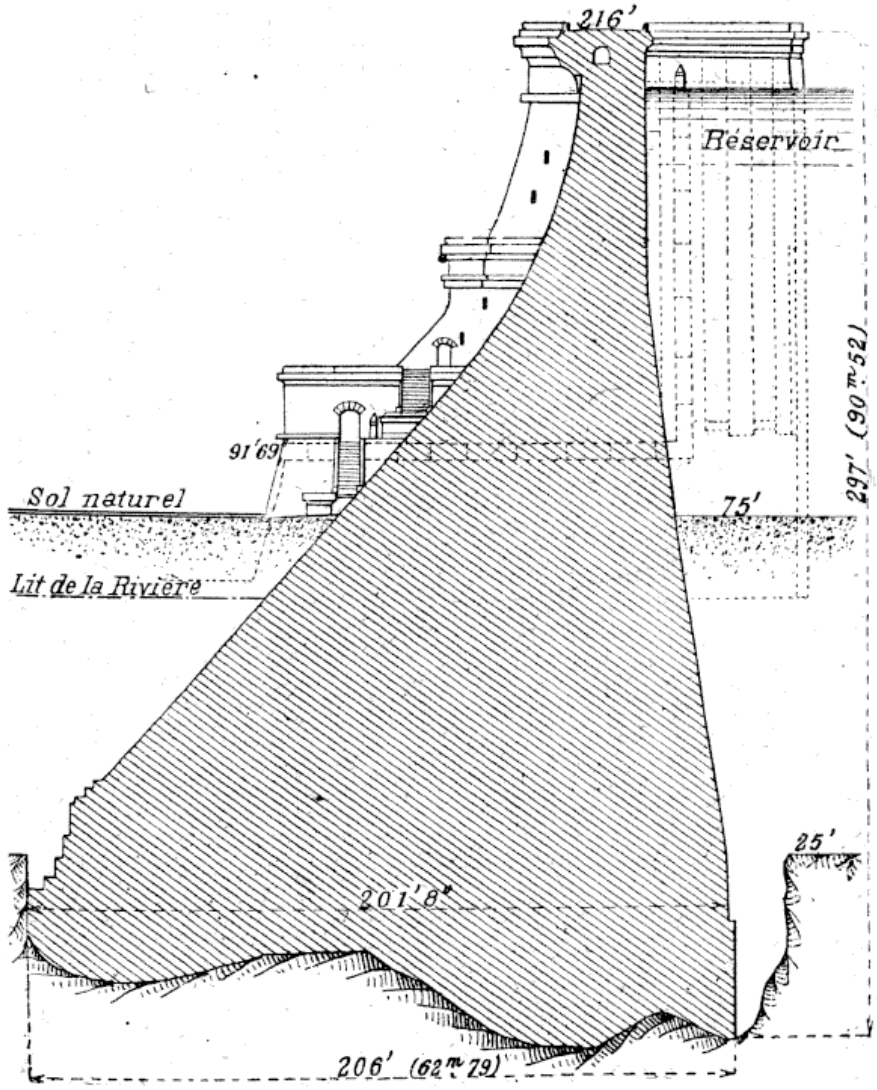


FIG. 317. — Coupe du barrage au point où il a la plus grande hauteur.

d'une rive à l'autre est de 330 mètres. Il est rectiligne et le niveau normal de l'eau est de 45 mètres au-dessus du lit de la rivière. En crête la largeur de l'ouvrage est de 5m,486, de façon à livrer passage à une route ; 60 mètres au-dessous elle est de 56m,43. La largeur nécessaire à la route est obtenue au moyen d'un encorbellement sur le parement d'aval soutenu par des voûtelettes. Cette route franchit, par un pont métallique de 60 mètres de portée, le canal de décharge qui fait suite au déversoir. Ce dernier, qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

longe la rive droite et se raccorde au barrage par une courbe, est constitué par des gradins de 0m,60 de largeur. A la jonction du déversoir et du barrage on a construit un massif de renforcement dans lequel ont été logées, à 36 mètres de profondeur, trois conduites de 1m,20 de diamètre pouvant servir de vannes de purge et aider au besoin à l'écoulement des crues. Près de la rive droite un massif semblable contient les vannes de prise d'eau permettant l'introduction de celle-ci dans l'ancien aqueduc qui passe en ce point.

Préalablement avant l'attaque des fouilles, on a dérivé les eaux du Croton dans un canal de 37m,50 de largeur et 480 mètres de longueur, creusé dans la rive droite et capable de débiter les plus fortes crues. Quand la maçonnerie eut atteint le niveau du lit on ménagea dans le corps de l'ouvrage une galerie de 8m,50 de largeur et 7m,20 de hauteur pour l'écoulement des eaux. Cette baie fut ensuite bouchée. Mais une autre baie pareille, exécutée dans la même intention, reçut deux conduites de 1m,20 destinées à laisser écouler les eaux jusqu'au moment du remplissage ; elle sert au besoin à faire des chasses et à vider en partie le réservoir. L'intervalle laissé entre les conduites et le restant de l'ouverture de la baie furent bouchés.

Pour atteindre un sol de fondation convenable il a fallu d'abord enlever une couche d'alluvion de plus de 20 mètres de hauteur, qui a été faite à l'aide de dragues et d'excavateurs à sec. On a été en outre obligé d'enlever, sur une certaine épaisseur, de la roche qui se présentait à sa partie supérieure dans un état trop tendre, désagrégée et fissurée.

Tout le blocage de la maçonnerie a été exécuté en maçonnerie de blocage ordinaire avec une sorte de granit bleu pesant près de 3.000 kilogrammes par mètre cube. Les parements ont reçu une épaisseur moyenne de 1 mètre, la hauteur des assises variant de 0m,50 à 0m,70. Le mortier a été fait à l'aide de ciment à prise rapide, sauf en hiver où on employait du ciment de Portland. Pour les fondations on se servait de mortier composé de 1 partie de ciment pour 2 de sable. Par les temps froids on ajoutait du sel au ciment et on chauffait à la vapeur le sable et l'eau servant au gâchage.

Les ingénieurs américains ont encore donné là une preuve de leur hardiesse en faisant travailler la maçonnerie à 16 kilogrammes, alors que le chiffre le plus élevé admis en France ne dépasse pas 14 kilogrammes (Barrage de Chartrain).

116. Barrage-réservoir de Marklissa (Haute-Silésie). — Ce très important ouvrage, établi sur le Queis, qui a 45 mètres de hauteur, présente un intérêt tout particulier en raison des dispositions particulières que l'on a prises pour *l'évacuation des crues*. Le torrent le Queis prend sa

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

source dans les montagnes d'Isée (Silésie) et l'étendue de son bassin hydrographique, en amont de cette ville, est de 306 kilomètres carrés. Il est sujet à des crues subites extrêmement importantes (1 mètre cube à l'étiage 700 mètres cubes en fortes crues), mais elles sont de peu de durée. Pour

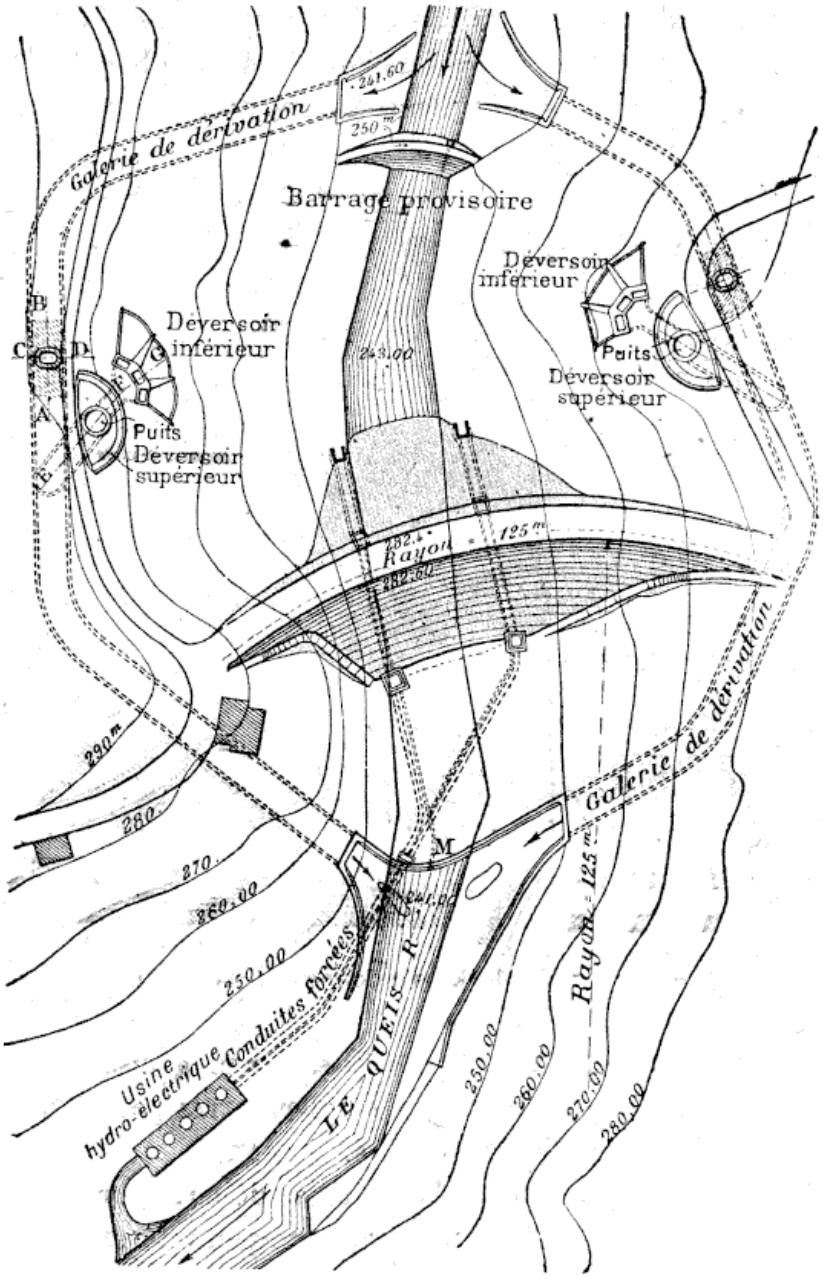


FIG. 318. — Barrage de Marklissa. Plan d'ensemble du barrage et des ouvrages acessoires.

préserver la vallée du Queis de tout désastre éventuel, on a résolu la construction d'un barrage-réservoir emmagasinant de 10 à 12 millions de mètres cubes au moment des crues et dont l'écoulement se fait ensuite progressivement.

Cet ouvrage commencé en 1901 n'a été terminé qu'en 1905 ; il est du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

type créé par le professeur allemand Intze, type qui dérive du profil inauguré en France, dès 1856, par l'ingénieur Delocre. Son épaisseur à la base est de 37m,64 et de 5m,70 au couronnement (*fig.* 318 à 326). Dans le corps de l'ouvrage on a aménagé des galeries de visite, accessibles de l'extérieur et permettant de s'assurer dans l'avenir de l'état de conservation de la maçonnerie. Elles sont réunies par des puits, peu inclinés.

On a recherché une augmentation de l'étanchéité de l'ouvrage par l'adjonction d'un remblai en terre argileuse s'appuyant sur sa face amont.

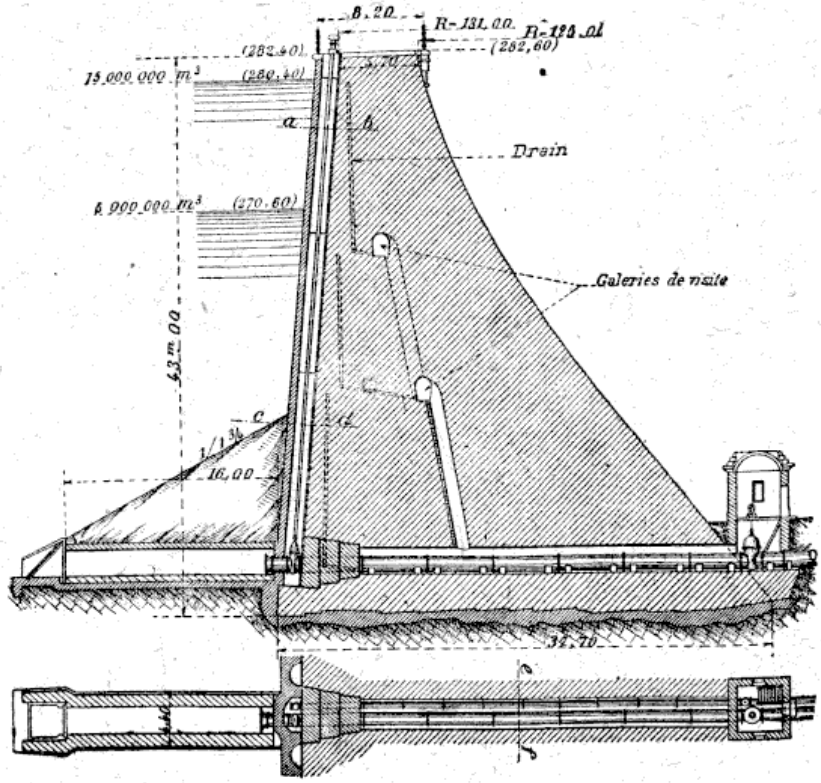


FIG. 319. — Barrage de Marklissa. Coupe en travers du barrage.

Les berges et le fond du lit sont constitués par un gneiss très dur et très compact fournissant non seulement une assiette très parfaite, mais aussi des matériaux de construction excellents.

Pour édifier les fondations et, à l'effet de se débarrasser des eaux, on a percé dans le flanc de la vallée, à un niveau un peu inférieur à celui du lit du torrent, deux galeries souterraines, contournant la base des fondations et ayant chacune 7 mètres de diamètre et une pente de 0m,006 par mètre. Elles étaient aussi capables d'évacuer les plus fortes crues connues, 800 mètres cubes par seconde.

Sauf dans quelques parties, où l'on a employé du mortier de chaux hydraulique, les maçonneries ont été faites au ciment de Portland (125 litres de ciment, 100 litres de trass, 66 litres de chaux et 510 litres de sable). Le mortier ainsi obtenu acquiert, au bout de 3 mois, une résis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tance à la traction de 30 à 40 kilogrammes par centimètre carré et une résistance à la compression de 124 kilogrammes. La face amont du bar-

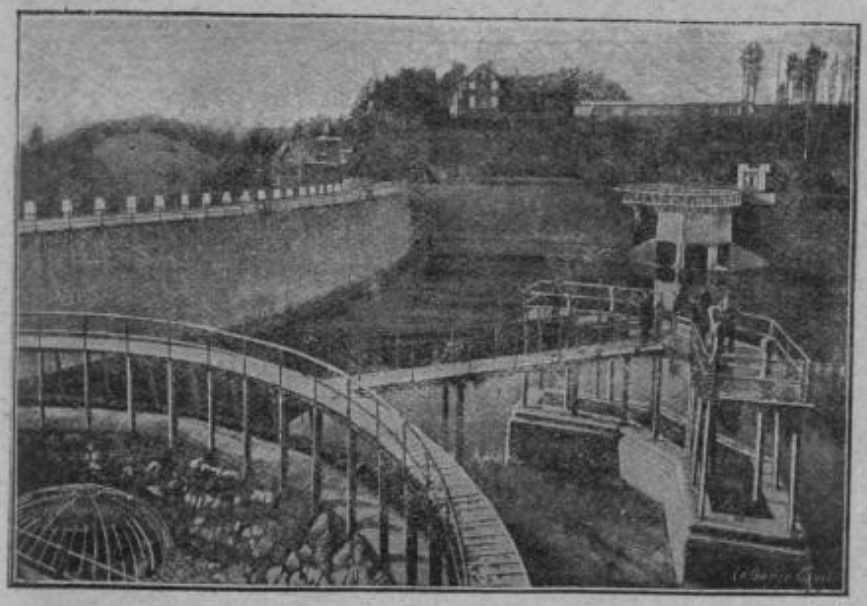


Fig. 320. — Barrage de Marklissa. Orifices des évacuateurs.

rage est non seulement revêtue d'un enduit étanche de ciment lissé,

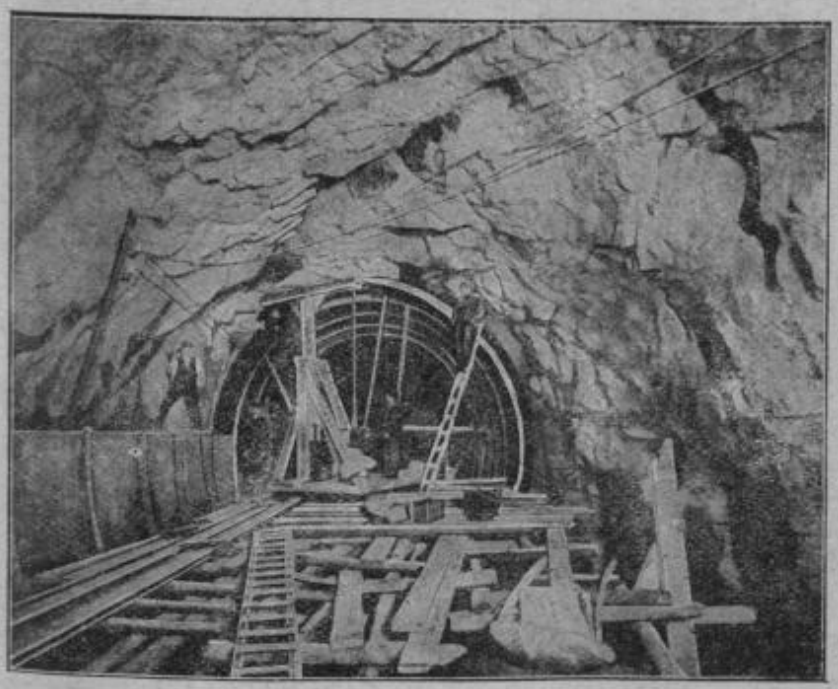


Fig. 321. — Barrage de Marklissa. Mise en place du revêtement métallique d'une galerie.

recouvert lui-même d'une couche d'asphalte, mais encore elle est protégée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

contre le contact de l'eau par un mur de garde. Les compartiments des puits constitués par les appuis qui relient ce mur au barrage peuvent être

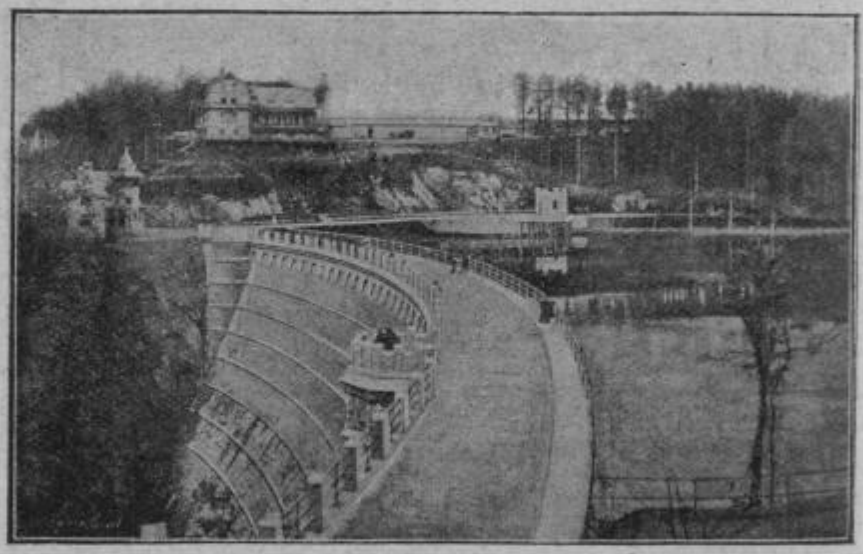


FIG. 322. — Barrage de Marklissa. Vue d'ensemble prise de la rive droite.

visités au moyen d'un descenseur et les eaux qui s'y rassemblent être évacuées par des conduites de $0^{m},30$ de diamètre ainsi que l'écoulement des drains ménagés dans le massif lui-même.

Pour l'évacuation des crues et la conduite de décharge destinée à l'écou-

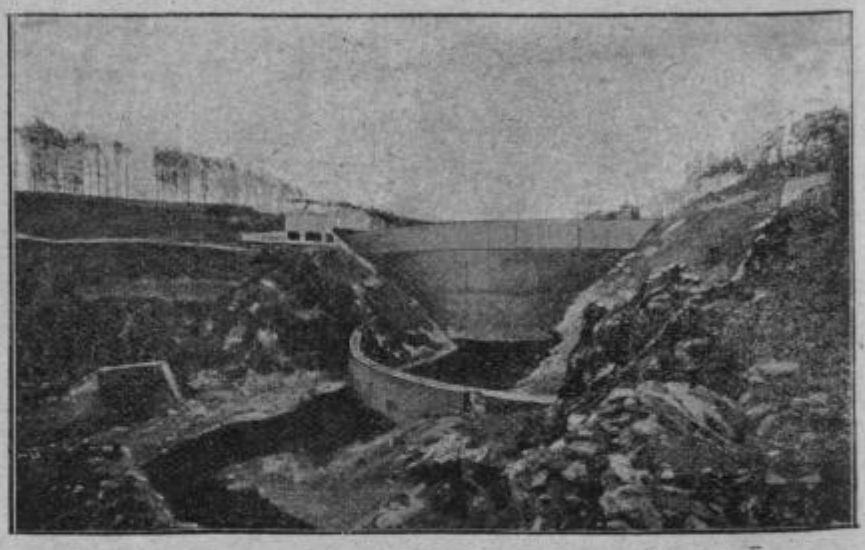


FIG. 323. — Barrage de Marklissa. Vue du barrage provisoire en béton et de l'entrée d'une galerie de dérivation rive gauche.

lement normal du réservoir, on a construit : deux conduites de prise d'eau traversant la partie inférieure du barrage et servant à l'alimentation des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

turbines dont nous parlons plus loin ; six conduites de décharge placées par trois dans les galeries de dérivation ; deux déversoirs inférieurs dont le débit est amené par des puits dans les galeries de dérivation ; deux déversoirs supérieurs et dont le débit est évacué de la même manière que celui des précédents ; enfin une nouvelle galerie a été percée pour compléter l'alimentation des turbines.

Les conduites de prise d'eau de 1m,10 de diamètre, en fonte, sont placées chacune dans un petit tunnel maçonné qui traverse le barrage. Une vanne cylindrique placée dans une cabine à l'aval du barrage et une vanne plane, dite de sûreté, manœuvrée par une longue tige, du couronnement de l'ouvrage, commandent l'orifice de chaque conduite. Les conduites débitent ensemble 6 mètres cubes d'eau par seconde, à la vitesse de 2m,80. Dans le même tunnel, et à côté de chaque conduite, s'en trouve une autre de 0m,30 de diamètre destinée à évacuer l'eau de suintement fournie par les drains et le mur de garde.

Les conduites de décharge des galeries de dérivation (1m,10 de dia-

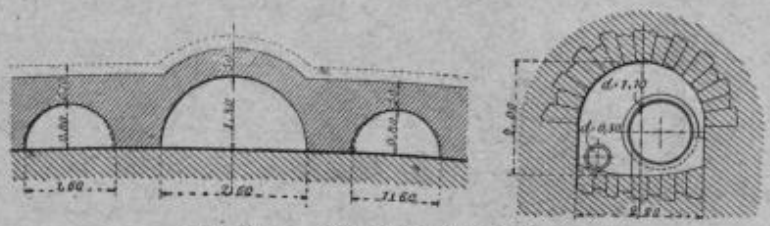


FIG. 324. — Coupes suivant *ab* et *cd*.

mètre) sont placées 3 par 3 dans chacune des galeries de dérivation ayant servi à assécher le lit du torrent pendant l'édification du barrage, lesquelles galeries à la fin des travaux ont été bouchées par un tampon en maçonnerie de 17 mètres de longueur. Ces conduites sont munies de vannes, manœuvrées au moyen de longues tiges logées dans un puits et actionnées du niveau supérieur du bassin. Lorsque la capacité du bassin est de 5 millions de mètres cubes, elles peuvent débiter les 110 mètres cubes par seconde qu'il est possible de laisser écouler dans le lit du Queis, sans danger pour les riverains. Une petite conduite de 0m,40 de diamètre sert à faire écouler l'eau qui peut s'amasser dans les puits renfermant les vannes.

Les deux déversoirs inférieurs sont situés dans les rives du Queis ; l'eau qui les surmonte se rend, par deux courtes galeries horizontales de 4 mètres de diamètre, dans deux puits inclinés de 5 mètres de diamètre qui vont rejoindre les galeries de dérivation un peu en aval des tampons dans lesquels sont noyées les conduites ci-dessus. Ces orifices ont pour but d'empêcher, automatiquement, l'élévation de l'eau dans le réservoir, car ils ne fonctionnent que lorsque ce niveau dépasse une cote déterminée et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

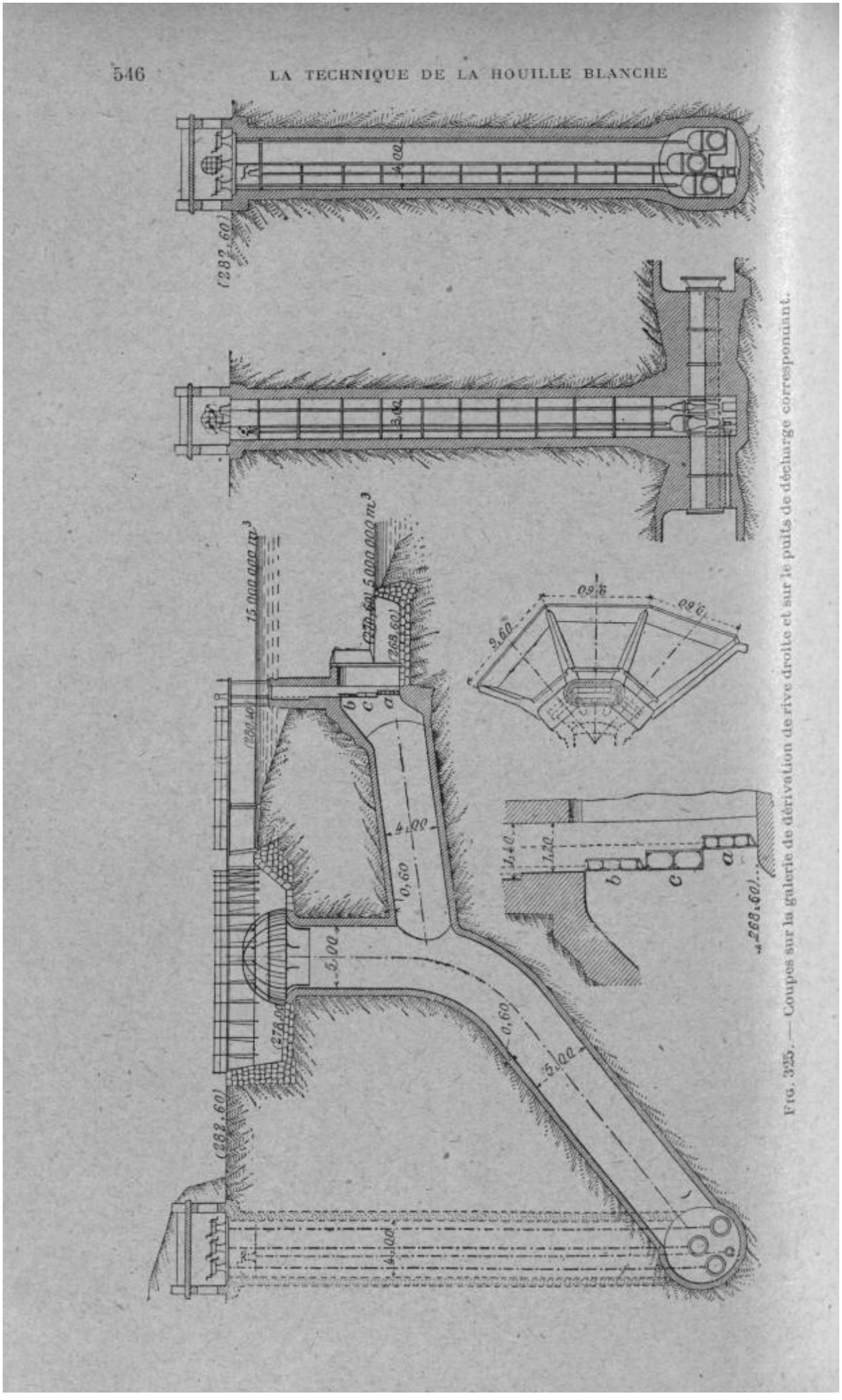


Fig. 325. — Coupes sur la galerie de dérivation de rive droite et sur le puits de décharge correspondant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

leur débit va en augmentant au fur et à mesure que l'eau s'élève dans le bassin. Ils peuvent débiter 110 mètres cubes avec une très faible surélévation du niveau normal. Entre le déversoir et le puits correspondant se trouvent trois conduites de décharge commandées chacune par deux vannes, l'une inférieure, l'autre supérieure. En temps ordinaire, les vannes inférieures sont ouvertes et suffisent pour laisser passer le débit de 110 mètres cubes par seconde. Lorsqu'on veut maintenir le niveau du réservoir à une cote un peu supérieure à la normale, on ferme ces vannes et l'on ouvre les vannes supérieures et l'eau s'écoule au-dessus de la partie fixe, qui forme à son tour déversoir. Quand les besoins de l'usine le demandent, on porte la contenance du bassin de 5 millions à 8 millions de mètres cubes par exemple, simplement par la fermeture des vannes inférieures, les vannes supérieures étant laissées ouvertes.

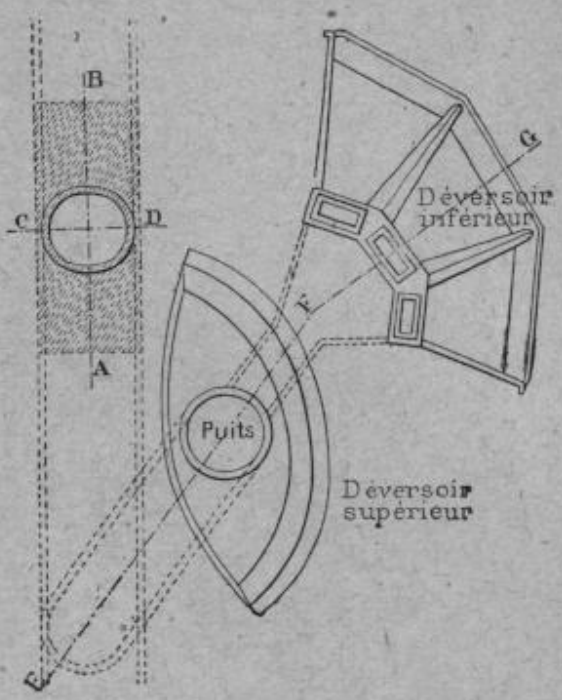


Fig. 326. — Plan détaillé des déversoirs, rive droite.

Les deux déversoirs supérieurs, situés un sur chaque rive et arasés à deux mètres au-dessous de la crête du barrage, laissent écouler l'eau, qui les surmonte, directement dans les puits donnant accès aux galeries de la dérivation. Ces déversoirs sont destinés à empêcher que le barrage puisse être surmonté par les eaux, même dans le cas d'une crue tout à fait exceptionnelle. Ils pourraient débiter, au moment où l'eau arriverait à la crête du bassin c'est-à-dire avec une lame de 2 mètres d'épaisseur, 428 mètres cubes à la seconde. Alors, les six conduites de décharge, les douze vannes des déversoirs inférieurs et les deux déversoirs supérieurs peuvent écouler ensemble 780 mètres cubes.

La grande vitesse que l'eau peut atteindre dans les galeries de dérivation a conduit à les revêtir en maçonnerie en pierre de taille dans la partie en aval des puits, et en béton de $0^m,60$ d'épaisseur dans la partie amont. Les raccordements de la partie inférieure des puits avec les galeries sont revêtus d'un blindage en tôles appuyé contre une couche de béton de $0^m,60$ d'épaisseur. Pour éviter l'introduction de corps flottants dans les puits, on a muni leurs orifices supérieurs, élargis en pavillons de trompette, d'une grille sphérique et l'on a même placé des grilles robustes devant les vannes qui commandent les conduites de la cote (270,6).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le prix total de la construction du barrage et de ses accessoires s'est élevé à 2.640.000 marks, dont : 1.300.000 pour le barrage proprement dit,

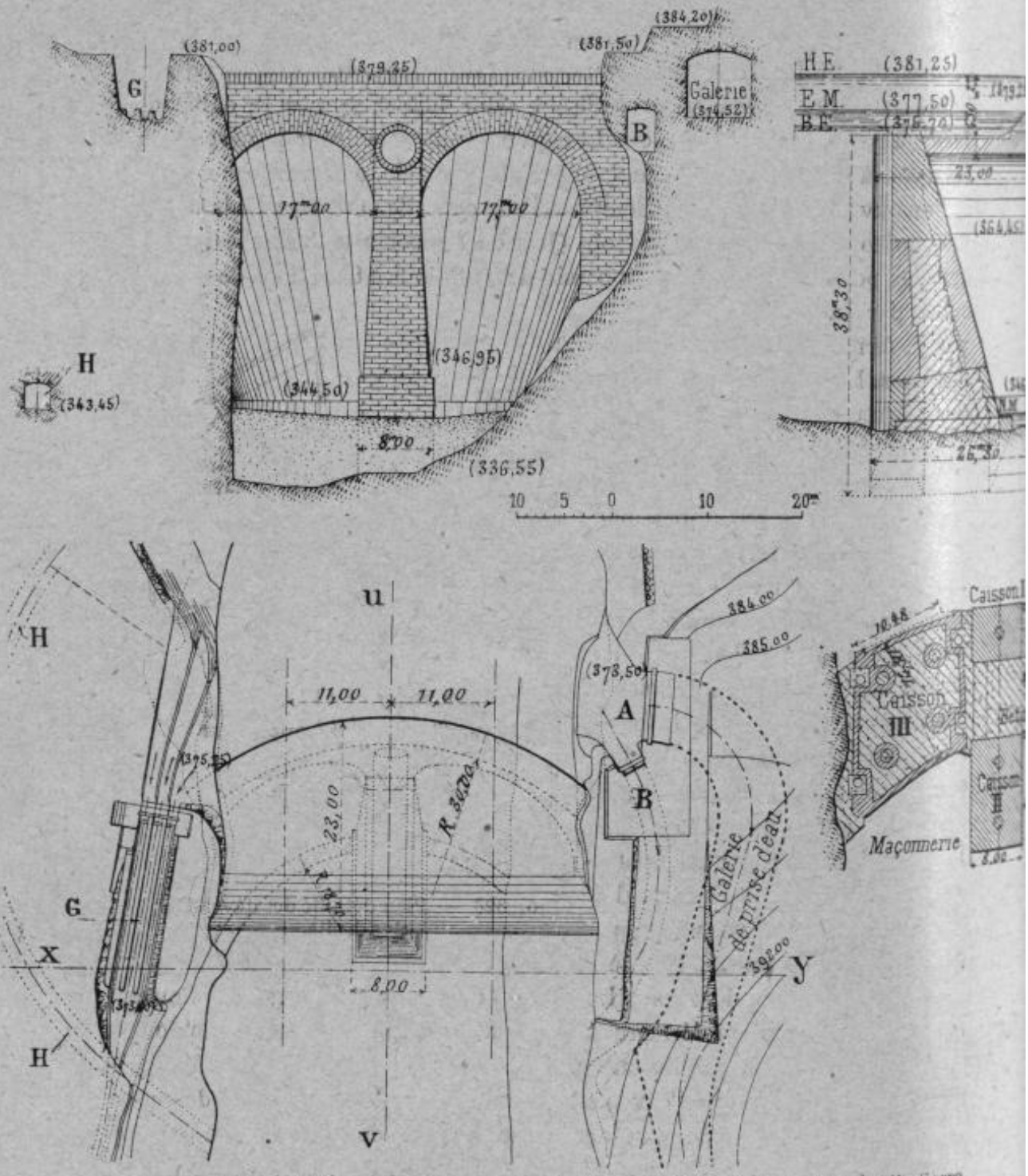


FIG. 237. — Élévation, coupes et plan du barrage du Cismon, à Ponte della Serra (Italie).

400.000 pour le percement et la maçonnerie des puits et galeries de dérivation, 264.000 pour les blindages des parois, 220.000 pour les vannes de décharge des déversoirs inférieurs, les conduites en fonte et pour les con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duites de l'usine, 144.000 pour les constructions accessoires et 132.000 pour les frais généraux. L'établissement d'un pont sur le Queiss, d'un chemin et l'acquisition des terrains noyés ont nécessité une dépense de 750.000 marks. Enfin on estime que les frais d'installation de l'usine hydroélectrique et de la distribution de l'électricité dans la ville de Marklissa s'élèveront à 1.500.000 marks. Soit donc en tout, 4.710.000 marks.

Cette installation, ainsi que le fait remarquer si justement M. A. Dumas, montre que les évacuateurs par puits et galeries donnent toute la sécurité voulue et que le barrage de Marklissa est pour donner confiance aux ingénieurs qui ont à élever des barrages dans des gorges dont l'étroitesse ne permet pas de trouver l'emplacement de déversoirs de superficie.

117. Barrage de Ponte della Serra (ITALIE) (*fig.* 327). — Cet ouvrage qui a 38 mètres de hauteur a permis de créer une chute de 54 mètres

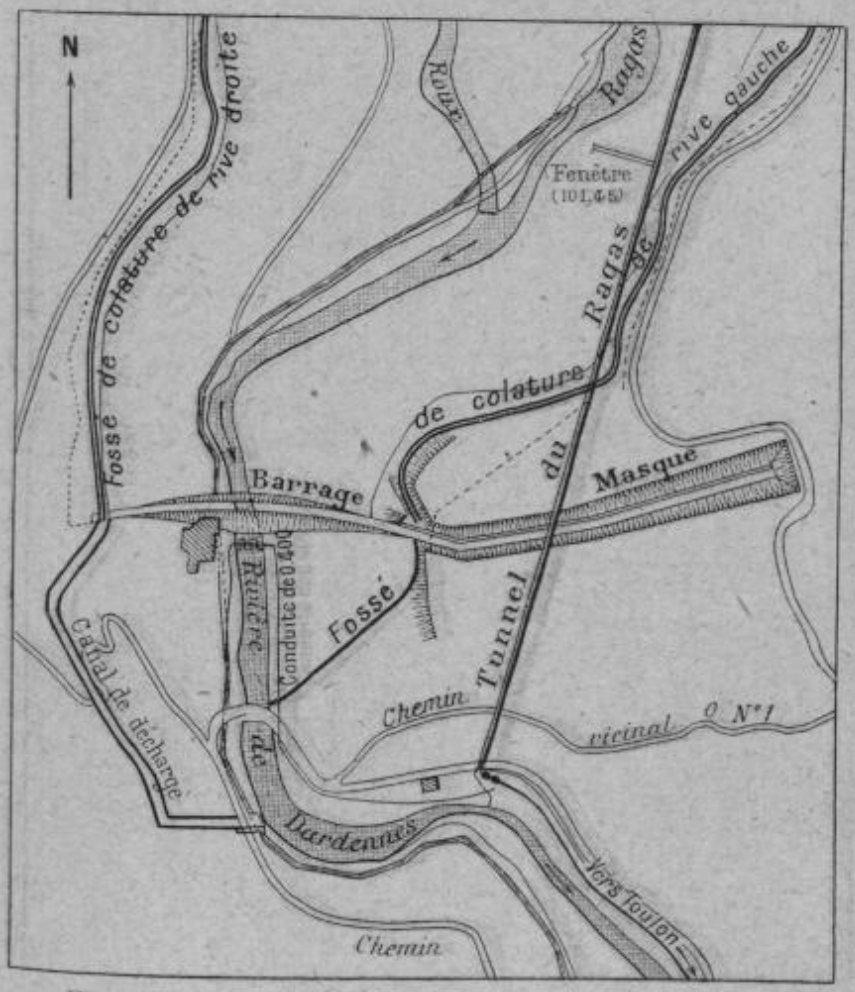
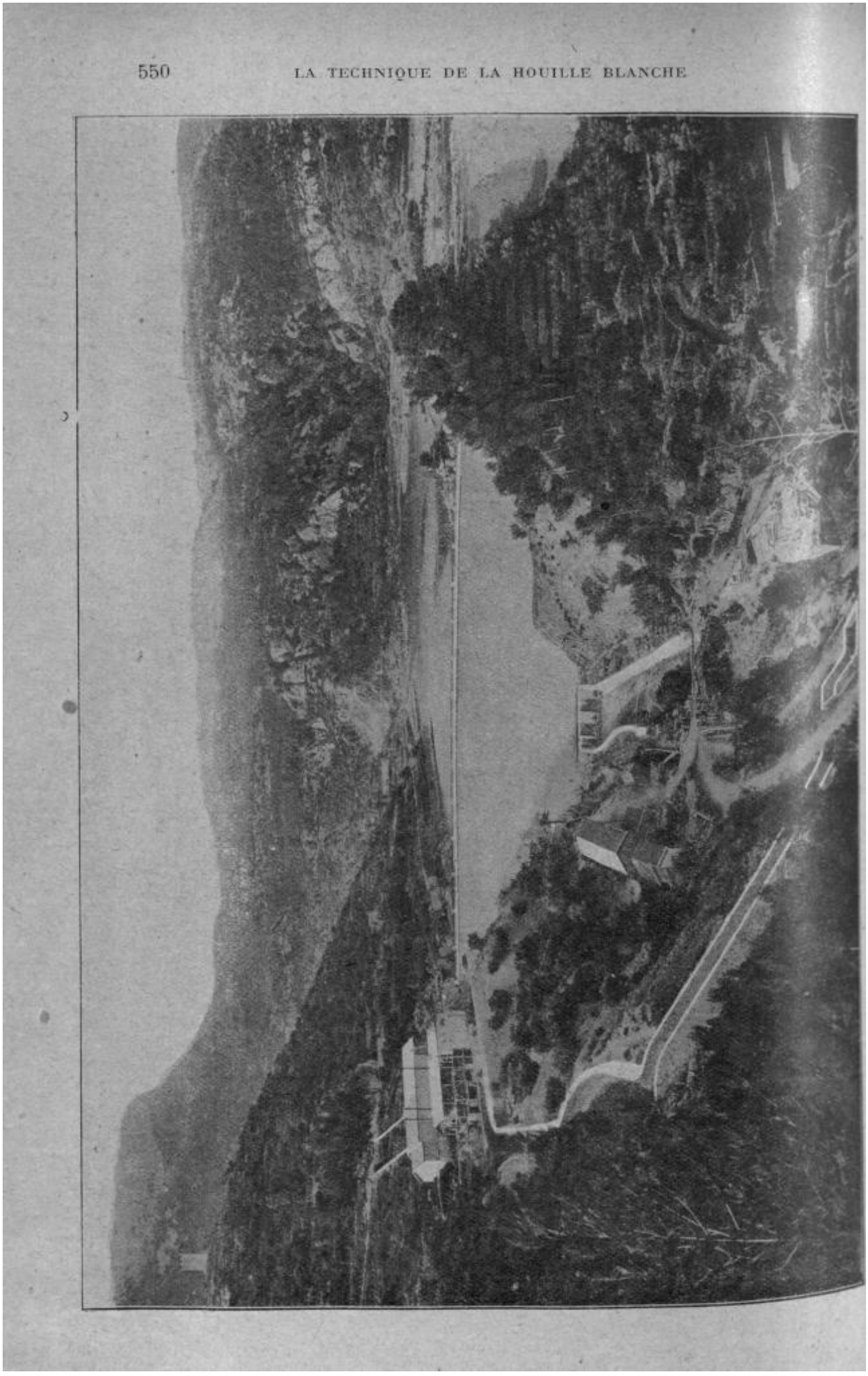


FIG. 328. — Plan de situation du barrage de Dardennes.

qui alimente l'usine de Cismon, sur la rivière de ce nom. Sa retenue est de 4millions de mètres cubes. Le barrage se compose de trois parties : 1° le bar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rage proprement dit à forte courbure en plan; 2° deux voûtes fondées sur les rocs de rive et sur une pile centrale; 3° un déversoir supporté par les constructions précédentes. Ces dispositions originales ont été adoptées en raison du peu de largeur de la gorge du torrent. Par suite la nappe d'eau qui se déverse au-dessus du barrage retombe assez loin pour ne pas affouiller les fondations, laquelle peut atteindre 2 mètres d'épaisseur. La prise d'eau se trouve sur la rive gauche à 25 mètres du barrage. Entre le barrage et la prise d'eau, 1m,50 plus bas, une galerie avec pente de 11 0/0 sert à l'évacuation des graviers et des sables; sur la rive droite, ayant leurs orifices à 3m,50 les unes des autres, trois gouttières à section ovale, de 1 mètre

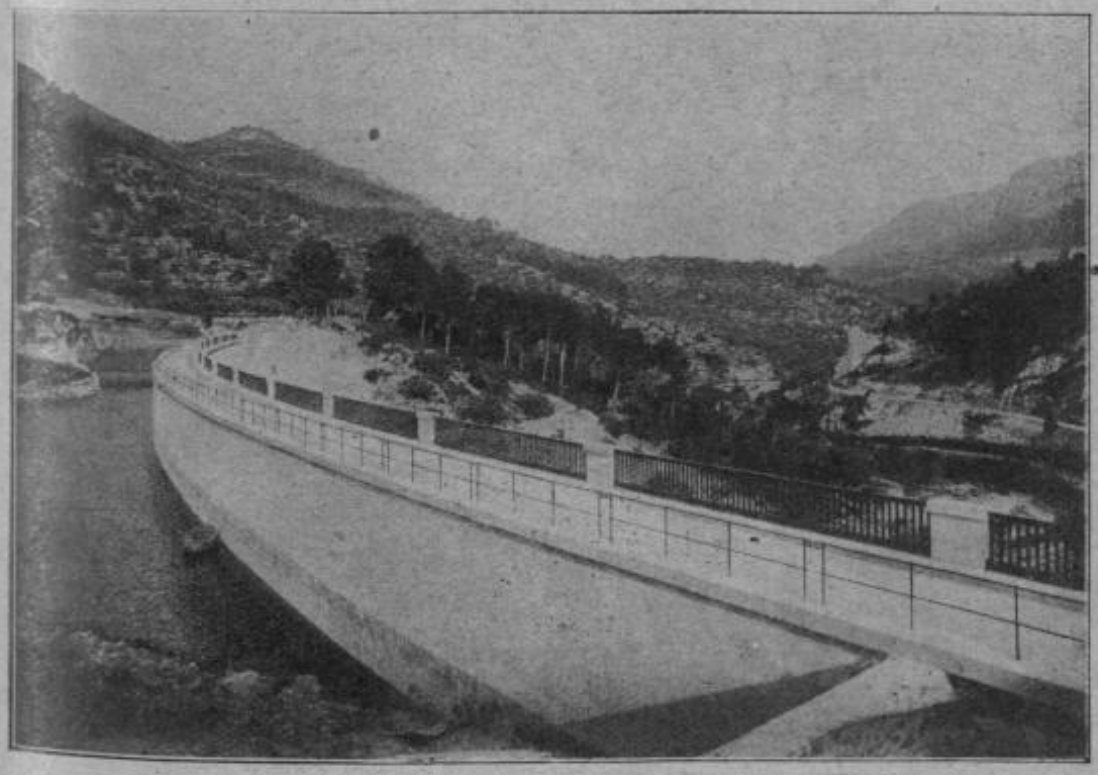


Fig. 330. — Vue du couronnement et du parement amont du barrage des Dardennes.

de largeur permettent le flottage des bois ; elles se réunissent 20 mètres plus loin en une seule rigole, avec une pente de 20 0/0.

La maçonnerie de l'ensemble du barrage représente près de 20.000 mètres cubes, dont plus de 4.000 pour les fondations. Le béton de remplissage était composé de 250 kilogrammes de ciment pour 0m3,500 de sable et 0m3,750 de gravier.

L'usine hydroélectrique de Cismon est établie pour une puissance d'environ 11.000 chevaux à l'aide de turbines Francis de 3.500 chevaux chaque et d'alternateurs triphasés 5.500 volts, 42 périodes-seconde. Le transport d'énergie est à la tension de 60.000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

118. Barrage-réservoir de Dardennes (Bouches-du-Rhône) (*fig.* 328 à 332). — Ce barrage a été créé pour accumuler les eaux de la source du Ragas, pendant les périodes pluvieuses en vue de l'alimentation en eau potable de la ville de Toulon pendant les périodes sèches.

Derrière le barrage, qui a été mis en service en 1913, il se produit dans la retenue des mouvements d'eau alternativement ascensionnels et des-

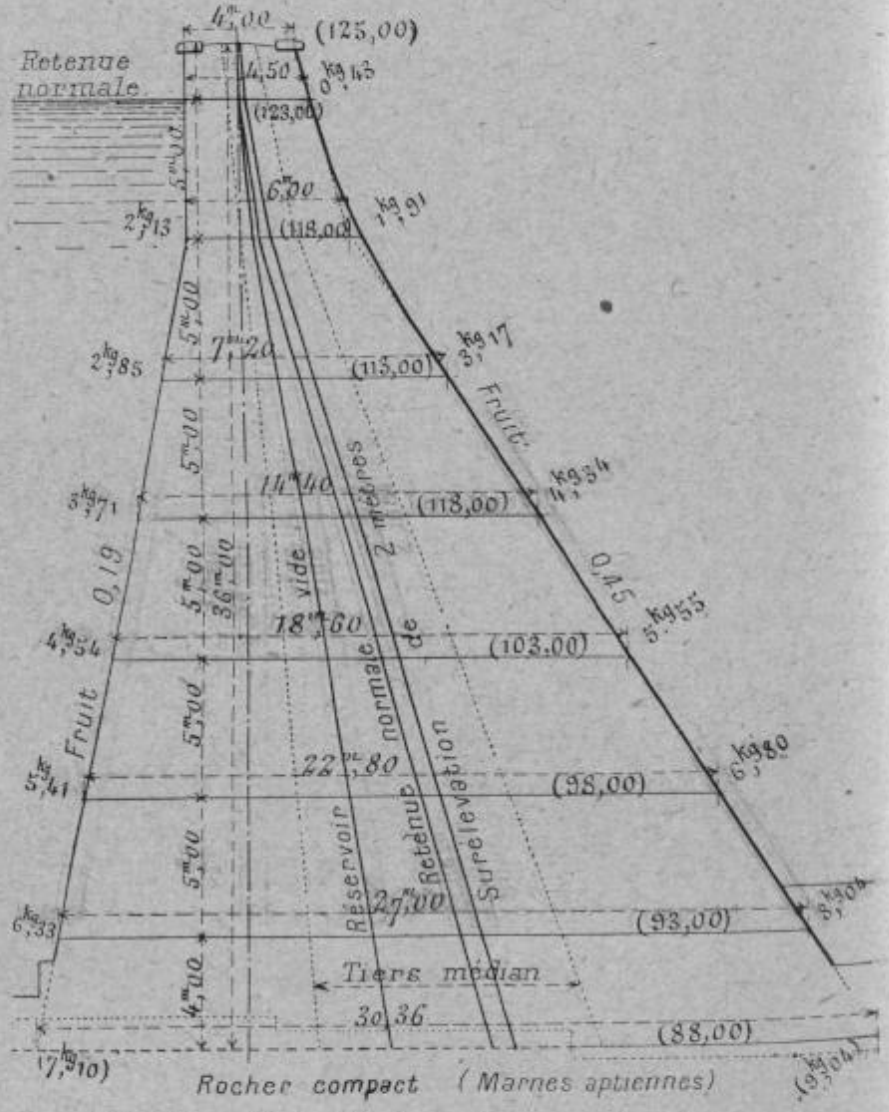


FIG. 331. — Profil théorique du barrage des Dardennes.

cendants. Le bassin artificiel qui reçoit les quantités d'eau de source en excédent, les restitue pour soutenir le débit sur Toulon, lorsque la consommation augmente ou lorsque l'écoulement continu de la source est insuffisant pour faire face aux besoins.

Le barrage a été fondé sur un emplacement imposé par les conditions géologiques. L'ancrage sur la rive gauche a donné lieu en particulier à l'exécution d'un masque étanche en mortier de chaux maritime comprimé,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ayant pour objet d'arrêter et de canaliser les infiltrations se produisant sous l'effet de la charge d'eau de retenue dans les massifs éboulеux de la rive gauche. Sa longueur totale est de 174m,72. Des puits, au nombre de 62, ont été ménagés dans l'ouvrage et communiquent dans leur partie inférieure par une conduite en fonte de 155 millimètres destinée à conduire toutes les eaux d'infiltration vers un puits central.

En plan, le barrage a la forme d'un arc de cercle de 300 mètres de rayon, dont la convexité est dirigée vers l'amont et dont le développement au niveau du couronnement est de 154m,28.

Son profil type a été établi en conformité des prescriptions ministérielles du 25 juin 1897. La pression maximum sur le sol de fondation dépasse légèrement 9 kilogrammes par centimètre carré. La hauteur maximum au-dessus de la risberme à la cote (91,40) est de 33m,60 ; la charge d'eau effective, lorsque la retenue est réglée à la cote normale (123,00) est de 31m,60.

A sa partie inférieure, le barrage est traversé par trois canalisations en fonte de 800 millimètres de diamètre qui permettent d'écouler un volume d'environ 30 mètres cubes à la seconde.

Sur la rive droite, on a établi un déversoir de superficie de 70 mètres de longueur arrasé à la cote (123,00) permettant d'écouler 100 mètres cubes à la seconde avec une surélévation du plan d'eau de 0m,80.

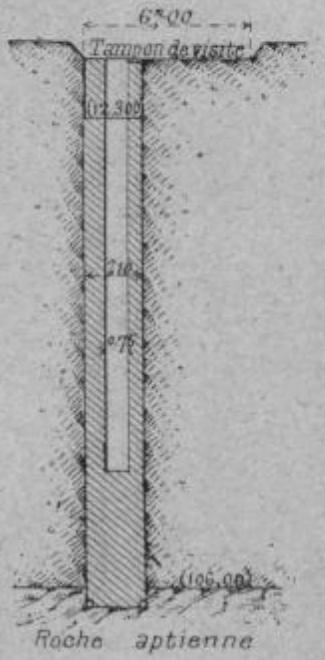


FIG. 332. — Coupe du masque Barrage de Dardennes.

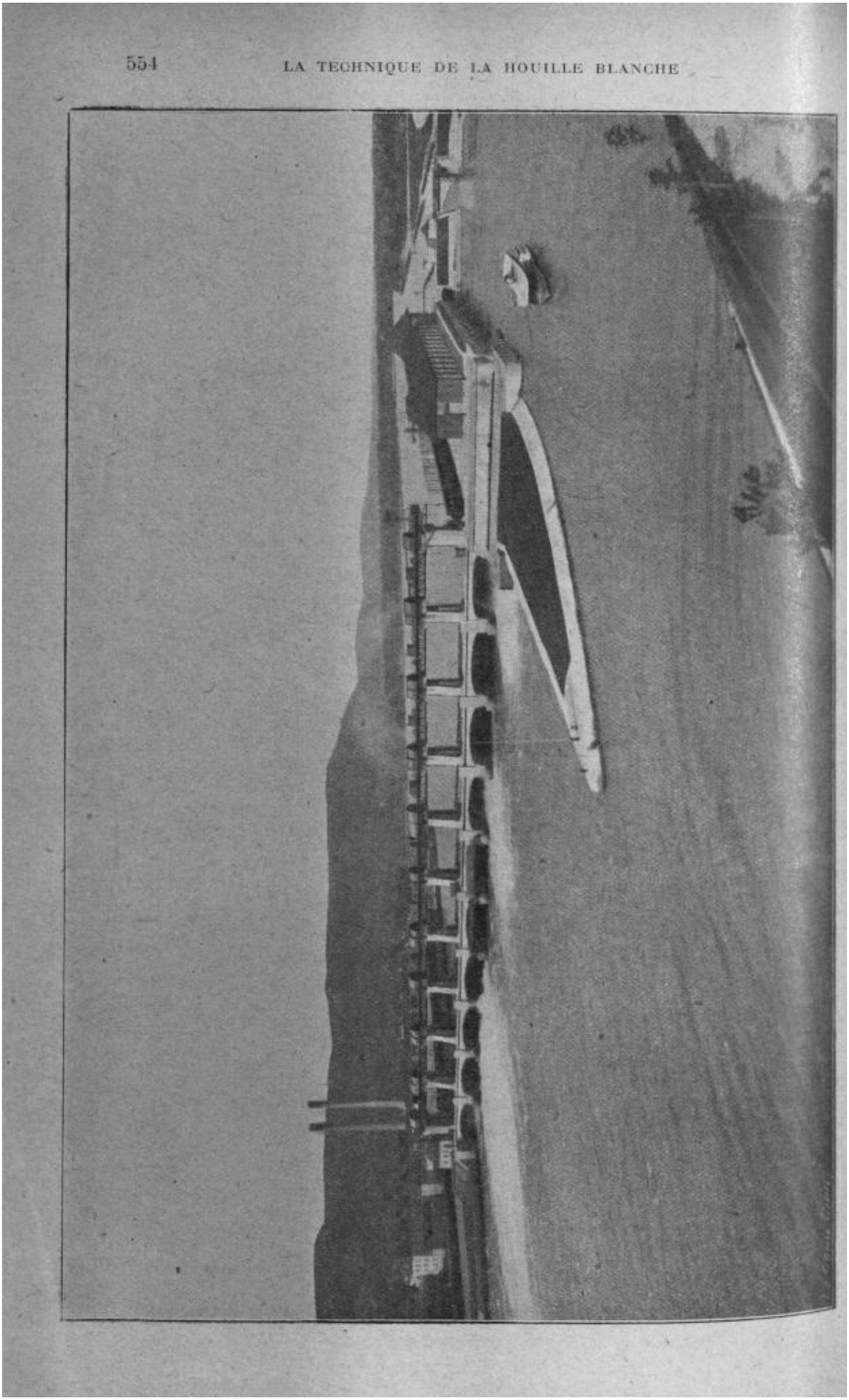
Le canal de décharge, qui traverse le barrage à son extrémité ouest, constitué par un tunnel avec voûte, se développe à flanc de coteau sur la rive droite, pour rejoindre, par un rapide maçonné, le lit de la rivière.

Un fossé de colature, tracé sur toute la périphérie du bassin, emmagasine les eaux de ruissellement superficielles. Il traverse le barrage sur la rive gauche et rejoint le lit de la rivière. Sur la rive droite, il débouche librement dans le canal de décharge du déversoir, à son extrémité amont.

Le prix de revient de l'ouvrage entier se décompose comme suit :

BARRAGE.	Terrassements : 25.598m3,83 à 3fr,50 le mètre cube..	84.476fr,14
	Rocaillage du fond de fouille.....	50.672 ,89
	Maçonnerie ordinaire du barrage : 40.703 mètres cubes à 15fr,60 le mètre cube et plus-value pour certaines sujétions.....	625.127 ,91
	Enduit sur parement amont, 3.123m2,70 à 4fr,80....	14 993 ,76
MASQUE.	Terrassements : 10.303 mètres cubes et plus-values.	26.737 ,45
	Fouille blindée : 5.996m3,195.....	68.333 ,00
	Mortier comprimé : 4.768 mètres cubes.....	179.267 ,00
	Ensemble.....	1.577.772fr,30

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

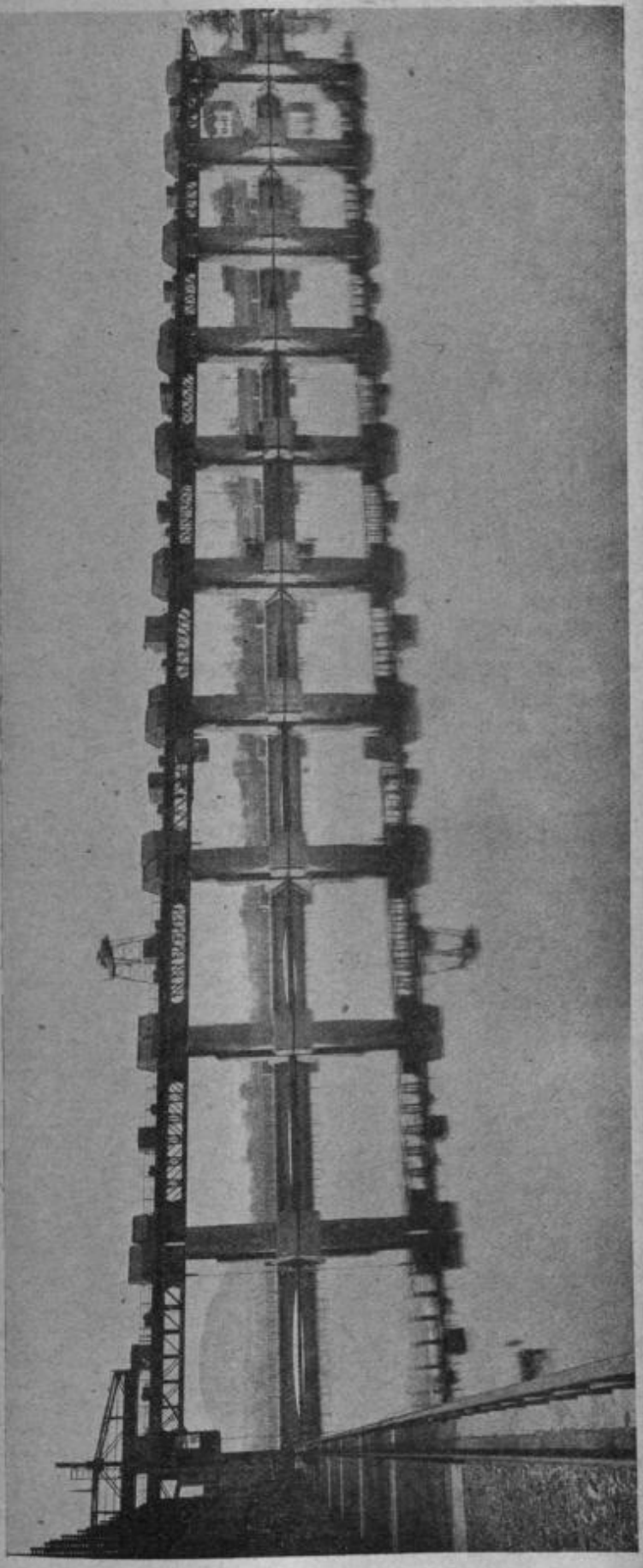


FIG. 334. — Barrage d'Augst-sur-le-Rhin. — Vue d'ensemble prise de l'amont.

CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

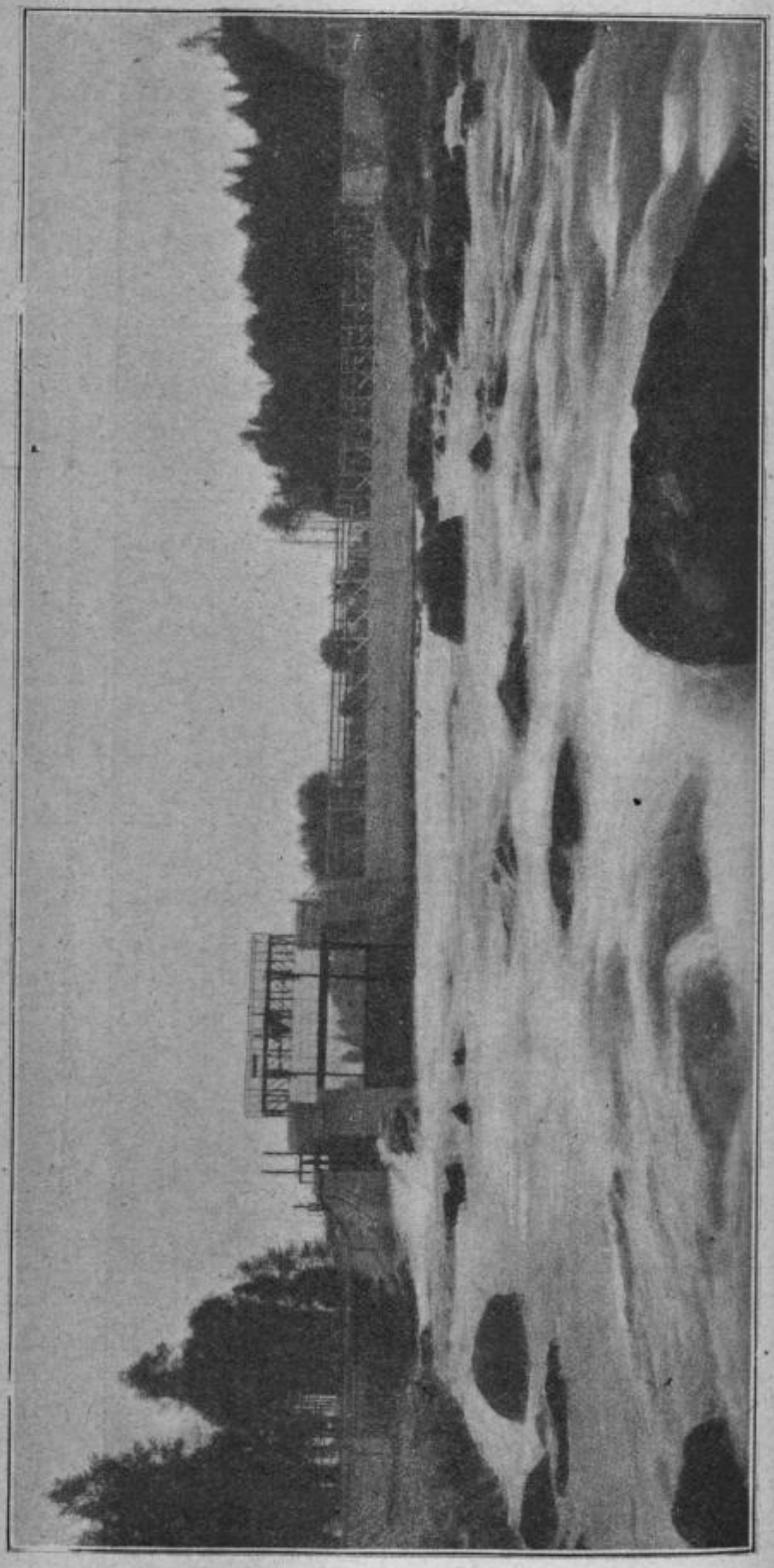


FIG. 335. — Usine hydroélectrique d'Aelfkarbely. — Vue du barrage sur le Bras-du-Roi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En ajoutant à ce chiffre des travaux divers, tels que étanchement, prix des terrains, on arrive au prix de 2.100.000 francs.

Les travaux ont duré trois ans.

En outre, des ouvrages que nous venons de décrire, les plus grands barrages déversoirs et les plus importantes retenues d'eau réalisés à ce jour sont celles ci-après :

	Hauteur en mètres		Largeur au sommet en mètres	Capacité de la retenue en mètres cubes
Barrage du lac Vanern (Suède).....	1.80			8.490.000.000
» Roosevelt (Arizona).....	79.50		196	1.600.000.000
» d'Assouan (1re cataracte du Nil).	14	(max 39m)	1950	1.165.000.000
» du lac Mjösen (Norvège).....				1.080.000.000
» du lac Mrösvand (Norvège)...	12			800.000.000
» du lac de Genève (Suisse)....	0,90			350.000.000
» du lac Tinoset (Norvège).....	2			200.000.000
Barrage de l'Urft (Gemünd).....	58		226	45.500.000
» du Hamiz (Alger).....	38			14.000.000

Voici en outre les prix minima atteints dans certaines retenues en Norvège et en Suède :

Noms des lacs	Capacités des réservoirs en millions de mètres cubes	Dépenses totales en millions de francs	Dépenses en centimes par mètre cube emmagasiné
Mjösen (en Norvège)...	1080	42	0.39
Mjösvand (»)...	800	14	0.18
Vättern (en Suède)....	910	1.400	0.15
Vänern (»)...	8480	2.520	0.04

119. Types de profils calculés. — Dans cet exemple, ramené à un cas très simple, le poids de la surcharge d'eau qui charge verticalement le sommet du mur est de 3 mètres de hauteur (*fig.* 336), soit :

$$3 \times 2{,}80 \times 1.000^{kg} = 8.400 \text{ kg.},$$

poids qui vient en augmentation de celui de chaque zone de maçonnerie considérée.

La densité des maçonneries est prise égale à 2.200 kilogrammes.

La poussée Q de l'eau est donnée par la formule :

$$Q = \frac{1.000H^2}{2},$$

et son point d'application est au tiers inférieur de la hauteur pour une zone déterminée.

Si on désigne par P, P_1, P_2, etc., les divers poids des maçonneries, et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par R, R_1, R_2, les résultantes, on obtient les valeurs suivantes de ces forces, correspondant aux surfaces de cinq zones considérées :

$S = \frac{2,80+3,30}{2} \times 1 = 3^{m2},05$ et $P = 3,05 \times 2.200 = 6.710$ kg.

$S_1 = S + \frac{3,30+4,50}{2} \times 2 = 10^{m2},85$ et $P_1 = 10,85 \times 2.200 = 23.900$ kg.

$S_2 = S + S_1 + \frac{4,50+5,85}{2} \times 2 = 21^{m2},20$ et $P_2 = 21,20 \times 2.200 = 46.000$ kg.

$S_3 = S + S_1 + S_2 + \frac{5,85+7,30}{2} \times 2 = 34^{m2},35$ et $P_3 = 34,35 \times 2.200 = 75.600$ kg.

$S_4 = S + S_1 + S_2 + S_3 + \frac{7,30+8,80}{2} \times 2 = 50^{m2},45$ et $P_4 = 50,45 \times 2.200 = 119.400$ kg.

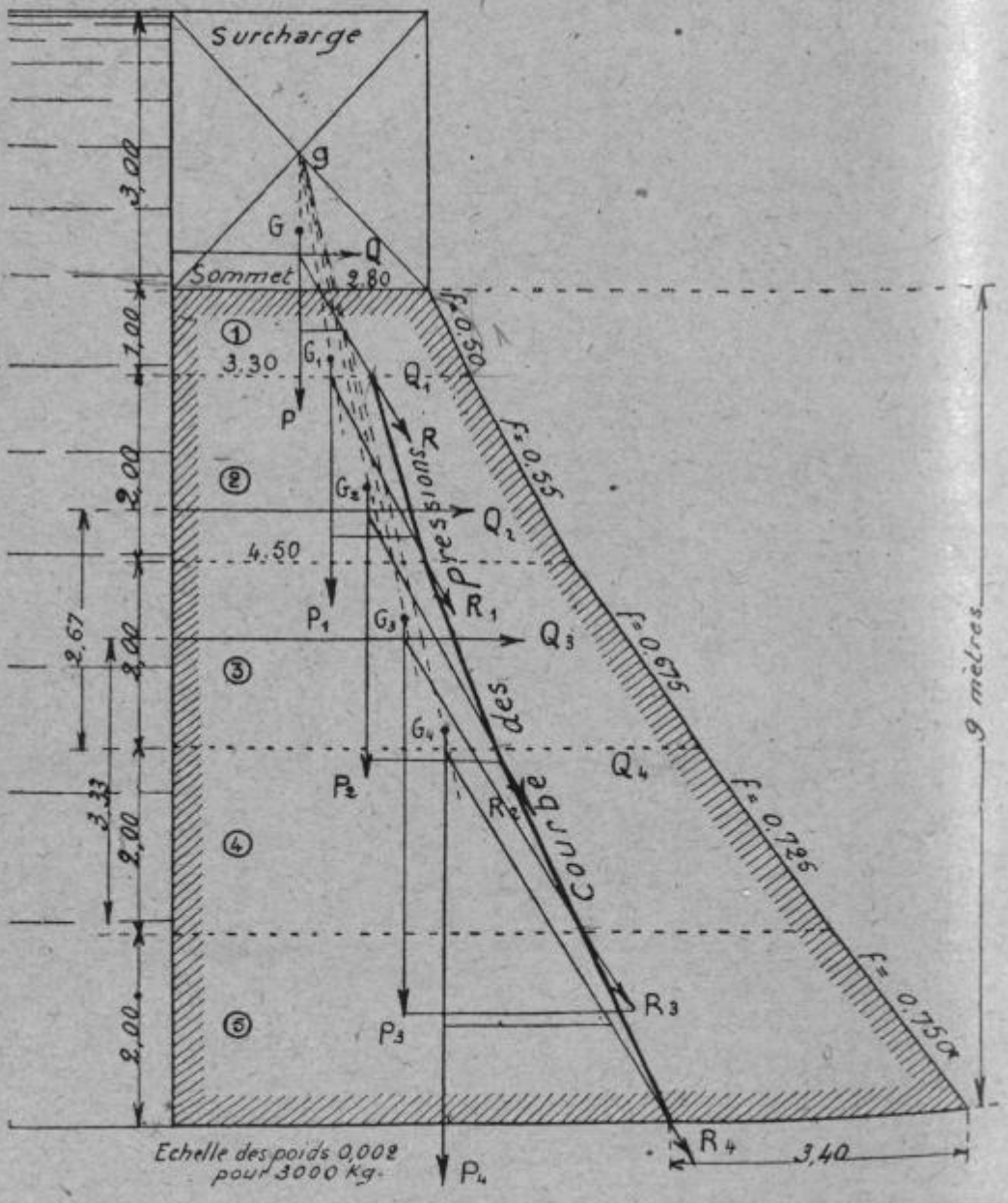


FIG. 336.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

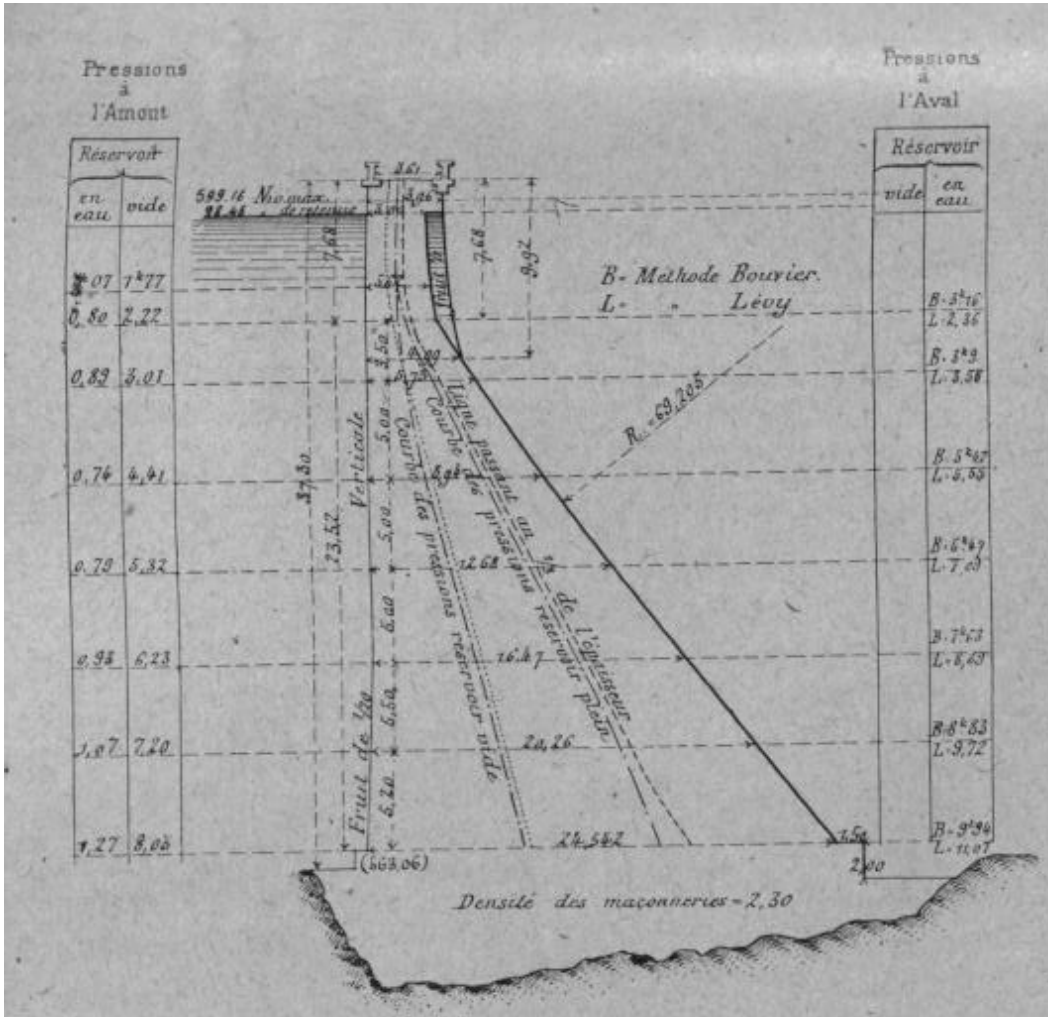


Fig. 337. — Épure de stabilité du barrage-réservoir de l'Échapre (vallée de l'Ondaine, dans la Loire).

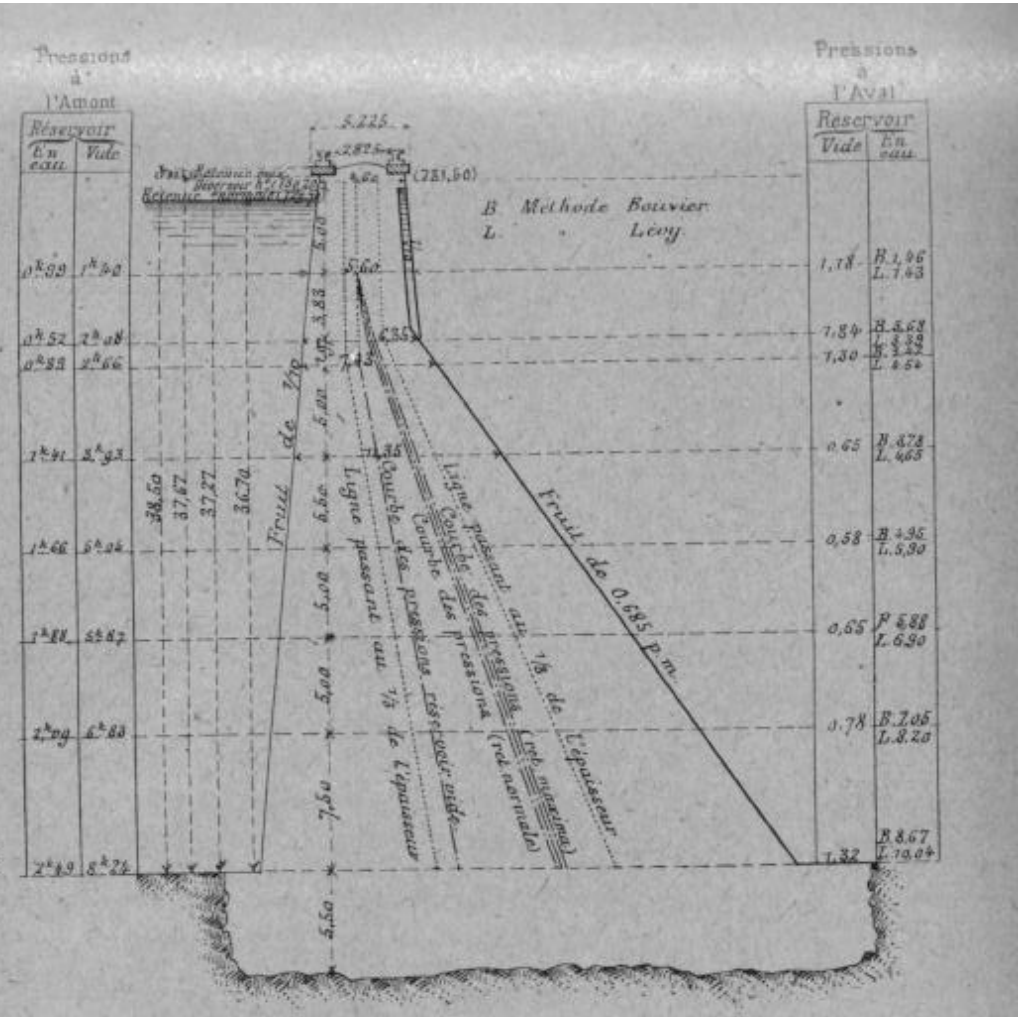


Fig. 338. — Épure de stabilité du barrage de Cotatay (vallée de l'Ondaine, dans la Loire).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soit avec surcharge : $6.710 + 8.400 = 15.110$ kg.
» $23.900 + 8.400 = 32.300$ kg.
» $46.600 + 8.400 = 55.000$ kg.
» $75.600 + 8.400 = 84.000$ kg.
» $111.000 + 8.400 = 119.400$ kg.

Puis :

$$Q = \frac{1.000 \times \overline{4}^2}{2} = 8.000 \text{ kg.} ; \quad Q_1 = \frac{1.000 \times \overline{6}^2}{2} = 18.000 \text{ kg.} ;$$

$$Q_2 = \frac{1.000 \times \overline{8}^2}{2} = 32.000 \text{ kg.} ;$$

$$Q_3 = \frac{1.000 \times \overline{10}^2}{2} = 50.000 \text{ kg.} ; \quad Q_4 = \frac{1.000 \times \overline{12}^2}{2} = 72.000 \text{ kg.}$$

Et enfin :

$$R = \sqrt{\overline{15.110}^2 + \overline{8.000}^2} = 17.000 \text{ kg.} ; \quad R_1 = \sqrt{\overline{32.300}^2 + \overline{18.000}^2} = 37.300 \text{ kg.} ;$$

$$R_2 = \sqrt{\overline{55.000}^2 + \overline{32.000}^2} = 64.000 \text{ kg.} ;$$

$$R_3 = \sqrt{\overline{84.000}^2 + \overline{50.000}^2} = 98.000 \text{ kg.}, \text{ et } R_4 = \sqrt{\overline{119.400}^2 + \overline{72.000}^2} = 140.000 \text{ kg.}$$

En construisant l'épure des pressions, on voit que la courbe des pressions passe dans le tiers médian pour toutes les zones et coupe la base du mur à $3^m,40$ de l'angle aigu.

Le moment de renversement de la poussée de l'eau est :

$$Q_4 \times 4^m = 72.000 \text{ kg.} \times 4 = 288.000.$$

Celui des maçonneries :

$$P_4 \times 5^m,80 = 119.400 \times 5^m,80 = 690.200.$$

$$\text{Le coefficient de stabilité} = \frac{690.200}{288.000} = 2,40.$$

Les (*fig.* 337 et 338) présentent des profils de barrages calculés par M. l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées Reuss.

La (*fig.* 339) montre le profil du barrage de l'usine hydroélectrique du Cher, dont les travaux d'aménagement ont été confiés à MM. Giros et Loucheur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Barrage-réservoir de Fontbélon, sur la Durance (Projet). — Cet ouvrage que nous décrivons d'une façon spéciale aux (§ 277 à 285) (voir Planche XI) a en plan un rayon de courbure de 1 kilomètre et l'arc a 660 mètres de longueur.

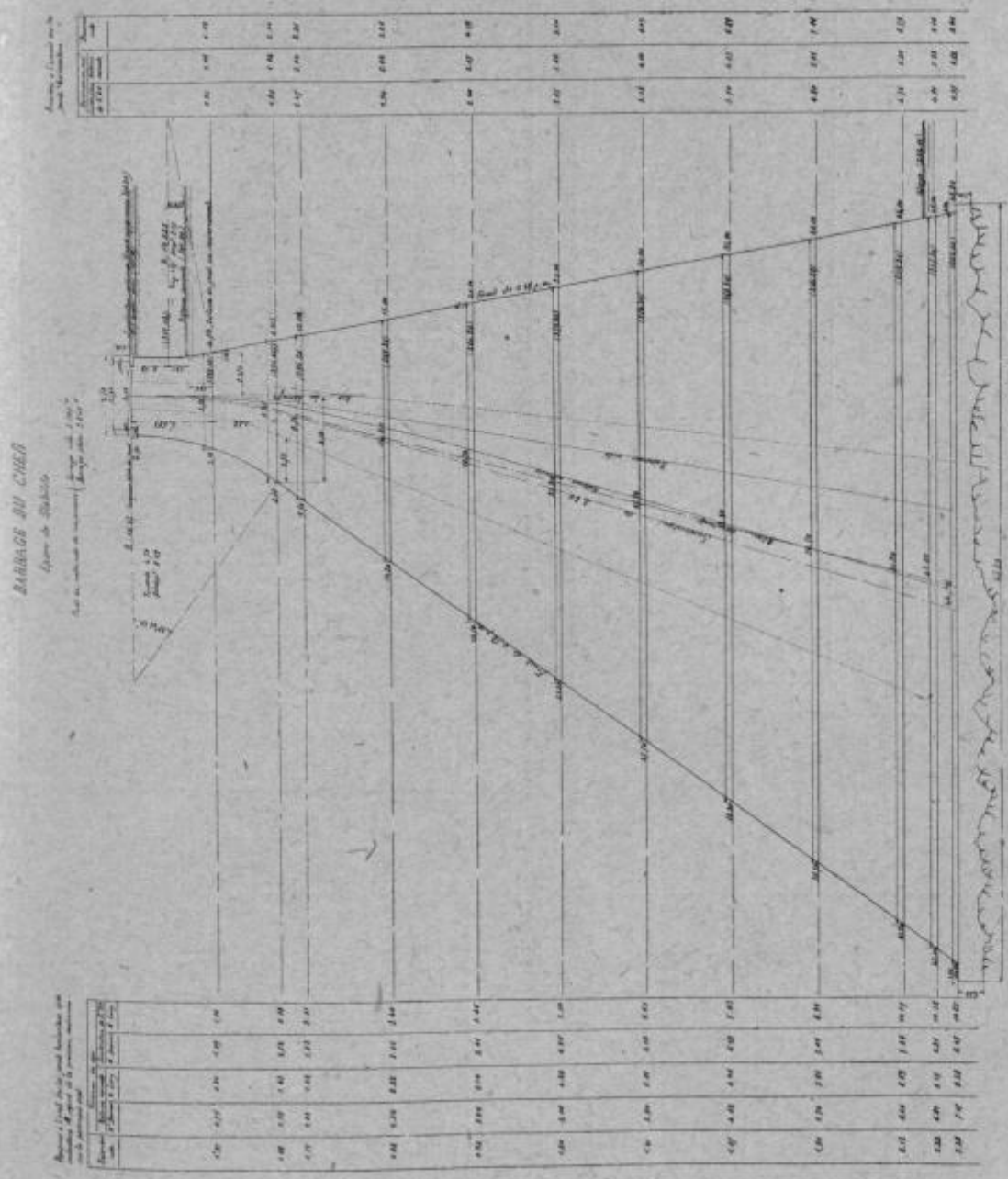


Fig. 339. — Épure de stabilité du barrage de l'usine du Cher.

La hauteur totale du mur du barrage est de 50 mètres (*fig.* 340), la largeur au sommet, 3 mètres et son épaisseur au pied, 47m,40. La crête de l'ouvrage est à la cote 516 et la retenue légale à la cote 515,50.

Le volume d'eau retenu par le barrage est de 124.112.000 mètres cubes.

Les travaux provisoires en vue de l'édification du barrage proprement dit comportent un barrage-batardeau et deux canaux pour la dérivation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

BARRAGE DE FONTBÉTON. — CALCUL DU BARRAGE

BARRAGE à vide	BARRAGE EN EAU — RETENUE NORMALE	BARRAGE EN EAU — LAME DÉVERSANTE de 1m,00	DÉSIGNATION DES JOINTS
0k,363	B = 0k,880 0k,567 L = 0 ,618	B = 0k,477 0k,197 L = 0 ,470	1
0 ,122	B = 0 ,937 0 ,836 L = 1 ,305	B = 1 ,37 0 ,44 L = 1 ,79	2
—0 ,05	B = 1 ,52 1 ,29 L = 2 ,33	B = 2 ,01 1 ,62 L = 2 ,93	3
—0 ,04	B = 2 ,41 2 ,00 L = 3 ,62	B = 2 ,83 2 ,26 L = 4 ,09	4
—0 ,08	B = 3 ,89 2 ,78 L = 3 ,85	B = 3 ,89 3 ,10 L = 5 ,85	5
—0 ,12	B = 4 ,39 3 ,58 L = 6 ,88	B = 5 ,20 4 ,15 L = 7 ,97	6
—0 ,11	B = 6 ,70 5 ,46 L = 10 ,49	B = 7 ,07 5 ,67 L = 10 ,71	7

CALCULS DE s ET DE d

DÉSIGNATION DES JOINTS	DIMENSIONS des SURFACES partielles	DISTANCE à l'amont des joints des c. de g. des surfaces partielles	SURFACES PARTIELLES	SURFACES TOTALES s	MOMENTS PARTIEL	MOMENTS TOTAL	DISTANCE à l'amont des joints des c. de g. des surfaces totales d
1	3 × 3 3 × 0,9/2	1,5 3,3	9,00 1,35	10,35	13,50 4,455	17	1,73
2	4 × 3,9 4 × 3/2	1,55 4,9	10,35 15,60 6,000	31,95	17,955 30,420 29,40	77	2,43
3	5 × 6,9 5 × 4,5/2	3,45 8,40	31,95 34,5 11,25	77,70	77,775 119,025 94,50	291	3,74
4	6 × 11,4 6 × 5,4/2	5,7 13,2	77,70 68,40 16,2	162,30	291,300 388,88 213,84	894	5,51
5	7 × 16,8 7 × 6,6/2	8,4 19,0	162,30 117,60 23,10	303,00	894,02 987,84 438,90	2320	7,66
6	10 × 23,40 10 × 9,6/2	11,7 26,6	303,00 234,00 48,00	585,00	2320,76 2737,80 1276,80	6335	10,83
7	15 × 33,00 15 × 14,4/2	16,5 37,8	585,00 495,00 108,00	1188,00	6335,36 8167,50 4082,40	18594	15,64

CACULS DE P ET DE P_1

DÉSIGNATION DES JOINTS	SURFACES	POIDS P pour D = 2300 k	POIDS P_1 pour D_1 = 2200 k
1	10,35	23,805 kg	22,700 kg
2	31,95	73,485 »	70,290 »
3	77,70	178,710 »	170,940 »
4	162,30	373,290 »	357,060 »
5	303,00	696,900 »	666,600 »
6	585,00	1,345,500 »	1.287,000 »
7	1.188,00	2.732,400 »	2.613,600 »

CALCUL DES PRESSIONS A VIDE

DÉSIGNATION DES JOINTS	a	P	d	PRESSIONS SUR LES JOINTS moyenne	PRESSIONS SUR LES JOINTS amont	PRESSIONS SUR LES JOINTS aval
1	3,9	23,805	1,73	0k,584	0k,805	0,363
2	6,9	73,485	2,43	1 ,019	1 ,916	1,122
3	11,4	178,710	3,74	1 ,500	3 ,050	1,650
4	16,8	373,290	5,50	2 ,12	4 ,282	2,342
5	23,4	696,900	7,66	2 ,85	5 ,785	3,885
6	33,0	1.345,500	10,83	4 ,07	8 ,262	5,322
7	47,40	2.732,400	15,64	5 ,51	11 ,130	7,110

CALCULS DES PRESSIONS EN CHARGE

DÉSIGNATION DES JOINTS	a	P_1	d	Q	h	$\frac{Q}{P_1}$ ou tg. d	h tg α ou C	$c+d$	b	PRESSION sur les joints moyenne	PRESSION sur les joints amont	PRESSION sur les joints aval	t tg β	PRESSIONS maxima maximorum sur le parement aval Bouvier	PRESSIONS maxima maximorum sur le parement aval Lévy
1e RETENUE NORMALE															
1	3,9	22,770	1,73	4,500	1,00	0,197	0,20	1,93	1,97	0,584	0,601	0,567	0,300	0,589	0,618
2	6,9	70,290	2,43	24,500	7/3	0,348	0,81	3,24	3,66	1,019	1,202	0,836	0,750	0,337	1,30
3	11,4	170,940	3,74	72,000	4,00	0,421	1,68	5,42	5,98	1,500	1,71	1,29	0,900	1,52	2,23
4	16,8	357,060	5,51	162,000	6,00	0,453	2,72	8,23	8,57	2,12	2,24	2,00	0,900	2,41	3,62
5	23,4	666,600	7,66	312,300	29/3	0,468	3,90	11,56	11,64	2,85	2,92	2,78	0,943	3,39	5,25
6	33,00	1.287,000	10,83	612,500	35/3	0,476	5,55	16,38	16,62	3,65	3,72	3,58	0,960	4,39	6,88
7	47,40	2.613,600	15,64	1.250,000	50/3	0,478	7,90	23,60	23,80	5,51	5,65	5,46	0,960	6,70	10,49
2e LAME DEVERSANTE DE 1m,00															
1				7,500	1,2	0,329	0,39	2,12	1,78		0,43	0,737	0,300	0,816	0,803
2				31,500	2,59	0,448	1,16	3,19	3,31		0,893	1,145	0,750	1,37	1,79
3				84.000	4,28	0,491	2,10	5,84	5,56		1,380	1,620	0,900	2,01	2,93
4				180,000	8,10	0,504	3,07	8,56	8,22		1,980	2,260	0,900	2,83	4,09
5				337.500	8,64	0,506	4,37	12,03	11,37		2,600	3,100	0,943	3,89	5,85
6				641,500	11,98	0,503	6,02	16,85	16,15		3,650	4,150	0,960	5,20	7,97
7				1.300,000	17,00	0,497	8,45	24,09	23,31		5,350	5,670	0,960	7,07	10,71
3e LAME DEVERSANTE DE 3m,00															
1				13.500	1,50	0,592	0,89	2,62	1,28		0,017	1,185	0,300	1,54	1,29
2				45.500	3,03	0,647	1,96	4,31	2,51		0,185	1,853	0,750	2,63	2,896
3				10.800	4,80	0,631	3,03	6,77	4,63		0,654	0,346	0,900	3,28	4,85
4				216,000	6,86	0,604	4,14	9,65	7,15		1,05	3,19	0,900	4,35	5,77
5				387.500	9,20	0,581	5,36	13,02	10,38		1,96	3,74	0,943	5,00	7,05
6				717,500	12,60	0,557	7,07	17,90	15,10		2,52	4,78	0,960	6,26	9,18
7				1.400,000	17,61	0,535	9,42	25,00	22,34		4,58	6,36	0,960	8,13	12,22

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des eaux de la Durance, de 30 mètres carrés de section, suffisants pour l'évacuation des crues.

Pour donner une étanchéité relative au bief, la surface de la retenue provisoire sera fréquemment saupoudrée d'argile pulvérisée à l'effet de

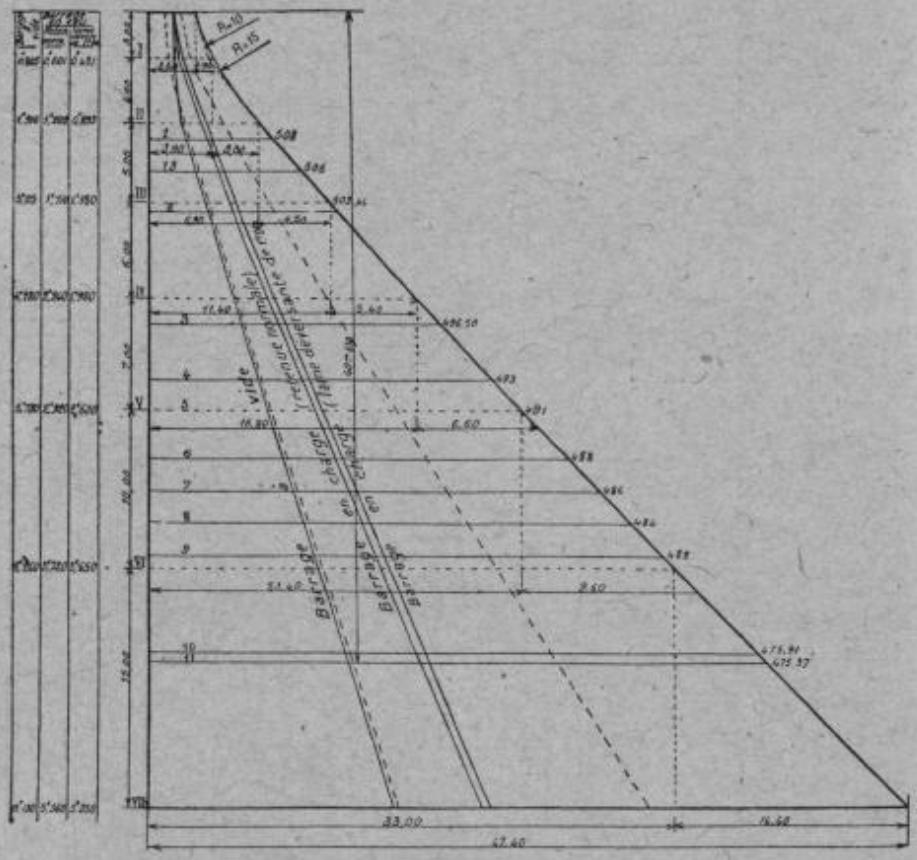


FIG. 340.

colmater le fond de la cuvette, ce qui laissera libre d'eau l'emplacement des fouilles à exécuter en aval, principalement pour les ouvrages du mur du barrage définitif. Nous donnons ci-avant les tableaux des calculs relatifs à l'établissement du barrage de Fontbeton.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VII

RÉCEPTEURS HYDRAULIQUES. — TURBINES

I. — CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES TURBINES

120. Classification des turbines. — C'est en 1826 que Burdin donna la turbine axiale à injection complète, et en 1827 que Fourneyron construisit la première turbine centrifuge avec distributeur cloisonné et vannage à cylindre.

En 1841, Jonval crée la turbine à réaction, perfectionnée par Kœchlin. A la même époque, Fontaine apporte un type de turbine susceptible d'un léger degré de réaction. Puis l'année 1851 voit le développement des turbines à admission partielle de Girard, montrant ainsi les avantages du fonctionnement de la roue mobile dans l'air, et en 1880 apparaissent les turbines centripètes, dues aux ingénieurs Mac-Cormick et Francis, et enfin les turbines à injection partielle de Pelton.

L'année 1885 signale un grand progrès pour l'utilisation des turbines par la venue du servo-moteur de M. Piccard, résolvant le problème du réglage automatique des récepteurs hydrauliques.

Depuis cette époque, nombre de constructeurs ont réalisé des progrès incessants, soit en ce qui concerne les turbines elles-mêmes, soit du côté de la régulation de la vitesse qui est devenue si importante à l'heure actuelle.

Les turbines hydrauliques diffèrent des roues hydrauliques en ce qu'elles peuvent recevoir l'eau sur tout leur pourtour, qu'elles sont, à puissance égale fournie sur leur arbre, plus légères, plus solides, moins coûteuses et tournent dans le sens qu'on désire. Elles peuvent fonctionner en temps de gelée et permettent d'utiliser, avec un égal rendement, des volumes de plusieurs mètres cubes sous des chutes de quelques mètres, et quelques litres sous des charges de plusieurs centaines de mètres.

On divise les turbines, au point de vue du mouvement de l'eau : en *turbines parallèles ou axiales*, où le distributeur est superposé à la cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ronne mobile et où l'eau traverse la roue mobile en se déplaçant sur une surface cylindrique circulaire, ayant pour axe, l'arbre de rotation ; en *turbines radiales*, dans lesquelles la couronne directrice est juxtaposée à la

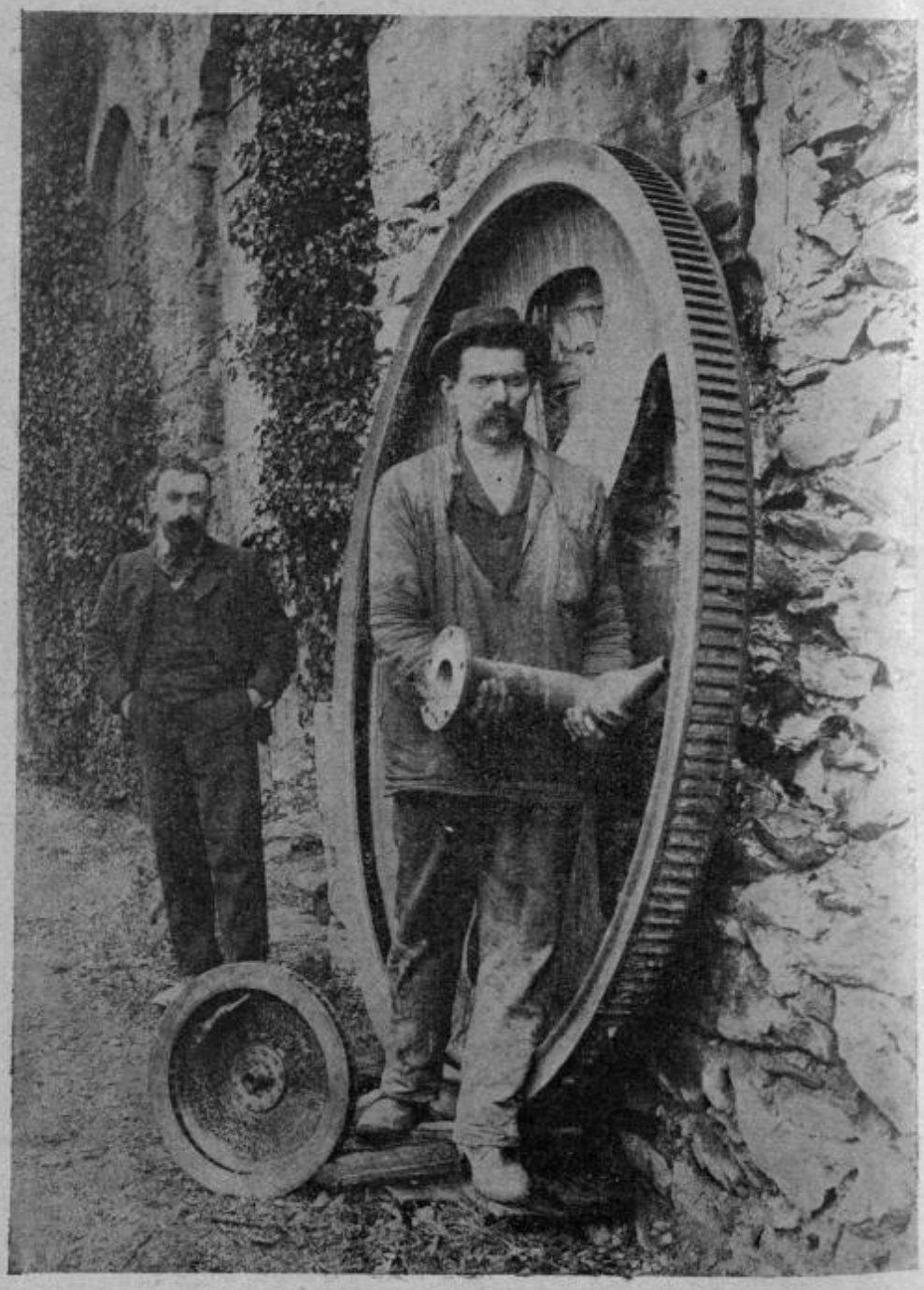


Fig. 341. — Les premières turbines pour hautes chutes. (Usines de Lancey).

roue mobile. Lorsque la première enveloppe la seconde, la turbine est dite *centripète*, où les molécules d'eau se meuvent dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, en s'en rapprochant, et quand cette dispo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sition se présente dans un sens inverse, la machine prend le nom de *centrifuge*, où les molécules d'eau traversent la roue mobile en se mouvant encore dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, mais en s'éloignant de cet axe.

Au point de vue du mode d'action de l'eau, on classe les récepteurs hydrauliques en *turbines à réaction* ou à pression intérieure, et *à action* ou *à libre déviation* ou *à impulsion*. On désigne aussi, sous le nom de *turbines limites* ou à réaction nulle ou à veine moulée, les moteurs hydrau-

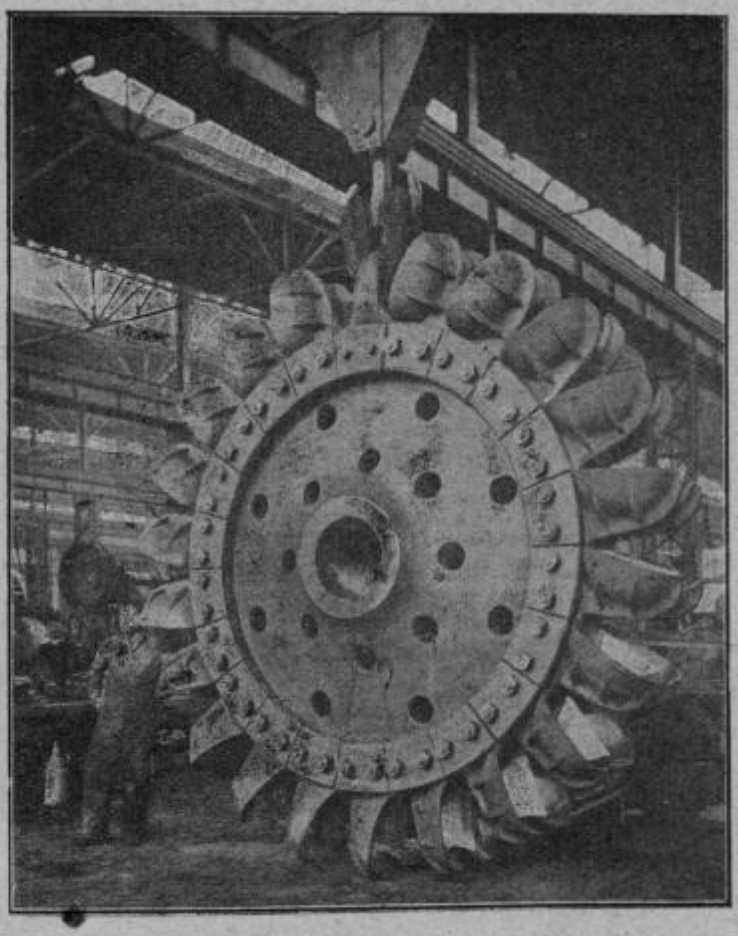


Fig. 342. — La plus grande roue du monde. (Usine hydroélectrique de Bombay.)

liques où la lame liquide qui traverse la roue n'est soumise à aucune pression. Les turbines à réaction sont celles qui travaillent en charge, et les turbines à action celles où l'eau agit sans pression.

Les machines radiales à réaction comprennent les turbines centrifuges, celles centripètes, ou *Francis*, et les *turbines mixtes*, dites *américaines*, qui participent des centripètes et des axiales et qui peuvent être disposées pour fonctionner par aspiration. Les roues utilisées pour les hautes chutes, du genre Pelton, sont des roues vives à réaction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut, comme l'ont fait quelques auteurs, ne faire entrer que deux catégories dans la classification des turbines ; alors elles sont *totales* ou *partielles*. Par totales il faut entendre les turbines à réaction, dites aussi à *surpression* ou à *veine forcée*, et par partielles, les turbines à pression, à libre déviation ou à *veine libre*. Dans les turbines totales, le distributeur peut être en dessus ou en dessous de la roue mobile. L'injection a lieu sur tout le pourtour de la couronne mobile ; les canaux du distributeur et de la roue sont complètement et simultanément parcourus par l'eau. Ces turbines peuvent fonctionner *noyées* sans trop affecter leur rendement. Dans les turbines partielles, le distributeur ne recouvre généralement qu'une portion de la surface d'entrée de la couronne tournante. Enfin, pour ces dernières, la pression a partout la même valeur (égale à la pression atmosphérique), tandis que, pour les premières, elle est variable avec la section des aubes. Ces turbines, dont les canaux contiennent toujours de l'air, doivent être disposées hors de l'eau. Donc la différence essentielle entre les turbines totales et les turbines partielles se traduirait par les variations de pression dans la roue mobile.

Ruttënger a proposé de classer les récepteurs hydrauliques en turbines à *action pure*, pour lesquelles l'eau passe sans variation de pression dans le canal de la roue mobile, sa vitesse seule variant ; en turbines à *réaction pure*, pour lesquelles l'eau passe à travers le canal avec une pression variable, et enfin en *turbines mixtes*, où la pression et la vitesse varient simultanément. Le premier cas correspondrait aux turbines partielles et le troisième aux turbines totales ; quant au deuxième cas de la classification Ruttënger, on ne rencontre que très rarement son application dans la pratique.

Enfin on appelle *turbines jumelles* celles qui sont composées de deux roues calées sur un même arbre horizontal, disposées symétriquement et renfermées dans une même chambre d'eau.

Par rapport à leur mode de fonctionnement dans l'espace, les turbines sont disposées soit verticalement, soit horizontalement.

121. Turbines à axe vertical et turbines à axe horizontal. — a) *Turbines à axe horizontal.* — Avec ce genre de turbines, la composante horizontale de la pression de l'eau s'exerce suivant l'axe seulement. Dans le cas de turbines jumelles, les deux pressions qui en résultent se font exactement équilibre et les paliers n'ont à supporter que le poids des pièces en mouvement. Les turbines à axe horizontal peuvent être placées dans le local même où se trouvent les machines électriques qu'elles sont destinées à actionner. Elles présentent une grande facilité pour le montage, le démontage, les réparations et, de plus, se prêtent mieux à l'ac-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couplement direct ; enfin l'installation est moins coûteuse que pour celles à axe vertical.

Par contre, tout le poids des parties tournantes et la composante de la pression de l'eau sont transmis aux supports, inconvénient que l'on peut cependant atténuer en employant des paliers de longueur convenable et un bon système de graissage.

Les projections d'eau de la turbine sur la machine électrique et l'inondation de l'usine par suite de la rupture du tuyau d'alimentation ou de la chambre d'eau étant à craindre, il convient, dans ce dernier cas, de prendre des dispositions pour éviter les coups de bélier et de placer les tuyaux d'arrivée sous le plancher de la salle.

La position horizontale ne convient pas pour des chutes de faible hauteur, et l'actionnement direct est d'ordre impossible en raison de la faible vitesse de la roue mobile.

b) *Turbines à axe vertical.* — Avec ce genre de turbine, il faut ajouter à la pression de l'eau suivant l'axe le poids des parties mobiles de la turbine et, dans certains cas d'accouplement direct, le poids de la partie tournante de la machine électrique. On peut, il est vrai, pallier en partie aux effets de ces actions sur les pivots au moyen de la pression même de l'eau ou à l'aide, soit d'un liquide spécial (l'huile par exemple), soit d'un appareil équilibreur électromagnétique ; mais ces artifices ne vont pas sans un détriment de la simplicité de l'installation.

Les turbines à axe vertical étant noyées ou placées au niveau de l'eau d'aval ont de ce fait leurs organes mobiles logés dans un espace restreint, ce qui entraîne à des sujétions de montage, de démontage et à une surveillance moins facile qu'avec les turbines à axe horizontal.

II. — TURBINES CENTRIFUGES

TURBINES RADIALES

TURBINES A IMPULSION. — TURBINES A RÉACTION

122. Fonctionnement des turbines centrifuges. — Les turbines radiales fonctionnent à impulsion, ou à libre déviation, ou à action, ou à réaction. Le caractère propre à la première classe de ces moteurs est défini au (§132) traitant des turbines parallèles ; d'une façon générale, ce sont des moteurs travaillant sans pression, et il n'y a ni refoulement,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ni aspiration de l'eau à travers le jeu existant entre les deux couronnes fixe et mobile.

Les turbines à réaction travaillent au contraire en charge. La pression de l'eau, lors de son admission dans la roue, est différente de celle qui règne dans le voisinage extérieur de ce récepteur ; cette pression, d'ail-

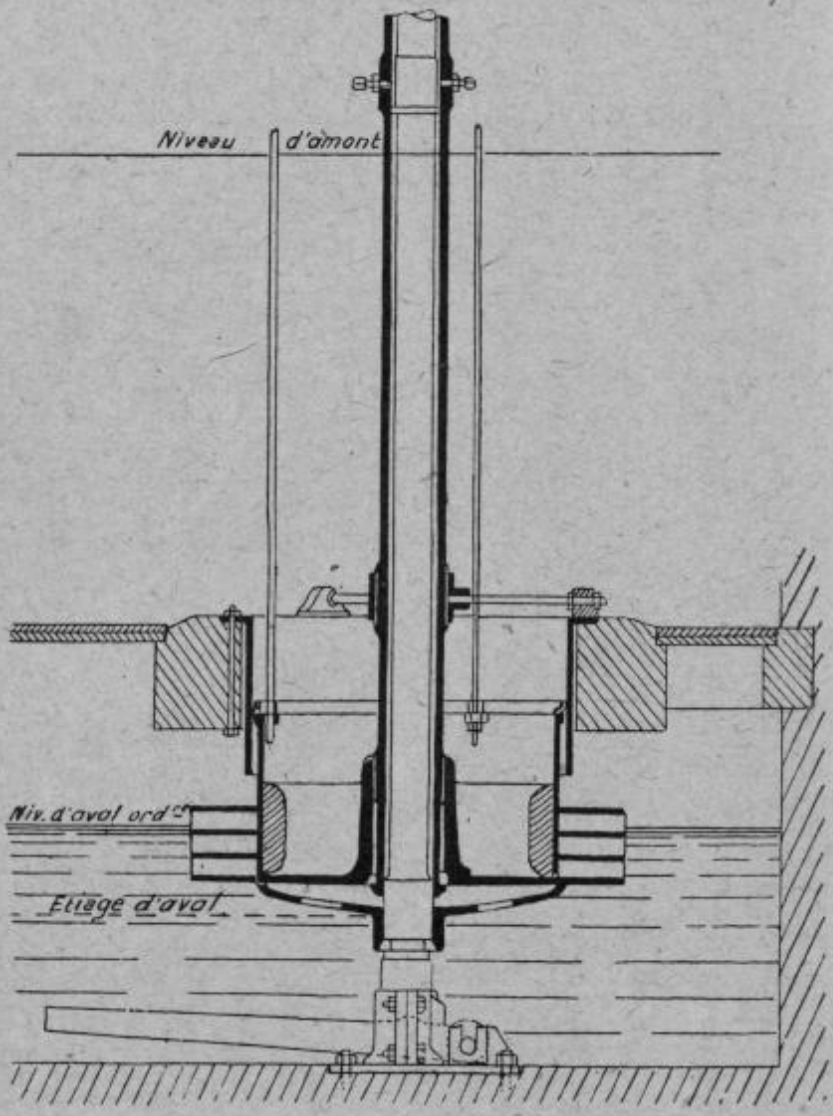


Fig. 343. — Turbine Fourneyron, à chambre d'eau ouverte.

leurs, peut être supérieure ou inférieure à la pression extérieure. Les conditions de la marche en réaction sont définies au cours de l'étude théorique qui suit.

Dans les turbines centrifuges, les deux couronnes qui constituent l'appareil moteur sont concentriques, la couronne mobile disposée à l'extérieur. L'eau amenée dans les aubes directrices s'écoule dans les aubes mobiles, du centre à la périphérie ; les filets liquides se meuvent dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation en s'éloignant de cet

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

axe. La force centrifuge favorise la sortie de l'eau du récepteur et le débit augmente avec la vitesse de rotation. L'uniformité de la vitesse dans ces moteurs laisse à désirer, aussi doit-on les munir de régulateurs très sensibles, qui agissent sur le vannage.

Le type original de ce genre de récepteur est la *turbine Fourneyron*, que l'on désigne aussi sous le nom de « turbine à admission centrale ». La couronne A (*fig.* 344) ou turbine proprement dite, qui comporte des aubes dites mobiles, à surfaces cylindriques verticales limitées par deux joues horizontales, reçoit l'eau qui a traversé la cuve en fonte C et le cylindre B, qui constitue la vanne circulaire. Les aubes directrices, à surfaces cylindriques verticales venues de fonte sur le plateau G, sont disposées en sens inverse des aubes de la roue mobile calée sur l'arbre vertical M, lequel passe dans un tube creux et tourne dans une crapaudine fixée dans le fond du bief d'aval. La turbine est à chambre ouverte.

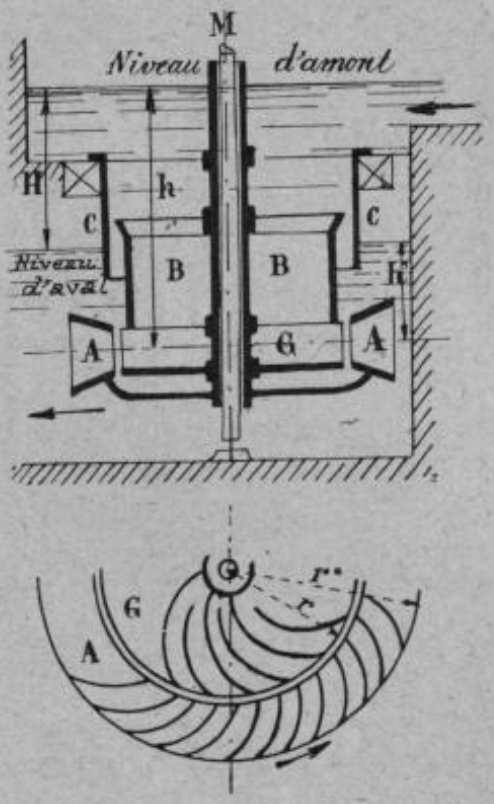


FIG. 344.

L'eau vient frapper les aubes dans la partie concave, condition très favorable pour un bon rendement.

L'admission est totale quel que soit le degré d'ouverture du vannage, mais, comme pour une ouverture incomplète le changement de section brusque à l'entrée de la couronne mobile déterminerait une perte d'énergie importante, on interpose entre les deux joues de la couronne mobile une ou plusieurs cloisons horizontales qui créent des couronnes superposées indépendantes, et réduisent ainsi l'influence du changement de section.

123. Équation des turbines centrifuges. — Appelons V la vitesse absolue de l'eau à la sortie de l'aube fixe en *a* (*fig.* 345), et *v* la vitesse à la circonférence interne de la roue.

Si on construit le parallélogramme des vitesses, *w* représente la vitesse relative avec laquelle l'eau entre dans la roue mobile ; elle sert à tracer la direction du premier élément de l'aube mobile, qui est tangente en ce point à la vitesse *w*, pour que l'eau puisse entrer sans choc dans la couronne mobile.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'on désigne par α l'angle des vitesses v et V, c'est-à-dire l'angle que la dernière partie de la courbe directrice fait avec la circonférence interne de la couronne, on a :

$$(1) \qquad w^2 = V^2 + v^2 - 2vV \cos \alpha.$$

Soient r le rayon interne de la roue et r_0 le rayon extérieur, v' la vitesse à la circonférence externe et ω la vitesse angulaire de la roue, on a :

$$v = \omega r \quad \text{et} \quad v' = \omega r_0.$$

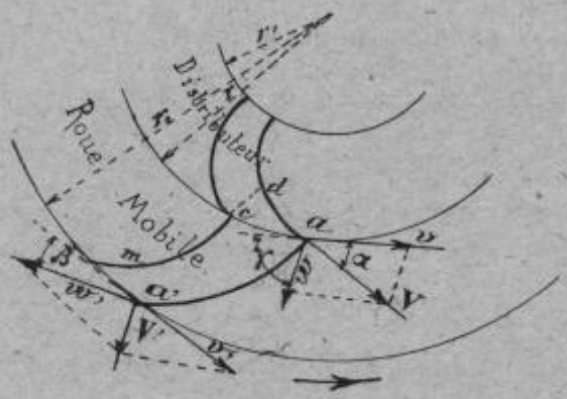


FIG. 345.

Et le travail des forces qui sollicitent le fluide a pour expression :

$$\frac{1}{2} m (v'^2 - v^2).$$

Soient, d'autre part, p la pression du liquide au niveau de la couronne supérieure, p_a la pression atmosphérique par mètre carré, θ le poids du mètre cube d'eau, l'application du théorème de Bernoulli fournit la relation :

$$(2) \qquad V^2 = 2g \left(h + \frac{p_a - p_0}{\theta} \right),$$

h étant la distance du niveau de l'eau dans le bief d'amont au plan médium horizontal de la couronne mobile.

Si h' représente la distance de ce même plan au niveau d'aval, la pression au point de sortie a' de l'eau de la roue a pour valeur : $p_a + \theta h'$, et le travail négatif de cette pression est : $- mg \left(h' + \frac{p_a}{\theta} \right)$.

L'accroissement de puissance vive du liquide considéré se réduit à :

$$\frac{1}{2} m (w'^2 - w^2).$$

Comme nous négligeons les frottements et que le travail de la pesanteur est nul, puisque l'eau se meut dans un canal horizontal, il vient :

$$(3) \qquad w^2 = w^2 + v'^2 - v^2 + 2g \left(\frac{p_0 - p_a}{\theta} - h' \right).$$

Le parallélogramme construit sur les vitesses v' et w' permet de connaître la direction et la valeur de V', vitesse absolue de l'eau à la sortie de la roue. Si nous désignons par β l'angle que fait le dernier élément de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'aube avec la circonférence externe, le triangle des vitesses nous fournit la relation :

$$V'^2 = w'^2 + v'^2 - 2v'w' \cos \beta. \tag{4}$$

En supposant la vitesse relative de sortie w' égale à la vitesse à la circonférence externe de la roue, c'est-à-dire $w' = v'$, ces nouvelles valeurs introduites dans les formules (1), (2) et (3) donnent, toutes réductions effectuées :

$$2g(h - h') = 2vV \cos \alpha,$$

d'où :

$$v = \frac{gH}{V \cos \alpha}, \tag{5}$$

H désignant $h - h'$, ou la différence de niveau des deux biefs.

Représentons par b la hauteur de la roue et par $a'm$ et cd les normales sur les aubes directrices et celles mobiles ; il faut exprimer que la quantité d'eau qui entre dans la roue dans l'unité de temps est égale à celle qui en sort ; on a par suite :

$$ac \sin \alpha V = a'n \sin \beta v'.$$

ou :

$$r^2 \sin \alpha V = r_0^2 \sin \beta v. \tag{6}$$

Des équations (5) et (6) on tire :

$$V^2 = 2gH \frac{r_0^2}{r^2} \frac{\sin \beta}{\sin 2\alpha} \quad \text{et :} \quad v^2 = 2hH \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\tang \alpha}{2 \sin \beta}. \tag{7} \tag{8}$$

Connaissant v, on aura : $\omega = \frac{v}{r}$.

La valeur de V étant ainsi obtenue, l'équation (2) fera connaître la pression p_0.

Si dans l'équation (4) on introduit l'hypothèse : $w' = v'$, on trouve :

$$V'^2 = 2v'^2 (1 - \cos \beta) = 2 \frac{r_0^2}{r^2} v^2 (1 - \cos \beta) = 2gH \tang \alpha \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta}$$

ou :

$$V'^2 = 2gH \tang \alpha \tang \frac{1}{2} \beta. \tag{9}$$

De cette valeur on déduit le rendement de la roue.

Si P est le poids de l'eau qui s'écoule dans l'unité de temps, le travail perdu par la vitesse que l'eau conserve à sa sortie est : $\frac{PV'^2}{2g}$.

Et le travail théorique transmis à la roue : $T_u = PH - \frac{PV'^2}{2g}$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme $T_m = PH$, énergie brute de la chute, le rendement est :

$$(10) \qquad R = \frac{T_u}{T_m} = 1 - \frac{V'^2}{2gH} = 1 - \operatorname{tang} \alpha \operatorname{tang} \frac{1}{2} \beta.$$

Ce rendement est d'autant plus considérable que les angles α et β sont plus petits. En les supposant tous les deux réduits à 25° par exemple, le rendement théorique serait de 0,89, et le rendement pratique égal 0,80 à 0,90 du rendement théorique.

Supposons que l'on se donne le débit Q et qu'il s'agisse de déterminer les dimensions de la turbine.

Appelons n le nombre des aubes directrices, on doit avoir :

$$n \times ac \times b \times \sin \alpha \times V = Q.$$

Mais $n \times ac = 2 \pi r$. En négligeant l'épaisseur des aubes, il vient :

$$(11) \qquad 2\pi r b \sin \alpha V = Q.$$

On se donne ordinairement l'angle γ des deux vitesses v et w, et alors :

$$(12) \qquad \frac{v}{V} \frac{\sin (\gamma - \alpha)}{\sin \gamma}.$$

Cette relation, combinée avec celle (6), donne :

$$(13) \qquad \frac{r_0^2}{r^2} = \frac{\sin \alpha \sin \gamma}{\sin \beta \sin (\gamma - \alpha)}.$$

Mais on fait :

$$(14) \qquad r = 8k \sin a \, . \, b,$$

où le coefficient k est plus grand que l'unité.

Le rapport $\frac{r_0}{r}$ étant déterminé par la relation (13), la valeur de V se trouve connue ; on pourra donc, de la condition (11), déduire le produit rb et, à l'aide de la relation (14), trouver b, puis r ; enfin, l'équation (13) fournira r_0. L'angle β se fait très petit, soit de 20 à 30°.

La condition $w' = v$ peut toujours être remplie, si la vitesse v est suffisante pour que la turbine débite toute l'eau fournie par la chute.

Les relations ci-dessus sont générales et s'appliquent aux turbines centrifuges à libre déviation et à celles à réaction.

La condition essentielle pour que la turbine fonctionne en libre déviation est que l'on ait :

$$p_0 = p_a,$$

à condition que p_a s'exerce sur la surface libre des veines liquides ; pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cela on dispose des évents dont la largeur est inférieure à l'intervalle laissé libre entre la surface de la lame liquide et la face convexe de l'aube.

Pour que la turbine puisse fonctionner noyée, il faut que : $\frac{p_0 - p_a}{\theta} = h'$, la turbine étant noyée à la profondeur h'. De plus, les sections des aubes doivent être telles que l'écoulement se fasse sans vide ni pression à l'intérieur des canaux.

Si on réalise la condition $w = v$, on a affaire exclusivement à une turbine *à libre déviation*, quand la couronne mobile est dénoyée, et à une *turbine limite sans réaction*, si le récepteur est noyé.

Si l'angle des deux vitesses v et V au point a était égal à 60°, le triangle serait équilatéral, et on aurait :

$$\frac{V^2}{2g} = h - h' = H$$

et :

$$V = \sqrt{2gH},$$

c'est-à-dire que la vitesse de l'eau à la sortie du distributeur aurait une valeur égale à celle correspondant à la chute H.

Ce moteur convient parfaitement aux chutes élevées, où il reste le moteur par excellence.

Dans le *fonctionnement à réaction*, on a aussi $w = v$, et le triangle des vitesses en a étant isocèle, on obtient :

$$V^2 = 2gH$$

ou :

$$V = \sqrt{2gH}.$$

Si v est plus grand que w, comme cela a lieu dans les turbines à réaction, V est plus petit que dans le cas des turbines sans réaction, et par suite : $V < \sqrt{2gH}$. Le *degré de réaction* est symbolisé par le rapport : $\frac{\sqrt{2gH}}{V} = K$, de la vitesse effective de l'eau à la sortie des aubes directrices à la vitesse théorique applicable au fonctionnement de la turbine sans réaction. Le coefficient K est assez souvent voisin de 2 et moindre que 3 ; il est fonction de l'angle α.

Les turbines centrifuges à axe horizontal sont toujours à injection partielle et le segment de couronne directrice (*fig.* 346) égal à $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{8}$ de la circonférence. Si la chute est moyenne ou basse, le tuyau coudé ou injecteur C est boulonné sur la paroi verticale d'une chambre d'eau qui fait suite au bief d'amont. Lorsque la turbine utilise une haute chute, l'eau

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est amenée à l'injecteur par un tuyau dans lequel la vitesse moyenne ne dépasse pas un mètre par seconde. La dépense d'eau est réglée par une vanne circulaire qui sort de l'injecteur par une boîte à étoupes.

Pour les basses et moyennes chutes, dont le niveau d'aval est presque toujours variable, à l'effet de réduire le plus possible la perte de chute à l'étiage, il convient de plonger la couronne mobile, au-dessous du niveau d'aval des plus hautes eaux, d'une hauteur égale à la flèche de l'arc sur lequel cette couronne est alimentée. Pour les hautes chutes, il faut avoir

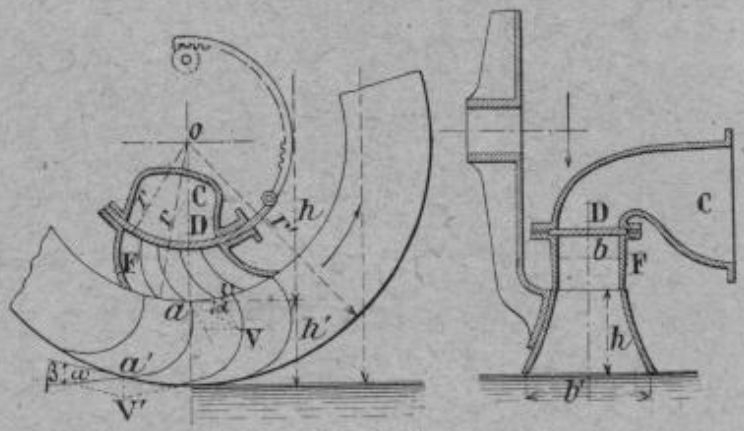


FIG. 346.

égard à ce que la couronne mobile ne plonge généralement pas dans l'eau d'aval.

Les dimensions principales d'une turbine centrifuge à axe horizontal, alimentée sous une fraction $\frac{1}{m}$ de la circonférence, se calculent comme celles d'une turbine à axe vertical à alimentation totale qui devrait dépenser par seconde et sous la même chute un volume mQ.

On accouple parfois deux turbines centrifuges et les turbines doubles sont employées pour utiliser des chutes variant de hauteur. On trace alors les aubes de chaque couronne pour qu'elles puissent faire le même nombre de tours.

Le vannage de Fourneyron lorsqu'il n'est pas entièrement levé produit un étranglement des veines liquides qui abaisse le rendement dans une proportion importante ; on remédie à cet inconvénient en partageant la couronne mobile dans sa hauteur en plusieurs compartiments (turbine Neyret-Brenier) ou en divisant la couronne directrice en plusieurs cadrans. Dans ce dernier cas, on peut régler le débit par une vanne circulaire qui se meut dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

124. Types de turbines centrifuges. — La (*fig.* 347) représente une turbine centrifuge Victor de 1.000 HP à axe horizontal avec injec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

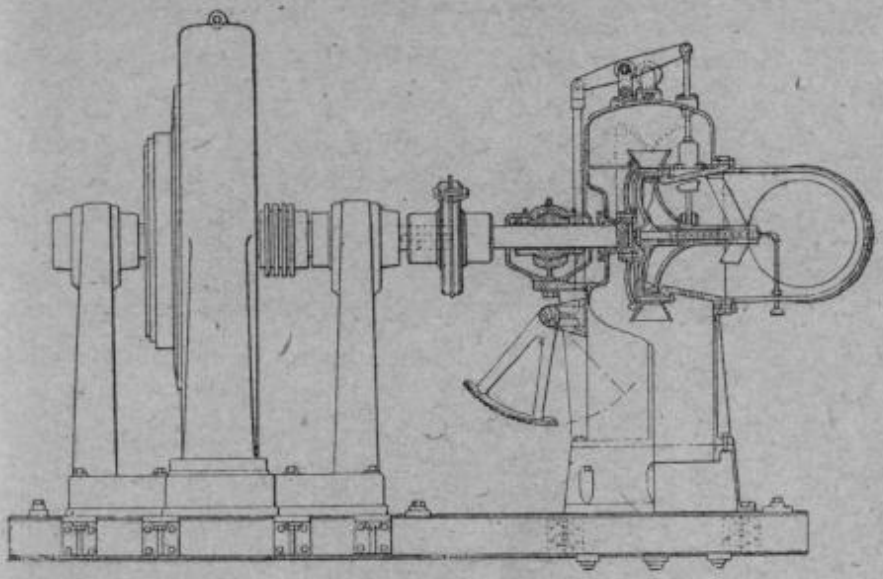


FIG. 347. — Turbine centrifuge Victor de 1.000 HP à axe horizontal, à injection partielle.

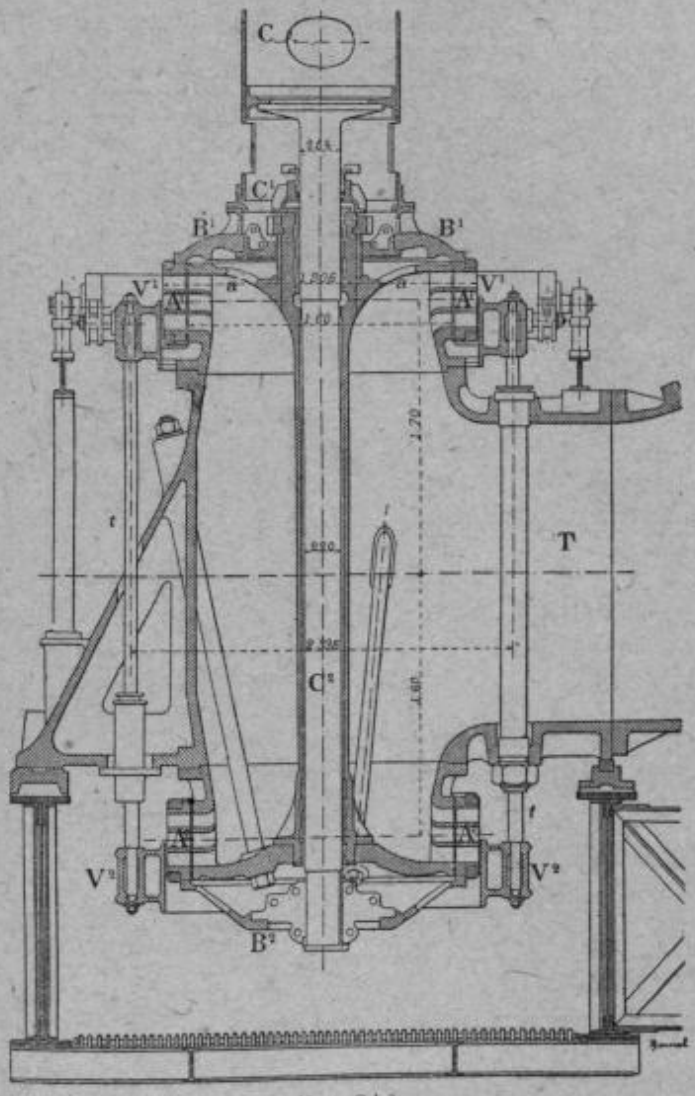


FIG. 348.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion partielle, et la (*fig.* 348) montre une des turbines de 5.000 HP, tournant à 250 tours, de l'installation de la Compagnie de la Niagara Falls Power, sur lesquelles nous renseignons au (§ 332). Cette vitesse imposée de 250 tours par minute étant relativement considérable pour d'aussi grandes turbines, les constructeurs ont été obligés d'adopter le système dit « turbine double » dont la vitesse est $\sqrt{2}$ fois plus considérable que celle d'une turbine simple de même force. Dans ce dispositif chaque turbine se compose de deux turbines semblables, superposées, placées l'une au-dessus et l'autre au-dessous d'une bâche commune, où débouche le tuyau adducteur d'eau motrice.

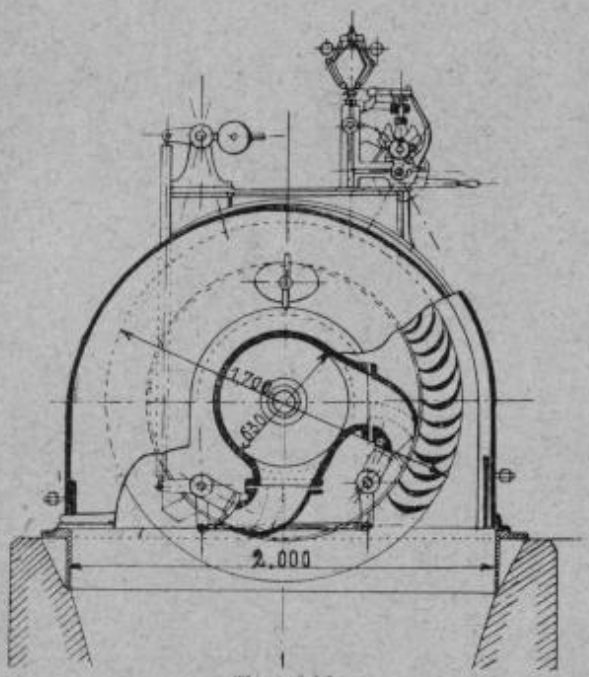


FIG. 349.

Chaque turbine est réglée par deux vannages cylindriques, parfaitement équilibrés, disposés à l'extérieur des roues mobiles et se déplaçant parallèlement à l'axe de la turbine. La description de la turbine centrifuge (*fig.* 349) à axe horizontal et admission inférieure, construite par les établissements Piccard et Pictet, est rapportée au (§ 356), ainsi que celle de la turbine (*fig.* 350 et 351).

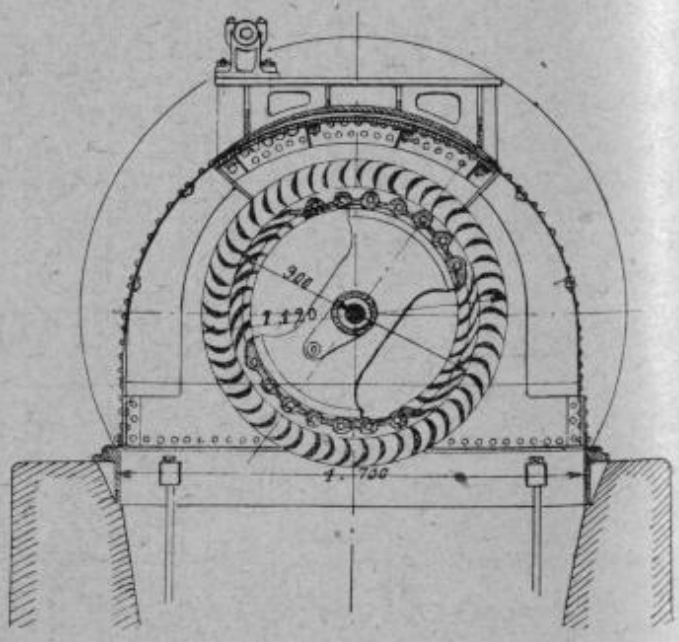


FIG. 350.

Les établissements Piccard et Pictet ont installé à l'usine hydro-électrique d'Olten-Aarburg (Suisse) une turbine à axe horizontal centrifuge à libre déviation et à introduction partielle, fonctionnant sous une chute de 310 mètres, tournant à 1.200 tours avec un débit de 280 à 350 litres et donnant une puissance de 950 à 1.200 HP. La roue de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la turbine est calée en porte-à-faux sur l'arbre de l'alternateur. La

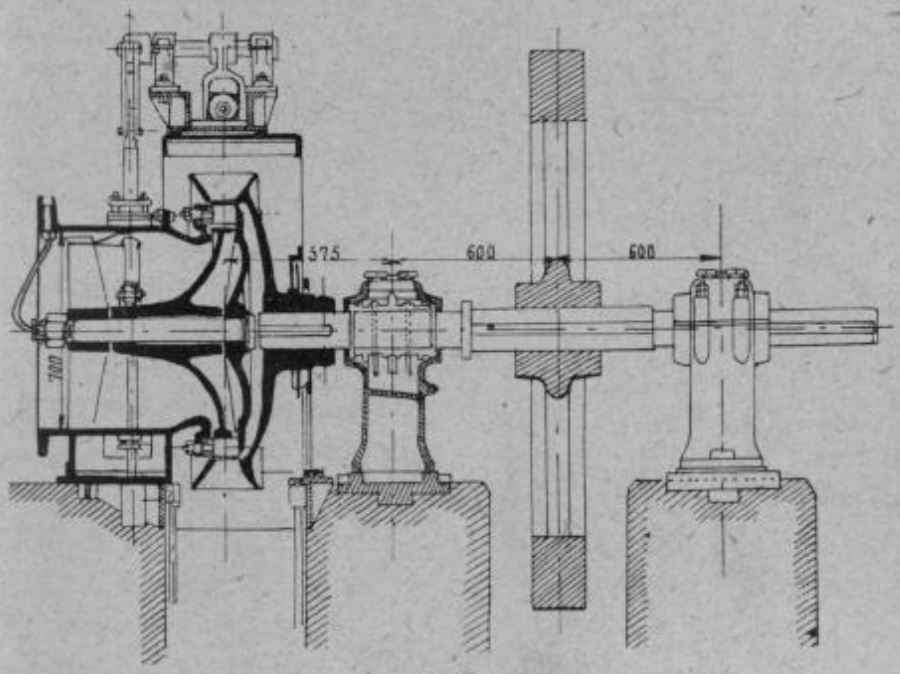


FIG. 351.

couronne étant douée d'une vitesse considérable, on a dû la renforcer contre les tensions dues à la force centrifuge en la frettant de deux bandages en acier laminé, posés à chaud. Cette couronne est une pièce indépendante rapportée contre un disque.

Les distributeurs, au nombre de quatre, sont disposés sur les quatre prolongements d'une tuyauterie en acier coulé de 400 millimètres de diamètre intérieur, qui pénètre à l'extérieur de la roue. Chaque distibuteur est muni d'un seul orifice à section variable. Les vannages chargés de régler la section de ces orifices sont entièrement situés à l'extérieur du distributeur, c'est-à-dire hors de l'eau. La poussée de l'eau sur les vannages est entièrement supportée par les tou-

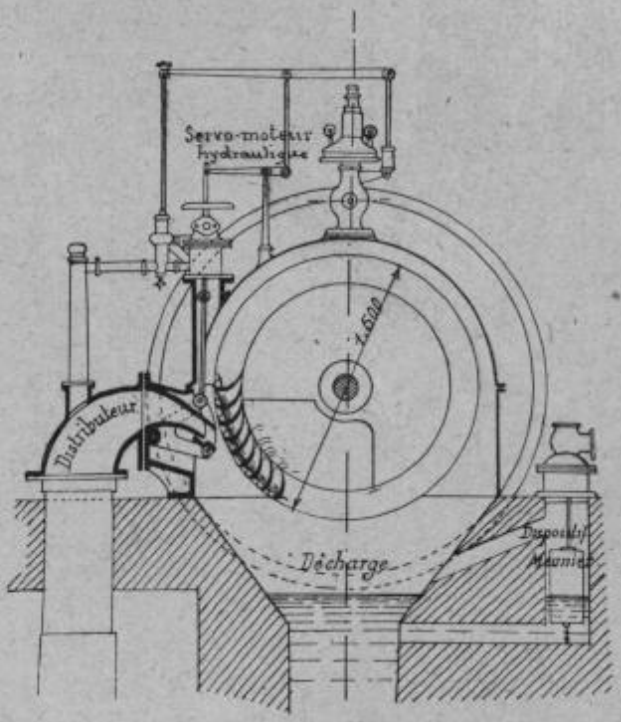


FIG. 352. — Turbine centrifuge à axe horizontal avec servo-moteur hydraulique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rillons graissés sur lesquels l'amplitude du mouvement est très réduite. Il en résulte que ces vannages offrent peu de résistance et se prêtent bien à l'action du régulateur automatique. L'extrémité des injecteurs et le pourtour des vannages sont, lorsque l'eau est limoneuse, tout particulièrement exposés à l'usure. Par suite ce sont des pièces rapportées en bronze phosphoreux, de petites dimensions et d'un remplacement aussi facile que peu coûteux. Les parois intérieures de l'orifice des injecteurs sont de courbure telle que la direction de la veine liquide qui s'en échappe reste toujours constante, quelle que soit la section de passage.

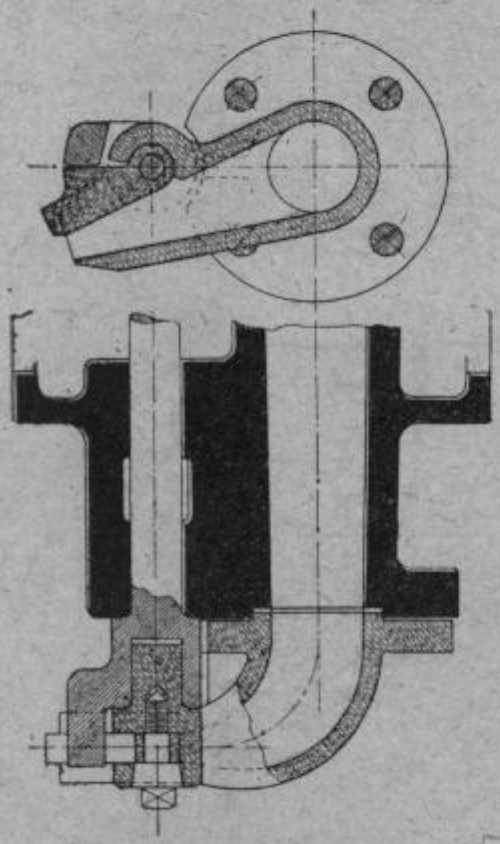


Fig. 353.

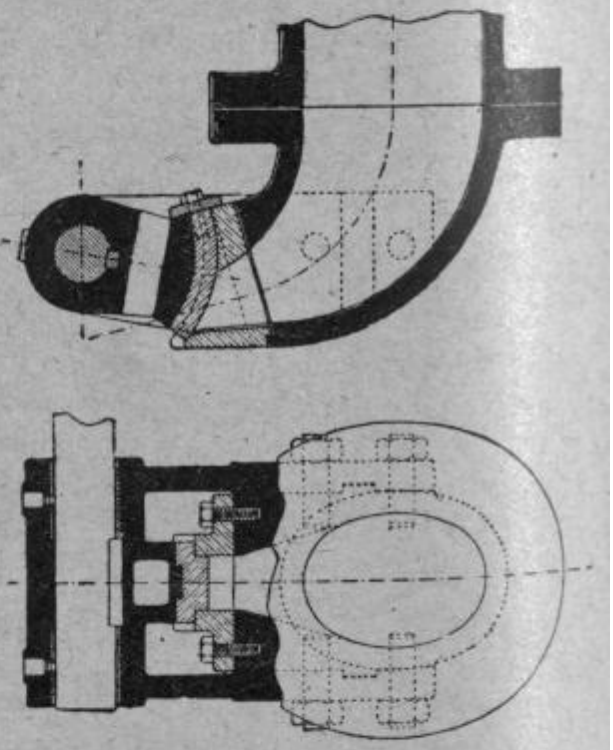


Fig. 354.

Cela a poue effet de maintenir le rendement remarquablement élevé avec les débits fractionnaires.

Cette turbine est munie du servo-moteur à déclic des mêmes constructeurs.

La turbine centrifuge à libre déviation et à admission partielle, d'un type très courant, construite par la maison Neyret-Brenier, s'établit soit avec des secteurs de distribution symétriques par rapport à l'axe avec tiroirs équilibrés, soit avec un seul secteur de distribution avec tiroir cylindrique, soit enfin avec distributeur à languette. Pour les récepteurs destinés aux très hautes chutes, où pour obtenir un nombre de tours admissible à la minute on est obligé de faire des roues de très grandes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

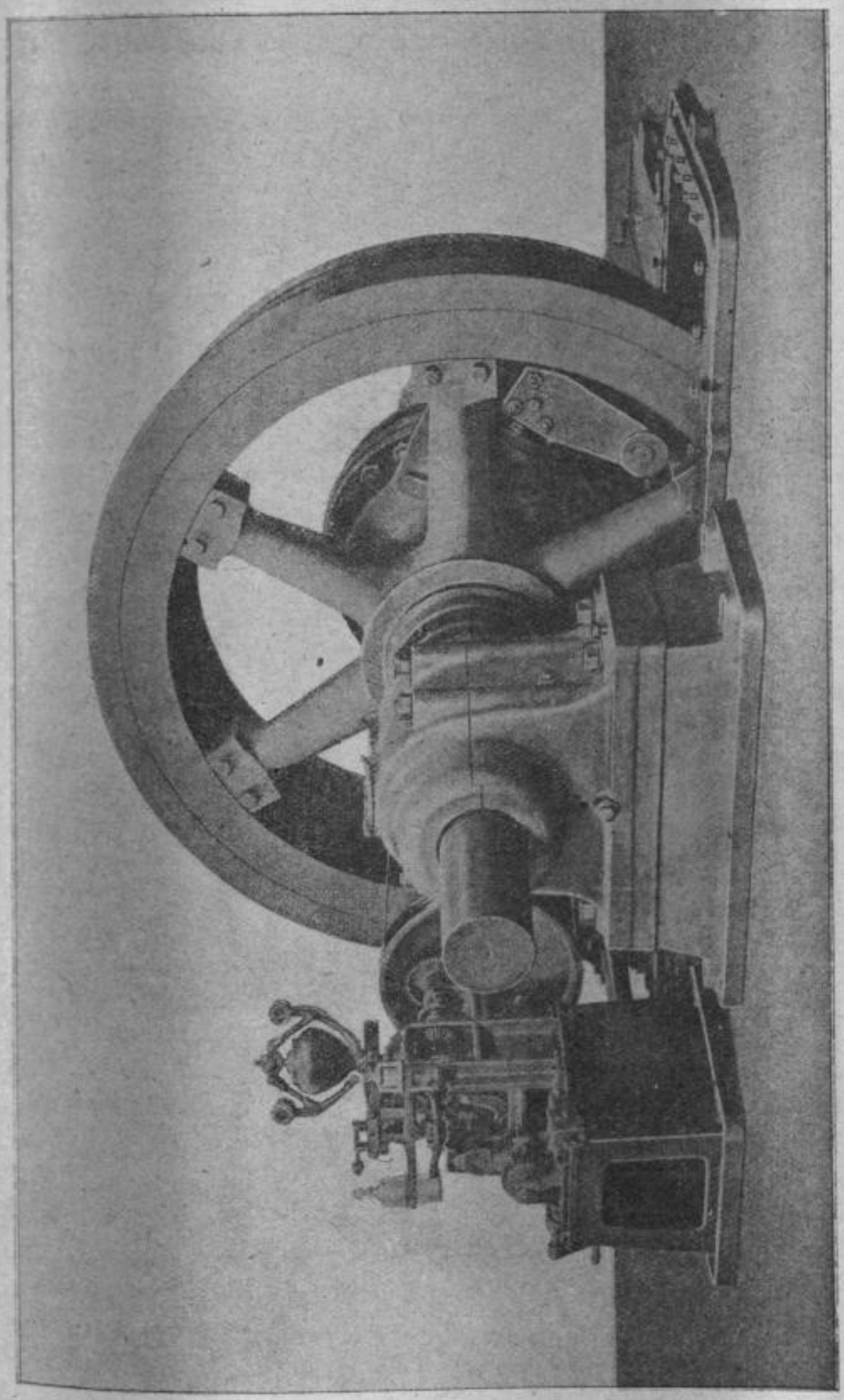


Fig. 355. — Turbine Piccard et Pictet de 1.400 HP, centrifuge, à introduction partielle. (Usine de Tusciano.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dimensions, l'appareil de distribution est presque toujours composé soit de tuyères à languettes (*fig.* 353) soit de deux tuyères à bascules (*fig.* 354)

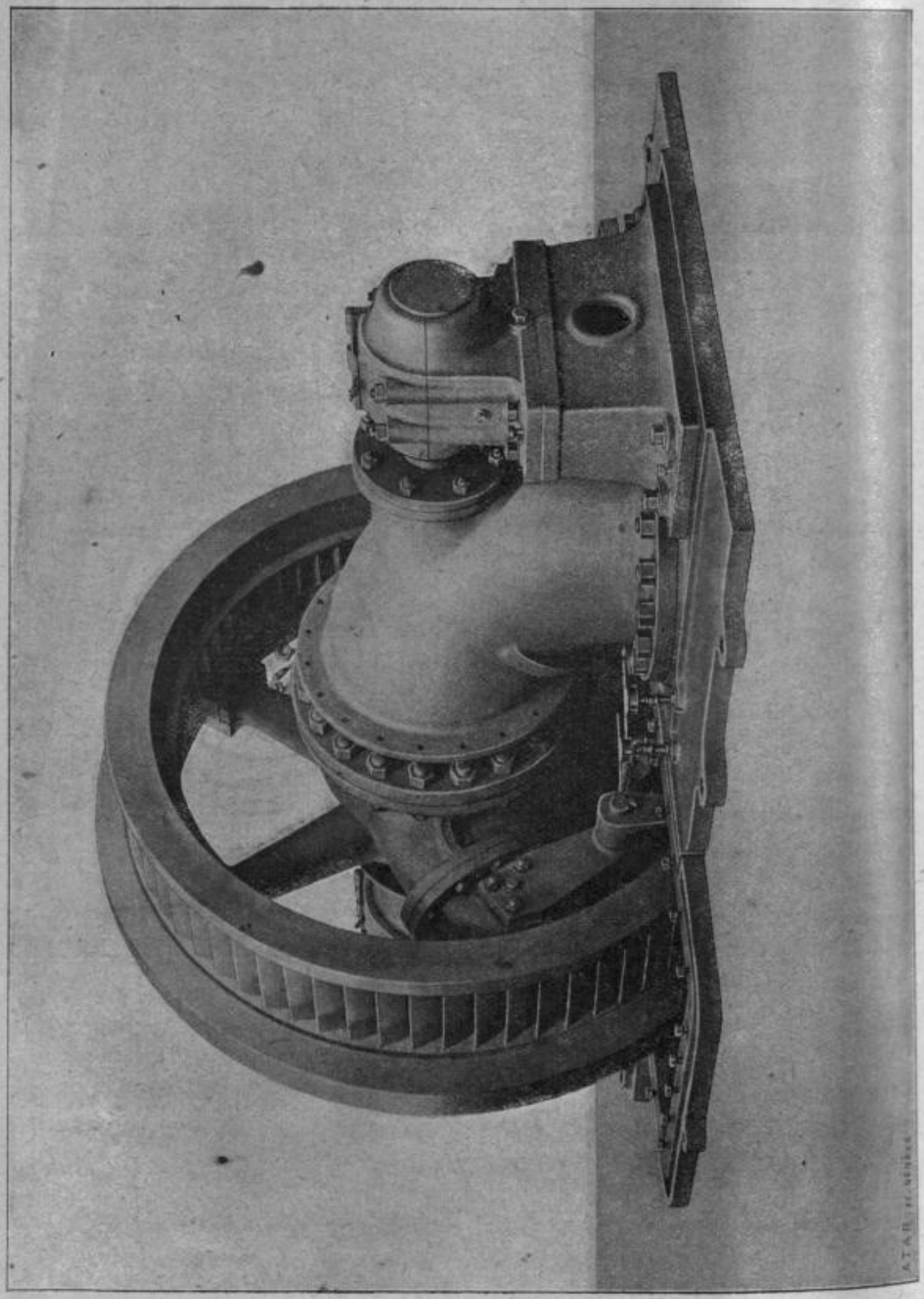


Fig. 356. — Turbine Picard et Pictet de 1.400 HP, centrifuge, introduction partielle, à deux injecteurs, pour chute de 274 mètres. Nombre de tours, 600.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et rarement c'est un secteur à tiroir ; d'ailleurs ces dispositifs se prêtent facilement à l'action rapide d'un régulateur. Les roues mobiles des turbines à libre déviation tournent au-dessus du niveau aval, c'est-à-dire

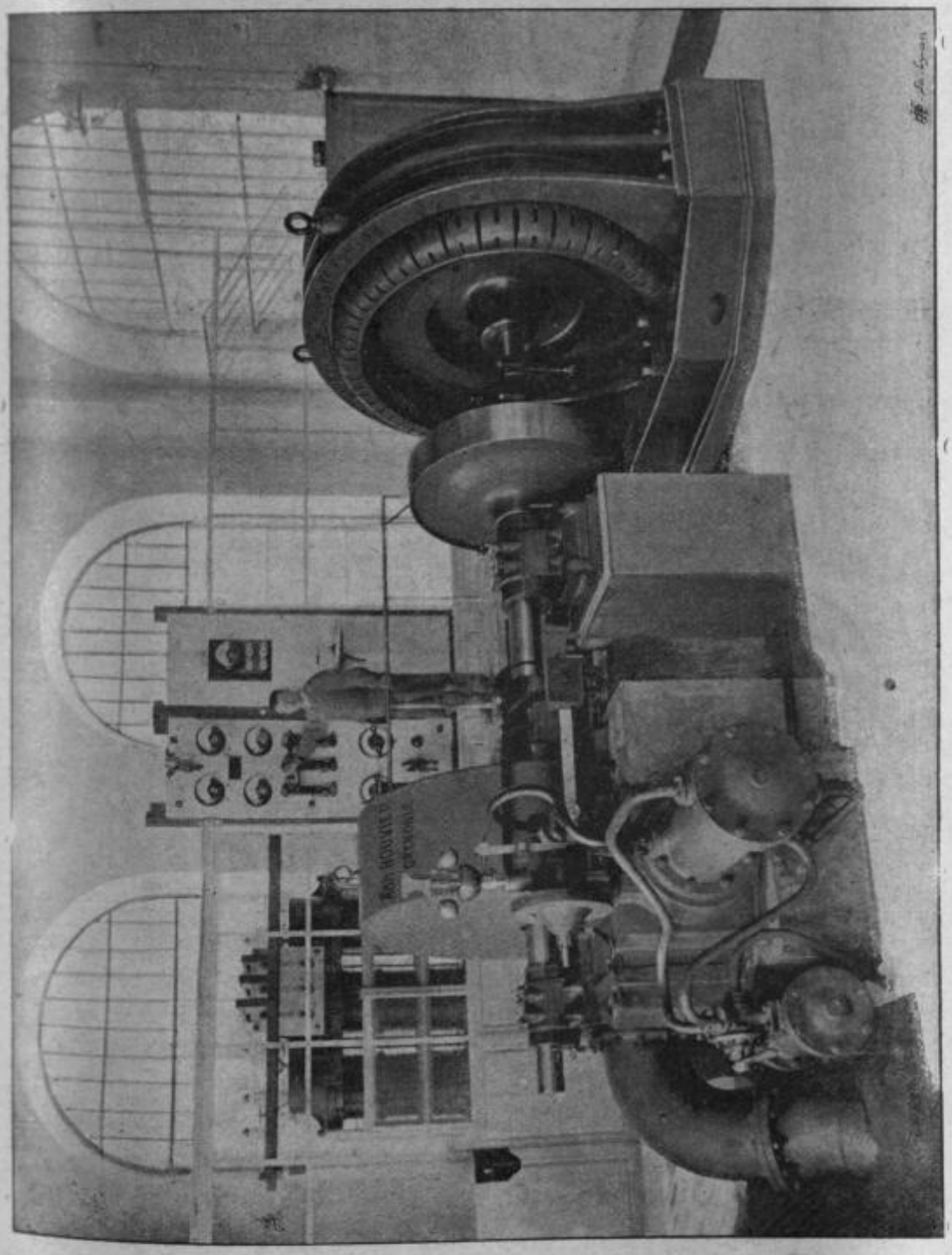


FIG. 357.— Turbine centrifuge A. et H. Bouvier, à libre déviation, avec son déclencheur automatique.

dénoyées. Elles ne peuvent, en effet, fonctionner sous l'eau, car avec l'injection partielle on aurait un choc violent chaque fois qu'un canal de la roue mobile arriverait sous le premier canal d'un distributeur, choc

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

produit par l'eau injectée frappant sur l'eau morte entraînée par la roue. On aurait de ce chef à subir une sérieuse perte de rendement.

125. Données de construction. — Pour avoir un rendement maximum il faut que $w = v'$ et que l'angle des deux vitesses soit aussi petit que le permettent les exigences du débit, soit de 20 à 30°.

En résumé, le rendement est d'autant plus grand que les angles que font entre elles les vitesses w' et v', d'une part, et les vitesses v et V, d'autre part, sont plus petits. Par suite, les turbines à petite vitesse sont celles qui ont le plus grand rendement. En outre, V′ sera d'autant plus petit et le rendement d'autant plus grand que le rapport $\frac{v'^2}{v^2}$ sera plus voisin de l'unité. Donc v' doit être autant que possible égal à v.

En pratique, on prend : $v = 1{,}50v'$ à $2v'$; n, nombre des aubes directrices, de 40 à 80 ; n', nombre des aubes mobiles = 30 à 60 ; b_1, hauteur de la roue = 0,17 à 0,2r et $r_0 = 1{,}20r$ à $1{,}50r$.

On calcule le rayon d'entrée d'après la formule empirique :

$$r = 0{,}5\sqrt{Q} \quad \text{à} \quad 0{,}6\sqrt{Q};$$

Q, débit maximum en mètres cubes.

Le nombre de tours est : $N = \frac{60 \times v}{2\pi r}$.

Le rendement industriel varie de 0,70 à 0,75 pour les turbines à petite vitesse et de 0,58 à 0,62 pour celles à grande vitesse.

La turbine centrifuge voit son débit augmenter un peu quand elle tourne à sa plus grande vitesse. Le débit de la turbine calée est à peu près égal au débit normal.

Si la vitesse de la roue ne s'écarte pas trop de sa valeur normale, le rendement ne subit pas une réduction très marquée. La vitesse de la turbine centrifuge tournant à vide dépasse un peu le double de la vitesse normale. Les résistances par le distributeur sont, avec les turbines à réaction, moitié plus faibles que dans le cas des turbines d'action.

Pour les grandes vitesses, on recourt aux turbines à impulsion ; mais, si l'alimentation de la roue est restreinte à une fraction de la circonférence, l'avantage est en faveur de la libre déviation.

On place quelquefois autour des turbines centrifuges une sorte de couronne fixe munie ou non d'aubes, dans le but de réduire la pression sous les aubes et d'accroître l'effet de la charge. Cet appareil est appelé *effuseur*. L'eau, à la sortie de la roue mobile, entre dans les canaux de cet appareil et est conduite par eux vers l'extérieur. Il prend le nom de *diffuseur* quand on veut enlever au fluide sortant de la roue mobile une partie de la vitesse qu'il possède encore pour reporter la portion corres-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pondante d'énergie sur la roue mobile ; ou inversement on peut vouloir augmenter cette vitesse, alors l'appareil prend le nom de *confuseur*. Il a été imaginé par les Américains Francis et Boyden.

Le jeu entre le distributeur et la roue dans les turbines radiales doit être réduit autant que possible. La surpression qui s'y produit, ou différence de la hauteur piézométrique entre la hauteur piézométrique dans le jeu et celle à la sortie de la roue mobile, est positive quand une partie de l'eau va du niveau amont directement dans le niveau aval sans passer par la roue. Lorsque l'eau remonte du bief aval par le jeu pour couler ensuite dans le récepteur avec l'eau sous pression, il y a aspiration d'eau et d'air ou surpression négative. L'effet de l'aspiration étant plus nuisible que la première cause, on doit calculer la turbine pour que la surpression soit positive.

126. Hydropneumatisation. — Nous avons dit que, dans la turbine centrifuge, le rendement diminue d'une manière notable quand la vanne n'est levée qu'en partie. La disposition hydropneumatique imaginée par Girard a pour effet de supprimer le changement brusque de section, et alors, quelle que soit la levée de la vanne, le rendement reste le même. De plus, le vannage partiel appliqué à la turbine centrifuge Fourneyron exige que la couronne mobile tourne non noyée ; de là perte de chute.

Le dispositif Girard consiste en une cloche, adaptée à la cuve de la turbine, qui enveloppe la couronne mobile et qui dépasse un peu le plan inférieur de la couronne. Sous cette cloche on refoule de l'air comprimé de façon à ce que la turbine fonctionne comme si elle était noyée. Si h' est la distance comprise entre le bas de la vanne et le niveau du bief d'aval, qui mesure l'excès de la pression de l'air contenu dans la cloche sur la pression atmosphérique, on aura toujours :

$$p_0 = p_a + 0h'.$$

Le *dispositif Meunier*, imaginé en 1882, a pour but de permettre aux turbines de fonctionner toujours à l'échappement libre, c'est-à-dire dans l'air. A cet effet le niveau d'aval est réglé par un flotteur dont la tige porte une soupape à deux sièges ; lorsque ce niveau s'élève, le flotteur monte, et l'excès de pression fait ouvrir une soupape en communication avec un réservoir d'air comprimé.

III. — TURBINES CENTRIPÈTES. — TURBINES FRANCIS

127. Fonctionnement des turbines centripètes. — Les turbines centripètes fonctionnent toujours par réaction. L'eau agit de l'extérieur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'intérieur en se rapprochant de l'axe, les filets se mouvant dans un plan normal à l'axe. La force centripète a une double action : elle diminue la pression effective à l'entrée des aubes et elle repousse l'eau en empêchant son entrée dans le récepteur.

Le débit varie en sens inverse de la vitesse, assurant ainsi l'uniformité de la rotation. Les turbines centripètes sont maintenant les plus répandues par suite de leur rendement élevé et de la facilité avec laquelle elles satisfont toutes les exigences de la pratique.

La disposition avec axe horizontal représentée schématiquement par les (*fig.* 358 et 359) est très usitée en Amérique. La couronne mobile se trouve à l'intérieur de la couronne fixe et est séparée de l'eau d'amont par une enveloppe qui la force à passer par les aubes directrices pour se rendre dans le bief d'aval.

Lorsque le courant est remonté vers la tubulure après un circuit com-

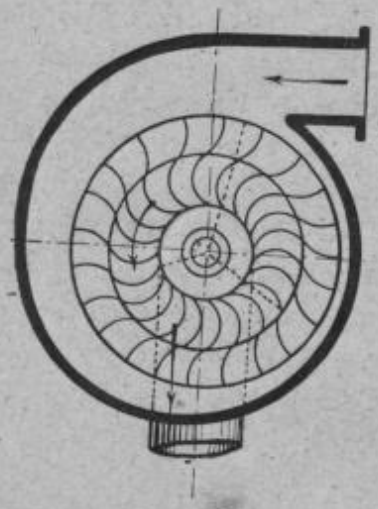


FIG. 358.

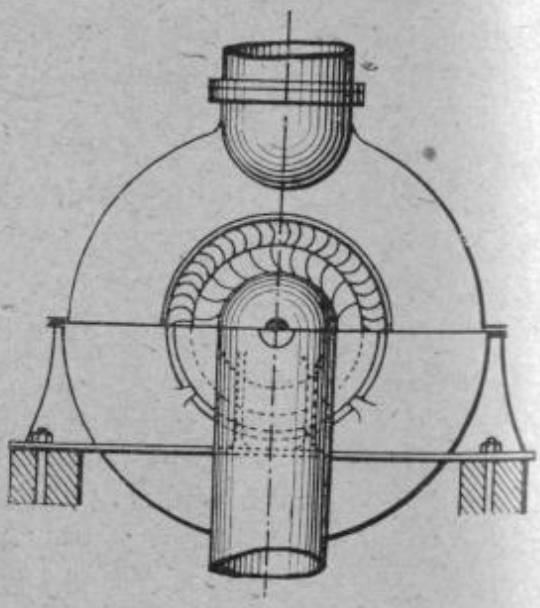


FIG. 359.

plet, la lame d'eau peut être réduite simplement à la quantité nécessaire pour alimenter la dernière aube. L'angle que fait le premier élément de l'aube avec la circonférence extérieure est établi de telle sorte que tous les filets liquides conservent la vitesse qu'ils possèdent dans le tuyau d'arrivée, boulonné sur la tubulure de l'enveloppe. Enfin l'eau, après avoir traversé les aubes mobiles, vient jaillir radialement vers le centre pour s'échapper par un tuyau *ad hoc*.

Le tracé de l'enveloppe peut être fait, de façon que la section de passage de l'eau aille en décroissant à partir de son origine, en raison inverse du volume qu'elle doit fournir à la couronne directrice, c'est-à-dire que la vitesse de l'eau soit constante pour toutes sections de l'enveloppe, ou de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

telle façon que tous les filets coupent, sous le même angle, la circonférence extérieure de la couronne. Dans le premier cas, la forme de l'enveloppe est indépendante de sa largeur, et, pour le second cas, cette forme est donnée par la développante d'un cercle concentrique à la turbine.

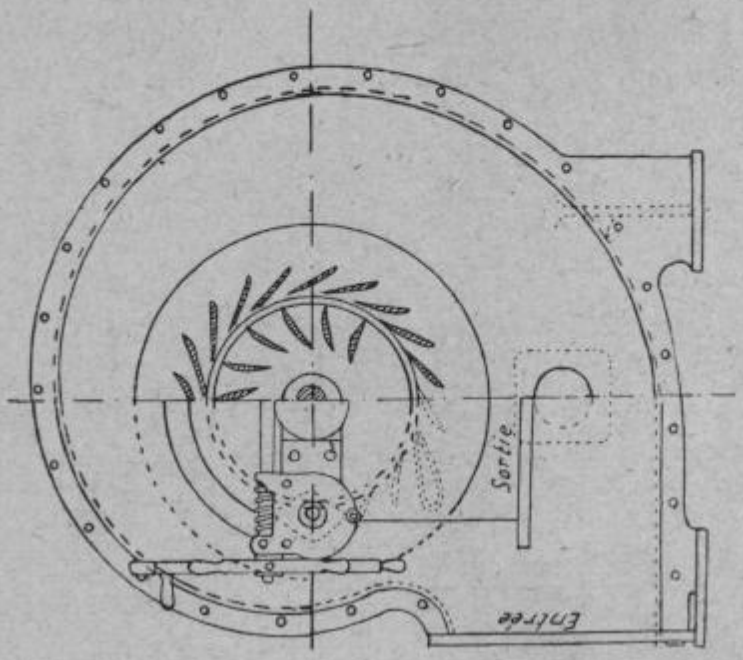


FIG. 360. — Turbine centripète, type Francis.

Dans les turbines de grande largeur, on dispose un plateau qui porte des aubes sur les deux faces, qui se partagent l'eau, et, à la sortie de la turbine, l'eau se répartit dans deux tuyaux placés symétriquement sur

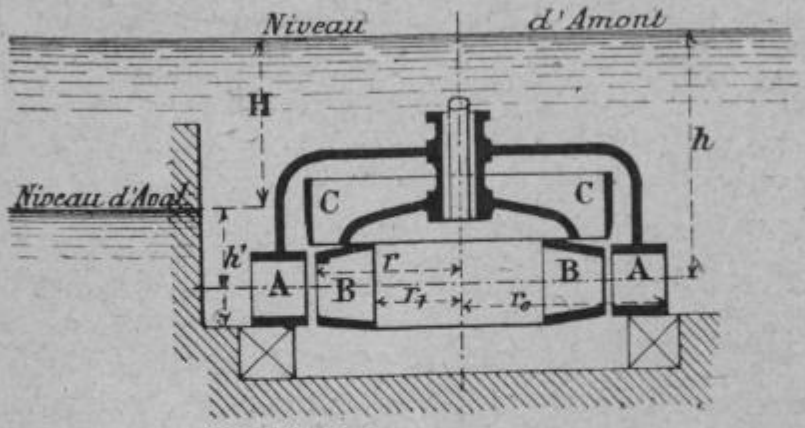


FIG. 361.

chacune des faces de l'enveloppe. Nous reviendrons plus loin sur les dispositions spéciales de ce genre de moteur hydraulique.

Les turbines centripètes offrent l'avantage de pouvoir être fractionnées sans diminution du rendement, fractionnement qui est nécessaire quand

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on veut régulariser la puissance sans abaisser l'effet utile. En diminuant la section des tubes d'arrivée au moyen d'une valve, on rend la pression plus petite, la turbine alors tourne dans des conditions différentes de celles pour lesquelles elle a été construite, et le rendement s'abaisse rapidement. Si l'on ferme quelques ouvertures du distributeur, on conserve assez bien le rendement, mais la roue est déséquilibrée, en sorte que la meilleure solution consiste à diminuer graduellement l'arrivée sur toute la circonférence.

Turbines Francis. — Les turbines centripètes du système *Francis* à axe vertical ont (*fig.* 361) leur distributeur A qui entoure entièrement la

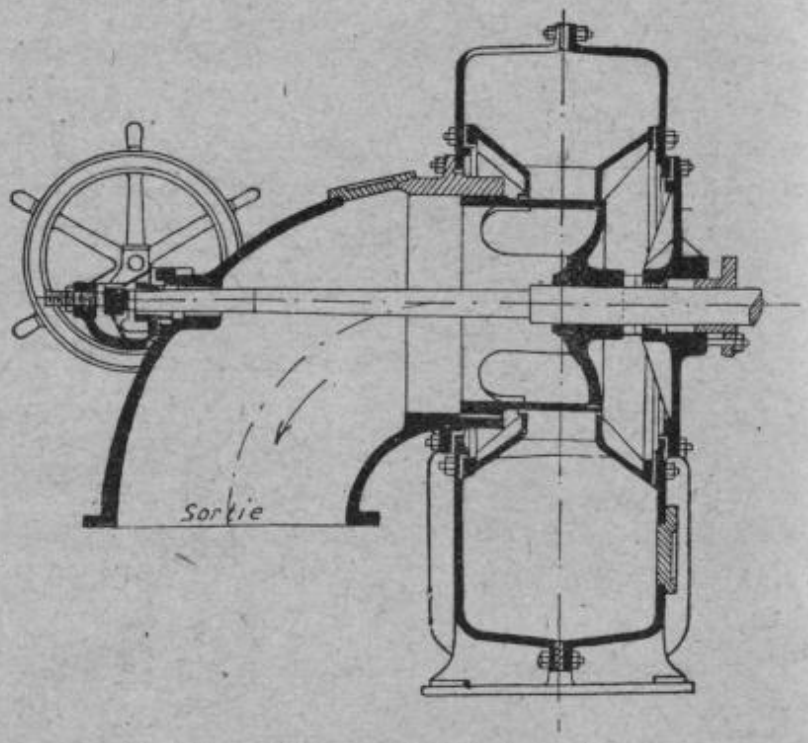


FIG. 362. — Turbine centripète, type Francis.

roue mobile B, l'eau coulant de l'extérieur vers l'intérieur. Les aubes directrices sont inclinées de l'angle α sur le cylindre d'entrée dans la couronne mobile. Les aubes mobiles sont établies entre deux joues formées par les surfaces de révolution dont la méridienne est tracée de façon à forcer les filets liquides à s'infléchir vers l'orifice de sortie et à s'écouler sans remous ; leur longueur perpendiculairement à l'aube est une fraction aussi faible que possible du rayon. Entre l'espace annulaire compris entre le distributeur et la roue, c'est-à-dire le jeu, on fait descendre ou monter un tiroir cylindrique C ou distributeur auxiliaire. Le pivot de la turbine se trouve en haut de l'arbre. La hauteur de la roue mobile à l'entrée est un peu inférieure à celle de la sortie, tandis que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans la turbine Fourneyron, la hauteur à l'entrée est égale à celle à la sortie. Pour les hautes chutes, les turbines sont complètement closes, et l'eau y est amenée par une conduite allant du bief amont à la capote de la turbine, prolongée par un tube d'aspiration (*fig.* 362). Un couvercle est placé sur la face de la turbine opposée à la sortie de l'eau. Il sert en outre au démontage de la turbine en cas de réparation. Les vannages sont analogues à ceux des turbines axiales et centrifuges. La (*fig.* 363) montre un vannage à persiennes qui peut tourner autour de l'axe de la turbine, et, pour un faible déplacement angulaire ouvrir totalement l'admission.

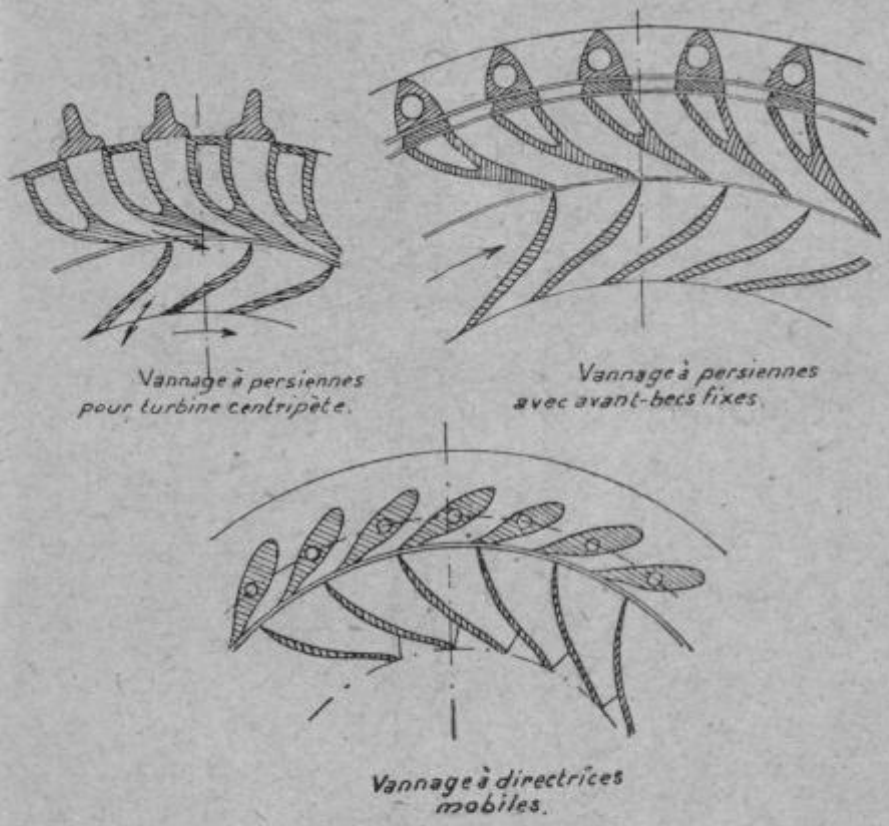


Fig. 363. — Vannages à persiennes.

Il est placé extérieurement à la roue fixe. Quand on veut éviter la poussée de l'eau sur le vannage on dispose au devant de lui une série d'avant-becs fixes.

Le vannage à directrices mobiles (*fig.* 363), a chacune des aubes directrices articulées autour d'un axe passant par son milieu, afin que l'action de l'eau s'équilibre sur chacune d'elles pour que la résistance au mouvement soit réduite au minimum.

Ces vannages sont commandés par des colliers actionnés par des bielles reliées elles-mêmes à des leviers coudés, ou par des colliers reliés aux aubes par des manivelles calées sur l'axe de chaque aube, ressorts amortisseurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avec les turbines centripètes, on a pu obvier à l'inconvénient de l'alimentation partielle en superposant des couronnes et appropriant ainsi ce moteur aux débits variables à l'instar des moteurs à libre déviation. Les turbines de Jonage et de Chèvres (§ 298 et 308) sont dans ce cas ; elles ont un coefficient de réaction voisin de 2,7 et un rendement de 75 0/0. La turbine Hercule, avec un coefficient de 2,6, donne un rendement de 87 0/0.

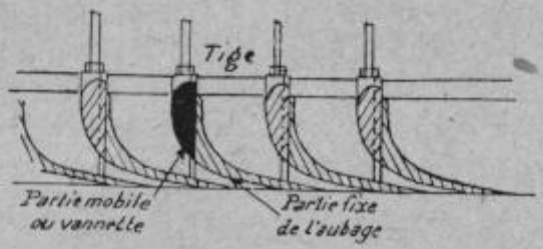


FIG. 364. — Vannettes partielles indépendantes.

Les nouvelles turbines de Bellegarde, fournies par la Société de constructions de Vevey, sont du type centripète à axe vertical ; elles développent normalement 1.200 HP sous une chute variant de 11 à 13 mètres. La couronne directrice est divisée dans le sens de la hauteur en trois couronnes superposées suivant la disposition préconisée par Jonval. Le vannage de réglage est constitué par un anneau à tiroirs. Cet anneau se déplace concentriquement à l'axe de la turbine sous l'action de bielles reliées à un levier coudé. La couronne mobile est pourvue d'un dispositif utilisant la pression de l'eau motrice.

La vitesse maximum des turbines centripètes est inférieure au double de la vitesse normale. La vitesse d'évacuation est plus grande que pour le type à libre déviation, et la vitesse linéaire, prise à la circonférence moyenne, est plus considérable dans la turbine à réaction que dans la turbine à libre déviation. Enfin, la vitesse relative de l'eau à l'entrée de la turbine à réaction est plus faible que celle correspondante dans la turbine d'action.

128. Équation des turbines centripètes. — Comme dans le cas de la turbine centrifuge, on a la relation fondamentale :

$$V^2 = 2g\left(h + \frac{p_a - p_0}{\theta}\right).$$

Le triangle des vitesses au point a fournit (*fig.* 365) :

$$w^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha.$$

Et celui au point a' donne :

$$V'^2 = w'^2 + v'^2 - 2w'v'\cos\beta.$$

Pour que l'eau entre sans choc dans la couronne mobile, il faut que le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

premier élément des aubes soit parallèle à la direction de w, formant avec la direction de v un angle γ qui fournit :

$$\frac{v}{V}\frac{\sin(\gamma + a)}{\sin\gamma}.$$

Enfin le rendement a toujours pour expression :

$$R = 1 - \frac{V'^2}{2gH}.$$

On s'arrange pour que β soit aussi petit que possible et que, d'autre part : $w' = v'$, à la condition que la vitesse v' soit assez grande pour assurer le débit total de la chute.

La relation $w' = v'$ permet d'avoir : $v = \frac{gH}{V.\cos\alpha}$, donnant la vitesse v sur le périmètre extérieur de la couronne mobile.

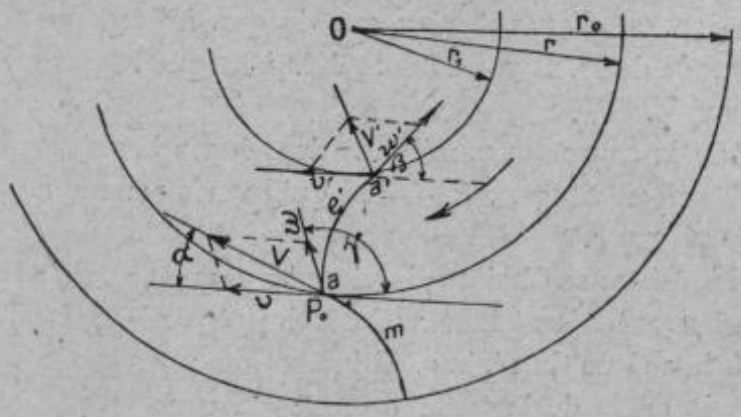


FIG. 365.

Pour que la turbine centripète fonctionne sans réaction, il faut, comme dans le cas d'une turbine centrifuge, que :

$$\frac{p_0}{\theta} = \frac{p_a}{\theta} + h' \quad \text{ou} \quad \frac{p_0 - p_a}{\theta} = h'.$$

Lorsque la turbine fonctionne non immergée, la valeur de h' devient égale à zéro et, par suite : $\frac{p_0}{\theta} = \frac{p_a}{\theta}$.

Quand la turbine marche sans réaction, on a les relations :

$$V = \sqrt{2gH} \quad \text{et} \quad w = v. \quad \text{Par suite :} \quad \frac{V}{v} = \frac{\cos\alpha}{2}.$$

Ce rapport $\frac{V}{v}$, qui dépend uniquement de l'angle α, permet de classer les turbines suivant leur vitesse d'entraînement par rapport à la vitesse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

absolue de l'eau à la sortie des aubes directrices. Les turbines à petite vitesse sont celles pour lesquelles le rapport $\frac{v}{V}$ ne dépasse pas 0,60, et les turbines à grande vitesse ont $\frac{v}{V} = 1$ ou très voisin de l'unité.

Le rendement augmente lorsque les angles α et β diminuent ; par suite, les turbines centripètes à petite vitesse présentent sur les turbines à grande vitesse un avantage notable au point de vue du rendement. On sait, de plus, qu'il y a intérêt à faire r_1 aussi peu différent que possible de r.

Quand la turbine centripète est située, par exemple, à une hauteur h'' au-dessus du niveau d'aval, la chute est réduite d'autant et devient égale à $(H - h'')$. Le rendement alors est :

$$R = \left(1 - \frac{V'^2}{2gH}\right) - \frac{h''}{H}.$$

La réduction est d'autant plus grande que h'' représente une fraction plus grande de H. Il y a donc intérêt à ce que la turbine centripète fonctionne noyée.

Le débit de la couronne mobile est donné par la même relation que pour la turbine centrifuge, c'est-à-dire qu'il varie comme w' et en raison inverse de la vitesse v.

Lorsque la résistance diminue, la vitesse v augmente, et, w' s'abaissant, le débit diminue, réduisant le travail développé par la turbine qui ramène sa vitesse à la valeur du régime. Si la charge augmente, v tend à diminuer, w' et le débit de la turbine croissent, et le travail moteur augmente dans la proportion voulue pour maintenir la vitesse. La turbine centripète, comme la turbine centrifuge, est autorégulatrice.

Dimensions de la turbine. — Appelons u la vitesse de l'eau dans la section circulaire de rayon r_1, qu'il convient de limiter entre $\frac{1}{7}$ (hautes chutes) et $\frac{1}{5}$ (basses chutes) de la vitesse due à la chute sous laquelle la turbine doit fonctionner, c'est-à-dire que :

$$u = \frac{1}{5} \text{ à } \frac{1}{7}\sqrt{2gH}.$$

Connaissant Q et H, et en se fixant u, on en déduit : $r_1 = \sqrt{\frac{Q}{\pi u}}$.

Puis on prend $r = 1{,}5r_1$ à $2r_1$ et on fait le rapport $\frac{r_0}{r} = 1{,}15$ à $1{,}25$.

Nous avons dit que la valeur de v' devait être suffisante pour que la turbine débite toute l'eau fournie par la chute.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La somme des dimensions horizontales des sections de sortie pour chacune des couronnes est :

$$\text{Couronne directrice : } 2\pi r \sin\alpha \times mk ;$$
$$\text{Couronne mobile : } 2\pi r_1 \sin\beta \times m'k' ;$$

k et k', coefficients tenant compte de l'épaisseur des aubes, et m et m' de la contraction qui se produit à l'entrée des orifices.

Désignant toujours par b et b' les dimensions verticales respectives des deux couronnes, et en nous rappelant que V et w' sont les vitesses du liquide à la sortie des deux couronnes, on obtient :

$$Q = mk \times 2\pi r \sin\alpha \times bV \quad (1) \quad \text{et} \quad Q = m'k' \times 2\pi r_1 \sin\beta \times b'w'.$$

Connaissant r, l'équation (1) fournit, en remplaçant V par sa valeur ($V = \sqrt{2gH}$) :

$$(2) \qquad Q = mk \times 2\pi r \sin\alpha \times b\sqrt{2gH};$$

m varie de 0,85 à 0,95 suivant la matière dont les aubes sont constituées et leur poli plus ou moins parfait.

Enfin, si n est le nombre d'aubes et e leur épaisseur, on a :

$$Q = m\,(2\pi r \sin\alpha - ne)\, b\sqrt{2gH}.$$

La valeur de b, tirée de l'équation (2), dépend de celle de l'angle α. Si n est le nombre de tours par minute, on écrit :

$$n = \frac{60v}{2\pi r}; \qquad \text{mais} \qquad v = \frac{2\cos\alpha}{V}; \qquad \text{d'où} \qquad n = \frac{60V}{4\pi r\cos\alpha}.$$

Comme on connaît, d'autre part, la valeur de $V = \sqrt{2gH}$, il devient facile de déterminer les valeurs de n et de v, c'est-à-dire la vitesse d'un point de la circonférence extérieure de la couronne mobile.

Le rendement des turbines centripètes est meilleur que celui des turbines axiales, lequel est aussi meilleur que celui des turbines centrifuges.

La valeur théorique que peut prendre le rendement hydraulique du tracé dans les deux cas extrêmes de la pratique, c'est-à-dire :

$$1^\circ \text{ Quand : } \alpha = 15^\circ,\ \gamma = 10^\circ ;\ \frac{r'}{r} = \frac{1}{2} \text{ et } \varepsilon = 0.$$

$$2^\circ \text{ Quand : } \alpha = 45^\circ,\ \gamma = 20^\circ\ \frac{r'}{r} = \frac{3}{2} \text{ et } \varepsilon = \frac{2}{3}.$$

en rappelant que α est l'angle que fait la vitesse d'entrée dans la couronne mobile avec la vitesse de la roue mobile en ce point, γ l'angle que fait la vitesse de sortie de la couronne avec la vitesse de la couronne mobile en ce point, ε le degré de réaction, et que la valeur du rendement varie entre 0,998 et 0,92. En prenant les chiffres ci-après pour les pertes d'énergie cor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

respondant à une bonne construction soit : 10 0/0 dans le distributeur, 10 0/0 dans la couronne mobile, et 5 0/0 pour les frottements de l'arbre et de la couronne dans l'air, on trouve que le rendement total est compris entre 0,765 et 0,711. Mais au moment des essais de réception on peut atteindre respectivement : 0,88 et 0,80, les pertes ci-dessus pouvant être réduites de moitié.

129. Types de turbines centripètes. — Les (*fig.* 366 et 367) ont trait à des turbines du genre Francis. La première a été construite

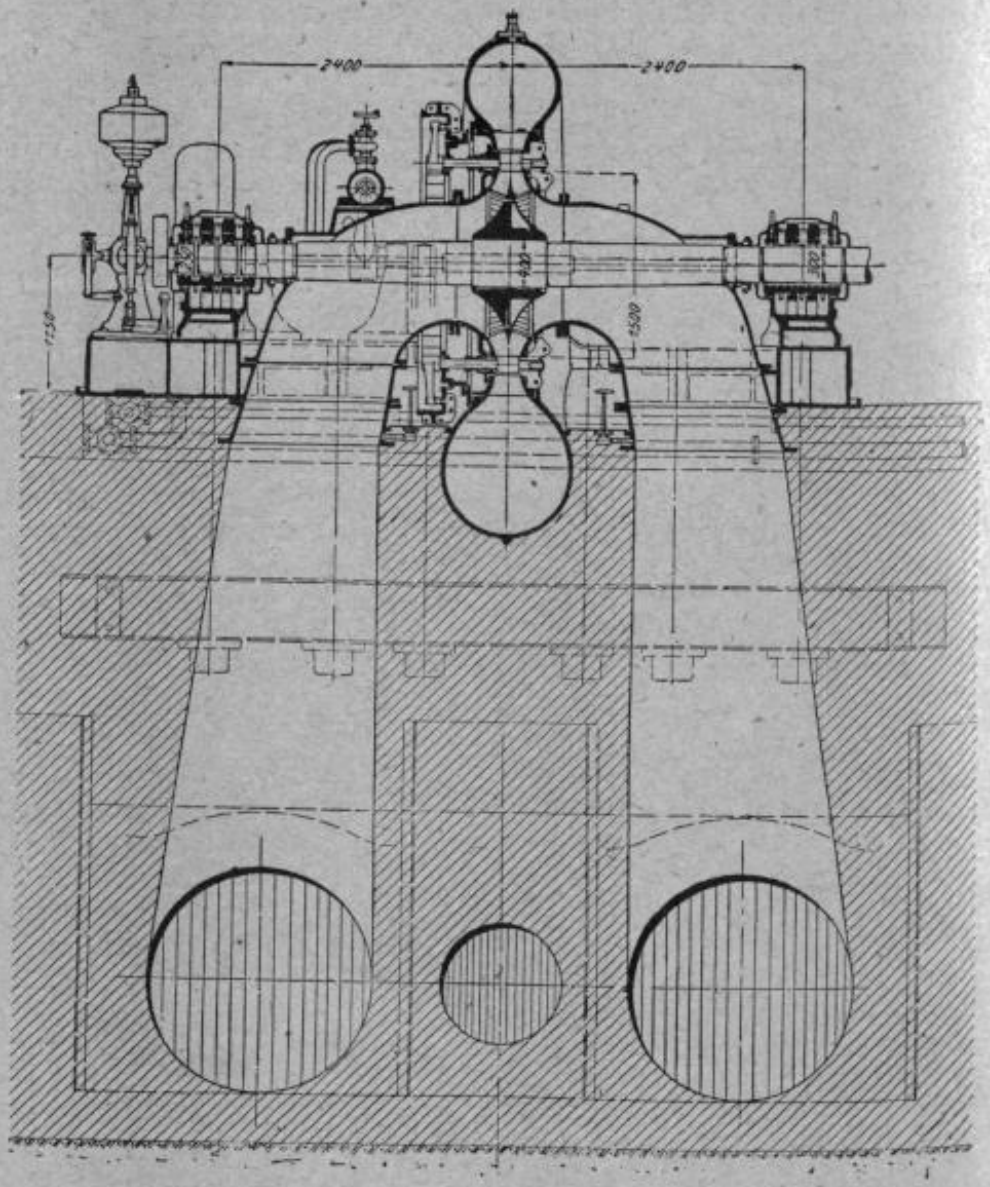


Fig. 366. — Turbine Voith.

par la maison Voith, et la seconde est sortie des ateliers de la maison Escher Wyss. Toutes les deux ont une puissance de 3.000 HP. Leur description est rapportée au (§ 297).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les turbines du genre « Francis », construites par la Société Alsacienne de constructions mécaniques, l'admission de l'eau se fait par un système d'obturateurs pivotants, de forme spéciale et parfaitement équilibrés par rapport à la pression hydraulique, afin que cette pression ne s'oppose nullement à leur mouvement dans un sens ou dans l'autre. Ils agissent simultanément et de la même quantité sur tous les canaux distributeurs.

L'attaque des obturateurs se fait avec un régulateur automatique et par l'intermédiaire d'un arbre vertical et de deux tringles agissant sur une couronne d'entraînement à laquelle sont réunis tous les obturateurs. Ce dispositif, très avantageux au point de vue du rendement, donne également entière sécurité au point de vue de la construction.

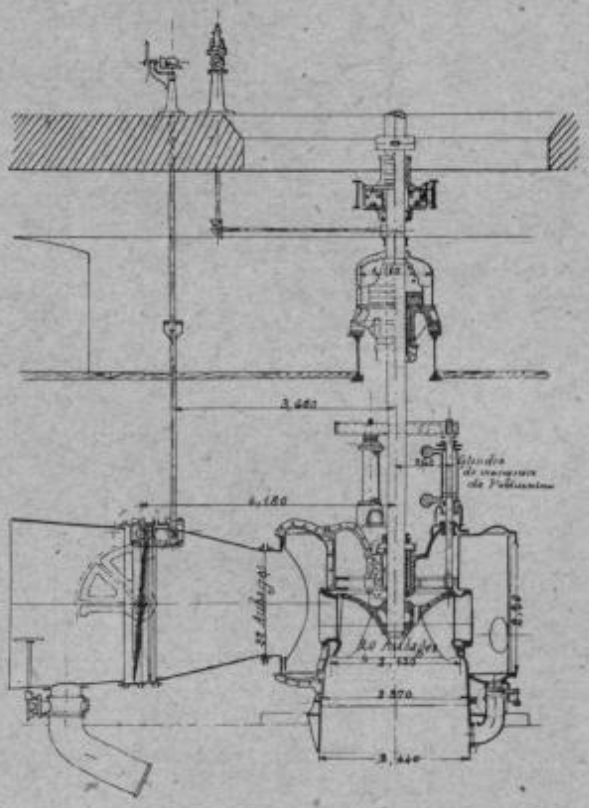


FIG. 367. — Turbine Escher Wyss.

Une disposition assez communément employée en Amérique pour régler la dépense des turbines centripètes, consiste à replier l'une sur l'autre les aubes de la couronne directrice au moyen d'un mécanisme qui les manœuvre toutes à la fois. A cet effet, chaque aube est composée de deux parties, dont la plus rapprochée de la couronne mobile est fixe, tandis que l'autre est articulée au moyen d'une charnière qui lui permet de se fermer, lorsqu'elle y est sollicitée, par un dispositif de manœuvre variant suivant les constructeurs.

Dans certains modèles, l'aube tout entière pivote autour d'un point et peut venir obstruer le passage entre deux aubes voisines, qui sont fixes.

Parfois on divise la couronne mobile, dans sa hauteur, au moyen de cloisons horizontales. En ce qui concerne la disposition consistant à régler le débit par le déplacement simultané de toutes les aubes de la couronne directrice, il semble préférable et avantageux de n'agir que sur une partie des aubes ouvertes, que l'on ferme alors entièrement.

La maison Teisset Chapron et Brault construit un type de turbine genre Francis pour basses chutes, recommandable par son faible encom-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

brement (*fig.* 368). La turbine est à axe vertical. Le distributeur se compose de deux plateaux tournés et solidement entretoisés ; les directrices mobiles posées entre ces deux plateaux oscillent chacune autour d'un axe servant aussi d'entretoise aux plateaux ; la manœuvre de ces directrices est très douce, même lorsque la turbine atteint de grandes dimensions.

La roue mobile est coulée d'une seule pièce en fonte extra-résistante ; cette roue équilibrée avec le plus grand soin est calée sur l'arbre vertical, lequel est supporté soit par un pivot noyé dans l'eau d'aval, soit par un pivot hors de l'eau.

Les établissements Piccard et Pictet ont installé à l'usine hydro-électrique de Messein (Meurthe-et-Moselle) une turbine centripète, à aspiration et introduction totale, c'est-à-dire sur tout le pourtour de la roue.

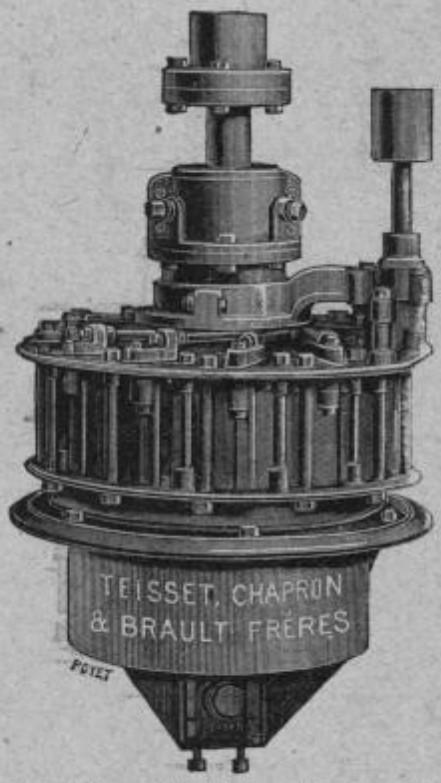


FIG. 368. — Turbine centripète à directrices mobiles (Teisset, Chapron et Brault, constructeurs).

Elle fonctionne sous une chute variant entre $1^{m},50$ et $1^{m},90$ et avec un débit de 6.000 à 10.000 litres, à la vitesse de 32 tours, fournissant une puissance de 165 HP. L'engin doit donc marcher avec des débits très différents.

La roue, ainsi que le distributeur, sont divisés en cinq étages superposés qui, l'un après l'autre, sont recouverts ou découverts par le vannage. Lorsqu'un étage est partiellement obturé, le rendement de cet étage seul est diminué. Il résulte de cette construction que cette turbine utilise avec un bon rendement les débits fractionnaires, quoiqu'elle marche constamment noyée. Les trois étages inférieurs sont munis d'un aubage normal, tandis que les deux supérieurs possèdent un aubage à grand débit qui permet à la turbine d'absorber un fort volume d'eau en temps de crue. Le maximum de rendement est obtenu lorsque les trois étages inférieurs seuls sont ouverts. En temps de crue, au contraire, la quantité d'eau disponible étant illimitée, l'importance du rendement diminue. Il ne s'agit plus que d'utiliser le plus grand volume d'eau possible pour maintenir constante la puissance fournie. C'est pourquoi l'aubage des deux étages supérieurs est disposé bien plus pour laisser passer beaucoup d'eau que pour obtenir un rendement élevé.

Le vannage est constitué par un cylindre en acier parfaitement équi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

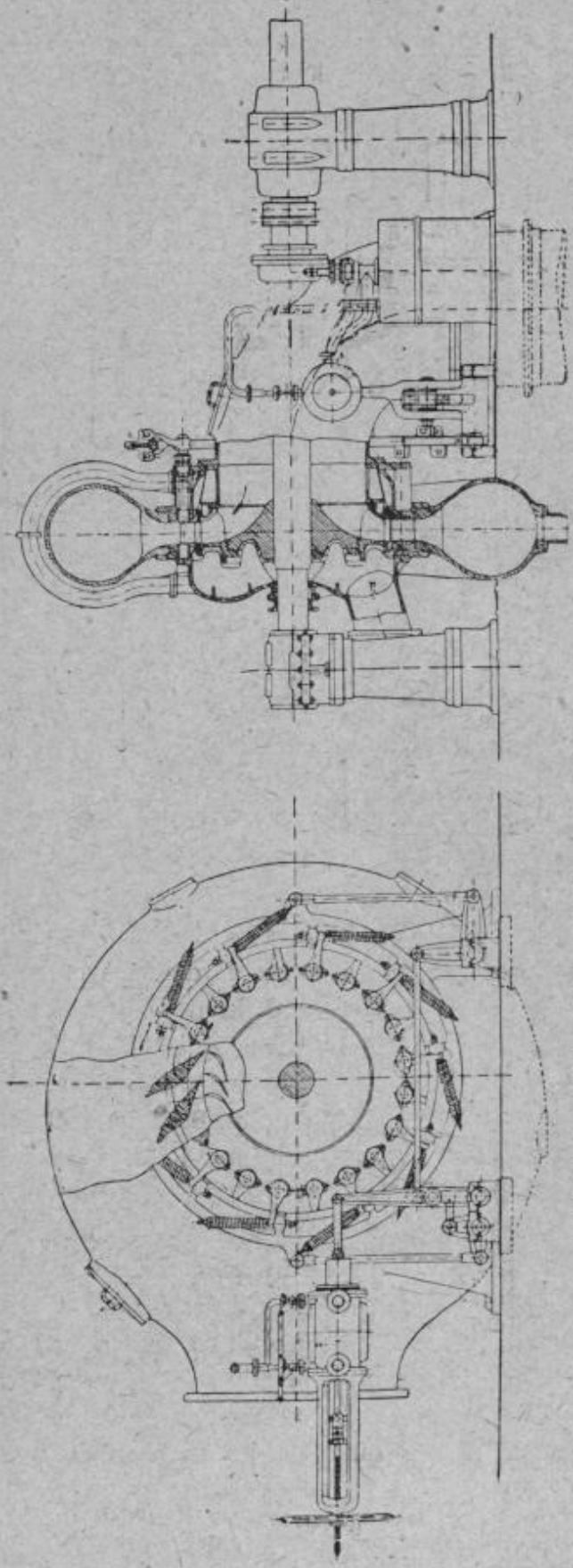


Fig. 369. — Turbine centripète Piccard et Pictet (2.000 HP, usine de Séchilienne).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

libré, enveloppant le distributeur et se déplaçant parallèlement à l'axe de la turbine.

Les usines hydro-électriques de Séchilienne (§ 348) et d'Orizaba nous

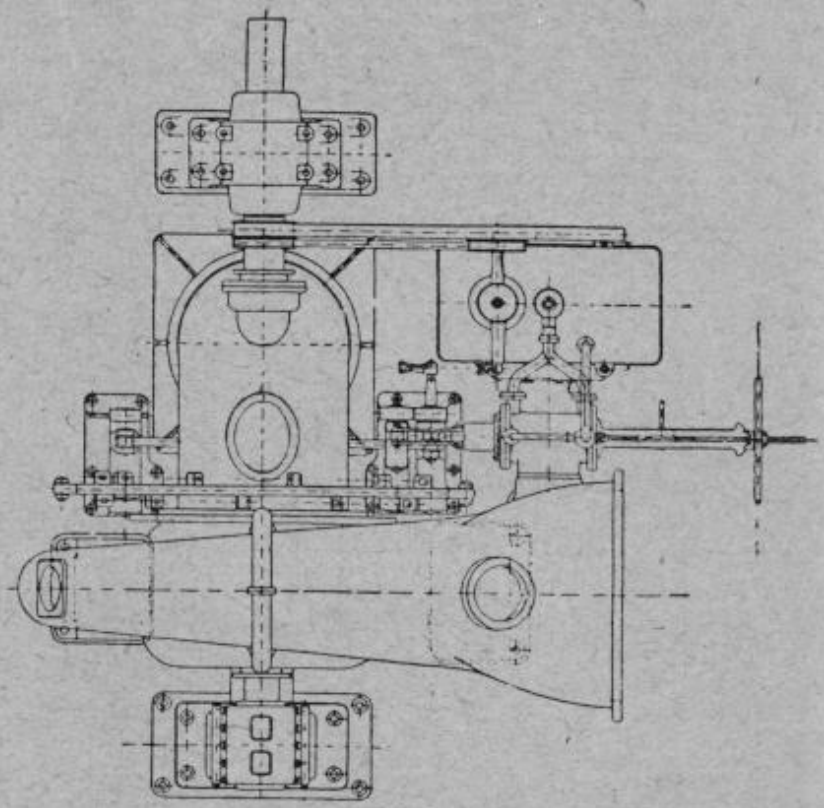


Fig. 370.

offrent des types de turbines centripètes à aubes mobiles de construction courante des établissements Piccard et Pictet, de Genève.

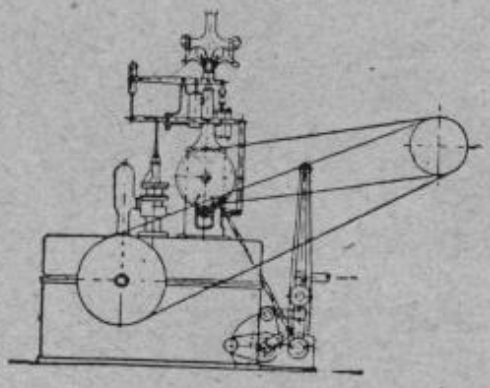


Fig. 371. — Ensemble.

Celles de la première usine ont une puissance individuelle de 2.000 HP, tournant à 375 tours, sous une chute de 58m,80 (*fig.* 369 et 370). Ces turbines Francis sont à axe horizontal, à roue simple avec un seul tuyau d'aspiration. Le réglage est effectué par les aubes mobiles du distributeur, commandées par le régulateur servo-moteur à huile sous pression décrit au (§ 168).

Le mécanisme de commande de ces aubes présente un intérêt tout particulier qui mérite une description spéciale.

L'on sait que d'ordinaire les tourillons sur lesquels tournent les aubes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

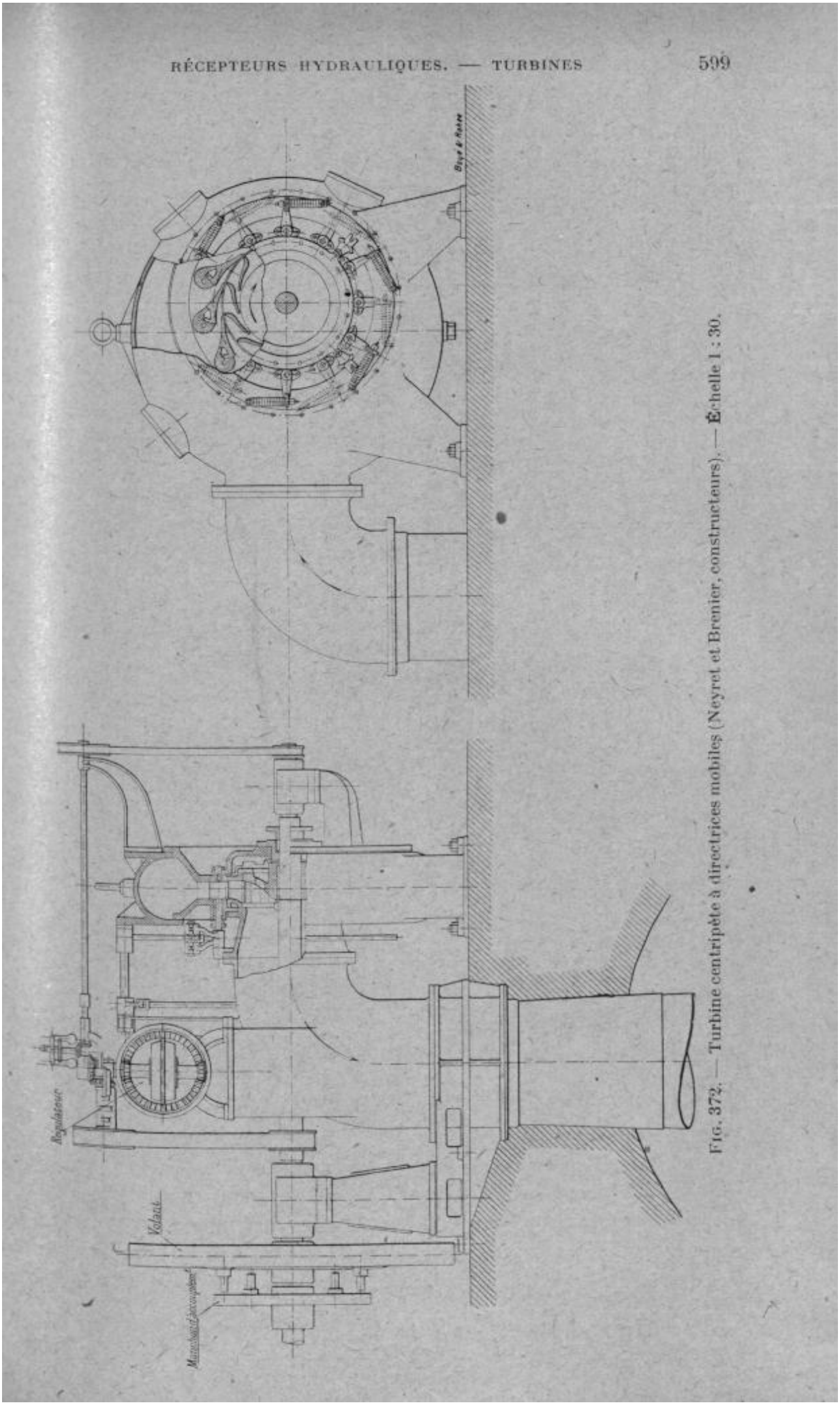


FIG. 372. — Turbine centripète à directrices mobiles (Neyret et Brenier, constructeurs). — Échelle 1 : 30.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mobiles et le mécanisme actionnant ces aubes sont constamment noyés à l'intérieur de la bâche de la turbine. Ils ne peuvent de ce fait être graissés et sont exposés à une destruction plus ou moins rapide. Aussi ici le mécanisme actionnant les aubes directrices est entièrement placé à l'extérieur de la bâche de turbine et par suite facilement graissé et réglé pendant la marche. Les aubes directrices sont coulées en acier d'une seule

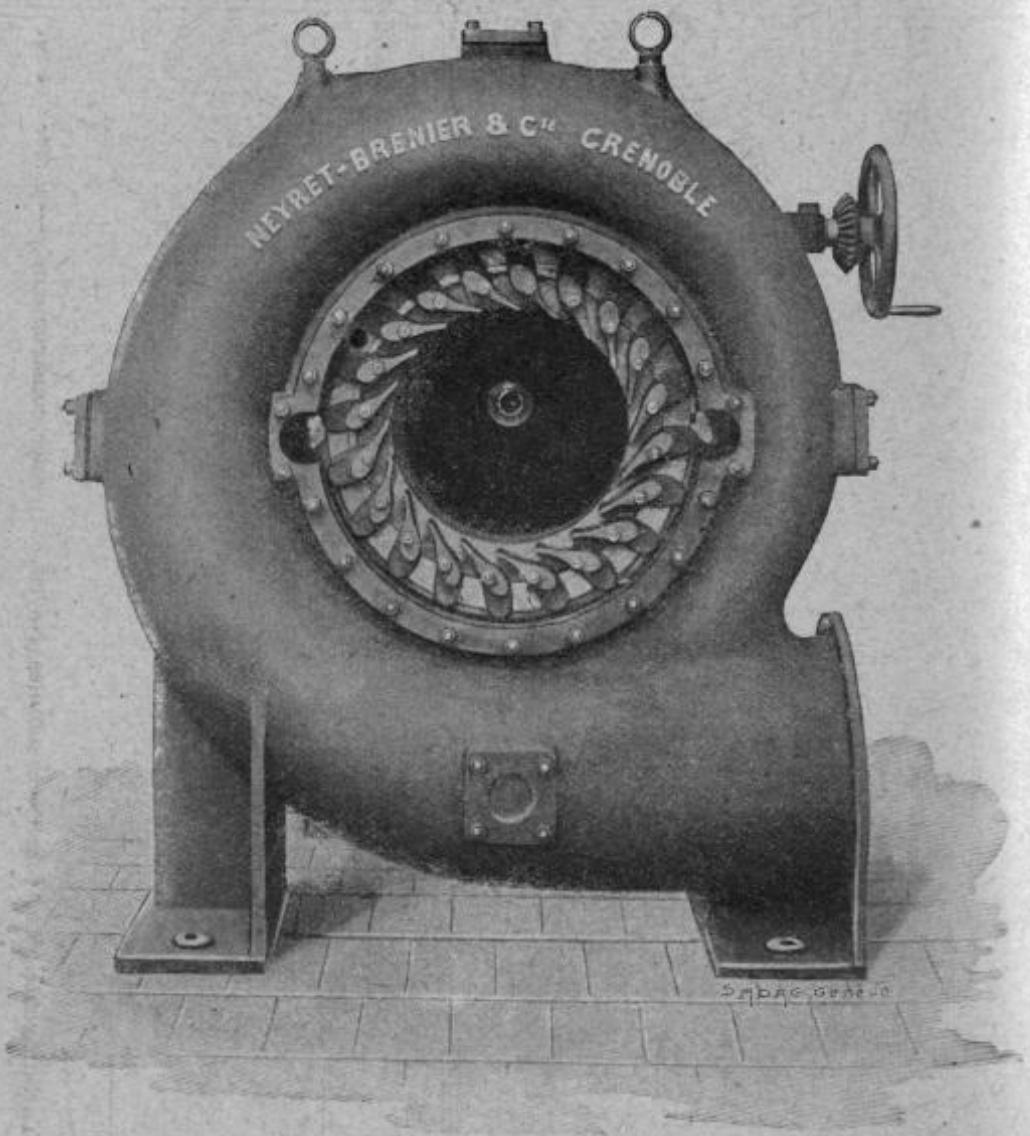


FIG. 373.

pièce avec leurs deux tourillons. L'un de ceux-ci pénètre dans une douille en bronze, et l'autre traverse un presse-étoupe également en bronze et sort de la turbine. Sur sa partie extérieure il porte une manivelle clavetée, commandée par le servo-moteur. La douille et le presse-étoupe sont maintenus pleins de graisse consistante au moyen de graisseurs appropriés, de sorte que les tourillons travaillent dans les meilleures conditions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autre part, l'ouverture de chacune des aubes est commandée directement par le mouvement d'un cercle relié au servo-moteur. Par contre,

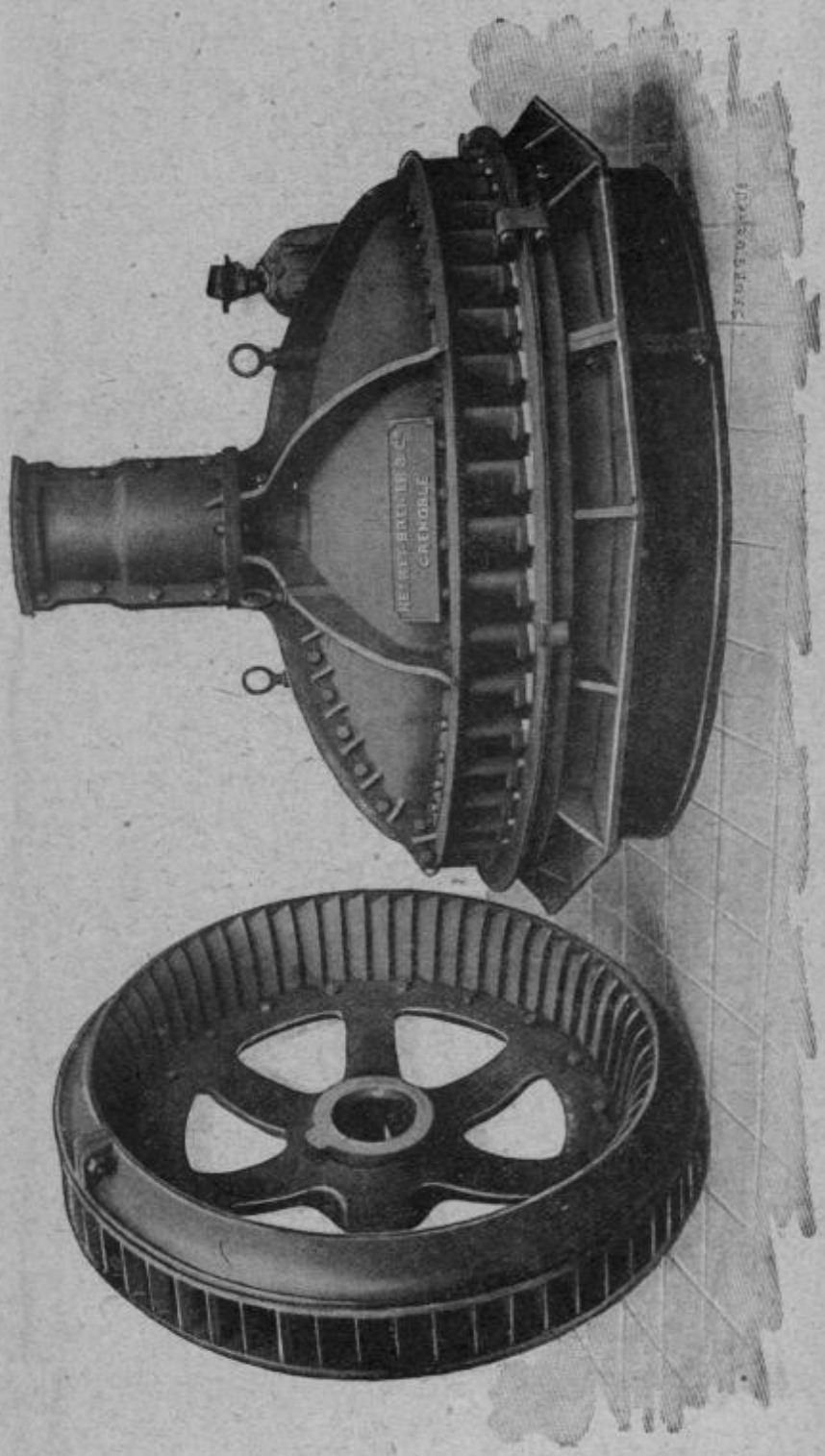


Fig. 374. — Turbine centripète à directrices mobiles (Neyret et Brenier, constructeurs).

la fermeture de ces aubes est provoquée par le même anneau, non plus directement, mais par l'intermédiaire de ressorts puissants intercalés entre cet anneau et les manivelles de chacune des aubes. De cette manière,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

si pendant la fermeture, un corps étranger vient à s'introduire entre deux aubes et y reste pincé, les ressorts intérieurs cèdent devant cette résis-

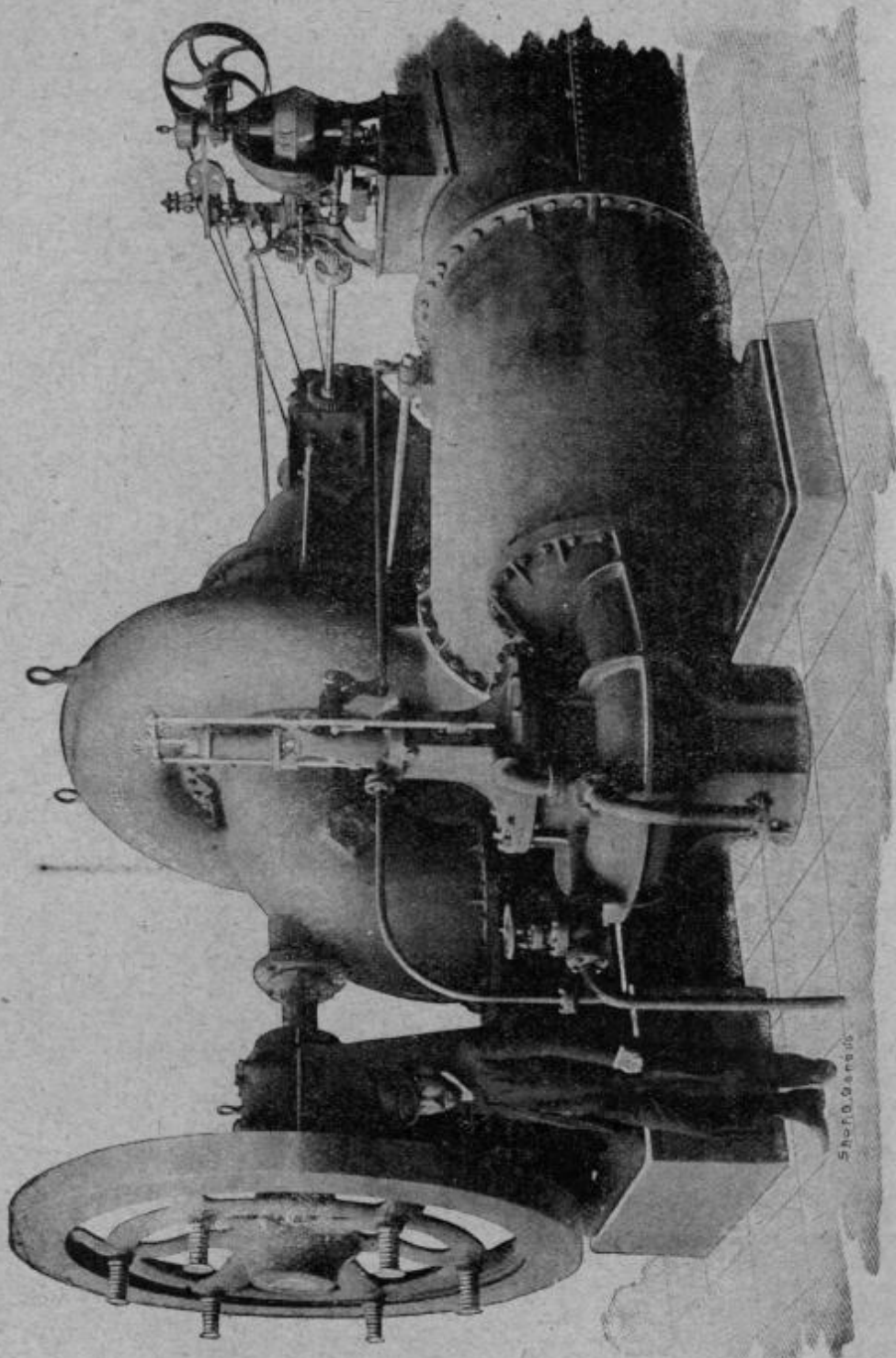


Fig. 375. — Turbine hélico-centripète double avec déchargeur (Neyret et Brenier, constructeurs).

tance anormale et l'aube reste ouverte au lieu de se briser. Le mécanisme étant extérieur, l'on peut tout de suite intervenir pour dégager l'aube.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chacun des régulateurs servo-moteurs possède sa pompe à huile située dans le socle de l'appareil qui sert en même temps de réservoir d'huile.

Des essais très précis sur ces turbines ont donné comme rendement à 3/4 de charge, 81 0/0, et à 1/2 charge, 77,5 0/0.

Dans les turbines centripètes *Singrun* la forme de l'enveloppe assure la

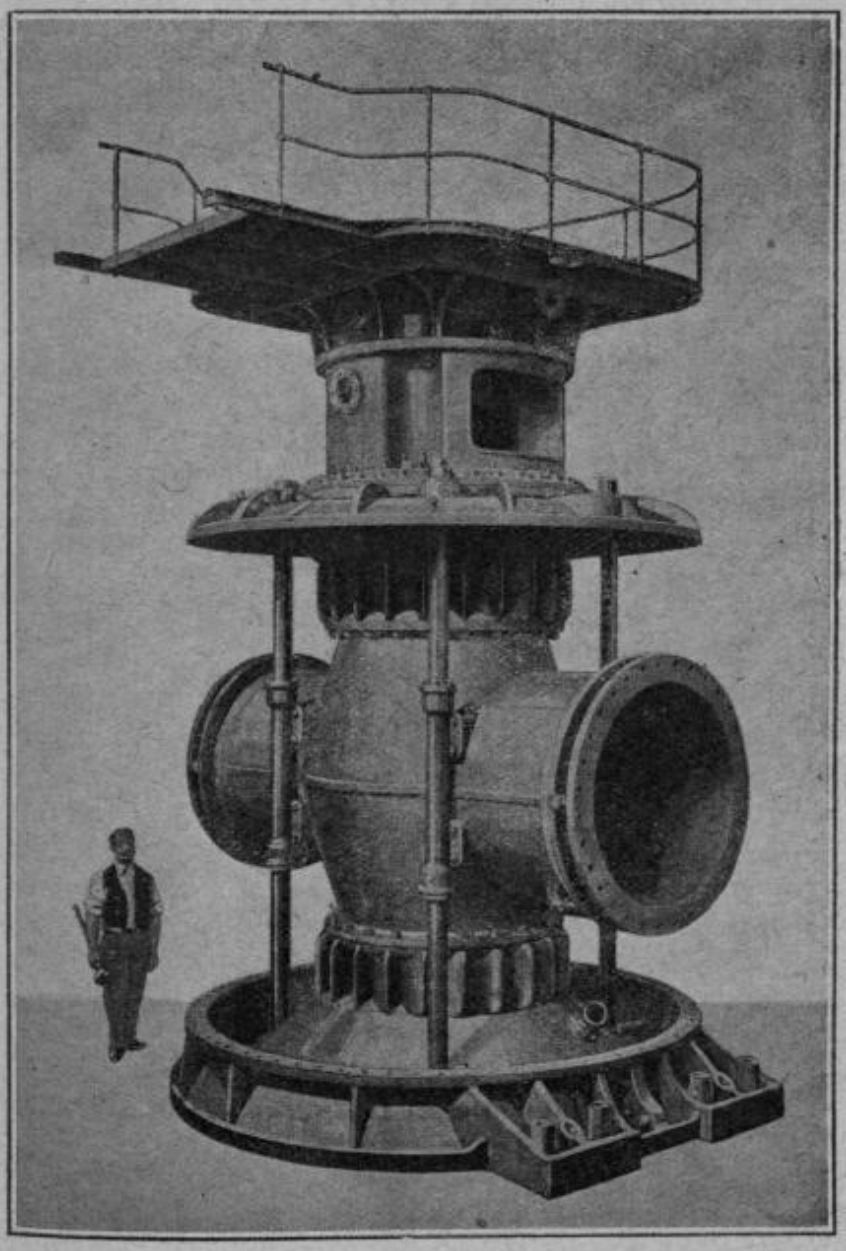


Fig. 376. — Turbine Francis (Escher Wyss, constructeurs), de 10.250 HP. (Usine de la Niagara Power C°, Ontario.)

constance de la vitesse d'introduction de l'eau sur tout le pourtour du distributeur, et son entrée dans ce dernier sans choc ni brusque déviation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les directrices, mobiles autour d'axes en acier, conduisent l'eau sur la roue sous des angles rigoureusement calculés comme les plus favorables au rendement.

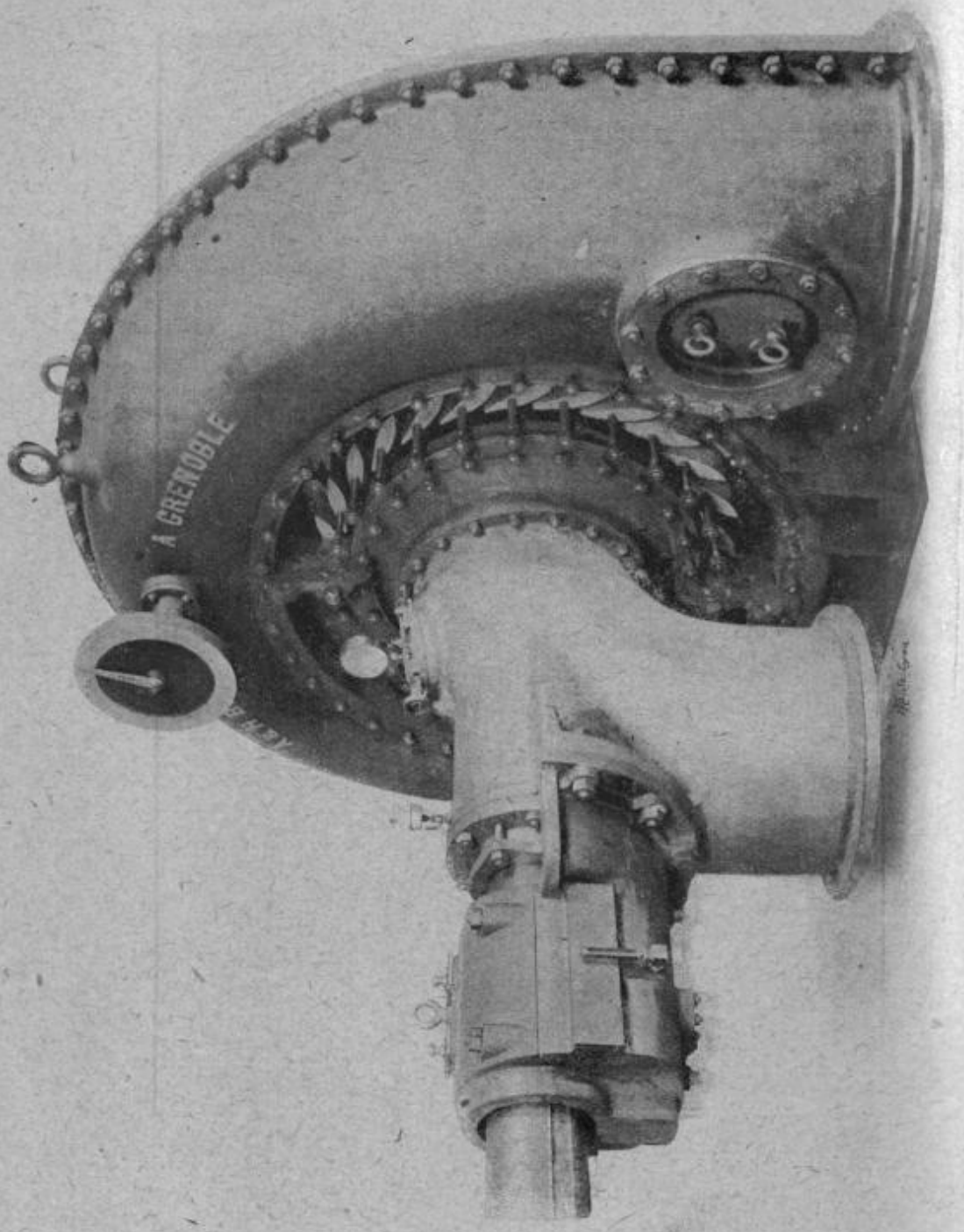


Fig. 377. — Turbine centripète horizontale double (A. et H. Bouvier, constructeurs), vannage Francis.

La (*fig.* 383) montre l'ensemble de l'installation d'une turbine centripète, avec régulateur automatique de vitesse. Ces turbines construites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

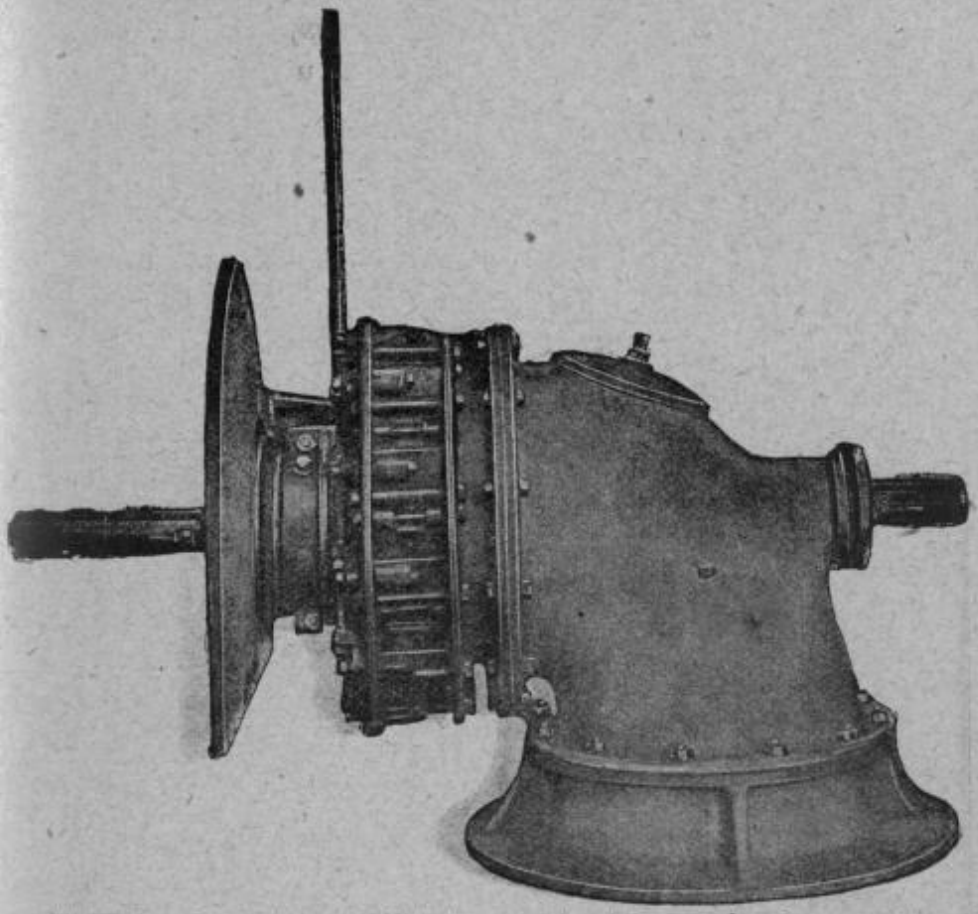


FIG. 378. — Turbine centripète à axe horizontal pour chambre ouverte. (Teisset, Chapron et Brault frères, constructeurs).

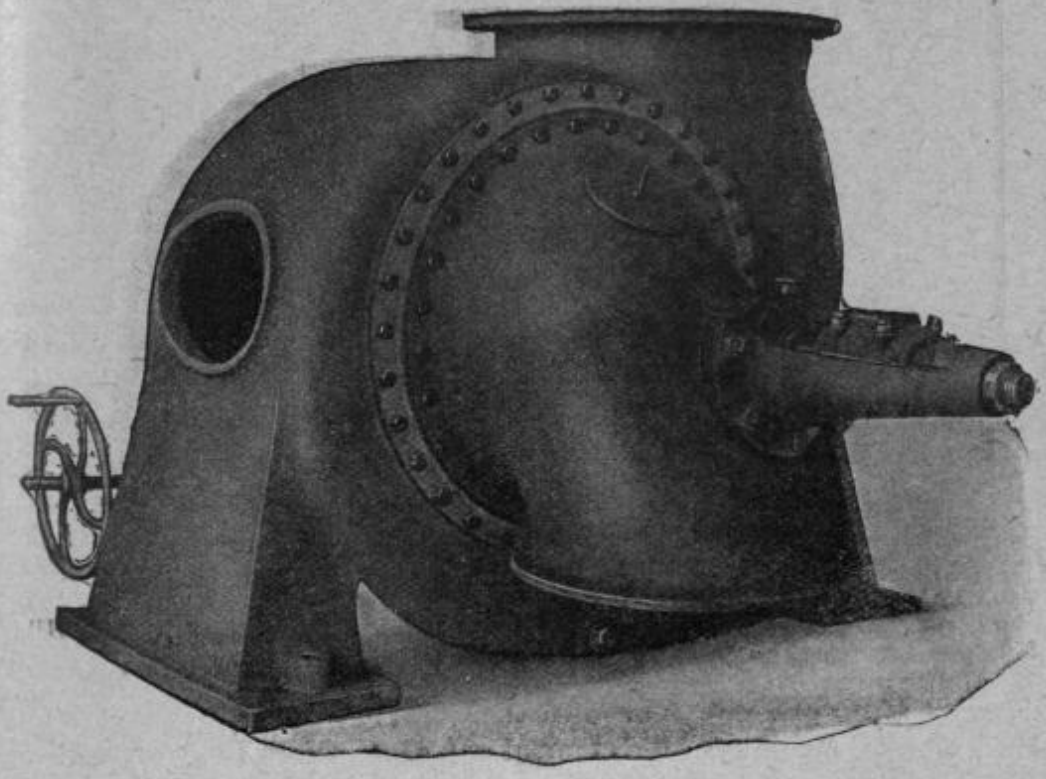


FIG. 379. — Turbine centripète à axe horizontal avec bâche spirale en fonte. (Teisset, Chapron et Brault frères, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'après les données consacrées par une longue expérience et les dernières découvertes de la technique moderne, donnent un rendement très élevé.

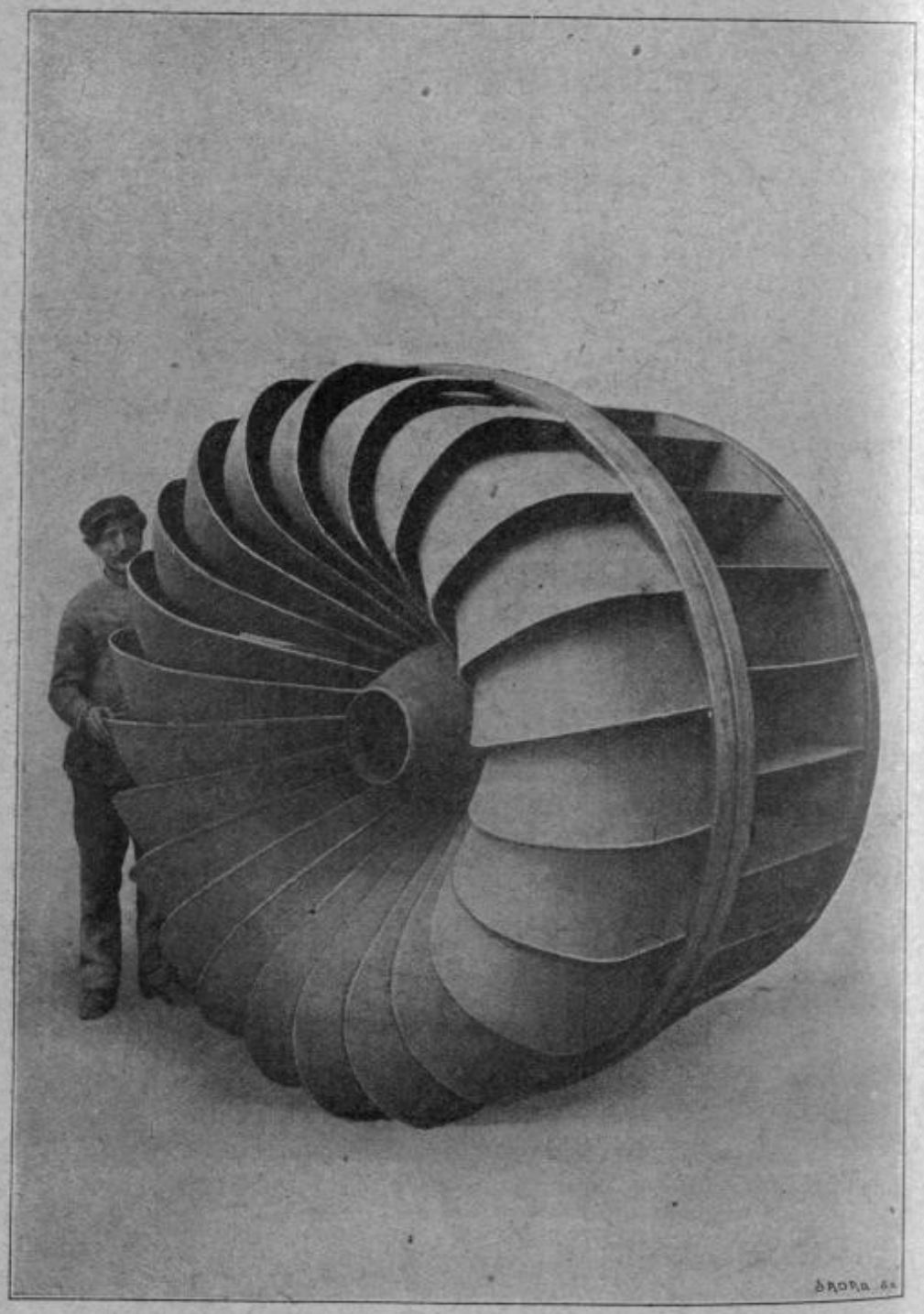


FIG. 380. — Roue mobile d'une turbine centripète à axe vertical, de 140 HP sous 2m,20 de chute (Neyret-Beylier, constructeurs).

Elles peuvent s'accoupler directement aux génératrices d'électricité. Elles s'appliquent à des hauteurs de chute de 25 à 180 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 389) montre une turbine centripète dans laquelle les directrices sont manœuvrées avec interposition de ressorts qui amortissent les

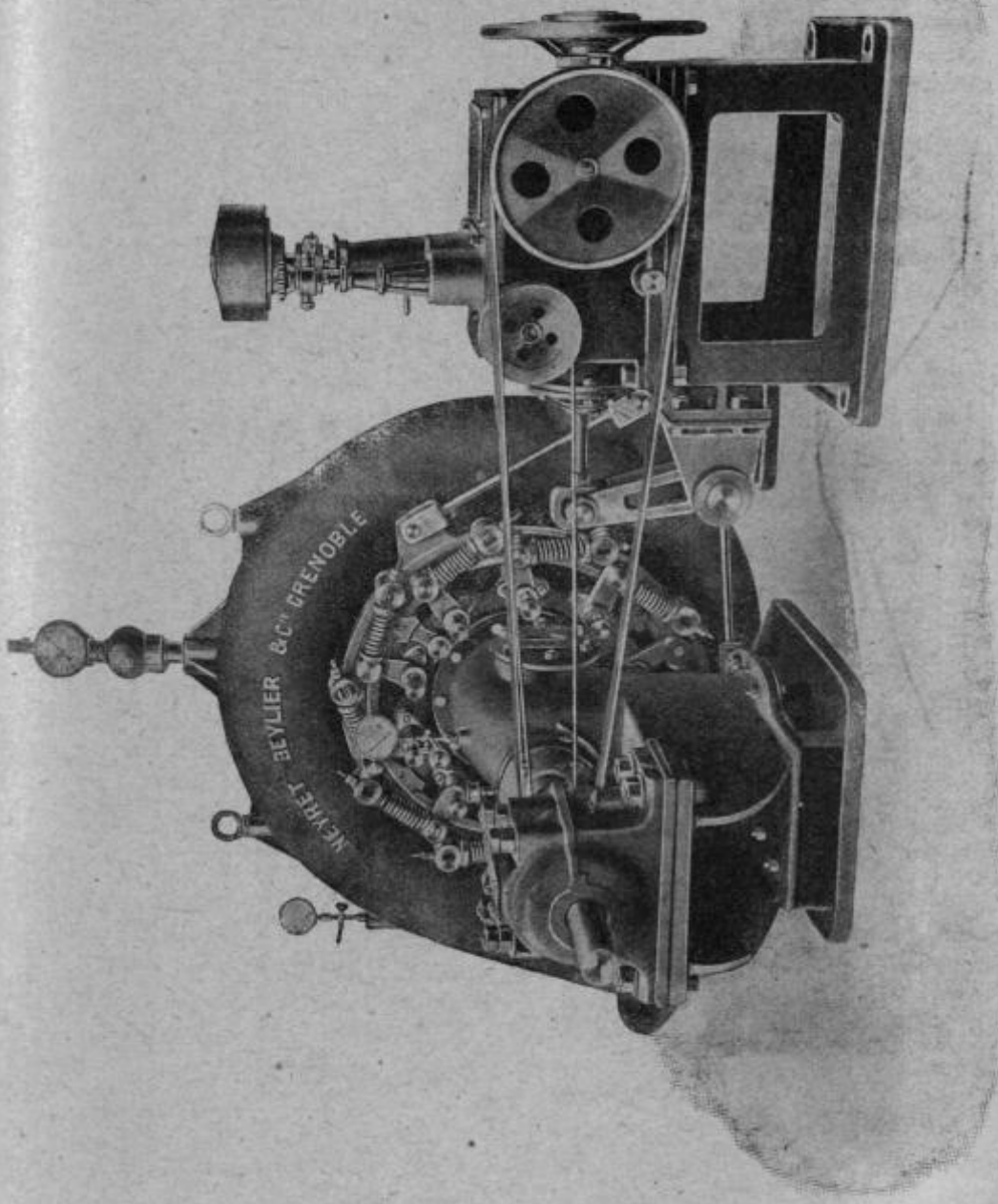


Fig. 381. — Turbine centripète simple de 125 HP sous 38m,50 de hauteur de chute (Neyret-Beylier, constructeurs).

mouvements brusques du vannage. La (*fig.* 390) représente l'installation de deux turbines accouplées avec régulateur de vitesse commun.

L'usine de Séros, sur le Sègre qui utilise une chute d'une puis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sance de 60.000 chevaux, comporte un canal d'amenée de 27,5 kilomètres de longueur auquel font suite quatre conduites rivées de 72,5

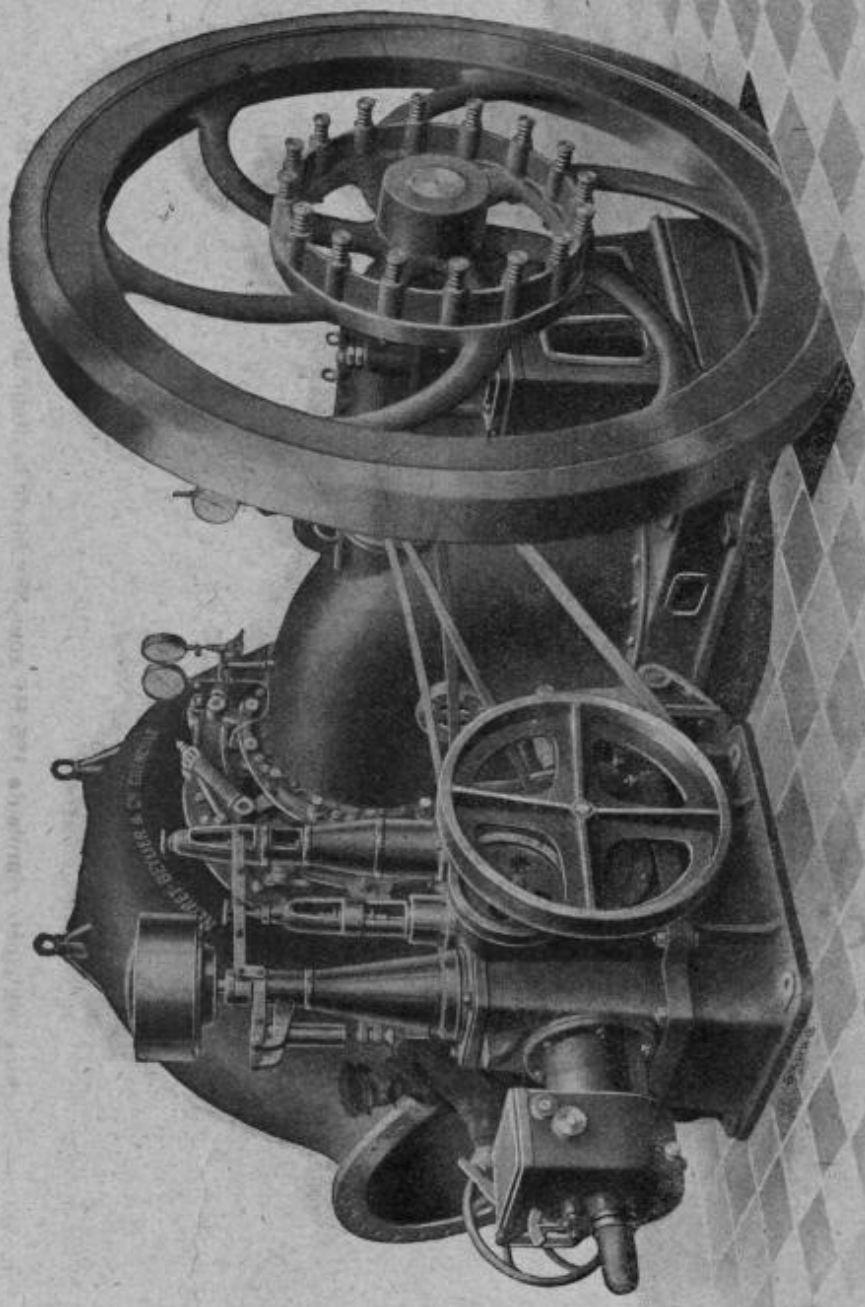


Fig. 382. — Turbine centripète de 2700 HP sous 58 mètres de chute. Usine hydro-électrique d'Arreau (Hautes-Pyrénées) (Neyret-Beylier, constructeurs).

mètres de longueur et 3 mètres de diamètre. Chacune de ces conduites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alimente sous une pression de 47 mètres d'eau une turbine de 15.000 chevaux, type Francis, tournant à la vitesse angulaire de 250 tours minute

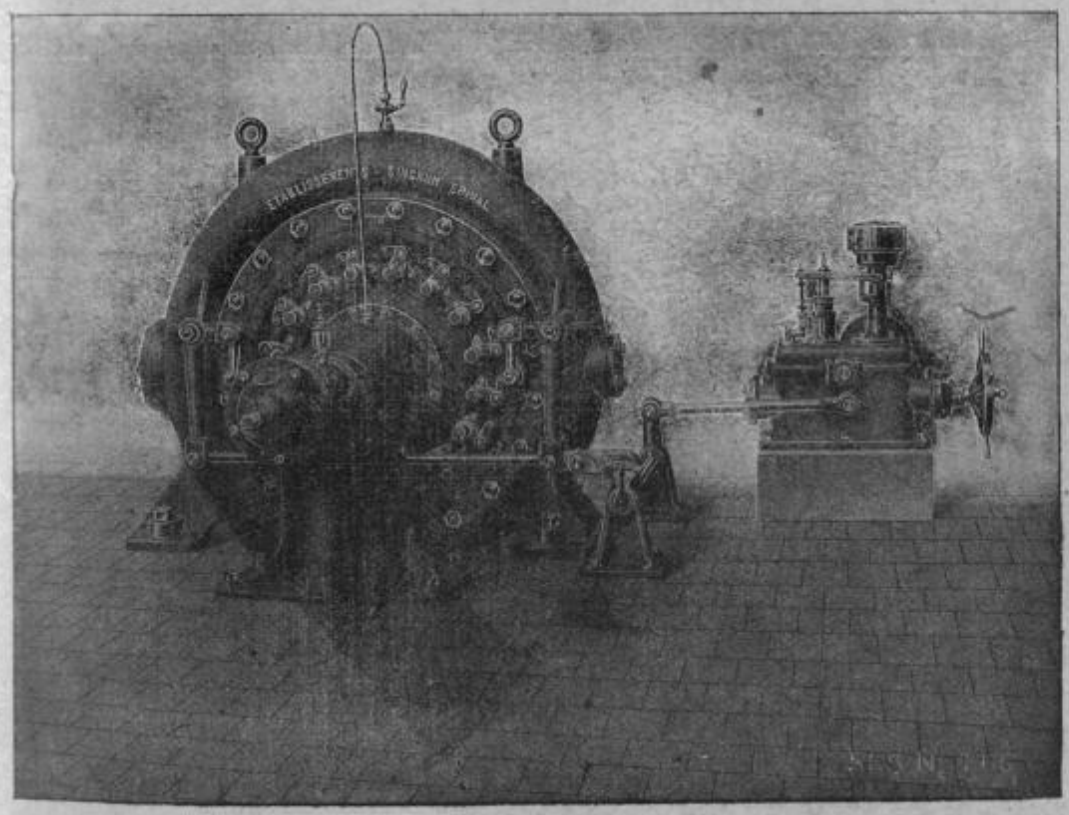


Fig. 383. — Turbine centripète Singrün en hèche spirale, avec régulateur de vitesse.

construites par la maison Escher Wyss et dont le rendement est de 0,82 à

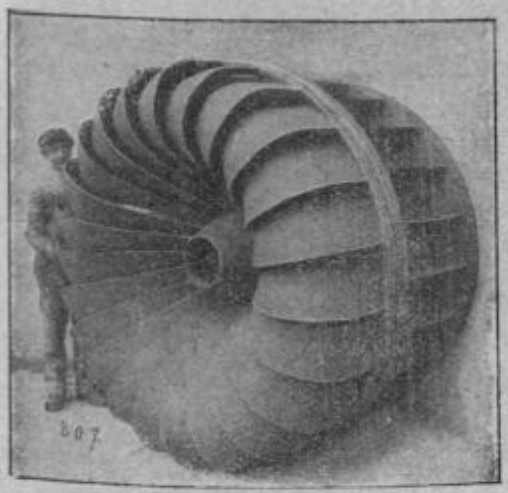


Fig. 384. — Roue de turbine américaine (ordinaire).

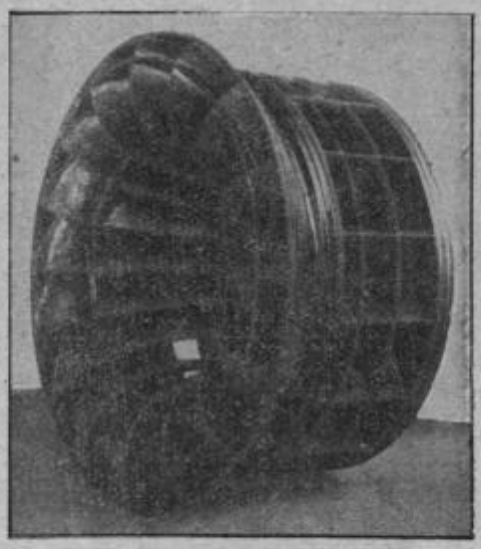


Fig. 385. — Roue de turbine américaine (cloisonnée).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pleine charge, 0,86 pour une charge de 7/8, 0,85 pour une charge de 3/4 et 0,80 à moitié de la charge normale.

La roue, d'un diamètre de $2^m,17$, est coulée, en fonte ordinaire,

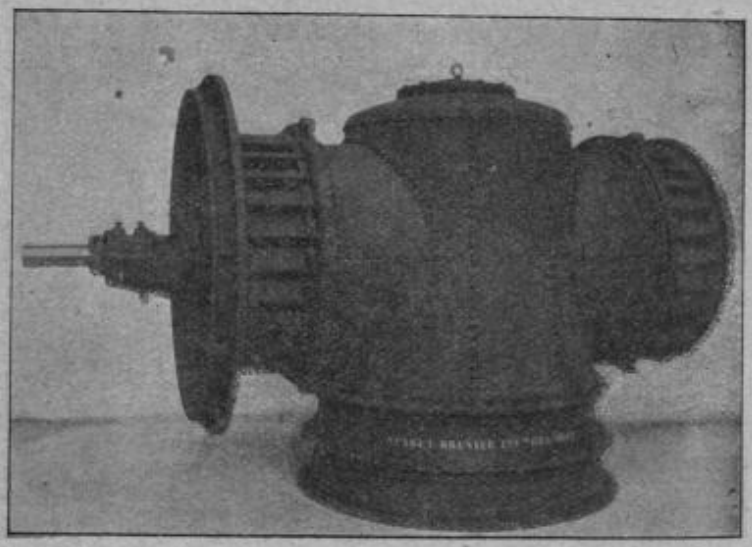


Fig. 386. — Turbine américaine à deux roues (arbre horizontal).

d'un seul bloc avec ses aubes : son poids est de 6.000 kilogrammes. Le distributeur de $0^m,570$ de largeur d'entrée est à aubes pivotantes, en acier moulé, commandées extérieurement par un cercle de vannage. Les fonds du distributeur sont reliés à la bâche en spirale par le moyen d'une couronne, en acier moulé, munie d'entretoises venues de fonte. La bâche est de section circulaire, en tôles rivées entre elles aussi bien qu'à la couronne d'acier; son diamètre d'entrée est de $2^m,30$, ce qui, pour le débit de 30 mètres cubes à la seconde, correspondant à une vitesse de:

Fig. 387. — Turbine américaine à quatre roues (arbre vertical).

$$v_0 = 0,23\sqrt{2gH}$$

La turbine peut être isolée de la conduite qui l'alimente par une vanne-papillon, à commande hydraulique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le cylindre du servo-moteur a été disposé à la hauteur du plan supérieur de la bâche, lequel attaque au moyen de deux bielles le cercle de vannage du distributeur ainsi que les deux orifices compensateurs destinés à éviter des surpressions trop considérables dans la tuyauterie. Ce servo-moteur est lui-même commandé par un petit régulateur servo-moteur, situé au niveau des alternateurs, actionné par une courroie de transmission horizontale et portant tous les appareils de mise en marche et de manœuvre de la turbine.

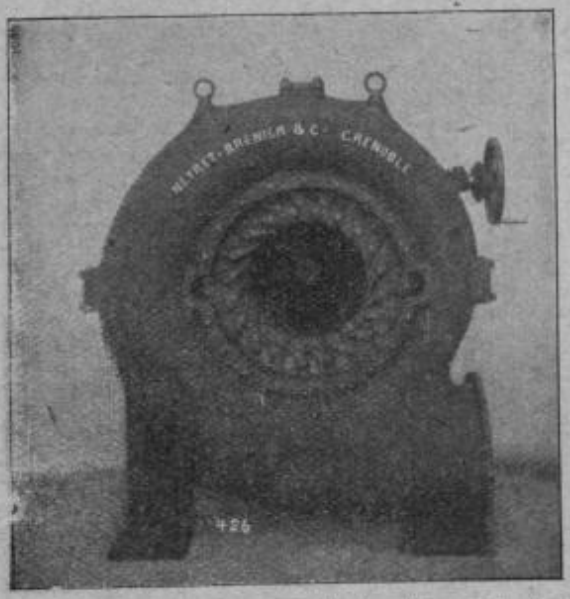


Fig. 388. — Distributeur à directrices Finck.

Une petite turbine Pelton et une pompe à trois cylindres oscillants fournissent l'huile nécessaire au servo-moteur, au pivot annulaire de la turbine ainsi qu'à un frein Prony, à serrage hydraulique, disposé en dessous de l'alternateur et destiné à limiter, dans une certaine mesure, le temps d'arrêt du groupe.

Fig. 389. — Turbine centripète en hûche spéciale avec ressorts amortisseurs du mouvement de vannage. Construction Singrün.

Les (*fig.* 372 et 373) ont trait à des turbines centripètes à huche spiroïdale à directrices mobiles, construites par la maison Neyret-Beylier, où les cloisons du distributeur sont toutes mobiles, chacune autour d'un axe propre. On peut les faire tourner toutes ensemble du même angle, et par suite faire varier l'espace qu'elles laissent entre elles, c'est-à-dire la section du distributeur. Ce vannage conserve mieux le rendement que le tiroir cylindrique, mais est moins robuste que celui-ci lorsqu'on a affaire à des eaux charriant des sables durs. Il se prête mieux qu'un tiroir à l'action rapide d'un régulateur et peut s'adapter aux turbines multiples sans aucune difficulté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour de hautes chutes et de grands débits, ou bien pour obtenir de grandes vitesses de rotation en basses chutes, on emploie des turbines ju-

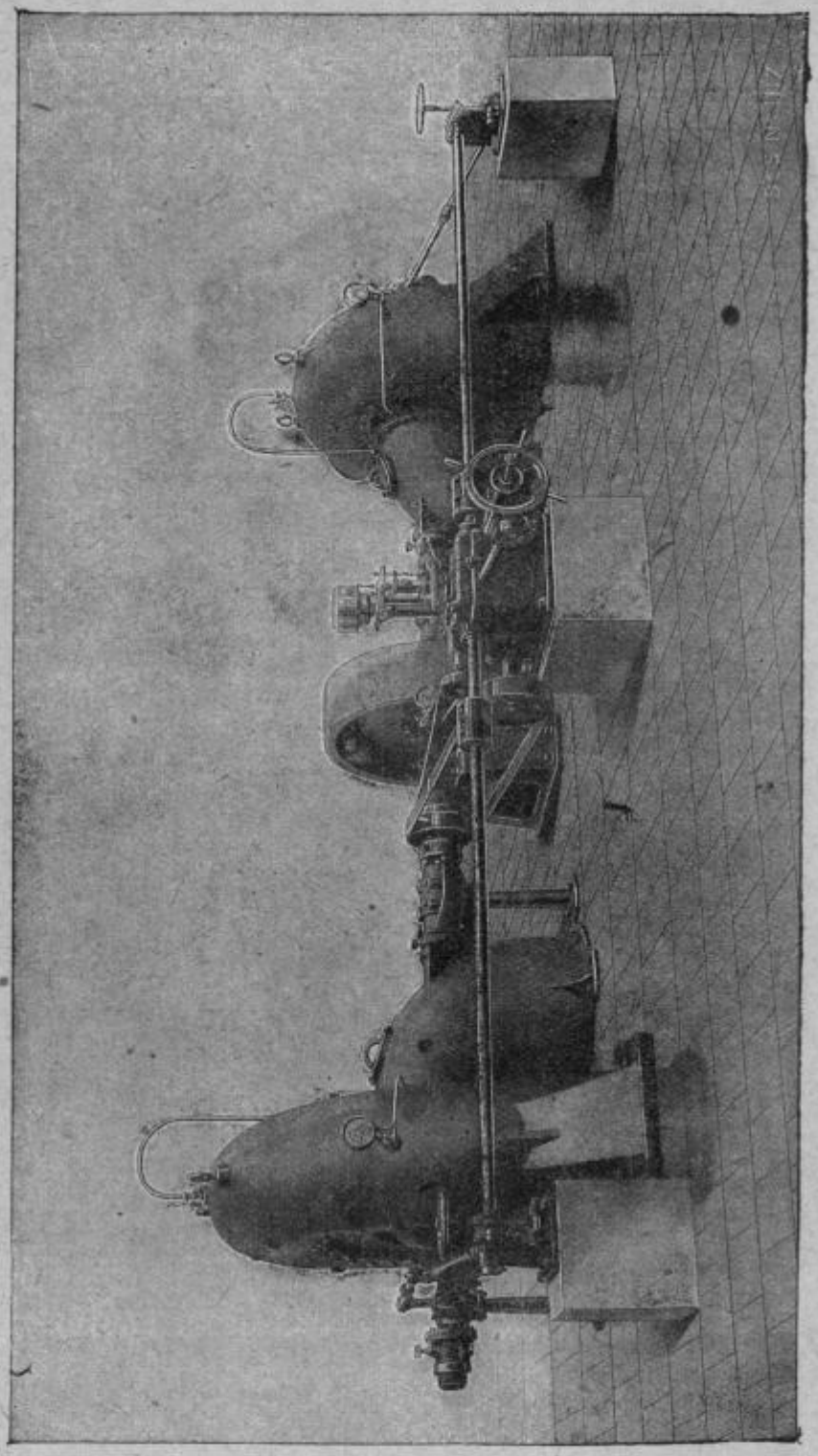


Fig. 390. — Vue d'une installation de deux turbines centripètes accouplées avec régulateur automatique de vitesse.
Construction Singrün.

melées. En opposant les turbines l'une à l'autre, on équilibre totalement la poussée sur l'arbre et l'on évite les paliers de butée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

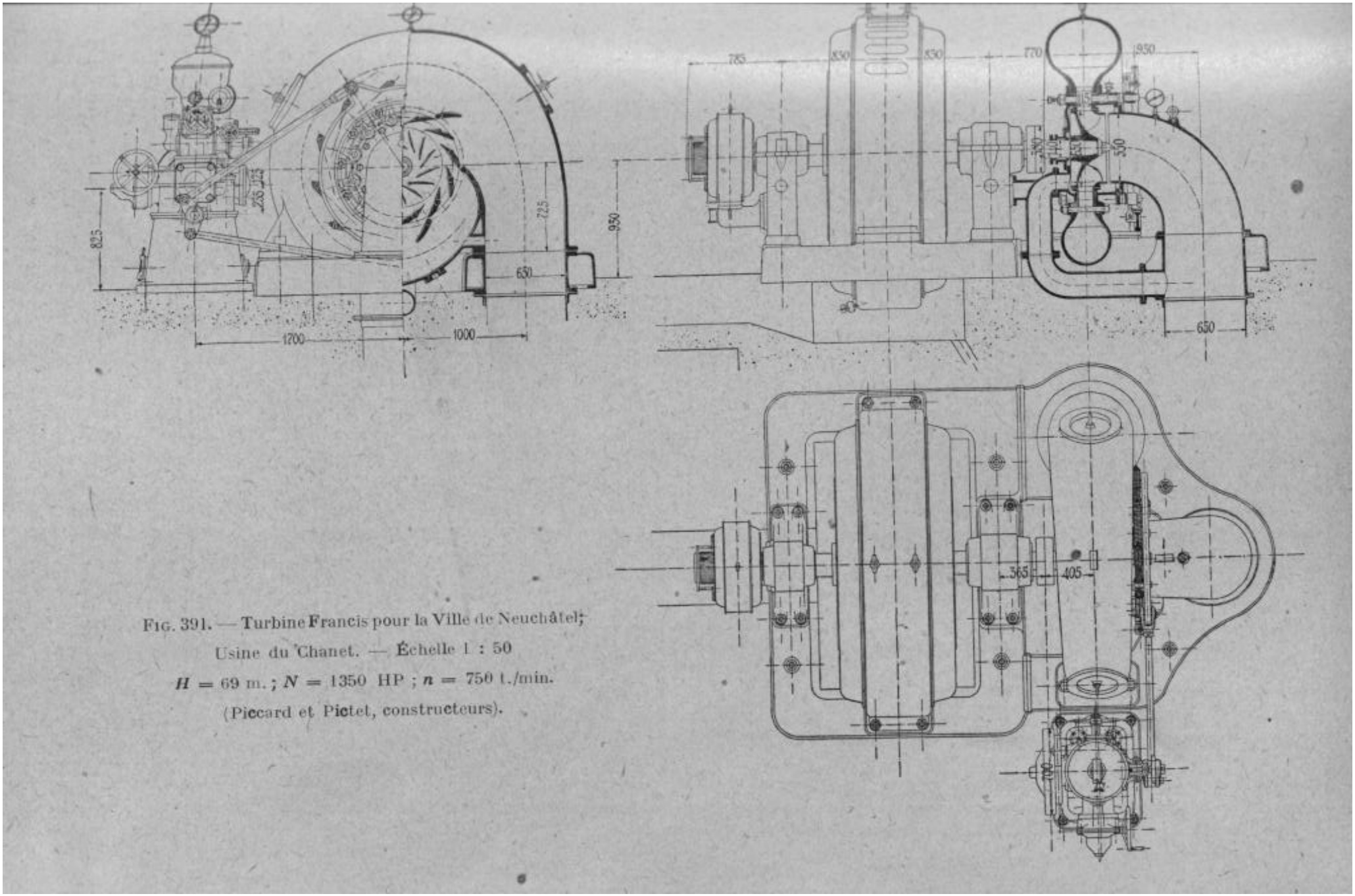


FIG. 391. — Turbine Francis pour la Ville de Neuchâtel; Usine du Chanet. — Échelle 1 : 50

$H = 69$ m. ; $N = 1350$ HP ; $n = 750$ t./min.

(Piccard et Pictet, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

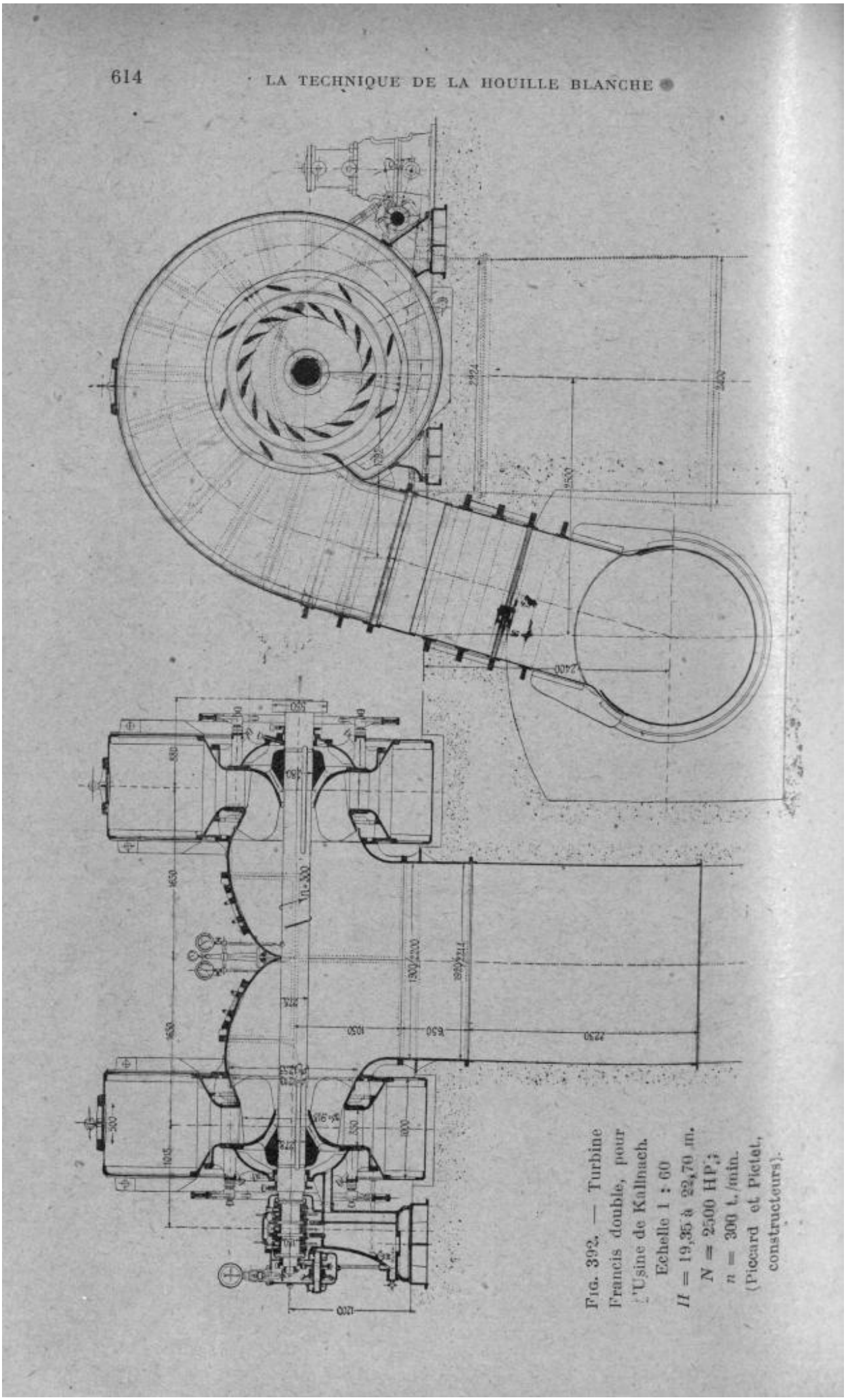


Fig. 392. — Turbine Francis double, pour l'Usine de Kallnach.
Echelle 1 : 60
$H = 19{,}35$ à $22{,}70$ m.
$N = 2500$ HP;
$n = 300$ t./min.
(Piccard et Pictet, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

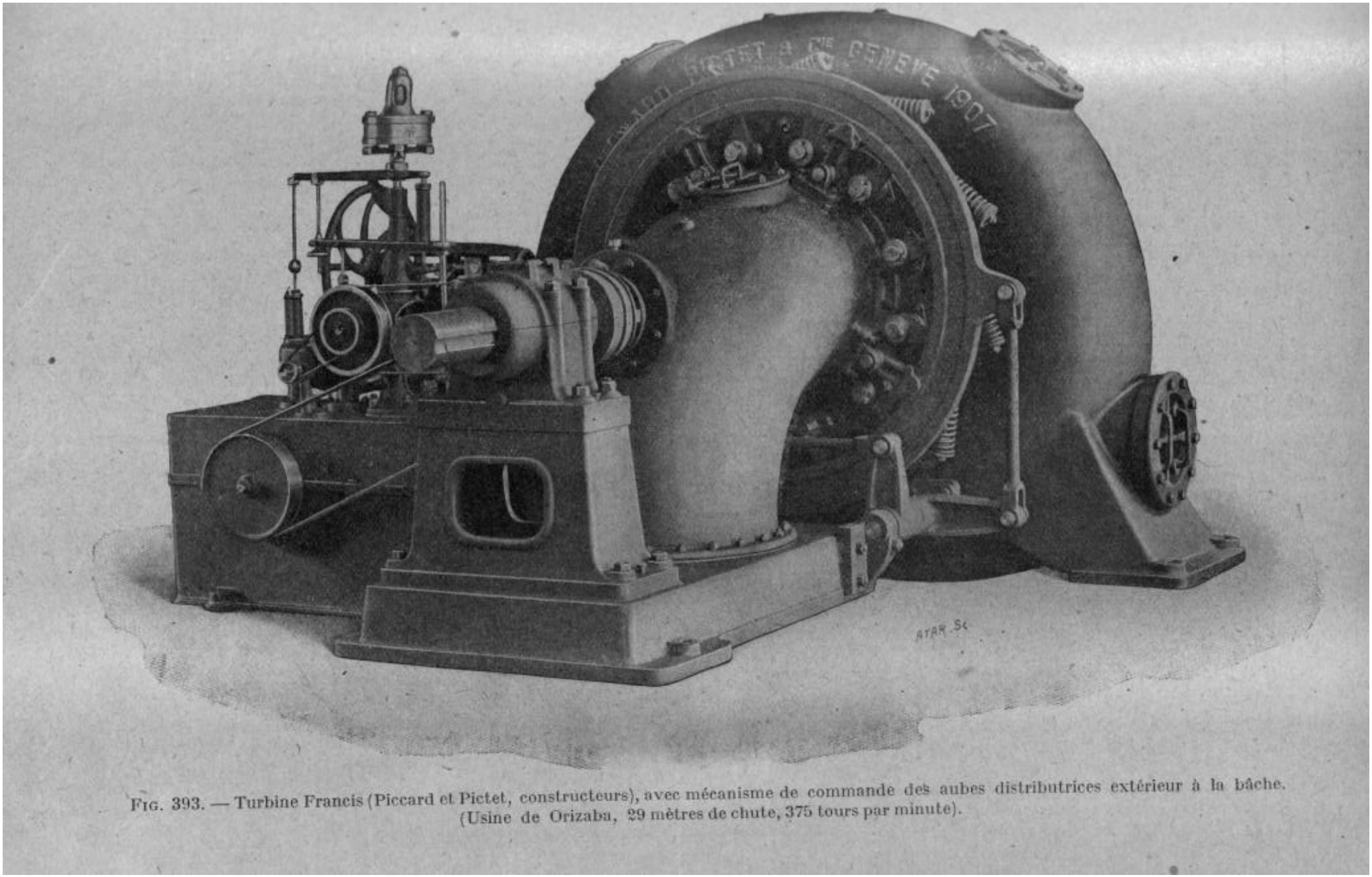


FIG. 393. — Turbine Francis (Piccard et Pictet, constructeurs), avec mécanisme de commande des aubes distributrices extérieur à la bâche. (Usine de Orizaba, 29 mètres de chute, 375 tours par minute).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

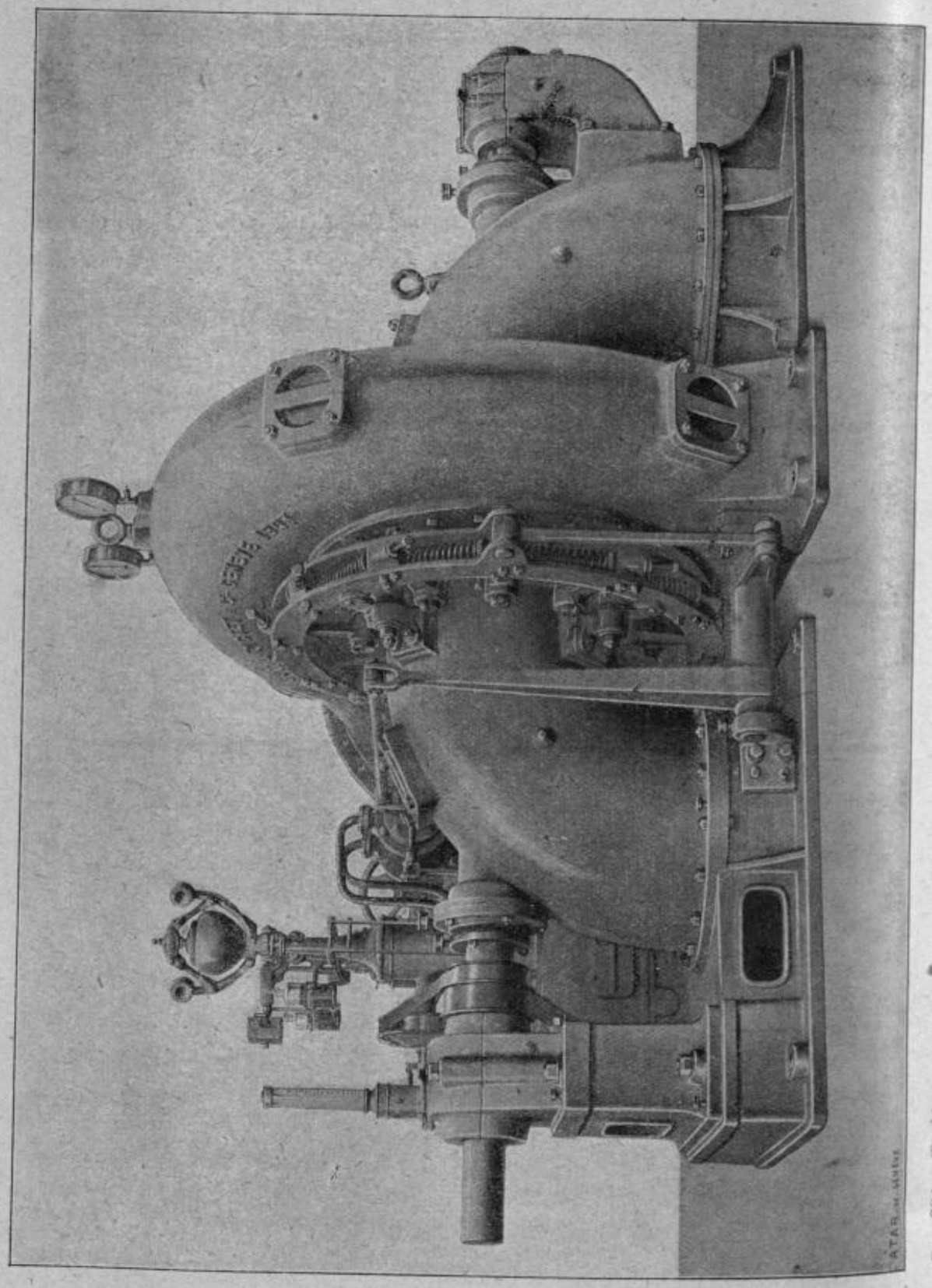


Fig. 394.— Turbine centripète Piccard et Pictet de 375 HP, à aspiration et introduction totale. (Usine du Fier, chute 18m,50, 430 tours).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour une basse chute la turbine jumelée est placée au fond d'une chambre d'eau ouverte.

Lorsque le sol de l'usine est trop haut par rapport au niveau d'aval pour permettre l'emploi d'une turbine à axe horizontal, on utilise des turbines à axe vertical. Tous les systèmes de turbines centripètes à axe horizontal sont employables, mais presque toujours les arbres sont annulaires. Les turbines centripètes à grand débit dites « coniques » n'ont pas répondu aux espérances qu'on en attendait. (Installations de Cusset et de Chères).

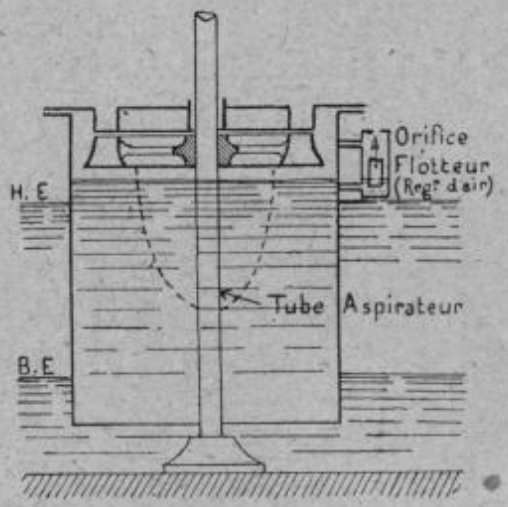


FIG. 395.

On place donc la turbine au-dessus des plus hautes eaux (*fig.*395) afin de pouvoir employer toutes les sortes de turbines et de les faire tourner dans l'air, dont le frottement contre la roue mobile est très faible. Pour que la turbine tourne dans l'air, on maintient au sommet du tube un matelas d'air d'épaisseur suffisante, en profitant de ce que la dépression permet à l'air atmosphérique de pénétrer dans le tube par un orifice qu'un flotteur peut obstruer, lorsque le matelas d'air tend à augmenter, et ouvrir, quand il tend à diminuer.

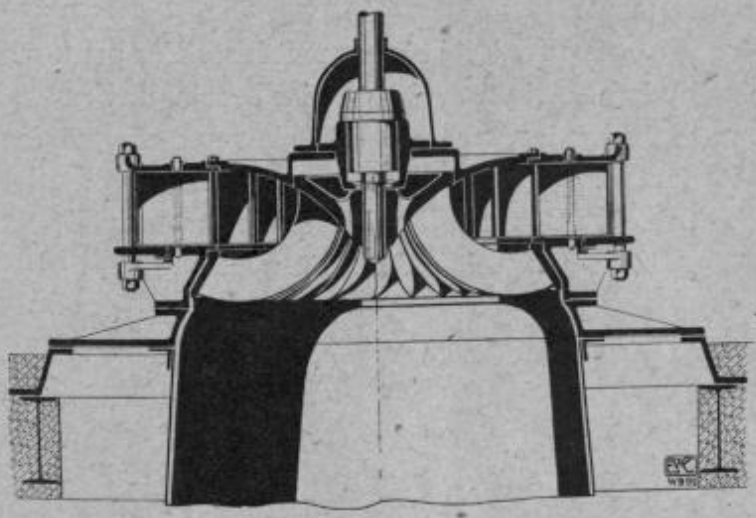


FIG. 396.

La maison Escher Wyss, de Zurich, s'est fait une spécialité de turbines Francis verticales, centripètes, fonctionnant sous chute et débit très variables avec un rendement élevé, et en outre à vitesses élevées favorisant l'attaque directe des alternateurs (*fig.* 396 et 397).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La consommation d'eau augmente si la vitesse devient plus grande, la chute et l'ouverture du distributeur restant constantes et que par conséquent la consommation d'eau à la turbine diminue moins que la chute, la vitesse restant constante. La stabilité de marche est assurée entre de grandes limites de la hauteur de la chute. L'emploi de cette turbine est avantageux dans les installations à basse chute où cette dernière varie considérablement. Elle est appelée à remplacer la disposition à plusieurs roues à axe vertical, puisqu'une seule roue exécute le même genre de travail. Son emploi est aussi indiqué dans les installations avec chutes moyennes.

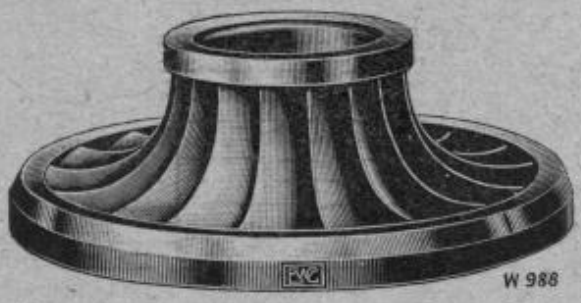


FIG. 397

La maison Escher Wyss applique avec succès ses turbines Francis à des hauteurs de chute qu'on ne croyait possibles qu'avec les roues tangentielles. Ainsi pour la chute d'Oo, cette firme a installé quatre turbines de 6.200 chevaux tournant à 1.500 tours et, aux usines hydroélectriques du Pic inférieur et du Pic supérieur, respectivement des turbines de 2.280 chevaux tournant à 1.000 tours et de 3.280 chevaux à la vitesse de 1.000 tours également.

Des turbines de ce type ont été récemment installées par la ville de Toulouse à l'usine hydroélectrique créée pour les besoins de l'arsenal. L'installation comporte trois récepteurs de 675 chevaux chaque fonctionnant sous $3^m,25$ de hauteur de chute, 20 mètres cubes de débit, à la vitesse de 833 tours. A l'usine du Bazacle, il existe quatre turbines de 730 chevaux tournant à 107,2 tours sous $4^m,70$ de hauteur de chute.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TURBINES FRANCIS SIMPLES EN CHAMBRE D'EAU A AXE HORIZONTAL

SÉRIE COURANTE

ÉTABLISSEMENTS PICCARD-PICTET ET NEYRET-BEYLIER

H = Chute en mètres — Q = Débit en litres par seconde — N = Puissance en chevaux
n = Nombre de tours par minute

MODÈLE N°	H	2 m.	2m,50	3 m.	3m,50	4m,00	5m,00	6m,00	7m,00	8m,00	10m,00
200	Q =	106	118	130	140	150	167	183	198	212	237
	N =	2.1	2.9	3.8	4.8	5.9	8.2	10.8	13.6	16.7	23.4
	n =	488	545	600	645	690	770	845	910	975	1090
250	Q =	153	171	187	202	216	242	264	286	305	342
	N =	3	4.25	5.6	7	8.6	12	15.7	19.8	24.3	34
	n =	407	455	500	540	575	645	705	760	815	910
290	Q =	224	250	274	295	316	350	385	420	415	500
	N =	4.5	6.25	8.2	10.3	12.6	17.5	23	29.5	35.5	50
	n =	337	375	410	445	475	530	585	630	675	750
350	Q =	325	365	400	430	460	325	565	610	650	730
	N =	6.5	9.1	12	15	18.4	25.8	34	42.5	52	73
	n =	279	310	340	370	395	440	480	520	555	620
425	Q =	480	540	590	635	680	760	830	900	960	1075
	N =	9.7	13.6	17.8	22.3	27.3	38.2	50	63.5	77.5	108
	n =	229	256	280	303	325	360	395	430	460	510
500	Q =	665	745	815	880	940	1050	1150	1240	1330	1490
	N =	13.4	18.7	24.5	31	38	53	69.5	87.5	107	150
	n =	195	218	239	258	275	310	340	365	390	435
575	Q =	875	980	1070	1160	1240	1380	1520	1640	1750	1970
	N =	17.7	24.8	32.5	41	50	70	92	116	142	200
	n =	170	190	208	224	240	268	295	315	340	380
650	Q =	1130	1260	1380	1500	1600	1780	1940	2120	2250	2520
	N =	23	32	39	53.5	65	90	118	150	182	255
	n =	150	167	183	198	212	237	260	280	300	335
725	Q =	1400	1570	1720	1850	1970	2200	2420	2620	2800	3130
	N =	28.5	40	52.5	66	80	112	148	187	228	320
	n =	134	150	164	178	190	212	232	250	268	300
800	Q =	1700	1900	2080	2250	2400	2680	2940	3180	3400	3800
	N =	34.5	48.5	64	80	98	137	180	227	278	390
	n =	122	136	150	162	173	193	212	228	245	273
900	Q =	2160	2420	2650	2860	3060	3420	3750	4050	4300	4850
	N =	44.5	62	82	103	126	175	230	290	355	500
	n =	109	121	133	144	154	172	188	204	218	243
1000	Q =	2660	2970	3250	3500	3750	4200	4600	5000	5300	5950
	N =	55	76	100	126	154	215	285	360	435	610
	n =	97	109	120	129	138	154	169	182	195	218
1100	Q =	3200	3590	3930	4250	4550	5050	5550	6000	6400	7200
	N =	66	93	122	154	188	260	345	435	530	745
	n =	89	100	109	118	126	141	154	166	178	200

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TURBINES FRANCIS SIMPLES EN CHAMBRE D'EAU A AXE VERTICAL

SÉRIE COURANTE

ÉTABLISSEMENTS PICCARD-PICTET ET NEYRET-BEYLIER

H = Chute en mètres. Q = Débit en litres par sec. N = Puissance en HP.
n = Nombre de tours par min.

MODÈLE N°	H	1m,00	1m,25	1m,50	1m,75	2m,00	2m,50	3m,00	3m,50	4m,00	5m,00	6m,00
500	Q	470	525	575	620	665	745	815	880	940	1050	1150
	N	4.7	6.6	8.6	10.9	13.4	18.7	24.5	31	38	53	69.5
	n	138	154	169	180	195	218	239	258	275	310	340
575	Q	630	690	760	820	875	980	1070	1160	1240	1380	1520
	N	6.2	8.7	11.4	14.3	17.7	24.8	32.5	41	50	70	92
	n	120	135	148	160	170	190	208	225	240	268	295
650	Q	800	895	980	1060	1130	1260	1380	1500	1600	1780	1940
	N	8	11.2	14.7	17.5	23	32	39	53.5	65	90	118
	n	106	119	130	140	150	167	183	198	212	237	260
725	Q	990	1100	1200	1300	1400	1570	1720	1850	1970	2200	2420
	N	10	14	18,5	23	28.5	40	52.5	66	80	112	148
	n	95	103	116	125	134	150	164	178	190	212	232
800	Q	1200	1340	1470	1600	1700	1900	2080	2250	2400	2680	2940
	N	12	16.8	22	28	34.5	48,5	64	80	98	137	180
	n	86	96	105	114	122	136	150	162	173	193	212
900	Q	1530	1710	1870	2020	2160	2420	2650	2860	3060	3420	3750
	N	15.4	21.5	28.5	36	44.5	62	82	103	126	175	230
	n	77	86	94	102	109	121	133	144	154	172	188
1000	Q	1880	2100	2300	2500	2660	2970	3250	3500	3750	4200	4600
	N	19	27	35	45	55	76	100	126	154	215	285
	n	69	77	84	91	97	109	120	129	138	154	169
1100	Q	2275	2530	2760	3000	3200	3590	3930	4250	4550	5050	5550
	N	23	32	43	54	66	93	122	154	188	260	345
	n	63	70	78	83	89	100	109	118	126	141	154
1200	Q	2700	3020	3300	3570	3820	4250	4680	5050	5400	6000	6600
	N	28	39	51.5	67	79	110	145	185	225	315	415
	n	57	64	70	75	80	90	100	108	115	128	140
1300	Q	3125	3500	3850	4150	4450	4950	5450	5900	6250	7000	7700
	N	32.5	45.5	60	78	93	129	170	215	260	365	480
	n	59	59	65	70	85	84	92	99	106	118	130
1400	Q	3600	4050	4450	4750	5100	5700	6250	6850	7200	8100	8900
	N	37.5	52.5	70	87	106	150	195	250	300	420	550
	n	49	55	60	65	69	77	85	92	99	110	120
1500	Q	4150	4650	5100	5470	5850	6550	7150	7750	8350	9300	10200
	N	43	60	80	100	122	170	225	285	345	485	640
	n	46	50	55	60	65	72	80	86	92	102	112

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TURBINES FRANCIS DOUBLES EN CHAMBRE D'EAU A AXE HORIZONTAL

SÉRIE COURANTE

ÉTABLISSEMENTS PICCARD-PICTET ET NEYRET-BEYLIER

H = Chute en mètres. Q = Débit en litres par seconde. N = Puissance en HP.
n = Nombre de tours par min.

MODÈLE N°	H =	2m,00	2m,50	3m,00	3m,50	4m,00	5m,00	6m,00	7m,00	8m,00	10m,00
290	Q	448	500	548	590	632	700	770	840	890	1000
	N	9	12.5	16.4	20.6	25.2	35	46	59	71	100
	n	337	375	410	445	475	530	585	630	657	750
350	Q	650	730	800	860	920	1050	1130	1220	1300	1460
	N	13	18.2	24	30	36.8	51.6	68	85	104	146
	n	279	310	340	370	395	440	480	520	555	620
425	Q	960	1080	1180	1270	1360	1520	1660	1800	1920	2150
	N	19.4	27.2	35.6	44.6	54.6	76.4	100	127	155	216
	n	229	256	280	303	325	360	395	430	460	510
500	Q	1330	1490	1630	1760	1880	2100	2300	2480	2660	2980
	N	26.8	37.4	49	62	76	106	139	175	214	300
	n	195	218	239	258	275	310	340	365	390	435
575	Q	1750	1960	2140	2320	2480	2760	3040	3280	3500	3940
	N	35.4	49.6	65	82	100	140	184	232	284	400
	n	170	190	208	224	240	268	295	315	340	380
650	Q	2260	2520	2760	3000	3200	3560	3880	4240	4500	5040
	N	46	64	78	107	130	180	236	300	364	510
	n	150	167	183	198	212	237	260	280	300	335
725	Q	2800	3140	3440	3700	3940	4400	4840	5240	5600	6260
	N	57	80	105	132	160	224	296	374	456	640
	n	134	150	164	178	190	212	232	250	268	300
800	Q	3400	3800	4160	4500	4800	5360	5880	6360	6800	7600
	N	68	97	128	160	196	274	360	544	556	780
	n	122	136	150	162	173	193	212	228	245	273
900	Q	4320	4840	5300	5720	6120	6840	7500	8100	8600	9700
	N	88	122	164	206	252	350	460	580	710	1000
	n	109	121	133	144	154	172	188	204	218	243
1000	Q	5320	5940	6500	7000	7500	8400	9200	10000	10600	11900
	N	89	152	200	252	308	430	570	720	870	1220
	n	97	109	120	129	138	154	169	182	195	218
1100	Q	6400	7180	7860	8500	9100	10100	11100	12000	12800	14400
	N	132	186	244	308	376	520	690	870	1600	1490
	n	89	100	109	118	126	141	154	166	178	200

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

130. Tubes d'aspiration. — Cette disposition dite *Jonval*, mais plus connue de nos jours sous la désignation de tube aspirateur, s'applique lorsqu'on a intérêt à établir la turbine au-dessus du niveau d'aval (*fig.* 398). A cet effet le distributeur est relié, par l'intermédiaire d'une enveloppe circulaire, à un tuyau coudé qui débouche horizontalement dans le fond du canal de fuite. Une vanne v sert pour régler la dépense d'eau, pour l'amorçage et aussi pour arrêter la turbine.

La pression en a' (*fig.* 365), à la sortie de l'aube mobile, a pour expression :

$$p_1 = p_a - \theta h'.$$

Pour qu'il n'y ait ni entrée ni sortie d'eau par le jeu existant entre la couronne fixe et la couronne mobile, la turbine doit remplir la condition :

$$\frac{p_0}{\theta} = \frac{p_a}{\theta} - h'.$$

Par suite, on a :

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{p_a}{\theta} + h - \frac{p_a}{\theta} + h' = H.$$

La turbine fonctionne ainsi comme si la couronne mobile était établie exactement au niveau d'aval. Mais, pour qu'il en soit toujours ainsi, il faut que le niveau d'aval ne descende pas au-dessous du bord supérieur de l'orifice du tuyau, sinon la pression atmosphérique ne serait plus à même de pouvoir faire équilibre à la colonne liquide. La relation (1) montre que la colonne d'eau h'' doit être notablement inférieure à la pression atmosphérique, car, si $\frac{p_1}{\theta}$ était par trop faible, l'air dissous dans l'eau se dégagerait, en réduisant la chute utilisable.

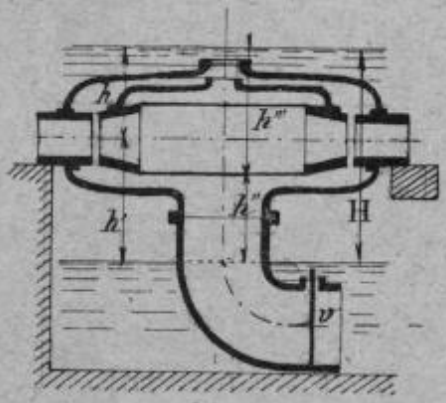


FIG. 398.

Grâce à cette disposition, les récepteurs hydrauliques peuvent être installés dans le hall des machines électriques ou dans une galerie spéciale, comme à Jonage (§ 308). A Chèvres (§ 298), il a été fait une application du dispositif Jonval, à l'effet d'avoir une puissance invariable. La turbine du haut occupe l'orifice supérieur d'un tube de succion oblique et reste fermée pendant l'hiver.

Au début de l'année 1907, la ville de Genève avait ouvert un concours pour la présentation de projets réalisant les meilleures conditions d'utilisation de la force motrice du Rhône, aux environs de la Plaine, près de la frontière française.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Parmi ces projets, celui de M. Clémens Herschell, de New-York, préconisait l'emploi d'un appareil, que son auteur appelle *Fall increascr*, et qui consiste en un gros tube biconique, tout à fait analogue à un tube de Venturi, percé de trous, et disposé dans le coursier de sortie de l'eau des turbines. L'eau est amenée dans ce tube par une prise faite dans le réservoir amont créé par l'usine qui forme en même temps barrage. Par suite de l'augmentation de vitesse de l'eau dans la partie rétrécie du tube, il se produit une diminution de pression. Si cette pression tombe au-dessous de celle qui correspond à la hauteur d'eau du niveau d'aval au-dessus de l'axe du tube, il se produit une dépression sous la turbine, d'où augmentation artificielle de la chute, à la condition, bien entendu, que soit fermée la vanne d'arrêt du tuyau ordinaire de décharge. Ce système a été expérimenté à la station d'essais hydrauliques de Holyoke, et a donné de bons résultats. Il a été déclaré très ingénieux par le jury, mais néanmoins n'a pas été adopté pour l'usine à créer, sous prétexte qu'il n'avait pas suffisamment la sanction de la pratique.

131. Application numérique. Calcul des turbines de l'usine de Jonage (Turbine radiale centripète). — Les conditions principales à réaliser par le constructeur étaient : un rendement de 76 0/0, quelle que fût la hauteur de chute et un nombre constant de tours, quelles que fussent la hauteur de chute et les variations de la résistance.

L'énergie E disponible ou énergie totale fournie par la chute a pour valeur :

$$E = T_u + T_f + \frac{Q}{g}\frac{V^2}{2};$$

T_u travail utile comprenant le travail absorbé par les résistances du mécanisme ; T_f travail absorbé par les résistances hydrauliques ; V vitesse de l'eau en sortant du tuyau d'échappement et Q le débit.

Soient (*fig.* 399) V_1 la vitesse absolue de l'eau à la sortie de la roue directrice, V_2 celle à la sortie de la roue motrice, v_1 la vitesse relative à l'entrée de la roue motrice et v_2 la même à la sortie de la roue motrice, w_1 la vitesse d'entraînement à l'entrée de la roue motrice et w_2 la même à la sortie de la roue motrice, a l'angle de la direction de la vitesse absolue à l'entrée de la roue motrice avec le rayon correspondant, a_1 l'angle de la direction de la vitesse relative à l'entrée de la roue motrice avec le rayon correspondant, et enfin a_2 l'angle de la direction de la vitesse relative à la sortie de la roue motrice avec le rayon correspondant.

Les deux conditions, entrée tangentielle de l'eau et sortie radiale, se traduisent par les équations de condition suivantes :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Entrée tangentielle de l'eau :

$$v_1 \cos a_1 = V_1 \cos a \; ; \; w_1 = V_1 \sin a - v_1 \sin a_1 \; ;$$

$$V_1^2 = v_1^2 + w_1^2 + 2 v_1 w_1 \sin a_1 \; ; \qquad \frac{w_1}{v_1} = \frac{\sin (a - a_1)}{\cos \alpha}.$$

Sortie radiale :

$$w_2 = v_2 \sin a_2 \text{ et } V_2 = v_2 \cos a_2.$$

La condition de continuité d'écoulement est fournie par l'équation :

$$V_1 s_1 = v_2 s_2.$$

s_1 section des guides à la sortie, s_2 section des aubes.

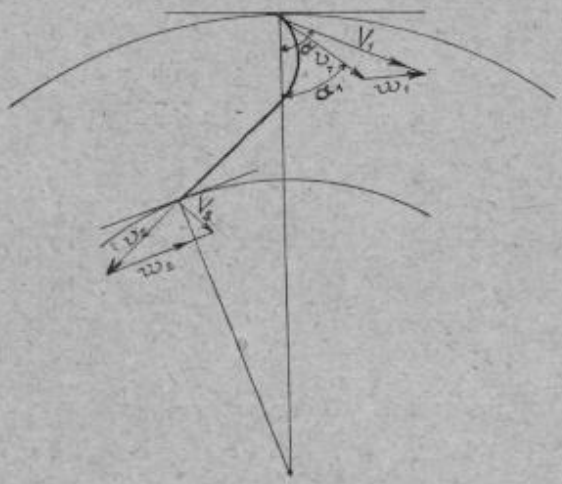


Fig. 399.

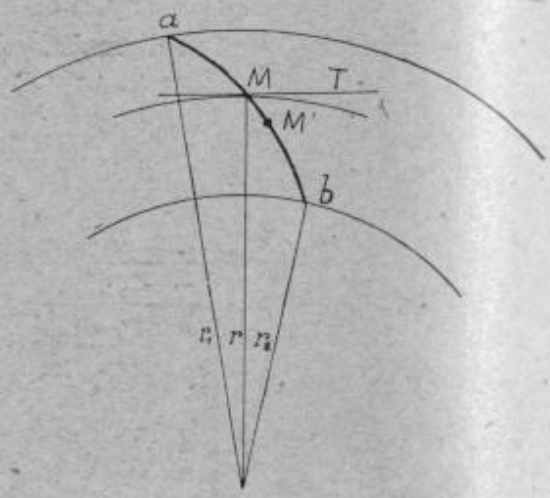


Fig. 400.

Pour déterminer la vitesse d'écoulement à la sortie des guides, dans la pratique on part de l'équation :

$$R = \frac{1}{gh} \cdot \frac{r_1}{r_2} \frac{s_1}{s_2} \sin a \sin a_2 V_1^2$$

d'où :

$$V_1 = \sqrt{\frac{R \times gh}{\frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{r_1}{r_2} \sin a \sin a_2}};$$

R rendement, r_1 et r_2 rayons correspondant aux extrémités de la trajectoire ab d'une masse m traversant les aubes (*fig.* 400).

On prend pour R une valeur déterminée par l'expérience sur des turbines semblables, valeur voisine de 0,80 pour de bonnes turbines et on a alors :

$$V_1 = 0{,}90 \sqrt{\frac{gh}{\frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{r_1}{r_2} \sin a \sin a_2}}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Posons pour simplifier :

$$K_1 = 0{,}90 \sqrt{\frac{1}{2\frac{s_1}{s_2}\frac{r_1}{r_2}\sin a \sin a_2}},$$

on a :

$$V_1 = K_1 \sqrt{2gh};$$

K_1 varie suivant les turbines de 0,50 à 1.

La vitesse angulaire se déduit de la vitesse d'écoulement : on trouve :

$$W_1 = \frac{r_1}{r_2}\frac{s_1}{s_2}\sin a_2 V_1 = \frac{r_1}{r_2}\frac{s_1}{s_2}\sin a_2 K_1 \sqrt{2gh}.$$

Posons pour simplifier :

$$K_2 = K_1 \frac{s_1}{s_2}\frac{r_1}{r_2}\sin a_2 ; \quad W_1 = K_2 \sqrt{2gh};$$

K_2 varie de $0^m,40$ à $0^m,80$.

Pour le rendement on a :

$$R = \frac{T_u}{E} = \frac{w_1 V_1 \sin a}{gh} = \frac{w_1 u_1}{gh};$$

E, énergie disponible ou énergie totale fournie par la chute, T_u travail utile comprenant le travail absorbé par les résistances du mécanisme, a_1 la composante de la vitesse absolue de la molécule m à l'entrée de l'aube.

Appelons l la largeur des aubes de la roue directrice à la sortie ; la section est obstruée par le passage de la cloison des aubes de la roue mobile (*fig.* 401).

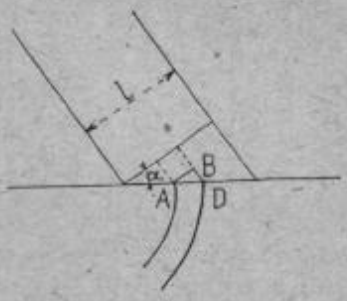


FIG 401.

Soit e l'épaisseur de la cloison des aubes de la roue mobile, la largeur à déduire sera : AB = AD cos $a = e \cos a$.

De plus, l'équation de continuité suppose l'écoulement par filets parallèles. En raison de la courbure des aubes, cette condition n'est pas absolument réalisée ; il y a contraction de la veine liquide, ce qui équivaut à une diminution de la section des aubes.

On en tient compte en multipliant $(l - e \cos a)$ par un coefficient généralement égal à 0,90.

La section des aubes de la roue mobile doit aussi subir la correction d'un coefficient de contraction égal à 0,90.

En prenant comme données pour le calcul des turbines de Jonage les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chiffres suivants, on arrive aux résultats consignés dans le tableau ci-dessous :

ROUE DIRECTRICE
- Couronne inf. $l = 62$; $e = 340$ 32 aubes
- Couronne moy. $l = 62$; $e = 340$ 26 aubes
- Couronne sup. $l = 61$; $e = 320$ 20 aubes

a moyenne $= 75°$; $\sin a = 0{,}965926$; $\cos a = 0{,}258819$;

ROUE MOTRICE
- Couronne inf. $l = 56$; $e = 340$; $r_1 = 1.064$; $r_2 = 890$
- Couronne moy. $l = 55$; $e = 340$; $r_1 = 881$; $r_2 = 707$
- Couronne sup. $l = 54$; $e = 320$; $r_1 = 704$; $r_2 = 539$

a_1 moyenne $= 64°$; $\sin a_2 = 0{,}898794$.

Admission par les deux étages inférieurs entièrement découverts :

$$s_1 = 0{,}90\,(58 \times 340 \times 62 - 58 \times 340 \times 23 \times 0{,}259) = 994.600^{mm2}.$$
$$s_2 = 0{,}90\,(32 \times 340 \times 56 + 26 \times 340 \times 55) = 986.000^{mm2}.$$

Admission pour les trois étages entièrement découverts :

$$s_1 = 0{,}90\,[(58 \times 340 \times 62 + 20 \times 320 \times 61) - (58 \times 340 \times 23 + 20 \times 320 \times 23)\,0{,}259] = 1.311.700^{mm2}.$$
$$s_2 = 0{,}90\,(32 \times 340 \times 62 + 26 \times 340 \times 55 + 20 \times 320 \times 54) = 1.296.000^{mm2}.$$

Tableau des résultats des calculs

h Hauteur de chute	S_1	S_2	$\frac{S_1}{S_2}$	$\frac{r_1}{r_2}$	K_1	K_2	V_1	Q	Nombre de tours par minute	Tu Travail moteur y compris résistance du mécanisme	R Rendement $\frac{Tu}{Qh}$	REMARQUE
m	m²	m²						m³		HP.		
14,00	0,99	0,98	1,01	1,220	0,614	0,680	10,17	10,115	111	1552	0,810	Admission par les 2 étages inférieurs entièrement découverts
11,00	1,13	1,29	1,01	1,246	0,608	0,688	8,93	11,713	109	1387	0,80	Dito par les 3 étages
10,00	1,31	1,29	1,01	1,246	0,608	0,688	8,51	11,160	104	1200	0,805	
9,00	1,31	1,29	1,01	1,246	0,608	0,688	8,08	10,600	99	1030	0,810	

Pour tenir compte des pertes du mécanisme et obtenir l'énergie disponible sur l'arbre de la turbine, il faut diminuer le rendement, ainsi obtenu, de 4 0/0. Le rendement effectif s'abaisse donc entre 76 et 77 0/0, chiffre imposé et garanti par le constructeur.

IV. — TURBINES PARALLÈLES

132. Fonctionnement des turbines parallèles ou axiales. — Dans les turbines parallèles ou à libre déviation ou à action, les filets liquides se meuvent en restant à la même distance de l'axe, c'est-à-dire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que l'eau agit en suivant les génératrices d'un cylindre dont l'axe coïncide avec l'axe de la turbine. Le débit, qui est proportionnel à la vitesse de l'eau à la sortie de la couronne mobile, varie inversement à la vitesse de rotation, condition très avantageuse pour une allure régulière du moteur hydraulique.

Le type original de ce genre de récepteur est la turbine *Fontaine* à axe vertical dite « à admission latérale ». Il se compose schématiquement (*fig.* 402) de deux couronnes superposées. La couronne mobile AA est située dans le bas de la chambre d'eau, dont l'entrée est précédée d'une vanne de garde ; cette couronne est reliée à l'arbre de la turbine par un crossillon fondu ou rapporté. Elle se fait généralement en fonte, quelquefois en bronze lorsque le diamètre est très réduit ; ses aubes sont le plus souvent venues de fonte, mais lorsque les eaux contiennent du sable, on les fait en tôle d'acier. Le nombre des aubes de la couronne fixe est généralement plus grand que celui des aubes de la couronne mobile, pour éviter des oscillations pendulaires dans l'admission. La couronne directrice BB est boulonnée sur le fond de la chambre d'eau. La roue mobile est calée sur un arbre creux qui est lui-même suspendu par un pivot supérieur tournant dans une crapaudine fixée sur le fond du canal de fuite. Le rattrapage de jeu entre couronnes se fait à l'aide du dispositif Fourneyron, c'est-à-dire par la manœuvre d'un levier sur lequel est placée la crapaudine ou, dans les dispositifs à arbre central creux, on rend variable la position de ce dernier par rapport au pivot, à l'aide d'un filetage et d'un écrou. En tournant l'écrou, on relève l'arbre creux et l'on diminue le jeu entre les deux couronnes. La turbine est munie d'un système de vannage constitué par des diaphragmes verticaux placés derrière chacune des aubes directrices. Ces diaphragmes ou vannes sont suspendus par des tiges qui en assurent la manœuvre. Ce genre de récepteur fonctionne noyé, mais ne peut s'accommoder de l'admission partielle.

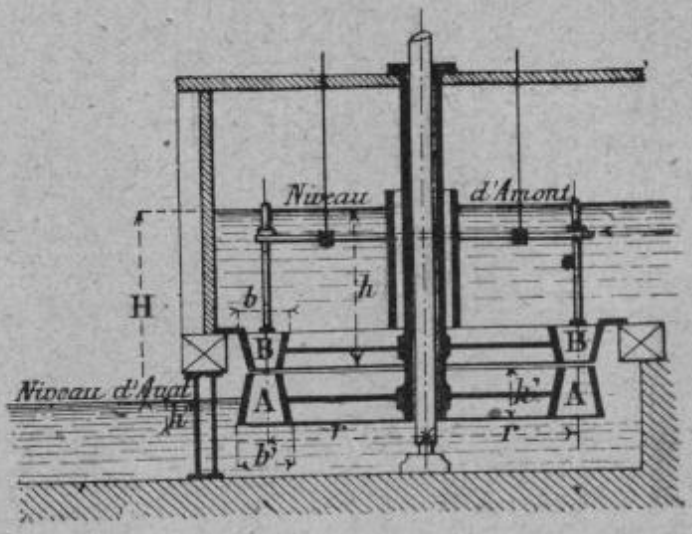


FIG. 402.

Le mécanisme de commande est placé au-dessus du plancher de la chambre d'eau. On peut donc, en ouvrant plus ou moins les vannes, arrê-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

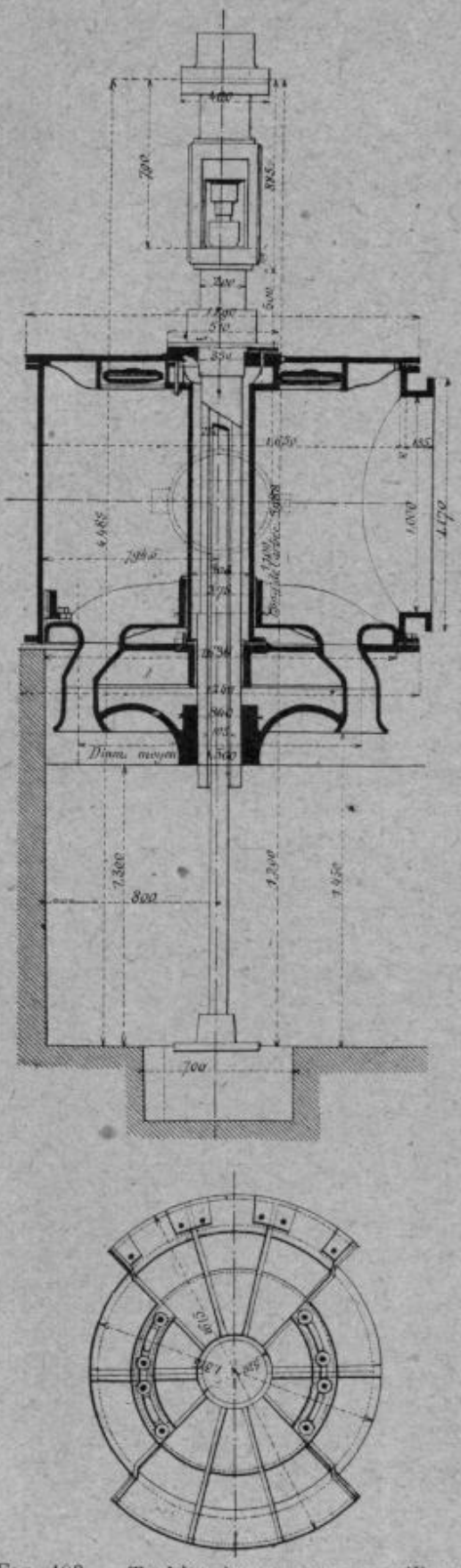


Fig. 403. — Turbine à cuve, avec papillon croisé équilibré, système Schabaver.

ter ou régler le passage de l'eau d'amont à travers les aubages de la turbine. Celle-ci est noyée, et la hauteur de chute $H = h + h' - h''$; lorsque la roue tourne à l'air libre, la chute H est mesurée du bief amont au plan inférieur de la roue mobile.

Il y a à considérer le cas où le distributeur recouvre complètement la roue et celui où le distributeur n'existe que sur une fraction de la roue. Pour le débit maximum, tous les canaux du distributeur doivent être ouverts.

Si le niveau dans le bief aval est variable, on installe la turbine de façon que le plan inférieur de la couronne mobile soit toujours un peu au-dessus du niveau le plus élevé de l'eau dans le bief aval.

La turbine Fontaine est d'une installation facile et, quels que soient les obstacles qui se sont accumulés sur le distributeur, le système fonctionne toujours et permet toujours d'arrêter le moteur ; c'est un avantage sérieux lorsque les rivières charrient de nombreux détritus.

Ce genre de turbines a son emploi marqué dans les installations avec chutes d'eau peu élevées, alors que le débit est très considérable. Jusqu'à 2 mètres de chute et lorsque l'on ne recherche pas un moteur à vitesse très élevée, l'installation est très économique. Le tableau ci-après donne la force en chevaux, le diamètre, le poids de turbines Fontaine pour des débits variant de 30 litres à 6.000 litres à la seconde et pour des chutes de 0m,75 à 50 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dépense d'eau par seconde en mètres cubes		CHUTE EN MÈTRES																					
		0,75	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40	50
0,03	Chevaux	»	»	»	»	»	»	1,5	2	2	2	3	3	5	6	9	13	15
	Diamètre	»	»	»	»	»	»	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
	Poids	»	»	»	»	»	»	900	900	900	900	900	1.000	1.200	1.300	1.500	2.000	2.500
0,062	Chevaux	»	»	»	»	»	2,2	3	4	4	5	6	8	9	13	19	25	31
	Diamètre	»	»	»	»	»	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
	Poids	»	»	»	»	»	1.000	1.200	1.200	1.200	1.250	1.300	1.380	1.500	1.700	2.200	3.000	3.800
0,125	Chevaux	»	»	»	3,3	3,7	5	6	8	9	10	11	13	19	25	38	50	62
	Diamètre	»	»	»	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
	Poids	»	»	»	900	1.000	1.200	1.500	1.600	1.700	1.750	1.800	2.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000
0,25	Chevaux	1,9	2,5	3,75	5	7,5	10	12	15	18	20	23	25	38	50	75	100	125
	Diamètre	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0
	Poids	2.000	1.500	1.600	1.800	2.000	2.500	3.000	3.000	3.200	3.400	3.600	3.800	4.200	5.000	7.000	9.000	11.000
0,5	Chevaux	3,8	5	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	75	100	150	200	»
	Diamètre	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	»
	Poids	2.300	3.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.500	6.500	7.000	7.500	8.000	9.000	10.000	12.000	14.000	»
0,75	Chevaux	5,6	7,5	11,25	15	22	30	37	45	50	60	67	75	113	150	225	»	»
	Diamètre	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	»	»
	Poids	3.000	3.500	3.500	4.000	4.500	5.000	5.000	7.000	8.000	9.000	10.000	11.000	12.000	13.000	14.000	»	»
1,0	Chevaux	7,5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	»	»	»
	Diamètre	1,7	1,7	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	»	»	»
	Poids	6.000	7.500	5.500	6.000	6.000	6.500	9.000	8.000	9.000	10.000	11.000	12.000	14.000	16.000	»	»	»
1,5	Chevaux	11,3	15	22	30	45	60	75	90	105	120	135	150	225	»	»	»	»
	Diamètre	2,0	1,7	1,7	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	»	»	»	»
	Poids	10.000	9.000	8.500	7.000	7.500	8.000	9.000	10.000	10.000	11.000	12.000	13.000	15.000	»	»	»	»
2	Chevaux	15	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180	200	»	»	»	»	»
	Diamètre	2,2	2,0	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	»	»	»	»	»
	Poids	13.000	11.000	9.000	10.000	9.000	9.500	10.000	11.000	10.000	12.000	13.000	15.000	»	»	»	»	»
3	Chevaux	22,5	30	45	60	90	120	150	180	210	240	270	»	»	»	»	»	»
	Diamètre	2,3	2,0	2,0	1,7	1,7	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,4	»	»	»	»	»	»
	Poids	16.000	14.000	13.000	12.000	12.500	12.000	12.500	13.000	14.000	15.000	16.000	»	»	»	»	»	»
4	Chevaux	30	40	60	80	120	160	200	240	280	320	»	»	»	»	»	»	»
	Diamètre	2,7	2,5	2,3	2,0	2,0	2,0	2,0	1,7	1,7	1,7	»	»	»	»	»	»	»
	Poids	18.000	17.000	15.000	14.000	15.000	16.000	17.000	18.000	18.000	21.000	»	»	»	»	»	»	»
5	Chevaux	37,5	50	75	100	150	200	250	300	350	»	»	»	»	»	»	»	»
	Diamètre	3,0	2,7	2,5	2,3	2,3	2,0	2,0	1,7	1,7	»	»	»	»	»	»	»	»
	Poids	21.000	20.000	18.000	17.000	18.000	18.000	19.000	20.000	21.000	»	»	»	»	»	»	»	»
6	Chevaux	45	60	90	120	180	240	300	360	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Diamètre	3,3	3,0	2,7	2,5	2,5	2,3	2,0	2,0	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Poids	25.000	23.000	21.000	20.000	22.000	22.000	23.000	23.000	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 403) représente une turbine Fontaine construite par les établissements Schabaver, installée aux salines de Salies-du-Salat (Haute-Garonne), fonctionnant sous une chute de 11 mètres et développant une puissance de 158 HP à 117 tours sous un débit de 1.240 litres. Le rendement a été reconnu de 87,50 à pleine charge en marche dénoyée, et 0,78 en marche noyée.

On a, d'après une disposition connue, placé le distributeur au fond d'une cuve en fonte, à couvercle boulonné, et l'eau d'amont arrive par une conduite latérale. La section de la turbine a été calculée en comptant sur un coefficient de réduction de 0,80 au passage de l'eau dans le distributeur. Ce dernier est muni d'un vannage à papillon croisé équilibré, qui a permis de donner à la turbine des dimensions moins grandes qu'avec un vannage à papillon ordinaire.

Le constructeur a eu l'idée de donner à l'espace réservé à l'eau, dans la turbine, la forme théorique que doit affecter la veine liquide dans son passage à travers les aubes. Il a obtenu ce résultat en renflant convenablement les surfaces non travaillantes.

Le diamètre moyen de la turbine est de $1^m,30$ et sa vitesse de 117 tours par minute. Dans ces conditions, la vitesse due à la hauteur de chute est :

$$V = \sqrt{19,62 \times 11} = 14^m,70.$$

D'autre part la vitesse circonférencielle par seconde, sur le cercle moyen, égale :

$$\frac{4^m,08 \times 117}{60} = 7^m,95.$$

D'où le rapport entre la vitesse de la circonférence moyenne de la turbine et celle initiale de l'eau égale :

$$\frac{7^m,95}{14^m,70} = 0,548.$$

En donnant à l'aubage de cette turbine le développement convenable, on peut arriver avec la chute de 11 mètres à une force de 158 chevaux.

Dans les turbines *à action de Girard* ou à libre déviation, la lame d'eau sortant des directrices trouve entre les aubes un canal de large section obtenu par l'évasement des joues ; cette lame d'eau se dévie alors librement sur l'aube. La pression d'entrée a la même vitesse que la pression de sortie si les vitesses sont les mêmes dans les sections d'entrée et de sortie. Les joues de la couronne sont pourvues d'orifices ou évents percés sur la joue intérieure.

Les pressions d'entrée et de sortie peuvent avoir des valeurs différentes en faisant les sections d'entrée et de sortie différentes. On fait seulement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la section d'entrée plus grande que celle de sortie. Dans ce cas, les turbines sont à *réaction*. L'importance de cette dernière se mesure par le rapport $\varepsilon = \frac{h}{H}$ qui existe entre la pression à l'entrée, mesurée en hauteur d'eau h et la hauteur de chute effective H. Les turbines à action se prêtent à de grandes variations de débit sans que le rendement soit sensiblement affecté.

Pour de faibles débits et de grandes chutes, le rayon de la turbine peut devenir assez faible, de façon qu'il suffise de réduire le distributeur à une portion seulement de la couronne mobile.

La puissance des turbines parallèles diminue à mesure qu'elles fonctionnent noyées.

Les turbines à libre déviation conviennent pour les hautes chutes de montagne. Le rendement de ces turbines s'élève à 0,85 à pleine admission et atteint encore 0,75 avec une admission réduite. On loge les turbines dans un récipient fermé, et l'eau y est amenée depuis le canal supérieur par la conduite de pression. Dans ce cas, il est très important de faire intervenir, dans le calcul de la vitesse de l'eau à la sortie des aubes du distributeur, les résistances hydrauliques de l'eau à son entrée dans la roue mobile, données par les conditions de l'installation elle-même. Avec ces turbines, la valeur du rayon r n'est pas limitée ; on choisit celui-ci par la considération du nombre de tours que l'on se donne ou qui est imposé. Cependant les turbines radiales à admission partielle leur sont souvent préférées.

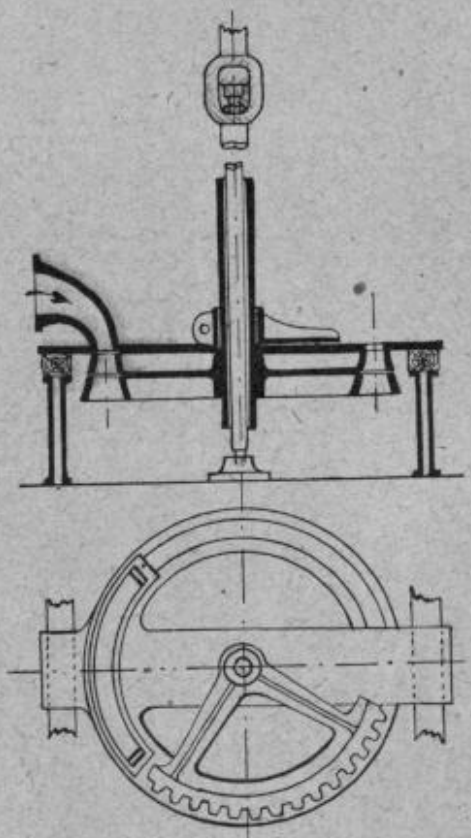


FIG. 404.

On sait que les dimensions d'une turbine sont d'autant plus faibles que la hauteur de chute est plus grande et le débit moins considérable. A l'effet de ne pas réduire la turbine à un diamètre trop petit en cas de très hautes chutes, et cela pour, d'une part, ne pas exagérer la vitesse de rotation de l'appareil et, d'autre part, éviter l'emploi d'orifices trop étroits, on n'alimente la turbine montée sur un arbre vertical que sur une fraction de sa couronne ou, autrement dit, on a recours à une alimentation partielle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

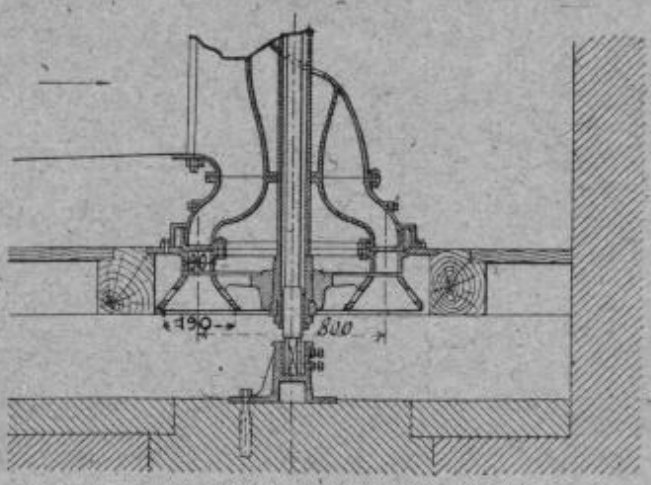


Fig. 405. — Alimentation à deux injections.

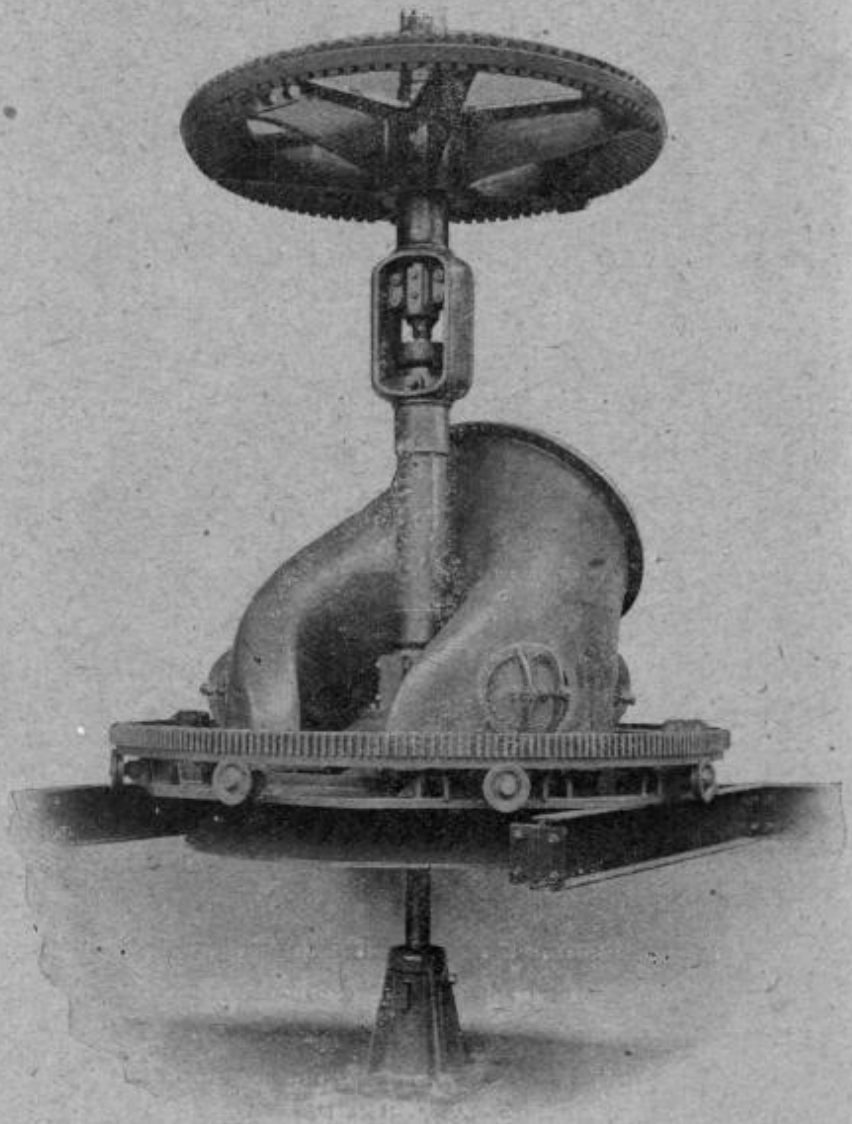


Fig. 406. — Turbine parallèle A. et H. Bouvier, vannage par vannettes horizontales. Pour chute de 3 à 16 mètres (1).

(1) La maison A. et H. Bouvier est maintenant connue sous la désignation B. Bouvier, Paul et Cie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le dispositif de vannage imaginé par Girard (*fig.* 404) consiste en un tiroir circulaire solidaire d'un secteur denté relié au moyen du distributeur. Le secteur engrène avec un pignon calé sur un arbre vertical commandé par un volant muni d'une manivelle.

L'alimentation partielle convient pour les hautes chutes et les petits débits.

Parfois on emploie deux injecteurs disposés symétriquement et occupant chacun $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{6}$ de la circonférence (*fig.* 405). On peut dans ce cas utiliser deux chutes différentes dans le même récepteur.

Lorsque la turbine affecte la disposition horizontale, le vannage partiel ne peut lui être appliqué, mais on peut, dans le cas de très hautes chutes, recourir à l'injection partielle, à la condition de faire plonger la roue mobile d'une quantité égale à la flèche de l'arc d'injection.

Les turbines à axe horizontal ne sont guère utilisées que pour les hautes chutes avec admission partielle, à cause du faible rendement que l'on obtient avec cette disposition, pour les basses chutes, même lorsque la turbine est munie d'un tube aspirateur.

Quoi qu'il en soit les turbines axiales ne s'emploient plus beaucoup dans les installations de montagnes ou de houille blanche, en raison de leur rendement pas très élevé et d'une certaine sujétion de surveillance. Cependant, dans les cas où l'eau est surabondante et où on peut prendre des dispositions pour des visites faciles et des réparations rapides, leur bas prix relatif est un argument intéressant à envisager.

133. Équation des turbines parallèles. — Les turbines parallèles ou axiales sont à impulsion et fonctionnement noyées ou non immergées. Le trait caractéristique de ce genre de turbines est l'égalité de pression à l'intérieur et à l'extérieur de la roue. Pour avoir cette condition, il faut que les vitesses relatives d'entrée w et de sortie w' de l'eau dans la couronne mobile soient égales.

Comme pour la turbine centrifuge, on a (*fig.* 408) :

$$(1) \qquad w^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha \qquad \text{et} \qquad (2) \qquad w'^2 = w^2 + 2gh' ;$$

h', la hauteur de la roue.

De même : $\frac{1}{2}mw'^2 - \frac{1}{2}mw^2 = mgh'$, ce qui revient à la relation (2).

Enfin :

$$(3) \qquad V'^2 = w'^2 + v^2 - 2vw'\cos\beta.$$

On prend généralement β égal à 25 et 30° et l'on fait $w' = v$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce qui donne :

$$(4) \qquad u = \frac{V^2 + 2gh'}{2V \cos \alpha}.$$

Si nous appelons h la hauteur du bief d'amont au-dessus de la roue

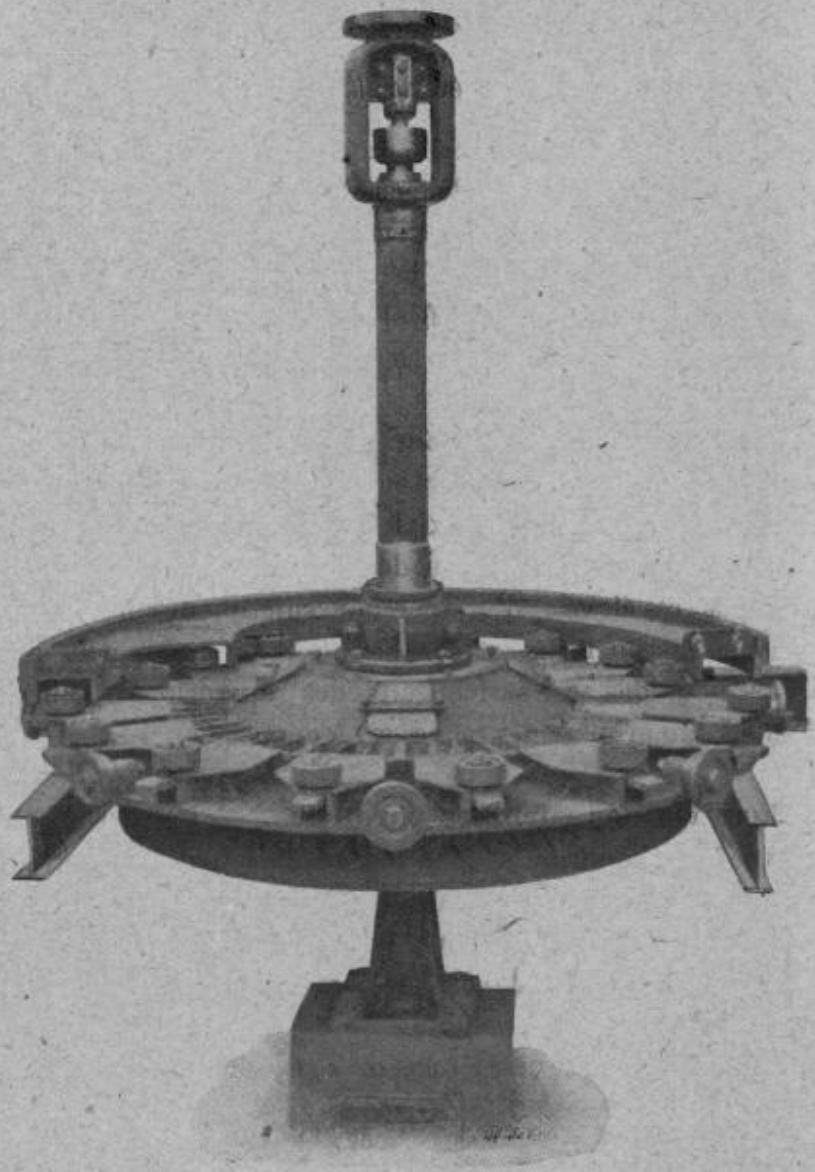


Fig. 407. — Turbine parallèle à chambre ouverte A. et H. Bouvier, vannage à vannettes horizontales pour basses chutes.

et si les canaux fixes sont convenablement évasés, on aura sensiblement :

$$(5) \qquad V^2 = 2gh.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Et par suite, en désignant par H la hauteur de la chute, sensiblement égale à $h + h'$, on a :

$$v = \frac{H}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

La vitesse v de la roue étant ainsi déterminée, on tire de la relation (3) :

$$V'^2 = 2v^2 (1 - \cos \beta) = \frac{2gH^2 \sin^2 \frac{1}{2} \beta}{h \cos^2 \alpha}.$$

Mais la condition essentielle à remplir est que la dépense par les canaux fixes soit égale à celle par les canaux mobiles.

Par suite : $V \sin \alpha = w' \sin \beta$; ou : $\frac{v}{V} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$.

Or de la relation (4) on tire, après réduction : $\frac{v}{V} = \frac{H}{2h \cos \alpha}$; donc

$$\frac{H}{h} = \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin \beta}.$$

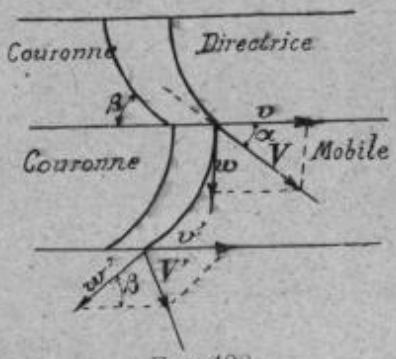


FIG. 408.

Le rendement théorique de la roue a pour expression :

$$R = 1 - \frac{2 \sin \alpha}{\sin \beta} \frac{\sin^2 \frac{1}{2} \beta}{\cos \alpha} = 1 - \operatorname{tang} \alpha \operatorname{tang} \frac{1}{2} \beta.$$

Le rendement est d'autant plus grand que les angles α et β sont plus petits. On ne peut cependant prendre β inférieur à 25°. Dans ce cas R = 0,89.

Avec $\gamma = 20°$ et $\beta = 25°$, le rendement théorique atteint 0,96.

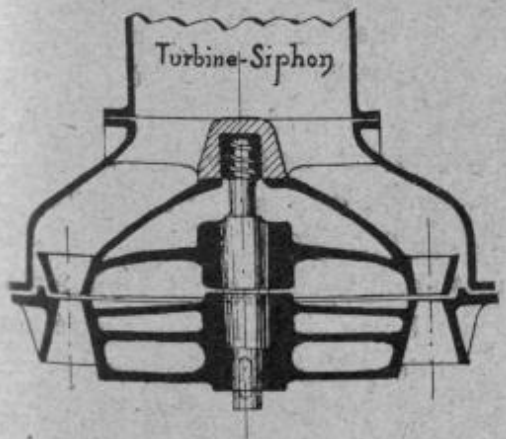


FIG. 409.

Appelons n le nombre des aubes fixes et Q le volume d'eau à débiter par seconde, r le rayon moyen de la roue, on peut poser, en négligeant l'épaisseur des aubes :

$$e \times 2\pi r \sin \alpha = Q.$$

On prendra e, largeur des aubes, égale à la hauteur de la roue, et la relation ci-dessus permettra de déterminer r.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand la chute dépasse 4 mètres, il convient d'enfermer la turbine dans une bâche métallique, alimentée par un tuyau cylindrique venant du bief d'amont.

Lorsque la turbine parallèle est établie en un point de la chute intermédiaire entre les niveaux d'amont et d'aval, on peut profiter de la totalité de la chute en utilisant le dispositif Jonval (*fig.* 409 et 410). Il est possible aussi, quand la turbine tourne noyée, de lui assurer les avantages de la libre déviation en lui adjoignant la même disposition.

La disposition dite en siphon évite la formation des entonnoirs ou tourbillons au-dessus de la couronne directrice. Une petite pompe pneumatique permet l'amorçage quand la turbine est arrêtée depuis quelque temps.

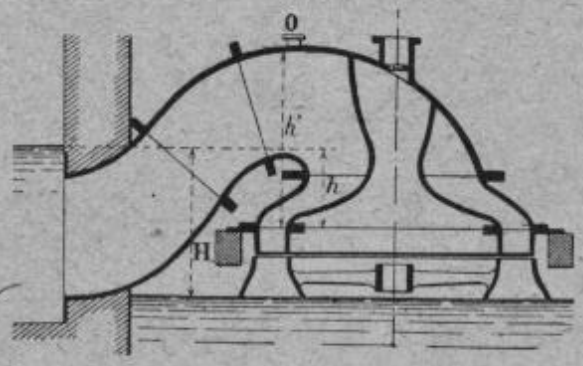


Fig. 403.

Lorsque la turbine marche non immergée, la relation de la marche sans réaction devient simplement :

$$\frac{p_0}{\theta} = \frac{p_a}{\theta}.$$

Le rendement industriel des turbines parallèles ne dépasse pas 75 à 80 0/0.

La vitesse de l'eau à l'entrée des aubes directrices devant être aussi faible que possible, la perte de charge variant comme le carré de cette vitesse, l'aube sera donc normale à la base supérieure de la turbine. On adopte généralement un profil d'aube formé d'un arc de cercle, prolongé, s'il est nécessaire, vers le bas par une droite. Dans les turbines à grande vitesse, α atteint 60°.

Les aubes mobiles sont constituées par des surfaces cylindriques ou conoïdes, et l'arête de sortie est toujours rectiligne et égale à la largeur de la couronne mobile.

Quand β est inférieur à 60°, on a des turbines à petite vitesse ; le rendement pratique des turbines à grande vitesse ne dépasse pas 0,60 à 0,70, et celui des récepteurs à petite vitesse atteint 0,75 à 0,80.

Un des grands avantages des turbines parallèles est que la variation de vitesse n'influe pas d'une façon très sensible sur le rendement ; les écarts entre les débits maxima et minima et le débit normal ne dépassent pas 13 0/0, le maximum se produisant quand la turbine est calée, le minimum quand elle s'emballe. Le débit normal est celui représentant la moyenne de ces deux valeurs. La vitesse d'une telle turbine ne dépasse pas le double de la vitesse normale.

Les turbines noyées parallèles conviennent pour les basses chutes,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quand le débit est constant et que les variations du niveau d'aval ne sont pas négligeables.

Dans les turbines axiales non noyées ou à libre déviation, c'est-à-dire placées à quelques centimètres au-dessus du niveau d'aval, le rendement a pour expression :

$$R = 1 - \frac{\sin^2 \beta}{\cos^2 \alpha}\left(1 + \frac{h}{H}\right);$$

h, hauteur de la couronne mobile.

134. Tracé des aubes. — 1° *Aubes fixes.* — Il s'effectue sur le développement du cylindre de rayon r concentrique à la turbine (*fig.* 411) (1).

1° On porte le pas $p = \frac{2\pi r}{n}$.

2° On mène ab, $a'b'$... faisant avec xy l'angle α.

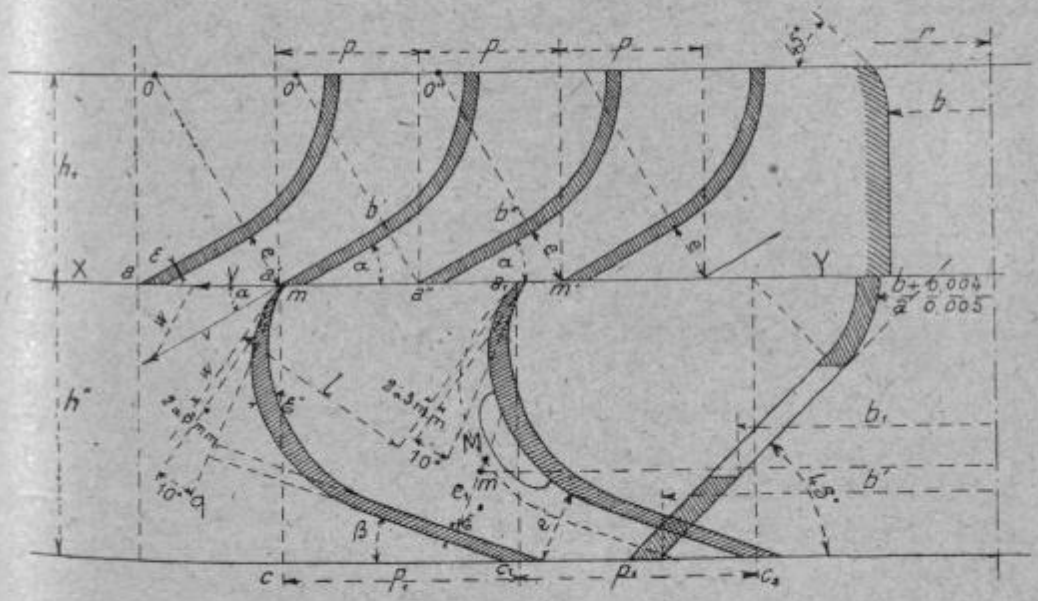


FIG. 411.

3° On trace par a, a' ... des perpendiculaires à ab, $a'b'$ ... ;

4° On raccorde, des points o, o' comme centres, avec ob, $o'b'$ ... pour rayons, les droites ab, $a'b'$ et leurs parallèles menées à la distance ε.

Si la couronne directrice doit comporter n' aubes en tôle d'épaisseur ε', et n'' aubes en fonte d'épaisseur ε'' (*fig.* 412), l'intervalle ou le vide entre deux aubes consécutives, $ai = a'i'$, sera :

$$p' = \left(2\pi r - \frac{n'\varepsilon' + n''\varepsilon''}{\sin \alpha}\right)\frac{1}{n' + n''};$$

(1) *Notes et formules de l'Ingénieur.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et :

$$aa' = p' + \frac{\varepsilon'}{\sin \alpha}; \quad a'a'' = p + \frac{\varepsilon''}{\sin \alpha}$$

Les points a, a' et a'' étant déterminés, le tracé des aubes se fera comme il a été indiqué ci-dessus.

Si la couronne directrice doit être munie de vannettes verticales (*fig.* 413), il faut que la partie courbe aboutisse, sur le plan supérieur de la couronne fixe, suffisamment à droite de la verticale du point a pour que la vannette correspondante C soit placée sur la verticale du point m ou à droite de cette verticale.

La vitesse v de la turbine se détermine par :

$$v = \frac{V}{2 \cos \alpha}$$

et le nombre de tours n par minute est $N = \frac{30v}{\pi r}$.

La hauteur h'' de la couronne mobile se fait $h'' = \frac{r}{5}$. Le nombre n_1 des aubes doit être inférieur ou au plus égal à celui n de la couronne directrice.

2° *Aubes mobiles.* — 1° Porter le pas $p_1 = \frac{2\pi r}{n_1} = a'a_1 = a_1a_2 = c'c_1 = c_1c_2$.

2° Faire le triangle des vitesses où l'on connaît $V = \sqrt{2gH}$ et v; w est la vitesse relative de l'eau.

3° Par a', a_1 ... mener des parallèles à w ; le premier élément de la face

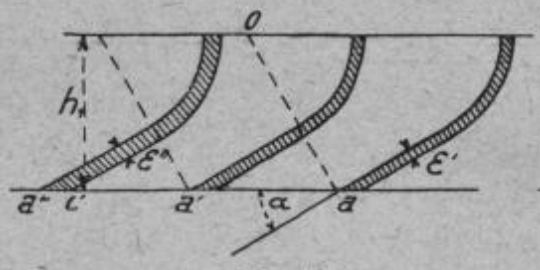


Fig. 412.

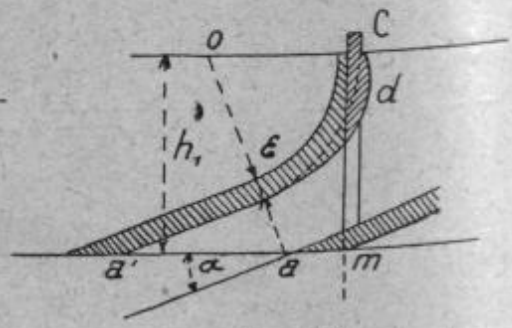


Fig. 413.

convexe de l'aube doit leur être tangent. L'autre extrémité de cette face part généralement de c_1 ou est pris à droite de c_1.

4° Par c', c_1 ... mener des parallèles faisant avec la face inférieure de la couronne mobile, $\beta = 20$ à $30°$.

5° Raccorder ces parallèles à celles menées à w par a', a_1 ... au moyen d'arcs à un ou plusieurs centres ; on a le dos de l'aube.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

6° Pour avoir le creux : Mener à w passant aux parallèles par a', a_1 ... d'autres parallèles distantes de 2 à 3 millimètres (épaisseur de l'extrémité de l'aube), puis des lignes mq_1 $m'q'$, faisant avec ces dernières un angle de 10°.

Mener à ε' des points c_1, c_2 ... des parallèles à la direction de β. Raccorder ces parallèles aux lignes mq, $m'q'$ ... par un arc à un ou plusieurs centres, de manière que l'épaisseur des aubes vers le milieu soit $\varepsilon'' > \varepsilon'$.

N. B. — Il faut toujours $e' > e$; n et n' doivent être choisis en conséquence.

La largeur de la couronne mobile sur sa face supérieure doit être égale à $b + 0^m,004$ ou $0^m,005$.

Quant à la largeur b', elle se déduit de :

$$Q = m\,(2\pi r \sin\beta - n'\varepsilon')\,b\,w',$$

expression dans laquelle $w' = w$.

Si la turbine doit tourner non immergée à l'étiage, il faut calculer b' pour ce cas et adopter la plus grande des valeurs trouvées.

On raccorde par des droites inclinées à 45° et des arcs de cercle comme il est indiqué.

Pour les turbines non immergées, on ménage, derrière les aubes, des évents dans les joues de la couronne mobile. Pour déterminer l'emplacement de ces évents, il faut tracer le profil extérieur de la veine liquide à son passage dans l'aubage. L'épaisseur e_1 de cette veine, mesurée en un point quelconque m, se déduit de la relation :

$$e_1 = l\,\frac{b}{b_1} = e'\,\frac{b}{b'}.$$

On obtient ainsi le point M. Les autres se déterminent de la même manière que plus haut.

135. Données de construction.— Si les aubes sont en tôle, on prend e, épaisseur des aubes, égale à e_1, épaisseur de celle de la roue, soit 6 à 8 millimètres ; si elles sont en fonte, l'épaisseur est portée à 12 millimètres.

On fait la largeur à l'entrée de la roue, mesurée suivant le rayon, égale à $0{,}15r$ à $0{,}35r$ et on détermine le nombre d'aubes dans le distributeur pour que la distance normale entre le milieu des aubes dans la roue mobile égale 40 à 85 millimètres. Généralement la hauteur de la roue mobile se fait égale à $0{,}25r$ et celle des aubes dans le distributeur, un peu plus forte.

La hauteur h de la couronne mobile varie de 15 à 35 centimètres et la hauteur du distributeur = 1/2 ou 3/4 de h.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

136. Turbines semblables. — Supposons une turbine fonctionnant dans des conditions de rendement maximum sous une chute H et tournant à n tours par minute ; si on la place sous une chute H′, elle conservera son rendement en satisfaisant à la relation : $n = \sqrt{\frac{H'}{H}}$. Les débits d'une même turbine sous des chutes différentes sont proportionnels aux vitesses d'écoulement dues à ces chutes et, si on appelle r et r' les rayons des roues, on a :

$$\frac{r^2}{r'^2} = \frac{Q}{Q'}\sqrt{\frac{H'}{H}}.$$

La turbine à débit Q′ étant placée sous la chute H, on obtient la vitesse de rotation par la formule :

$$\frac{n'}{n} = \frac{r}{r'}\sqrt{\frac{H'}{H}}.$$

V. — TURBINES MIXTES

137. Fonctionnement des turbines mixtes ou américaines. — Dans ce genre de turbines, qui dérivent des types parallèles et centripètes, l'admission est radiale et l'échappement axial ou même à la fois radial et axial. Les deux couronnes sont très élevées ; mais le volume de l'ensemble est néanmoins fort réduit, eu égard au volume débité.

Ces turbines se recommandent surtout par leur construction robuste et condensée ainsi que par leur prix de revient peu élevé, conséquence de leur établissement en séries.

Des lames de forme lenticulaire constituent les aubes directrices, et la régularisation du débit est obtenue à l'aide d'un registre cylindrique entre les deux couronnes, comme dans la turbine Fourneyron.

La vitesse absolue V à l'entrée dans l'aube dans la couronne mobile fait un angle α avec la vitesse v à la circonférence externe de cette couronne (*fig.* 414). Soient H la hauteur de chute ou différence de niveau entre les plans d'eau amont et aval, et h' la distance verticale entre le plan inférieur de la roue et l'axe de la couronne directrice $(H - h')$ représentant la charge qui donne la vitesse absolue à la sortie de l'aube directrice lorsque la turbine fonctionne sans réaction, on a :

$$\frac{p_0}{\theta} = \frac{p_a}{\theta} \qquad \text{et} \qquad V^2 = 2g\,(H - h').$$

La vitesse relative d'entrée de l'eau dans la couronne mobile est :

$$w^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La vitesse relative de l'eau à la sortie de la même couronne devient :

$$w'^2 = w^2 + v'^2 - v^2 + 2gh'.$$

La vitesse absolue de l'eau à la sortie de la couronne mobile est toujours :

$$V'^2 = w'^2 + v'^2 - 2w'v' \cos \gamma.$$

Enfin le rendement théorique est encore :

$$R = 1 - \frac{V'^2}{2gH}.$$

Si la turbine fonctionne *sans réaction* ou à action, il résulte de la condition $w = v$ que :

$$\gamma + 2\alpha = 180^\circ ; \quad \text{d'où} \quad \gamma = 180^\circ - 2\alpha.$$

Comme α varie de 25° à 30°, γ varie lui-même, dans ce cas, de 130 à 120°, et alors $V = \sqrt{2gH}$ donne la valeur de la vitesse absolue de l'eau à la sortie des aubes directrices.

Lorsque la turbine est *à réaction*, l'angle γ est inférieur à 120° et la vitesse V est plus petite que celle qui est due à la hauteur de chute H.

On sait que le degré de réaction a pour valeur :

$$K = \frac{V}{\sqrt{2gH}}; \quad \text{d'où :} \quad V = K\sqrt{2gH}.$$

Dans les turbines mixtes les aubes ont la forme d'hélices ou de cuillers, et la vitesse relative d'entrée de l'eau dans la couronne mobile est le plus souvent dirigée suivant le rayon ; l'angle γ est alors égal à 90°.

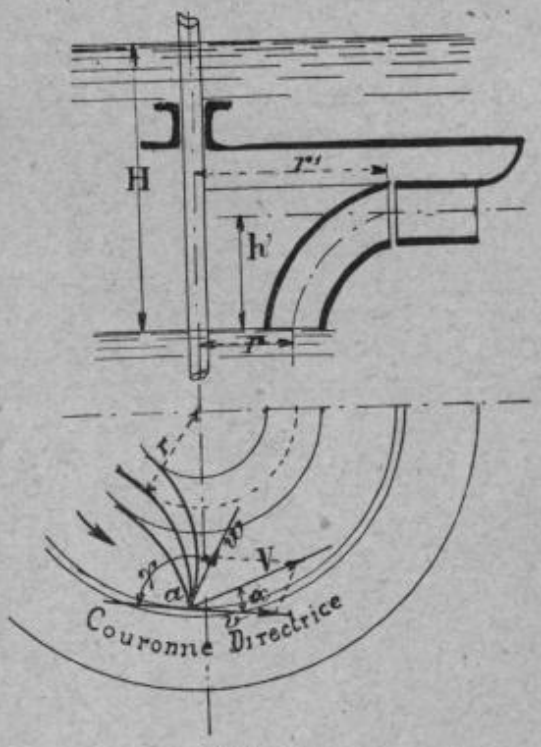


FIG. 414.

Le nombre des directrices varie avec le diamètre de la turbine ; il est de 20 à 26 pour les turbines d'environ 1 mètre de diamètre.

Le périmètre de sortie étant très développé, on peut réduire beaucoup l'angle de sortie de l'eau en donnant aux bords inférieurs de l'aube une direction très inclinée sur l'horizontale, circonstance qui favorise le mouvement de la turbine lorsqu'elle fonctionne noyée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A l'encontre des turbines ordinaires, le jeu entre les deux couronnes est ici considérable. Il est d'ailleurs utilisé pour le passage de la vanne cylindrique servant au réglage du débit ; il peut atteindre 30 millimètres.

Le rapport $\left(\frac{b}{r}\right)$ de la hauteur de la couronne directrice au rayon de la couronne mobile est toujours très grand, et il est souvent voisin de l'unité.

Les turbines mixtes sont de dimensions plus réduites que les autres systèmes de récepteurs ; leur installation est plus facile et le coût moins élevé, mais elles se prêtent mal aux variations de débit et le tracé des aubes offre de grandes difficultés d'exécution.

Ce genre de moteur hydraulique est toujours construit, en Amérique, pour être noyé ; on le place dans un tube à succion (turbine Hercule).

Lorsque de grandes réductions de débit sont à craindre, on peut faire tourner la turbine dans l'air.

Il est possible, avec ces turbines, d'utiliser un grand débit avec de petits diamètres de roues ; elles se prêtent facilement à l'accouplement direct aux machines électriques, même lorsque la turbine travaille sous faible charge.

Le rendement pratique de ces turbines est de 0,80 pour la pleine admission. Le débit n'est pas proportionnel aux levées des vannes ; il croît à mesure que cette levée est moindre.

Le dispositif Jonval est généralement applicable aux turbines mixtes à axe horizontal.

138. Tracé des aubes. — Le tracé de l'aubage s'effectue en traçant à l'entrée de la couronne mobile le triangle des vitesses dans lequel on connaît α ($\alpha = 20^\circ$ pour le cas qui nous occupe), v et V (*fig.* 415). Il est donc facile de déterminer w en grandeur et direction.

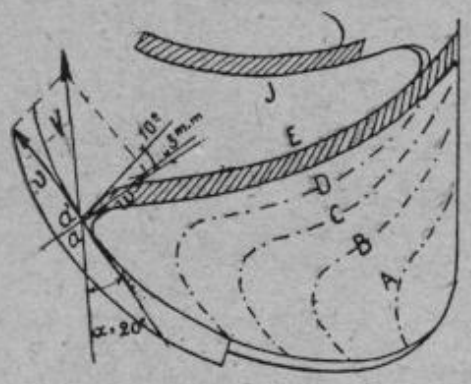


FIG. 415.

L'arête de l'aube projetée en a est généralement verticale ; quelques constructeurs la font légèrement inclinée en sens inverse du mouvement, pour mieux diriger l'eau vers la sortie de la turbine.

Quoi qu'il en soit, le premier élément de la face intérieure de l'aube doit être tangent à la direction de w ; la face extérieure peut être tracée comme nous l'avons indiqué à propos des turbines parallèles.

On mène à w une parallèle distante de 3 à 4 millimètres, avec laquelle on fait un angle de 10° ; le premier élément doit être tangent au côté extérieur de cet angle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En ce qui concerne la détermination de la forme des aubes à la sortie, on est obligé d'opérer ainsi qu'il va être expliqué :

On se donne le profil vertical de l'aube (*fig.* 416) et on détermine ensuite sa projection horizontale.

Dans ce but, on partage la largeur de AA′ de l'aube en un certain nombre de parties égales, puis on calcule quelles sont les vitesses de sortie dans chacun des anneaux cylindriques concentriques à l'axe de rotation correspondant aux divisions précitées.

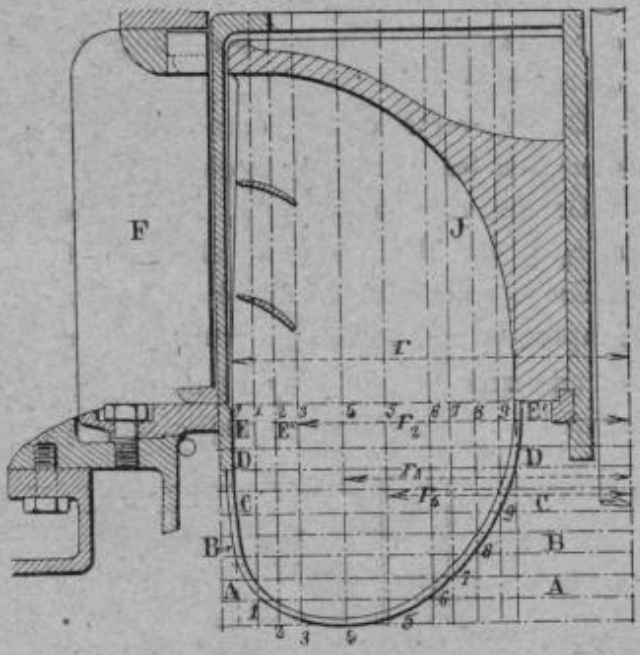


Fig. 416.

Cette détermination se fait comme il suit, mais il y a lieu de remarquer tout d'abord que l'eau, à son entrée dans la turbine, est animée de la vitesse relative w dont l'expression est :

$$w = V \sin \alpha$$
$$= 0{,}636 \sqrt{2gH} \sin 20^\circ$$
$$= 0{,}342 \times 0{,}636 \sqrt{2gH}$$
$$= 1{,}025 \sqrt{H}.$$

L'eau, introduite dans la couronne mobile et en mouvement relatif sur l'aube que nous considérons, est soumise aux trois actions suivantes :

1° A la vitesse relative w ;

2° A la pression 0,6 H due à la réaction ;

3° A la force centrifuge.

Le travail de cette dernière est de sens inverse aux deux autres, puisque les molécules liquides vont en se rapprochant de l'axe de rotation.

De sorte que, si nous considérons la partie de l'aube comprise entre les deux cylindres, de rayon moyen r_1, passant par les points E et E″, si nous appelons :

v_1 la vitesse des points de l'aube situés à r_1 de l'axe de rotation ;

w'_1 la vitesse relative de l'eau à la sortie de l'élément d'aube considéré, nous aurons :

$$w_1'^2 = w^2 + v_1^2 - v^2 (2g \times 0{,}6\ H).$$

Or, dans le cas actuel,

$$w^2 = (1{,}025 \sqrt{H})^2 = 1{,}05\ H,$$
$$v = (2{,}817 \sqrt{H})^2 = 7{,}94\ H ;$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par suite :

$$w_1'^2 = 1{,}054\ H + v_1^2 - 7{,}94\ H + 11{,}76\ H = 3{,}92\ H = + v_1^2.$$

On verrait de même que, pour le cylindre de rayon r_2, la vitesse à la sortie a pour expression :

$$w'^2_1 = 3{,}92\ H + v_2^2,$$

v_2 représentant la vitesse des points de l'aube situés sur la circonférence du rayon r_2.

On trouverait de la même façon les expressions des vitesses de sortie pour tous les autres points de division.

Or, les valeurs de v_1, v_2, v_3, etc., sont proportionnelles aux rayons r_1, r_2, r_3, etc., il en résulte que l'on peut facilement obtenir w'_1, w'_2, w'_3, etc.

Ces vitesses peuvent être établies très simplement par une construction graphique, en considérant qu'elles représentent l'hypoténuse d'une série de triangles rectangles ayant un côté de l'angle droit commun, $\sqrt{3{,}92H}$ et dont les autres côtés ont respectivement pour longueurs V_1, V_2, V_3, etc.

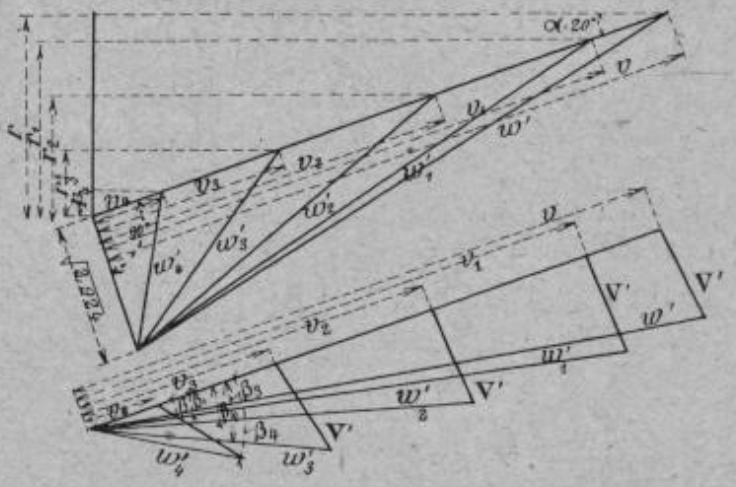


FIG. 417.

La (*fig.* 417) indique cette construction. Connaissant w'_1, w'_2, w'_3, etc., il faut composer ces vitesses avec la vitesse absolue V' que nous prenons égale à :

$$0{,}886\ \sqrt{H}$$

pour obtenir les angles de sortie de l'eau aux rayons r_1, r_2, r_3, etc., considérés. La construction graphique fournit en grandeurs les angles β_1, β_2, β_3, etc.

En développant les cylindres de rayons r_1, r_2, r_3, etc., et en observant en chaque point de sortie l'angle que doit faire le dernier élément avec la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tangente au même point, on détermine ainsi la courbe limitant la projection horizontale de l'aube.

La surface de l'aube tracée, il faut vérifier si la section de passage laissée libre à la sortie est suffisante pour permettre l'écoulement du débit Q. Cette vérification s'effectue en développant la section laissée libre entre deux aubes consécutives et en sectionnant ce développement de manière à appliquer à chaque section l'une des vitesses relatives de sortie w_1, w_2, w_3, etc., déterminées auparavant. Afin de tenir compte du frottement sur les aubes ainsi que des remous, on diminue les valeurs théoriques des vitesses de 15 à 20 0/0. Selon que le débit ainsi obtenu est inférieur ou supérieur à Q, on modifie le tracé de l'aubage, de manière à augmenter ou à réduire la section.

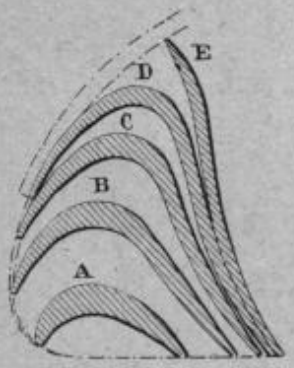


FIG. 418.

Ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte, le tracé d'une aube de turbine mixte est très complexe et hérissé de difficultés ; pour ces raisons il n'est guère possible de l'exécuter « au sentiment » comme on le fait généralement en Amérique.

La (*fig.* 418) représente les coupes horizontales faites en différents points de la hauteur de l'aube.

Le tracé des turbines mixtes à axe horizontal s'effectue de la même façon que celui des turbines à axe vertical.

139. Types de turbines mixtes. — La (*fig.* 419) représente schémati-

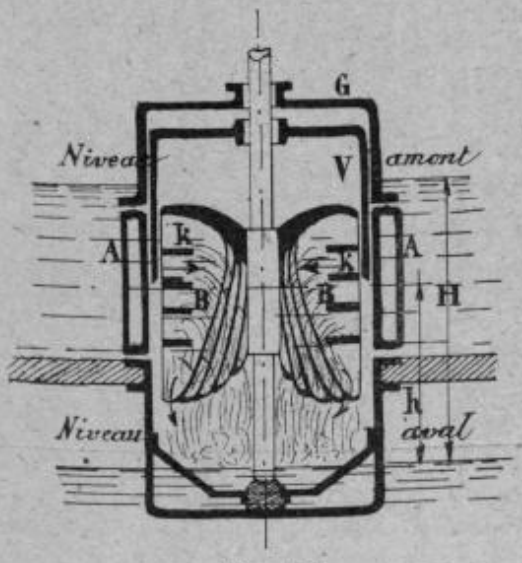


FIG. 419.

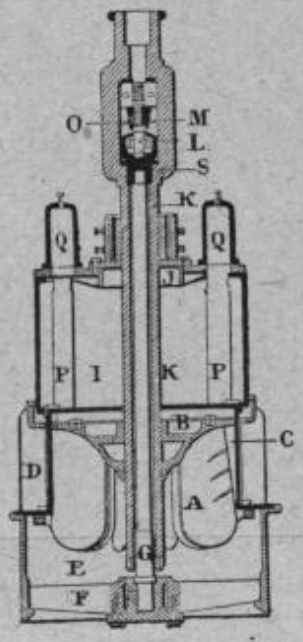


FIG. 420.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quement une turbine mixte du type *Hercule*, à axe vertical, construite par MM. Singrün frères. La couronne fixe AA a la forme d'un cylindre muni d'aubes directrices, et la couronne B, disposée à l'intérieur, est aussi constituée par une partie cylindrique de même hauteur que les aubes fixes et se prolongeant dans la partie inférieure par des surfaces en forme de cuil-

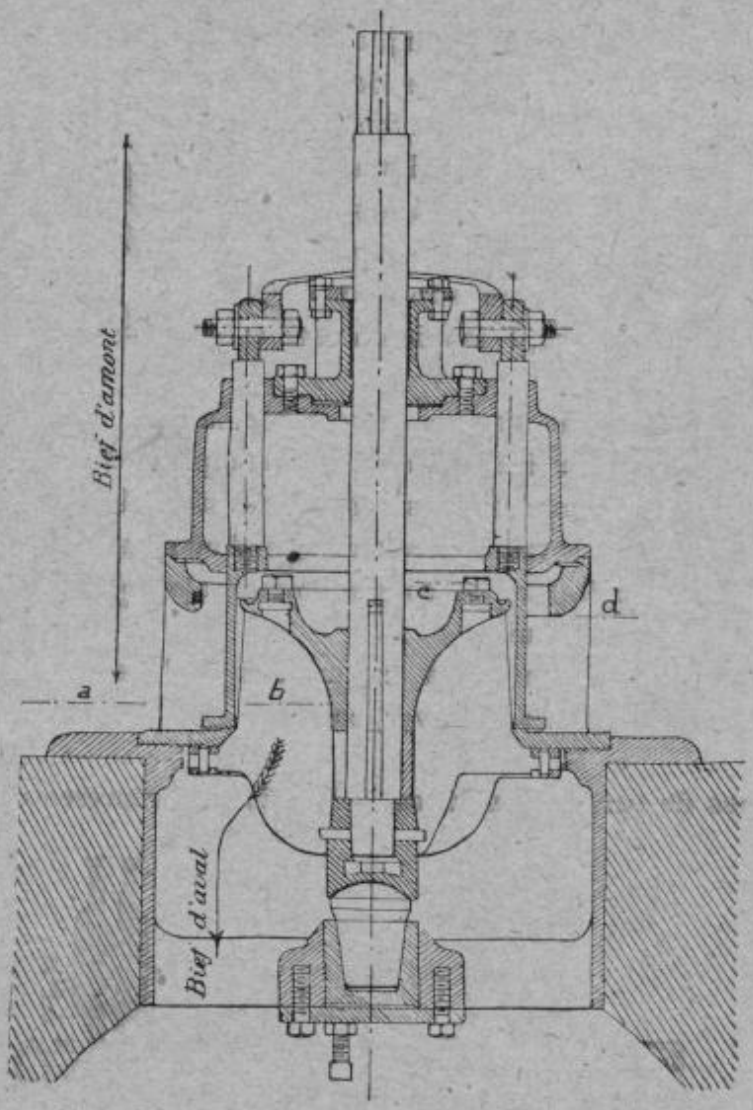


FIG. 421. — Turbine Hercule (Coupe verticale).

ler. Ces aubes sont amovibles et fixées au porte-aubes dont le moyeu est claveté sur l'arbre de la turbine ; leur ensemble forme un bloc indéformable (*fig.* 420) (1). Les nervures K ont pour but de partager la hauteur d'entrée de l'eau en plusieurs gradins correspondant aux diverses posi-

(1) Ce dispositif qui devait permettre le remplacement facile des aubes, en cas de rupture ou d'usure, n'ayant pas été concluant, à cause de la rouille et du tartre qui empêchaient le démontage, on en est revenu à faire venir de fonte les aubes avec la joue.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions que l'on peut donner au vannage. La courbure des aubes est telle que les filets liquides, d'abord dirigés horizontalement, se recourbent verticalement en agissant par réaction et s'échappent dans le bief d'aval. Entre les couronnes fixe et mobile vient glisser la vanne cylindrique V équilibrée par des contrepoids, en effectuant un mouvement de descente et de montée, à l'aide de deux crémaillères en prise avec des pignons calés sur un arbre horizontal, celui-ci recevant son mouvement d'un arbre vertical par l'intermédiaire de roues d'angle. L'étanchéité autour du vannage est assurée par des joints hydrauliques à la base de la cloche et au sommet de la couronne mobile.

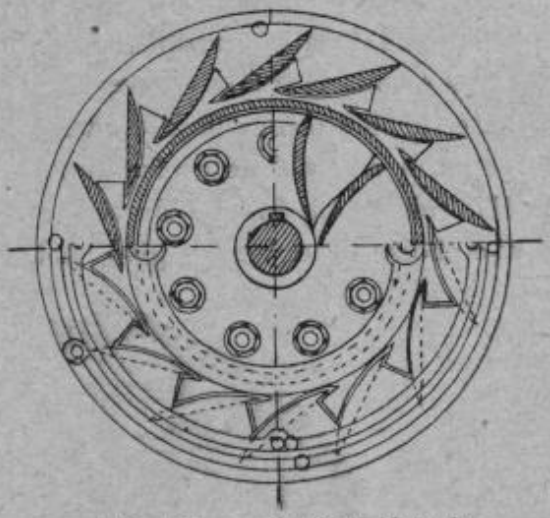


Fig. 422. — Turbine Hercule (Coupe en plan).

La base du cylindre porte à l'extérieur une couronne qui s'engage entre les aubes fixes, par des échancrures spéciales, qui obligent les filets liquides, pour une faible levée du vannage, à entrer dans la couronne, sous l'angle α, à l'effet d'obtenir le maximum de rendement de l'appareil.

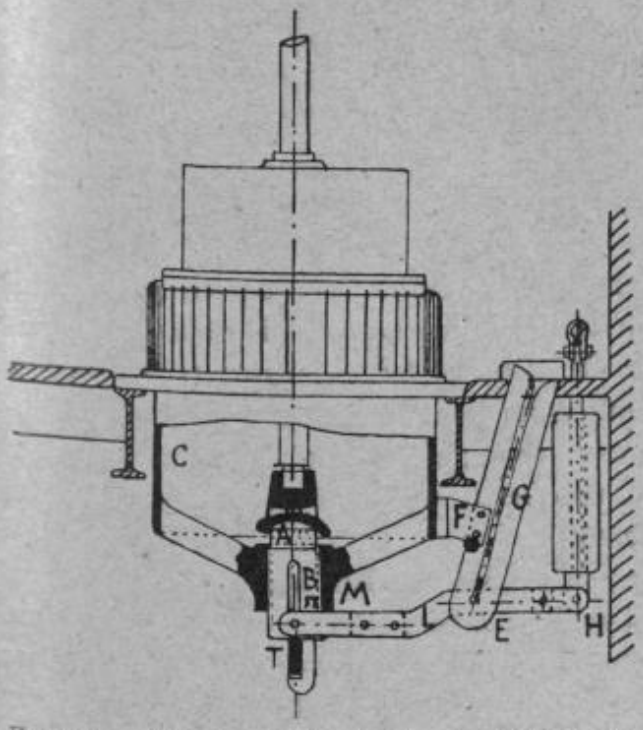


Fig. 423. — Turbine «la Houille blanche» (élévation).

L'arbre vertical présente la disposition bien connue du pivot noyé en bois de gaïac. Il porte à sa partie inférieure une boîte comportant des traverses reliées aux parois de la cuve inférieure, laquelle boîte porte la crapaudine recevant le champignon de gaïac sur lequel repose le pivot de l'arbre. Ce pivot est une pièce de fonte portant le grain sur lequel repose le champignon de gaïac. A la partie supérieure l'arbre est guidé dans un boîtard fixé sous le fond de la cuve supé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rieure G, à l'intérieur de laquelle vient se loger la cloche de la vanne lorsqu'elle est soulevée.

La turbine dite « la Houille blanche » (*fig.* 423) ne diffère de la précédente que par les dispositions prises pour rendre le pivot démontable. A cet effet on cale la roue mobile, on déplace la traverse T, après avoir desserré les écrous R, et on exerce une traction sur les tringles des leviers.

Cette turbine comme la précédente s'emploie en bâche ouverte ou fermée avec ou sans tube d'aspiration.

MM. Teisset, Chapron et Brault, tout en établissant les turbines à pivot noyé en bois, préconisent le pivot en l'air. Dans l'une et l'autre dispositions

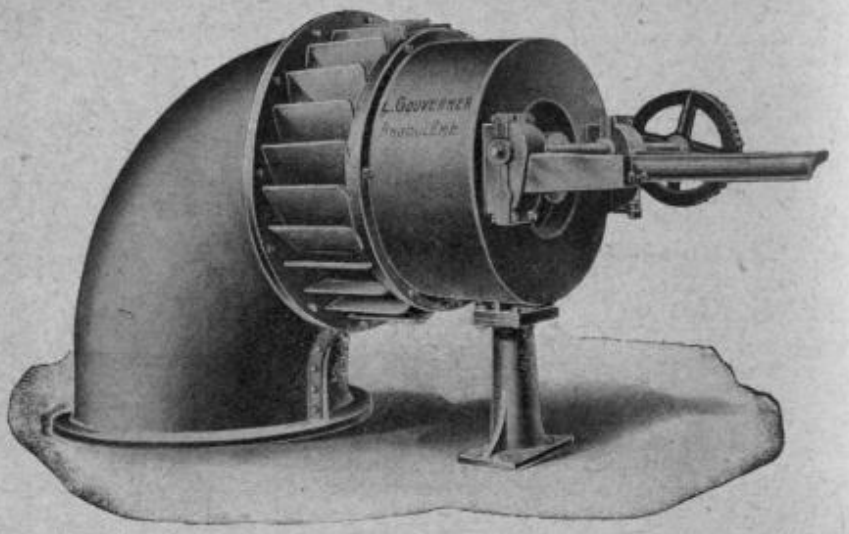


FIG. 424. — Turbine la Houille blanche, sans bâche et arbre prolongé d'un seul côté (moyennes chutes).

ils se servent d'un arbre creux en fonte guidé en haut dans un boîtard fixé au-dessous de la cloche cylindrique surmontant le distributeur. La turbine Teisset, Chapron et Brault, pour les fortes puissances, se compose d'un porte-aubes en fonte tourné sur lequel viennent s'assembler les aubages qui sont ensuite frettés et rivés ; ce mode d'assemblage assure la solidité de tout l'ensemble et rend la turbine aussi rigide que si elle était fondue d'une seule pièce (*fig.* 425).

Les aubages de la turbine portent, suivant leur hauteur, une, deux ou trois séries de directrices qui donnent à l'eau dès son entrée dans la roue même inflexion que la partie supérieure du porte-aubes. Ces directrices assurent à la turbine un bon rendement alors qu'elle n'est ouverte qu'en partie. Le distributeur, coulé d'une seule pièce, repose sur le tube de décharge et y est maintenu au moyen de vis. Ce tube plonge constamment dans l'eau d'aval et reçoit à la partie inférieure un croisillon en fonte assemblé avec lui. La vanne de distribution de l'eau est cylindrique et se déplace verticalement entre la turbine proprement dite et le distributeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tableau ci-après renseigne sur les caractéristiques de ces turbines, pour des chutes de 5 mètres à 10 mètres.

CHUTES	DÉBIT à LA SECONDE	FORCE en CHEVAUX	TOURS à LA MINUTE	CHUTES	DÉBIT à LA SECONDE	FORCE en CHEVAUX	TOURS à LA MINUTE
5 mètres.	823	43,35	224	8 mètres.	1.041	87,70	284
—	2.297	120,73	131	—	2.905	244,15	165
—	4.704	247,23	92	—	5.950	500,40	117
—	12.528	657,30	65	—	9.234	775,68	99
6 —	901	56,97	246	9 —	1.105	104,63	301
—	2.516	158,75	143	—	3.082	291,63	175
—	5.153	325,05	101	—	6.311	597,05	124
—	13.723	864,00	71	—	9.794	925,55	105
7 —	974	50,95	310	10 —	1.165	122,64	317
—	2.718	200,00	155	—	3.249	341,54	185
—	5.565	409,55	100	—	6.653	699,35	131
—	14 823	1.088,80	77	—	10.323	1.083,90	111

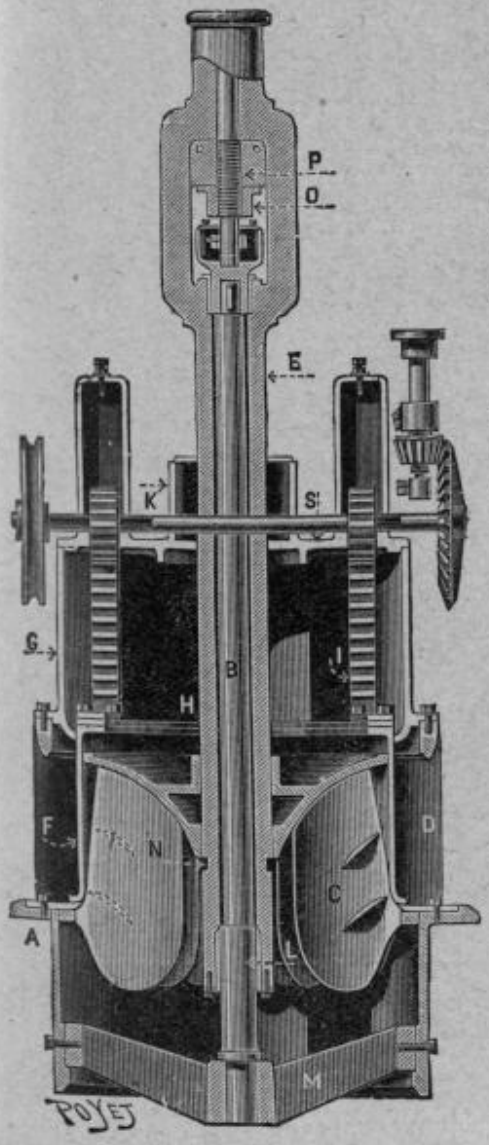


Fig. 425. — Turbine américaine (Teisset, Chapron et Brault frères, constructeurs).

La turbine à axe horizontal *Neyret et Brenier* comporte une couronne directrice fixée à l'intérieur d'une enveloppe en spirale où l'eau pénètre par une tubulure inférieure, et la couronne mobile est placée concentriquement à l'intérieur de la couronne fixe.

L'eau, après distribution sur la périphérie des aubes directrices, s'échappe parallèlement à l'axe par un orifice ménagé sur l'une des faces verticales de l'enveloppe. Cet orifice est prolongé par un tuyau coudé qui plonge dans l'eau d'aval. Le van-

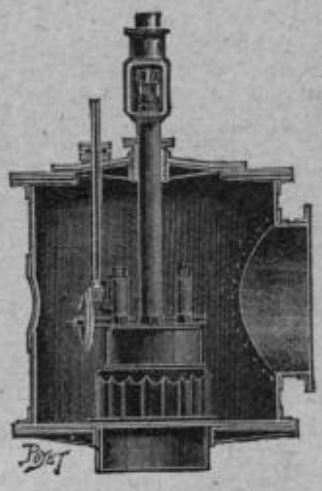


Fig. 426. — Turbine américaine avec bâche (Teisset, Chapron et Brault frères, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nage cylindrique est semblable à celui employé dans les turbines verticales. L'emploi de cette turbine est tout indiqué pour actionner directement des dynamos à axe horizontal.

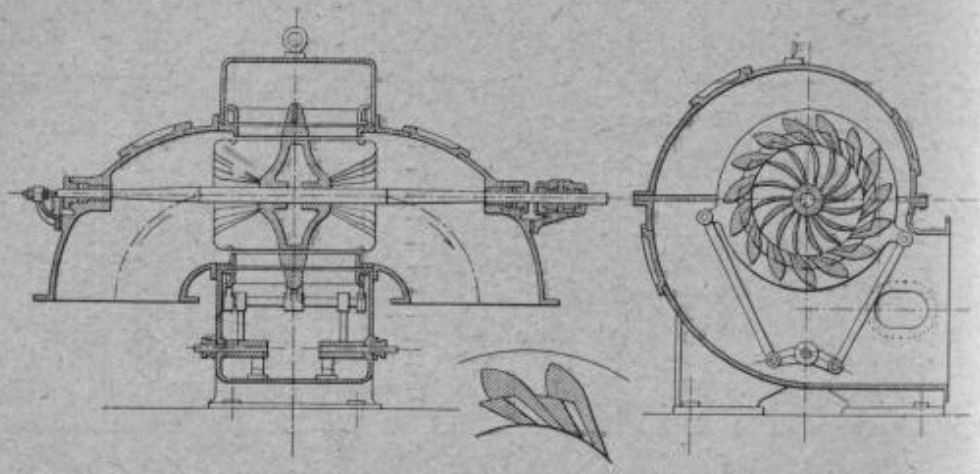


FIG. 427.

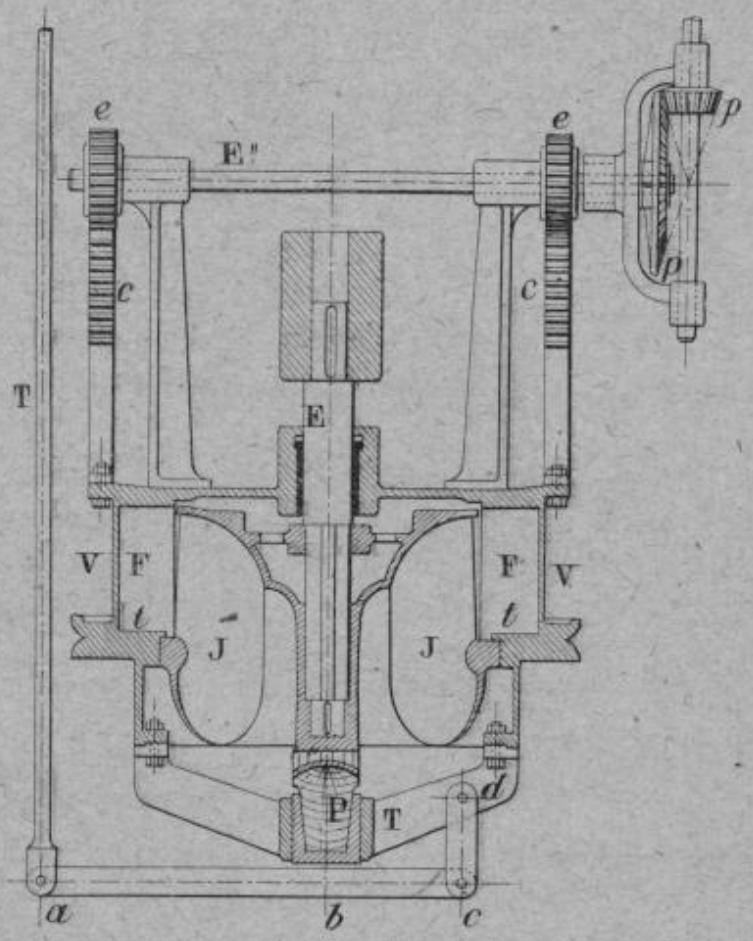


FIG. 428.

La turbine *A. et H. Bouvier* à axe horizontal (*fig.* 427) est à double aubage et à double évacuation symétrique, à l'effet d'annuler les réactions

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

longitudinales. Le vannage a lieu, au moyen de languettes fixes, par un déplacement angulaire obturant simultanément tous les orifices et, l'angle d'entrée de l'eau dans la roue mobile reste constant, quelle que soit l'ouverture du vannage, ce qui améliore le rendement à débit partiel.

La capote en forme de spirale en fonte répartit l'eau sur le distributeur et les deux coudes d'évacuation, également en fonte, forment diffuseurs.

Un avantage de cette turbine, pour les rivières à débits variables, est que, quand le débit diminue dans de grandes proportions, on peut fermer complètement un des deux distributeurs, en laissant une seule des roues mobiles fonctionner à pleine admission ; on a alors un rendement à mi-débit aussi bon que le rendement de la turbine à pleine ouverture.

La *turbine Leffel*, très répandue en Amérique, a sa couronne mobile

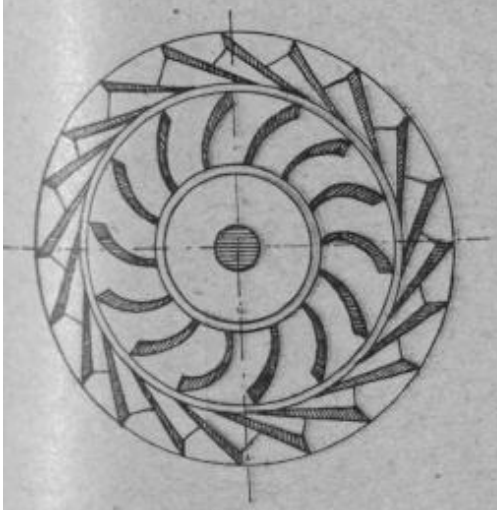


FIG. 429.

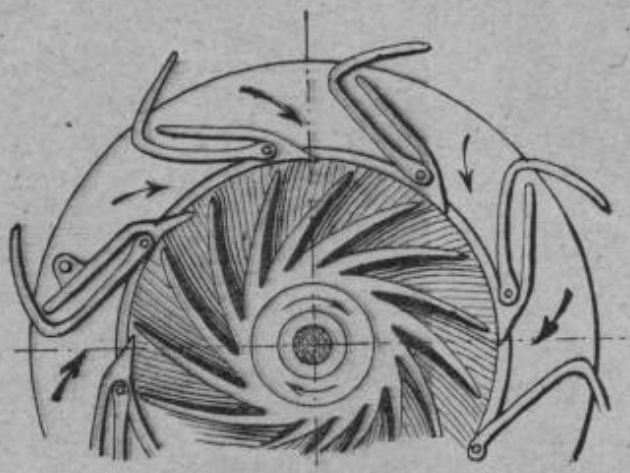


FIG. 430.

constituée par deux couronnes superposées, la partie supérieure ayant pour objet de diriger la veine liquide vers le centre, et la couronne inférieure, portant des aubages à double courbure, a pour objet de ramener l'eau à la sortie dans une direction parallèle, à l'instar des turbines à libre déviation.

Les aubes directrices sont articulées et peuvent osciller autour d'un axe parallèle à l'arbre de la turbine ; elles servent aussi de vannage par le jeu de leur inclinaison, en diminuant ou en augmentant la section d'introduction de l'eau.

La *turbine Laurent* (*fig.* 428) ne comporte pas de cuve extérieure, la cloche de vannage étant disposée à l'extérieur de la couronne directrice et embrassant les deux couronnes à la fois, ce qui a pour effet de réduire la hauteur de l'appareil.

Cela permet en outre : de ne laisser entre les deux couronnes que le jeu nécessaire pratique et d'immobiliser au besoin le vannage sans arrêter la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

turbine. Pour régler la hauteur de la turbine au fur et à mesure des

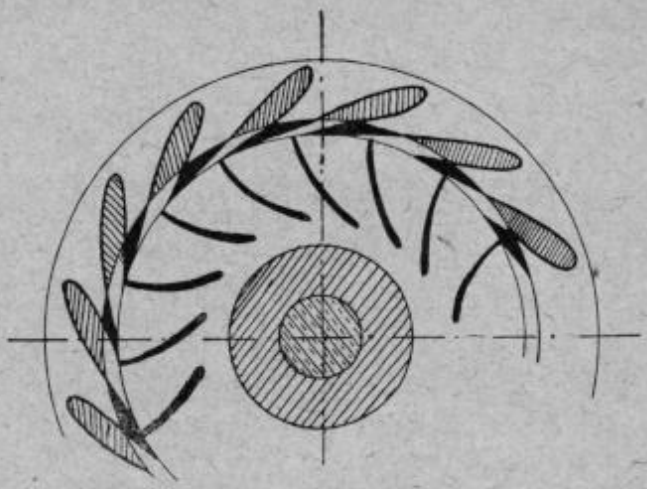


FIG. 431.

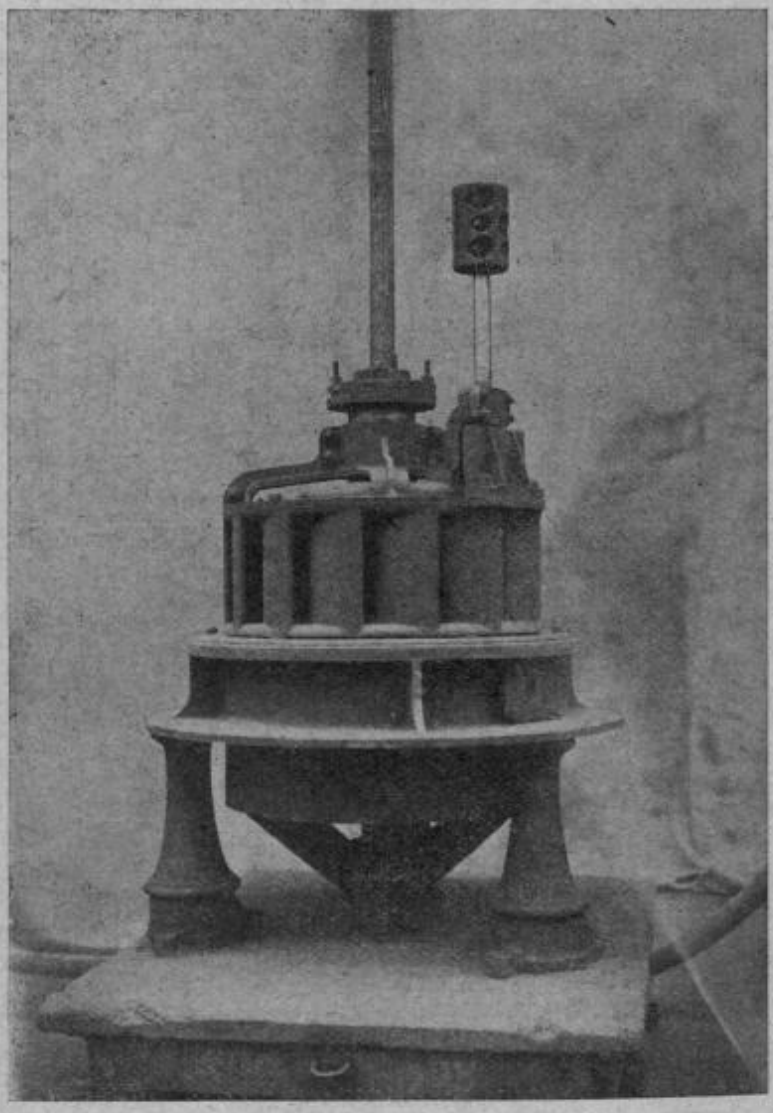


FIG. 432. — Turbine centripète mixte à vannage mobile.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

besoins, MM. Laurent frères et Collot adjoignent un système de balancier compensateur, du genre de celui employé par Fourneyron.

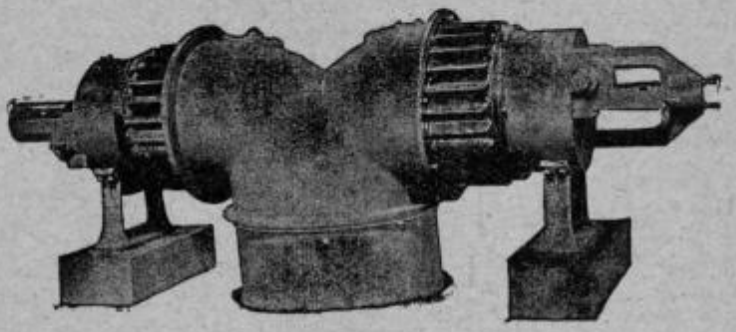


Fig. 433. — Turbine Hercule-Progrès double (Singrün frères, constructeurs).

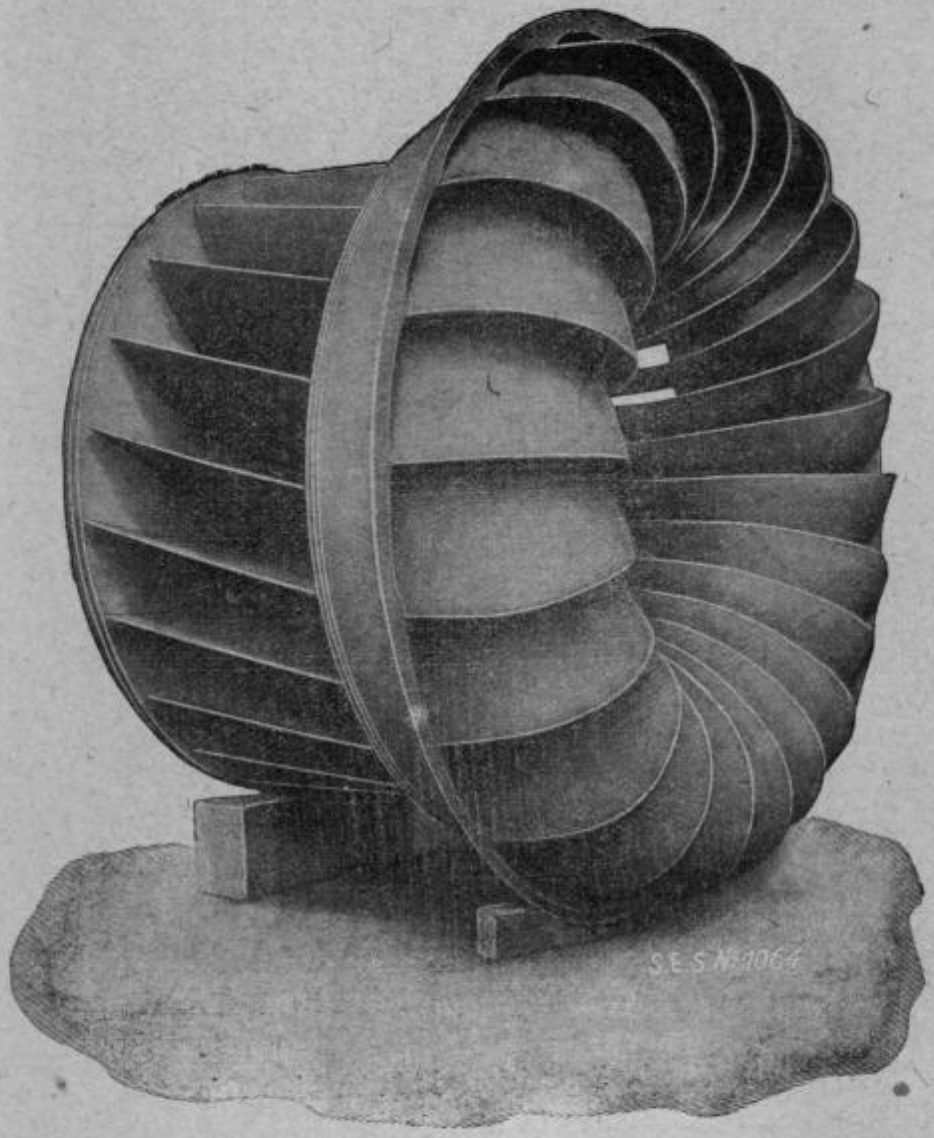


Fig. 434. — Roue motrice d'une turbine mixte, construction Singrün.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans la *turbine Ridson* (*fig.* 429), les aubes directrices sont rectilignes et les aubes mobiles, à double courbure et terminées en cuiller.

Dans la *turbine New American* (*fig.* 430), les palettes du distributeur ont une partie fixe et une partie mobile. Cette dernière, tournant autour d'une charnière, ouvre plus ou moins l'ouverture du canal et règle l'ar-

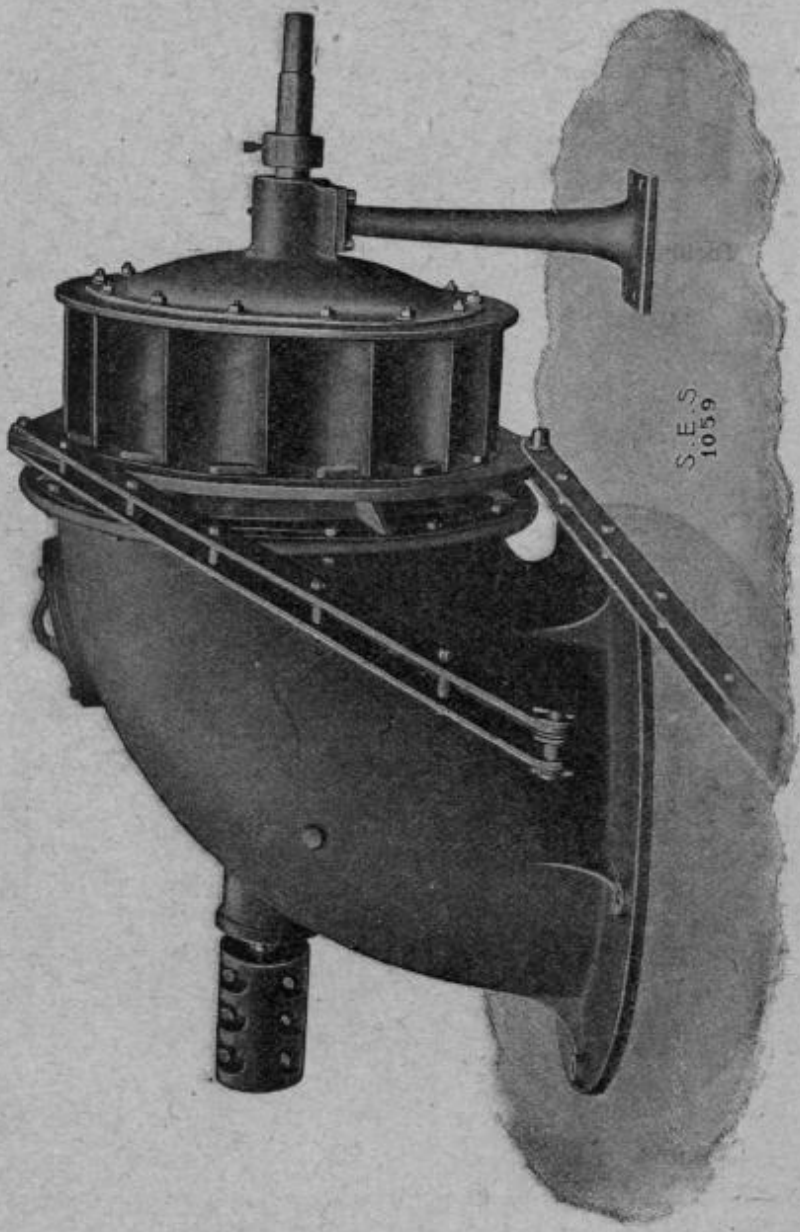


Fig. 435. — Turbine mixte simple, à directrices mobiles pour chambre d'eau ouverte et à axe horizontal.

rivée de l'eau, tandis que la partie fixe assure une direction constante à la veine liquide. Le mouvement est produit à l'aide d'un disque relié aux parties mobiles.

La (*fig.* 431) montre la disposition de la turbine *Riva ;* chaque palette du distributeur correspond à une aube de la couronne mobile ou récepteur.

Les palettes de celui-ci ont aussi une partie fixe et une partie mobile,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cette dernière reliée à une pièce que l'on peut faire tourner par un engrenage. Leur courbure assure toujours un parcours régulier à la veine liquide, et tous les orifices sont fractionnés dans la même mesure.

La turbine mixte *Singrün* à vanne cylindrique et axe vertical est du modèle centripète mixte à réaction. L'eau arrive sur tout le pourtour de la turbine, pénètre radialement vers le centre à travers le distributeur et agit sur les aubes de la roue motrice (*fig.* 434 et 435) en changeant de direction, puis s'écoule dans le canal de fuite par un tube de décharge. Les directrices sont fixes et conduisent l'eau sur la roue motrice suivant l'angle le plus favorable au rendement, quel que soit le degré de l'admission. Elles sont de forme lenticulaire et assurent l'arrivée de l'eau sur les aubes motrices sans choc et sans solution de continuité.

Une vanne se déplace parallèlement à l'axe entre le distributeur et la roue mobile, laquelle vanne se manœuvre au moyen de crémaillère et de pignons logés dans un dôme qui recouvre tout le mécanisme et le met à l'abri des impuretés de l'eau. Les aubes de la roue sont généralement venues de fonte avec le porte-aube ; mais elles se construisent aussi en tôle d'acier forgé, en bronze, ou en acier coulé, suivant les circonstances locales de l'installation.

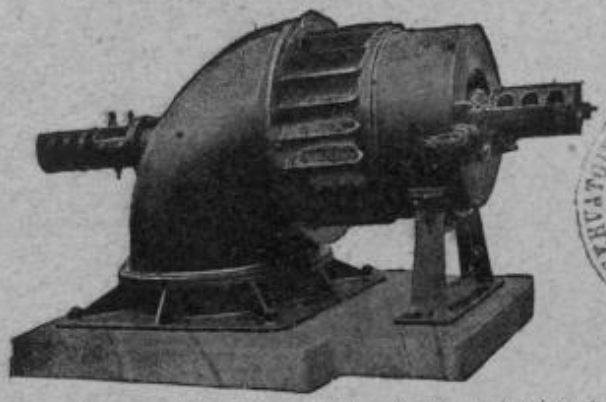


Fig. 436. — Turbine mixte à axe horizontal simple, chambre d'eau ouverte, construction Singrün.

BIBLIOTHEQUE DES ARTS ET METIERS CONSERVATOIRE

Le pivot est de modèle annulaire, hors de l'eau, à rotule et graissage automatique. La turbine à vanne cylindrique se construit également à axe horizontal, simple ou double, dans une chambre d'eau ouverte (*fig.* 436) ou bien à axe vertical dans huche métallique fermée, ou bien encore à axe horizontal simple (*fig.* 449) ou double dans huche fermée (*fig.* 448). Le rendement de ces turbines varie de 0,80 à 0,85.

Turbines accouplées. — On utilise les turbines mixtes pour les chutes à grand débit en accouplant deux turbines sur le même arbre, enfermées dans une enveloppe commune mise en communication des deux côtés avec le bief d'amont et portant un tuyau commun d'évacuation, lequel plonge dans l'eau d'aval, y jouant le rôle de siphon. Dans ce cas, les turbines sont alimentées par l'extérieur et l'eau se rend au tuyau d'évacuation après avoir traversé les deux turbines.

En disposant ces dernières en sens inverse sur l'arbre, l'eau pénètre dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chacune d'elles par le centre de l'enveloppe commune, et l'évacuation a lieu par les deux extrémités au moyen de deux tuyaux indépendants plongeant chacun dans le bief d'aval.

Dans un ensemble de deux *turbines Victor* accouplées dans une même enveloppe, le vannage à registre des deux moteurs est commandé automatiquement par l'intermédiaire d'un arbre vertical, d'un arbre horizontal et de roues d'angle. Les deux coudes par lesquels se fait l'évacuation de l'eau sont prolongés chacun par un tuyau plongeant dans le bief d'aval (jonvalisation).

140. Construction en série des turbines mixtes à grande vitesse. — Calculs. — Ces moteurs, de provenance américaine, sont

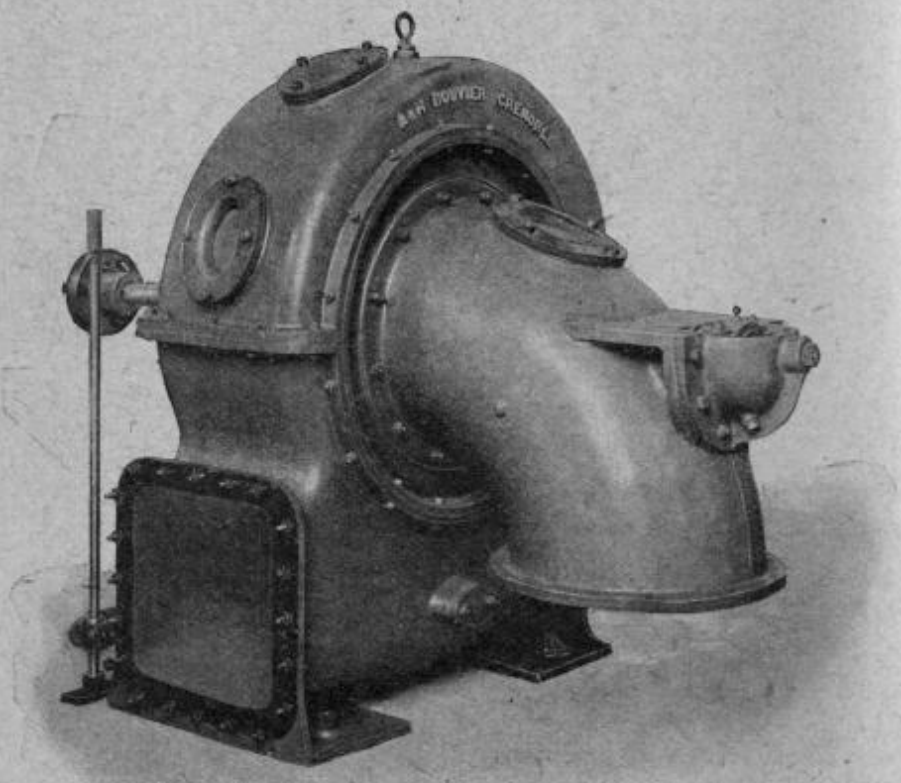


FIG. 437. — Turbine américaine système A. et H. Bouvier, avec vannages à persiennes.

aujourd'hui très employés dans le continent et ils tendent à remplacer les turbines Fourneyron, Fontaine, Girard qui nécessitent des frais d'études, de construction et d'installation supérieurs à ceux que demandent les turbines mixtes. Sous la forme de récepteurs centripètes parallèles, à grande vitesse de rotation, ces moteurs offrent l'avantage très appré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

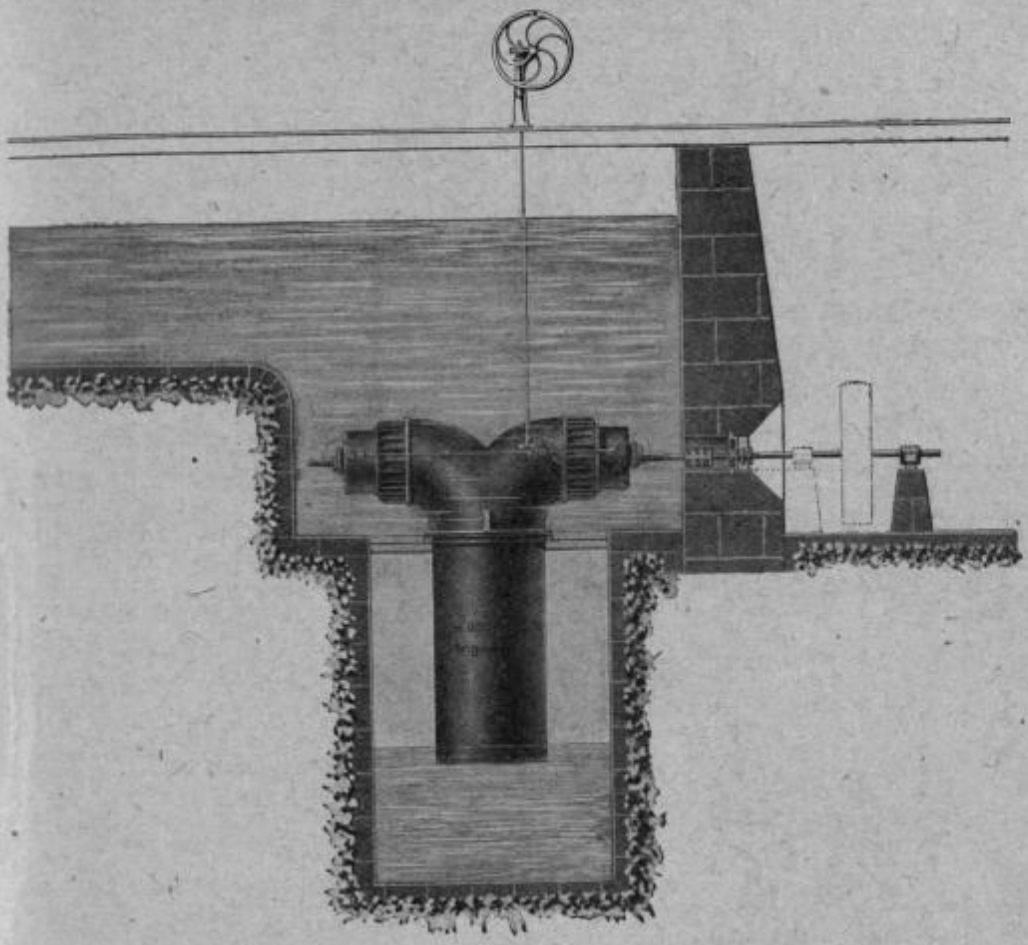


FIG. 438. — Installation de turbine double « La Houille Blanche ».

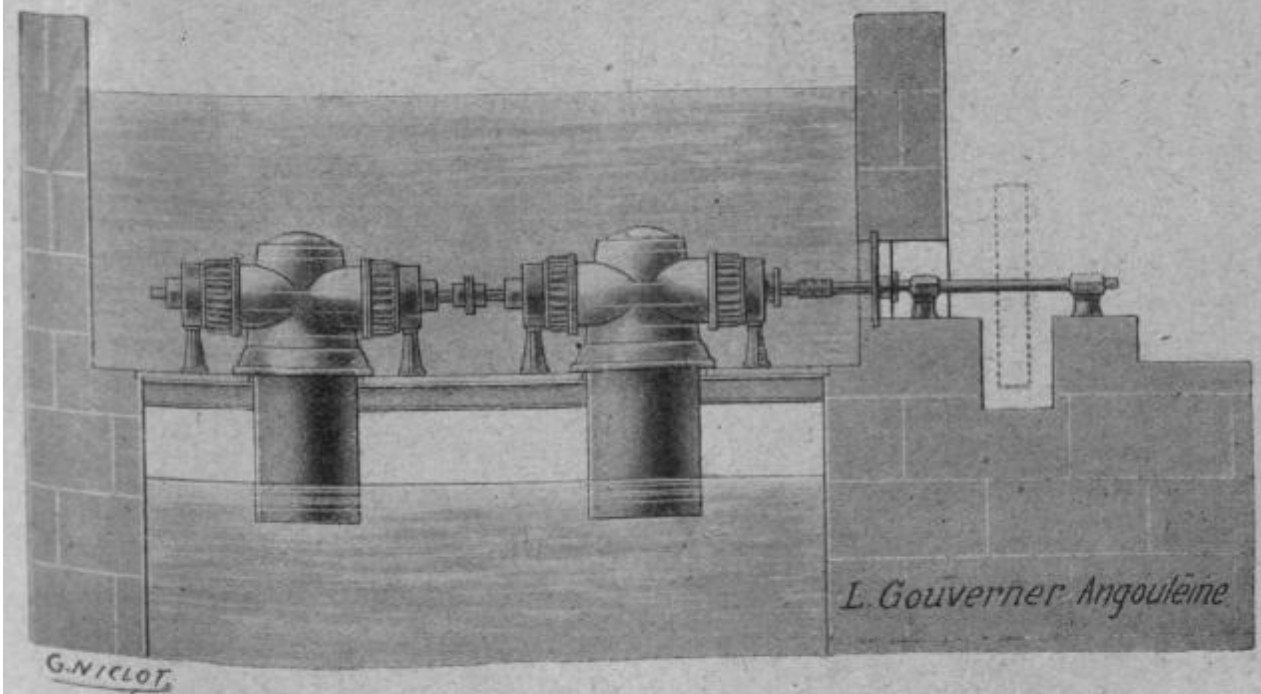


FIG. 439. — Installation de turbine quadruple « La Houille Blanche ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ciable de supprimer les renvois par engrenages, ce qui compense la diminution de rendement entraînée par l'adoption des grandes vitesses ; au point de vue de leur construction l'usinage ne comporte uniquement que

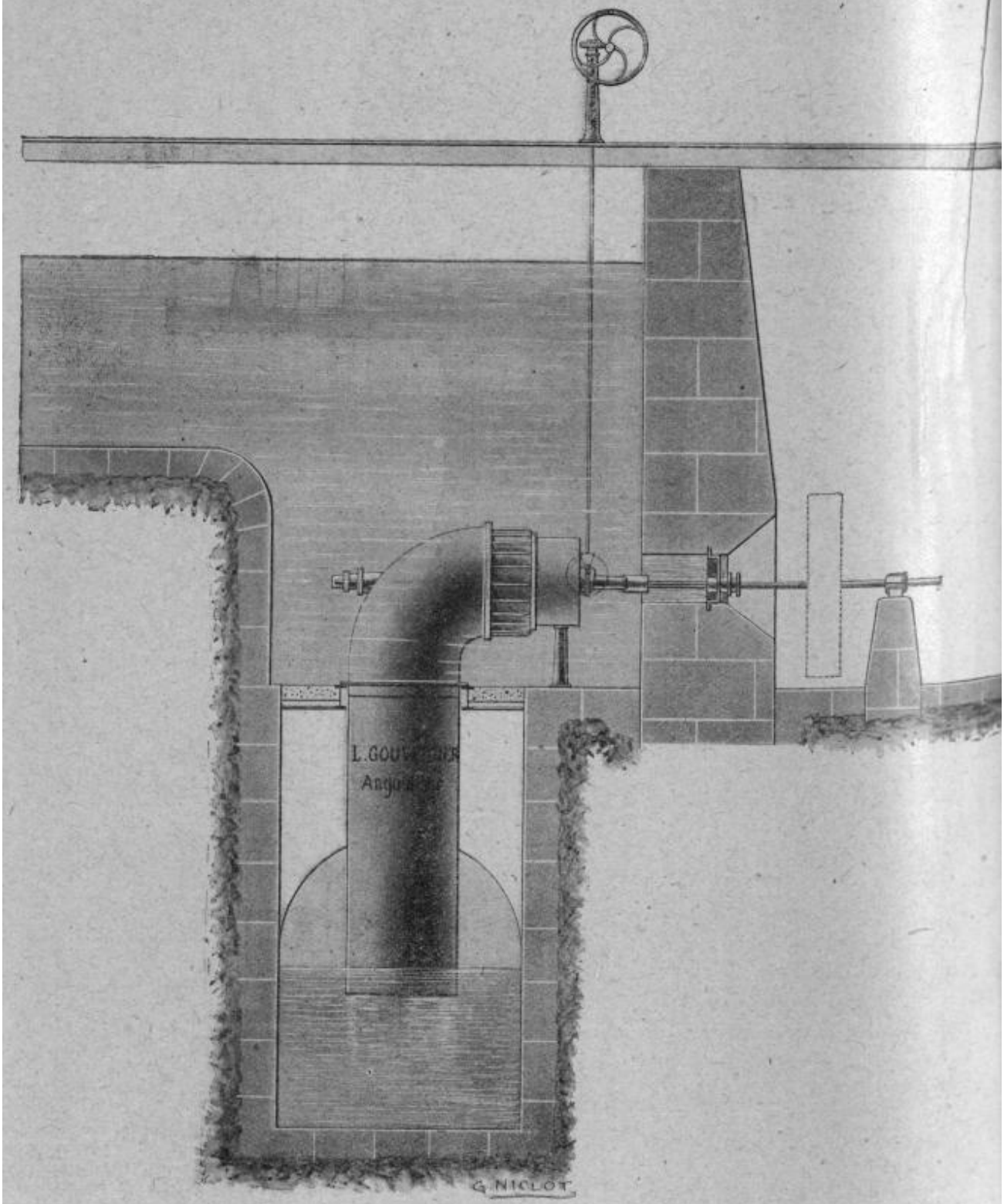


FIG. 440. — Installation de turbine sans bâche « La Houille Blanche ». Turbine simple.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du travail de tour, ce qui permet de les livrer à des prix particulièrement bas.

Nous donnons, d'après M. J. Laffite, le calcul d'une turbine prototype, le principe de la similitude permettant de ne faire que pour une seule unité d'une série les calculs d'établissement.

Soient : Q le débit à donner par la turbine sous une chute H, m le coefficient de contraction relatif à la dimension du distributeur, S, la section du distributeur supposé grand ouvert, K, le degré de réaction, on a :

$$Q = mS \times K\sqrt{2gH}. \qquad (1)$$

Si l'on construit la courbe représentée par l'équation (1), où S et K sont des constantes et où m varie selon la hauteur de chute (soit de 0,850 à 0,900 pour chutes de 1 à 9 mètres), on obtient une courbe d'allure parabolique représentée par la (*fig.* 441) qui donne le débit Q correspondant

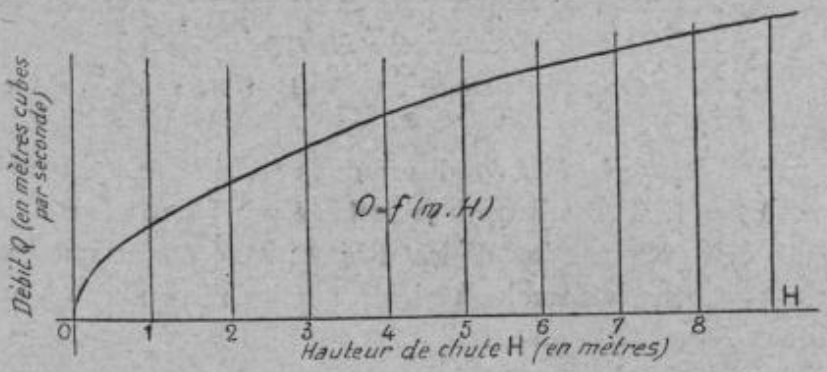


FIG. 441. — Diagramme relatif à la turbine prototype d'une série.

aux différentes valeurs de la hauteur de chute H, chaque groupe de deux valeurs correspondant aux conditions sous lesquelles la turbine étudiée pourra fonctionner à pleine admission.

La puissance nette T de la chute étant donnée par l'expression :

$$T = QDH = PH,$$

cette puissance sera représentée graphiquement par l'aire comprise entre la courbe Q, l'axe des abscisses et l'ordonnée correspondante, l'échelle dépendant de la valeur du poids spécifique D.

La vitesse U de l'eau dans la conduite de décharge donne lieu à une perte de travail et la considération des puissances nous fournit :

$$U^2 = M2gH. \qquad (2)$$

On calcule la section de cette conduite en se donnant M ; on aura par suite U, d'après (2) et on en déduit la valeur de S.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La section S étant constante pour une même turbine, elle fournit, pour les différents débits, des coefficients M donnés par :

$$(3) \qquad M = \frac{Q^2}{S'^2} \times \frac{1}{2gH} = \frac{m^2 S^2 K^2 2gH}{S'^2 2gH} = m^2 K^2 \frac{S^2}{S'^2};$$

S', section débitante du distributeur.

On trouve ainsi pour M des valeurs dont on peut tracer la courbe représentative (*fig.* 442). L'utilisation théorique de la chute est 1—M et (2) sera

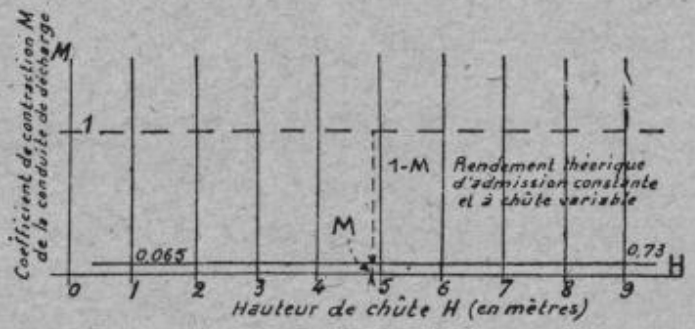


FIG. 442. — Diagramme relatif à toutes les turbines d'une chute.

donnée par cette courbe à la condition de la considérer comme rapportée à la ligne M = 1. Ce rendement est affecté par les remous et pertes de charge dus à la construction de la turbine ; il ne donne que les valeurs des variations pour la marche à pleine admission sous des hauteurs de chute différentes.

Application. — Soit une turbine présentant les conditions suivantes :

$$Q = 0^{m3},360 ; \quad H = 0^{m},900 ; \quad U = 1^{m},028 ;$$

D (diamètre de la conduite de décharge) $= 0^{m},660$;

M (perte d'énergie) $= \frac{6}{100}$ de la puissance de la chute.

Le diamètre de la roue mobile $= \frac{7}{10}$ de D, soit $0^{m},462$. Prenons $K = 0,55$.

La vitesse de sortie V du distributeur est donc :

$$V = 0,552gH.$$

Et la section débitante S' du distributeur est $S' = \frac{Q}{V}$.

Dans le cas supposé : $V = 2^{m},310$ et $S' = 0^{m2},181$, en tenant compte d'une perte de charge de 0,85 due à la forme des aubes directrices.

D'autre part l'angle adopté pour l'inclinaison des vannettes (turbine à vannettes indépendantes) sur la circonférence est égal à 25° et l'épaisseur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'extrémité est de 4 millimètres. L'ouverture A d'un distributeur sera sensiblement donnée par :

$$A = \frac{2\pi R}{n} \sin (25° + 15°),$$

n étant le nombre des aubes distributrices. Dans le cas présent ce nombre est égal à 12 et l'ouverture A du distributeur égale à $0^m,071$. La hauteur du distributeur est dès lors :

$$\frac{0^{m2},181}{0^m,071 \times 12} = 0^m,215.$$

Pour éviter les remous, on donne à la couronne mobile la même hauteur qu'au distributeur, et pour une turbine à grande vitesse, on devra tracer les aubes de façon que la vitesse circonférencielle de la turbine à l'entrée soit les $\frac{9}{10}$ de la vitesse due à la chute ; on a donc pour le nombre de tours N :

$$N = \frac{60 \times \sqrt{2gH} \times 0,9}{3,14 \times D}$$

En particulier, sous une chute de $0^m,900$, le nombre de tours est égal à 158 ; la courbe représentative des nombres de tours de la turbine sous les chutes diverses est évidemment une parabole.

Si l'on construit le triangle des vitesses à l'entrée, on en déduit, en grandeur et direction, la vitesse relative W, à laquelle le premier élément de l'aube doit être tangent ; W est ici trouvé égal à $1^m,95$. Le nombre des aubes mobiles est de 10, la section sera $\frac{0,360}{1,950 \times 0,85} = 0^m,216$ et la distance normale entre les aubages : $\frac{0^m,216 \times 10}{0^m,215} = 0^m,100$.

Tracé des aubages mobiles. — Comme pour toutes les turbines, le tracé des aubages mobiles est avant tout une question de pratique. Cette question, des plus délicates dans les turbines mixtes, a, la plupart du temps, été résolue expérimentalement. Une turbine est essayée dans des stations avec des aubages mobiles dont on fait varier la forme, le nombre, l'inclinaison, jusqu'à ce que l'on arrive pratiquement à de bons résultats ; l'on s'impose comme condition, pour la construction des premiers aubages, que la vitesse relative à la sortie des aubes soit égale à la vitesse circonférencielle de l'aube au même point. La forme définitive obtenue, on trace l'épure d'après celle-ci et on en déduit approximativement la forme des aubages des autres turbines de la série ; cette épure est suffisante pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

établir tous les calibres nécessaires pour la construction des formes à noyaux des surfaces convexes et concaves des aubes. L'épaisseur de celles-ci est déterminée par l'habileté professionnelle des fondeurs chargés de les exécuter et par la matière dont elles sont formées. Il faut tenir compte pratiquement des queues d'aronde nécessaires à l'assemblage des aubes avec le moyeu, d'une part, et avec la couronne, d'autre part.

Calcul des dimensions des autres organes. — Connaissant le nombre de tours du moteur et la force qu'il transmet, on en déduit le diamètre de l'arbre et celui du moyeu. Les dimensions à donner à la couronne peuvent être calculées de différentes façons. Dans la généralité des cas, cette couronne n'a pour but que d'assurer la rigidité de l'ensemble ; mais il en est d'autres où, pour assurer une régularité plus grande au mouvement de rotation, on fait de celle-ci un véritable volant monté sur l'arbre de la turbine ; on la calcule alors comme un volant ordinaire. Il n'y aura évidemment intérêt à le faire que dans le cas où la machine, commandée directement par la turbine, donne lieu, à chaque tour, à des variations notables de travail résistant.

Le reste de la construction n'est plus qu'une question de technologie que chaque maison résout à sa façon.

Calcul des dimensions des turbines de la série. — Les calculs précédents mettent en possession des dimensions de tous les éléments d'une turbine prototype qui sera un des numéros de la série à établir et on sait quels sont, pour des hauteurs de chutes différentes, les débits qui lui sont nécessaires pour marcher à pleine admission.

On prend comme constantes de construction :

1° Le rapport A entre le diamètre de la roue mobile et la hauteur du distributeur ;

2° L'inclinaison α des aubes distributrices sur la circonférence de la roue mobile ;

3° Le degré de réaction K et le degré de vitesse V, c'est-à-dire le rapport entre la vitesse circonférencielle de la roue mobile et la vitesse théorique due à la chute ;

4° La perte théorique M de travail due à la vitesse de l'eau dans le tube d'évacuation.

Le but poursuivi, de construire *a priori* une série de moteurs, impose évidemment les dimensions de ceux-ci et, par conséquent, le diamètre de leur roue mobile qui est pris comme base de classification.

Partant de ce diamètre, un élément d'une turbine se déduira de l'élément correspondant de la turbine prototype au moyen de relations du premier et du deuxième degré qu'il est facile d'établir et dont on peut simplifier l'emploi par le tracé de graphiques.

Il est particulièrement intéressant d'étudier les variations simultanées

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des débits, chutes et diamètres et aussi des débits, chutes et vitesses de rotation.

Si l'on représente ces variables par Q, H, D et V, on voit immédiatement qu'elles sont liées par une relation de la forme :

$$aQ - bD^2\sqrt{H} = 0,$$

ou :

$$aQ - bV^2\sqrt{H} = 0,$$

a et b étant des coefficients positifs constants.

Ces deux relations peuvent s'étudier de la même façon ; nous étudierons la première seulement.

Par rapport aux trois axes de coordonnées OQ, OD, OH (*fig.* 443), cette équation représente une surface et les quantités Q, D, H étant essentiellement positives, il n'y a à considérer que la partie comprise dans le trièdre positif.

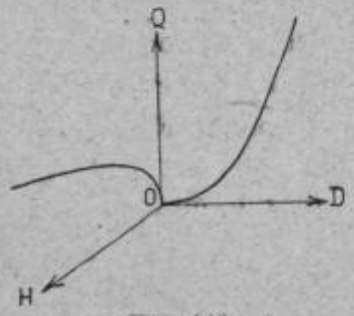


FIG. 443.

La section de ces surfaces par des plans $D = \alpha$ et $H = \beta$ donne des paraboles qui représentent les variations étudiées précédemment de H avec Q et de Q avec D.

Une parallèle à l'un des axes ne coupant cette surface qu'en un seul point, à des conditions Q et H imposées, correspondra un diamètre et un seul. Si ce diamètre existe dans la série, l'adaptation est parfaite, sinon elle l'est d'autant moins qu'il y a une différence plus grande entre le diamètre théorique et le diamètre de la turbine qui s'en rapproche le plus.

Mathématiquement, et pour une adaptation parfaite dans tous les cas, il faudrait un nombre infini de modèles. Pratiquement, les variations de chute et de débit des cours d'eau amènent des perturbations plus importantes que les différences théoriques ci-dessus ; aussi, généralement, une série d'une vingtaine de turbines a-t-elle été jugée suffisante pour les besoins courants de la pratique.

Leurs diamètres sont entre eux comme les nombres suivants : 9-12-15-18, etc.

L'application du principe de similitude se fait sans changement pour les petits modèles, mais pour les dernières unités de la série, le poids trop considérable et le gauchissement par retrait, avec les aubes de fonte, amènent à les remplacer par des aubes en tôle et la nécessité d'entretoiser plus fortement les plateaux fait augmenter le nombre des vannettes. L'épaisseur nouvelle des aubes mobiles, le nombre différent des distributrices conduisent donc à faire à nouveau une partie de l'étude faite pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la turbine prototype ; mais les résultats généraux relatifs aux débits, vitesses, rendements ne sont affectés en rien.

Ajoutons d'ailleurs que chaque turbine nécessite une mise au point spéciale que la pratique et des expériences répétées permettent seules de mener à bonne fin.

Cas de l'admission partielle. — Nous n'avons jusqu'ici examiné que le cas de la marche à pleine admission. Or, ici déjà, la distance entre l'extrémité des distributeurs et l'entrée de la couronne mobile empêche la distribution de l'eau de se faire conformément au triangle des vitesses. Il se forme en réalité un anneau liquide par lequel se fait l'entraînement de la couronne. Il s'ensuit des remous et des pertes de charge qui affectent le rendement théorique à pleine admission.

A admission partielle, le même phénomène se produit et il est difficile d'évaluer avec quelque vraisemblance les nouvelles variations théoriques de marche. Nous donnons ci-contre un graphique résultant d'expériences faites à Holyoke (*fig.* 444).

Le rendement R, on le voit, est maximum lorsque l'admission se fait aux trois quarts environ et il reste encore très bon pour les admissions plus réduites.

M. J. Laffite observe qu'il ne faut pas tirer de cette étude des arguments

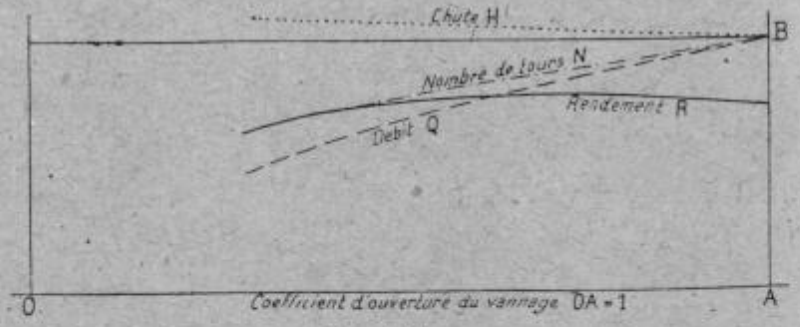


FIG. 444.

en faveur du vannage à aubes pivotantes contre le vannage à rideau. A son avis en tant que mode de vannage, les deux systèmes se valent. Les questions de prix et d'encombrement doivent seules faire préférer l'un à l'autre.

Les aubes mobiles doivent présenter une forme cylindrique sur une hauteur correspondante à celle du distributeur, les génératrices du cylindre parallèles à l'axe de la roue et sa directrice déterminée comme pour le cas d'une aube de turbine centripète, c'est-à-dire par la considération des vitesses relative et absolue de l'eau à l'entrée et à la sortie des aubages. Pour raccorder à cette surface cylindrique les aubes mobiles, celles-ci ont même axe que la turbine et présentent des surfaces concaves

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

telles que, — en supposant que l'eau quitte cette surface avec une vitesse absolue parallèle à l'axe, — les sections cylindriques, faites dans les aubes, fassent, en chaque point de sortie, avec un plan perpendiculaire à la roue, un angle déterminé par la règle du triangle des vitesses : vitesse absolue de l'eau, qui est supposée parallèle à l'axe et que l'on sait calculer ; vitesse de rotation de l'aube en ce point, qui est perpendiculaire à la première et que l'on connaît, puisque l'on sait déterminer la vitesse de rotation de la turbine ; enfin la vitesse déduite des deux premières, qui est la vitesse relative de l'eau à la sortie de l'aube et qui sert à déterminer la section de passage normal entre deux aubes consécutives. Partant de ces principes, on se donne le profil d'enroulement vertical de l'aube et on achève son tracé par tâtonnements (*fig.* 445).

Actuellement les aubes amovibles sont de plus en plus abandonnées par

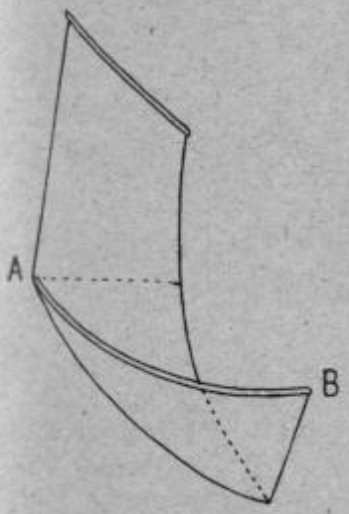


FIG. 445.

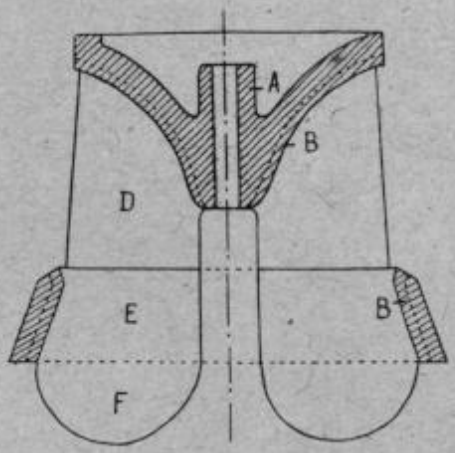


FIG. 446.

les constructeurs. On a recours à des aubes fixes en fonte ou en tôles d'acier. Pour les premières, on les réunit, d'une part au moyeu et d'autre part suivant la lunette AB de la cuiller, à une couronne circulaire en fonte, qui les entretoise et les rend rigides. Ces deux assemblages se font au moyen de queues d'aronde venues de fonte avec les aubes (*fig.* 446).

Celles-ci étant mises en place dans le moule de la roue, on coule dessus, avec de la fonte très chaude, le moyeu et la couronne. Mais le mode de reproduction par moulage empêche d'obtenir des aubes de même forme et de même inclinaison d'une turbine à l'autre. De plus les aubes en fonte sont lourdes, le poids total de la roue et par suite son prix s'en trouvent augmentés. Aussi, dans ces dernières années, les Américains ont-ils adopté des aubes en tôles d'acier sur un certain nombre de leurs gros moteurs. Les avantages qu'ils en ont tirés leur ont paru si concluants qu'ils tendent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à adopter ces aubes pour toutes leurs turbines et quelques maisons françaises les ont immédiatement suivis dans cette voie.

Les aubes en acier sont fixées au moyeu et à la couronne comme les aubes en fonte, mais leur nature même permet leur reproduction exacte.

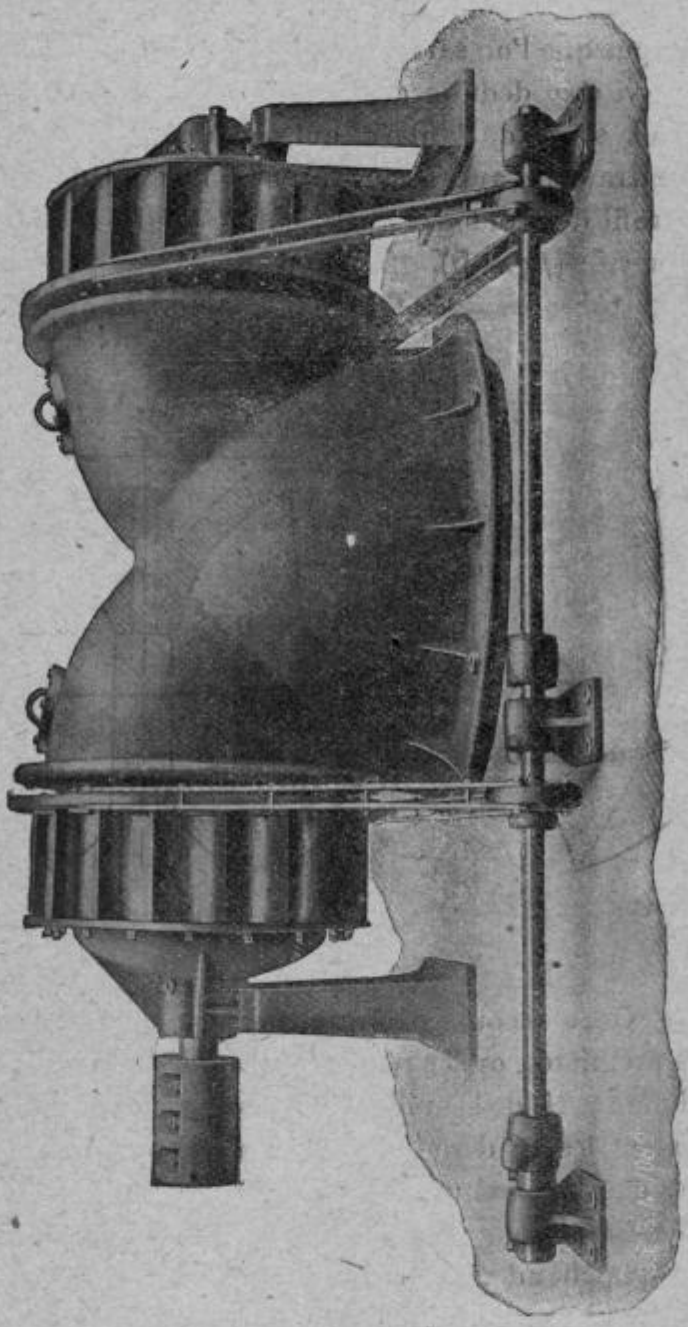


Fig. 447. — Turbine mixte à directrices mobiles, à axe horizontal double dans chambre d'eau ouverte. Construction Singrün.

La forme de la première étant trouvée, il devient relativement facile d'établir, d'après elle, les formes nécessaires au matriçage à chaud de la série. Les avantages de l'emploi de l'acier sont d'obtenir que la forme reste identique, que l'épaisseur des aubes est rigoureusement constante

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un moteur à l'autre et que le poli que prennent les aubes d'acier est supérieur à celui des aubes de fonte et par suite les frottements nuisibles sont diminués.

On peut donc espérer que, par l'introduction d'aubes en tôle d'acier, les roues deviendront aussi interchangeables hydrauliquement qu'elles le sont mécaniquement.

Les turbines mixtes à directrices mobiles *Singrün* se composent d'un

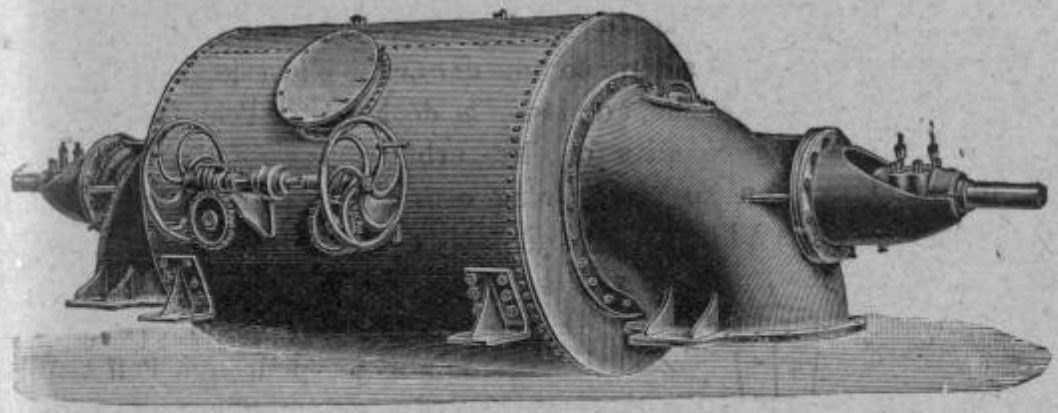


Fig. 448. — Turbine mixte à axe horizontal double dans huche. Construction Singrün.

socle en fonte dans lequel s'emboîte une couronne inférieure fixe qui porte des axes en acier autour desquels pivotent des directrices mobiles.

Un cercle mobile autour de la couronne fixe entraîne les directrices et

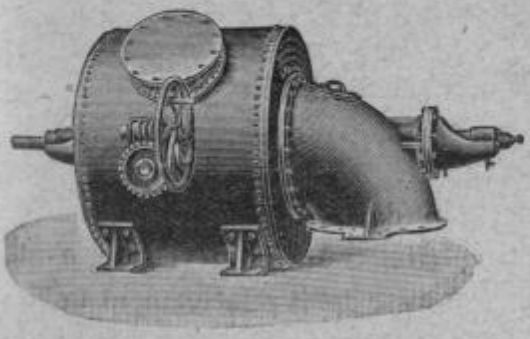


Fig. 449. — Turbine mixte à axe horizontal simple, dans huche. Construction Singrün.

Fig. 450. — Roue cloisonnée pour turbine mixte.

règle leur degré d'ouverture, par conséquent celui de l'admission de l'eau sur la roue motrice. Ces directrices se démontent isolément avec la plus grande facilité. Ces turbines ont sur celles à vanne cylindrique l'avantage de pouvoir absorber un volume d'eau un peu plus grand au moment des crues et de se prêter plus facilement au réglage automatique de la vitesse du moteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces turbines se construisent également pour chambres d'eau ouvertes et à axe horizontal (*fig.* 447 et 450).

VI. — TURBINES TANGENTIELLES OU ROUES PELTON

141. Fonctionnement des roues vives à réaction. — Ce genre de récepteur hydraulique nous vient d'Amérique, sous le nom de « roue Pelton » ; son rendement ne le cède en rien à ceux de nos meilleures turbines actuelles. On peut le considérer comme une turbine à action à axe horizontal, avec injection partielle, admission et décharge de l'eau tangentielles.

Par suite de leur constitution, les turbines tangentielles ne peuvent évidemment pas fonctionner en réaction, ni en turbines limites ; elles sont donc toujours à libre déviation. Par suite la vitesse périphérique de la roue est sensiblement la moitié de vitesse du jet pour que l'effet utile soit maximum.

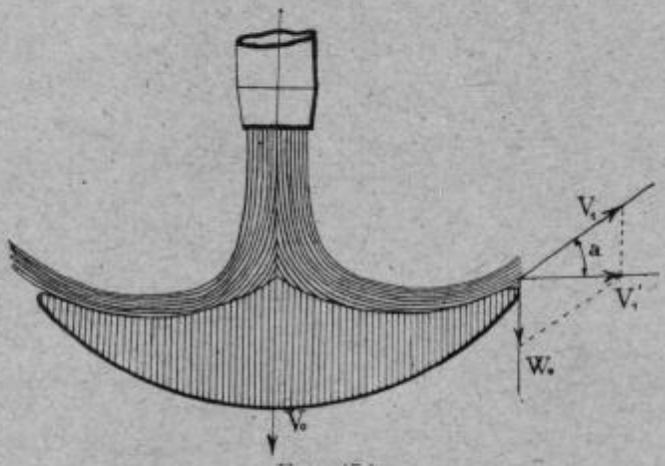


FIG. 451.

Les turbines américaines et celles à directrices mobiles ne pouvant s'appliquer aux très hautes chutes par suite de la trop grande vitesse qu'elles atteignent, les roues tangentielles ont dès leur apparition obtenu un grand et légitime succès en raison de leur rendement élevé et de leur construction simple. Elles ont l'avantage précieux, pour les applications électriques, d'avoir leur axe moteur horizontal.

Ces turbines sont employées maintenant dans la plupart des cas où l'on utilisait précédemment les turbines centrifuges à libre déviation, c'est-à-dire pour les chutes de moyenne hauteur avec débit relativement faible et pour les chutes de grande hauteur.

Les turbines tangentielles présentent des qualités tout à fait remarquables sous les rapports suivants : simplicité de construction, facilité d'entretien, haut rendement à toutes charges, sécurité dans les dispositifs de réglage de la vitesse. Ces qualités en font les turbines les plus parfaites à l'heure actuelle.

Les rendements des turbines tangentielles de bonne construction varient de 82 0/0, pour les faibles puissances, à 85 0/0 et plus pour les turbines de grande puissance. Suivant la façon dont est calculée et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tracée la machine, ces rendements maximum peuvent être obtenus soit à pleine charge, soit à trois quarts charge et même à demi-charge. En plaçant le maximum de rendement à trois quarts de charge, ce qui est le cas le plus fréquent, on peut dans des conditions normales conserver un rendement de 75 0/0, pour toutes les puissances comprises entre celle totale et la moitié de celle-ci.

D'autre part le rendement ne baisse que d'une quantité assez faible avec l'usure, ce qui assure une supériorité incontestable à la turbine tangentielle avec injecteur à aiguille sur les types de turbines centrifuges à libre déviation. Il n'est pas rare de constater, sur des turbines usées, des rendements de 50 à 60 0/0, et l'on conçoit dans ces conditions quel gain de puissance on peut obtenir, dans certaines installations, en remplaçant des turbines Girard par des tangentielles.

Si V'_0 et V_1 sont les vitesses moyennes du jet à la sortie du distributeur et des augets et si W_0 représente la vitesse de rotation correspondante de la circonférence moyenne de la couronne (*fig.* 451), les vitesses relatives V_0 et V_1 de l'eau à l'entrée et à la sortie des augets sont :

$$V_0 = V'_0 - W_0 \quad \text{et} \quad V_1 = W_0 - V'_1.$$

Faisons pour le rendement maximum $V'_1 = 0$, on obtient :

$$W_0 = V'_0 - W_0.$$

Par suite :

$$W_0 = \frac{V'_0}{2}.$$

A la sortie, la vitesse absolue V'_1 a aussi une petite valeur, et l'autre doit être établie de telle sorte que V'_1 soit normale à W_0.

Quant à V'_0, ou vitesse moyenne à la sortie du distributeur, elle a pour valeur : $V'_0 = K\sqrt{2gH}$, H étant la charge sur le centre de l'orifice, et K un coefficient variant de 0,90 à 0,96.

Appelons n le nombre de tours par minute et D le diamètre de la roue, V_1 pris sur la périphérie des augets, on a : $W_0 = \frac{D \times n}{60}$. Pour avoir le rendement maximum, il faut que la vitesse de rotation W_0 soit :

$$W_0 = 0{,}94\,\frac{V'_0}{2}.$$

L'angle a est compris entre $\frac{1}{5}$ et $\frac{1}{10}$ V'_0.

Le type classique de ce genre de récepteur est la « roue Pelton », dans laquelle les aubes sont remplacées par des godets dont le fond présente

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une double courbure, de telle sorte que chaque godet offre deux aubes de sens inverse.

L'eau, dirigée au moyen d'un ou plusieurs ajutages coniques ou tuyères fixes, agit par sa force vive tangentiellement à la roue (*fig.* 452).

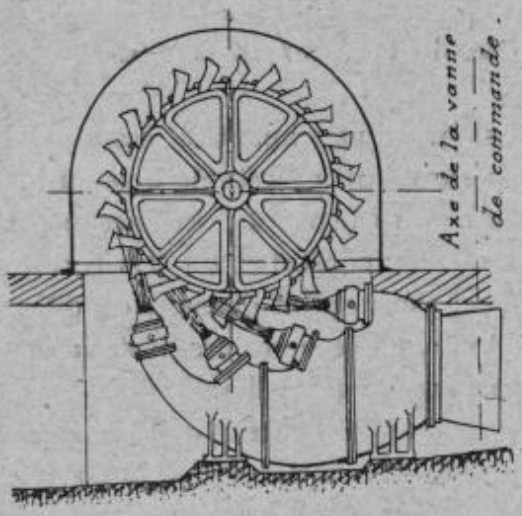


Fig. 452.

Le jet frappe le milieu de l'auget (*fig.* 453) et s'épanouit en deux nappes symétriques. Chaque filet liquide s'incurve ainsi dans un plan tangent au disque de la roue et détermine, comme dans les turbines axiales et radiales, un effort tangentiel qui fait tourner la roue.

L'auget de la roue Pelton affecte une forme caractéristique en double cuiller que le jet d'eau embrasse complètement. La largeur totale de l'auget ou poche est généralement prise égale à sept fois le diamètre du jet.

La détermination du nombre des augets est d'ordre assez difficile ; ils ne doivent être ni trop rapprochés, afin d'éviter un nombre trop grand de projections du jet moteur, ni trop espacés, ce qui peut donner lieu à des pertes d'eau. D'autre part, la position du jet à une hauteur très voisine du centre de la roue, qui facilite un moins grand nombre d'augets, est limitée dans sa position supérieure par la considération que le jet s'écoulerait dans l'intervalle des augets à l'intérieur de la roue.

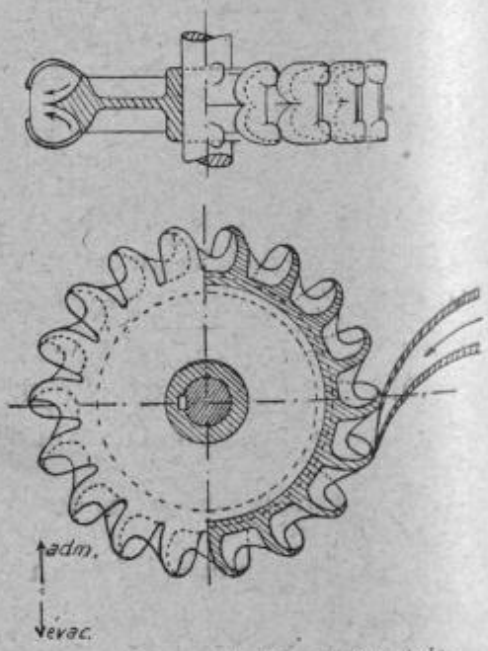


Fig. 453. — Turbine horizontale.

L'eau des augets doit s'échapper en lames minces pour qu'à sa sortie elle ne puisse venir frapper les parties extérieures des aubes qui suivent.

Dans ces roues, la vitesse dépendant de la hauteur de la chute est, par suite, toujours très grande ; elles conviennent spécialement pour les faibles débits et les chutes élevées.

Cependant, en employant des ajutages multiples, on peut utiliser des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débits assez importants ; dans ce cas, le premier jet est dirigé horizontalement et les autres tuyères s'étagent progressivement, de façon à fournir des jets se rapprochant de plus en plus de la verticale. Cette disposition offre cet avantage d'un réglage du débit plus commode, par l'ouverture ou la fermeture d'un ou plusieurs jets, alors qu'avec un seul projecteur on est obligé, pour arriver à ce résultat, d'étrangler plus ou moins l'orifice, ce qui déforme le jet au préjudice du rendement.

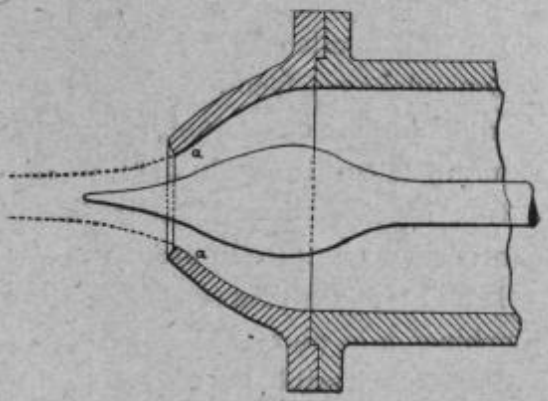


Fig. 454. — Injecteur à aiguille.

Ces roues doivent être montées avec grand soin et parfaitement équilibrées ; avec des appareils bien construits, le rendement est aussi élevé que celui des meilleures turbines.

Les vannages sont constitués par des aiguilles analogues à l'injecteur Giffard, par des observateurs articulés ou becs de canards ou par des obturateurs glissants.

Les dispositifs d'ajutages les plus employés en Amérique sont ceux de *Hell*, formé d'un cône de bronze commandé par une tige filetée, et de *Scharff*, composé de deux vannages coniques convergents.

Un type d'ajutage assez répandu est celui de Cauchin, adopté par la Société de constructions mécaniques de Vevey. La maison Escher Wyss a un ajutage qui agit sous l'action d'un régulateur.

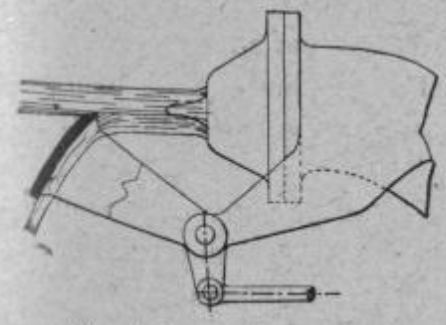


Fig. 455. — Déflecteur.

La régularisation de la vitesse des turbines tangentielles s'obtient soit par *l'aiguille* (*fig.* 454), soit par *le déflecteur* (*fig.* 455), soit par l'aiguille et le déflecteur simultanément.

Le réglage par l'aiguille qui s'obtient en agissant sur l'injecteur s'emploie lorsque les conduites sont relativement courtes ou que l'on peut adopter des vitesses de fermeture relativement lentes, de façon à limiter à des valeurs acceptables les variations de pression consécutives aux mouvements du régulateur.

Nous avons vu que le déflecteur est un organe qui dévie le jet et l'envoie tout ou en partie directement dans le canal de fuite sans que la fraction déviée atteigne la roue. Le même résultat peut aussi être obtenu en employant des buses articulées dont on peut faire varier la direction de l'axe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'un ou l'autre de ces procédés permet de faire varier le couple moteur tout en laissant rigoureusement constant le débit de la conduite. Le réglage de la vitesse se fait donc en évitant absolument toute variation brusque de pression dans la conduite forcée. Mais ce système entraîne une perte continuelle d'eau, toutes les fois que le déflecteur entre en action.

Cependant cet inconvénient devient un avantage lorsqu'une usine doit marcher à régime constant, pour respecter par exemple, certains droits, en assurant la constance du débit de la rivière à l'aval de l'usine.

L'action seule du déflecteur s'impose, quand on munit les turbines tangentielles de simples limiteurs de vitesse et non de régulateurs.

Dans la plupart des cas, la solution consiste à proportionner le débit des machines à la puissance qu'elles doivent fournir, de façon à économiser autant que possible l'eau dont on dispose et dans ces conditions il est impossible d'employer le réglage au moyen du déflecteur seul. La meilleure solution consiste à recourir à l'emploi simultané de l'aiguille et du déflecteur, qui réunit les avantages individuels de chacun de ces organes.

Dans ce cas, lors d'une diminution brusque de charge, le régulateur agit rapidement sur le déflecteur, produisant ainsi une diminution rapide du couple moteur pour ramener la turbine à sa vitesse normale, après un faible écart de vitesse. Puis l'aiguille se referme lentement jusqu'à ce que le jet ait pris un diamètre tel que le déflecteur se trouve exactement au bord de lui, sans le couper. La vitesse de fermeture de l'aiguille est calculée de façon que les surpressions qui en résultent soient aussi faibles qu'on le désire.

Lors d'une augmentation de charge, au contraire, le régulateur ouvre à la fois l'aiguille et le déflecteur. On peut dans ce cas admettre des vitesses d'ouverture de l'aiguille suffisamment lentes pour que les dépressions correspondantes n'occasionnent ni danger pour la conduite, ni troubles dans le réglage.

Le réglage à double action système *Picard et Piclet* comprend deux servo-moteurs hydrauliques commandés par un régulateur. L'un agit rapidement sur un déflecteur qui dévie le jet en dehors de la roue lors d'une décharge brusque de la turbine, tandis que l'autre actionne directement un pointeau de réglage de débit. Le mouvement de ces organes est basé sur le principe suivant : à chaque charge de la turbine correspond un diamètre du jet et une position du déflecteur, ce dernier est tangent au jet. Ainsi en pleine charge le jet a son plein diamètre et le déflecteur est en partie abaissé de façon à lui être tangent.

Le deuxième servo-moteur actionnant le pointeau est commandé par le premier au moyen d'une came dont la forme est choisie de façon à assurer la tangence du déflecteur au jet en tout temps, sauf lorsque se produisent des variations brusques de charge de la turbine. Il est placé directement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur la tige du pointeau et comporte un piston différentiel. Le cylindre principal est soumis à une pression d'huile variable et l'autre à une pression d'huile constante.

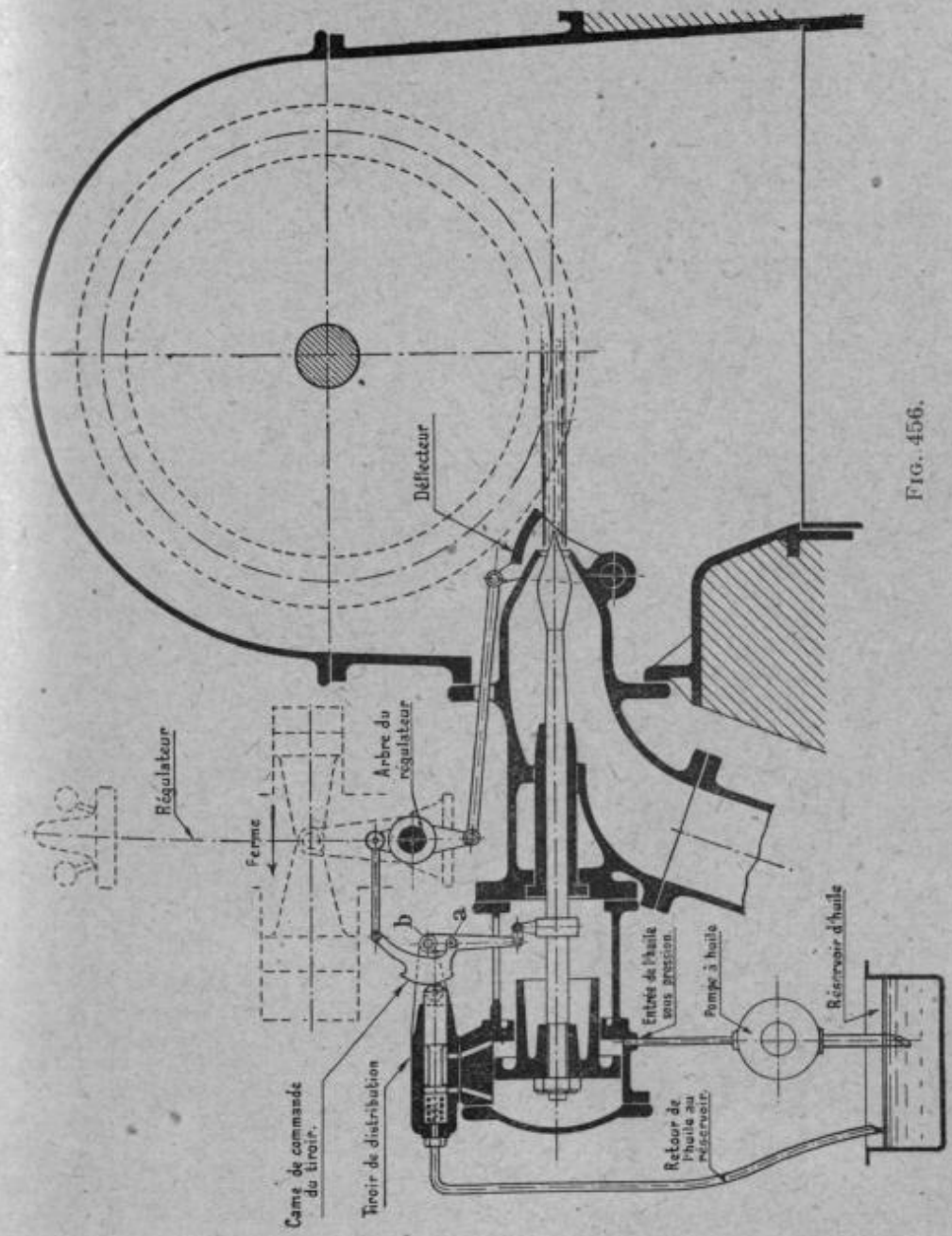


FIG. 456.

Un distributeur d'huile placé directement sur le servo-moteur met, suivant la position de son tiroir, le cylindre principal en communication soit avec l'huile sous pression, soit avec la pression atmosphérique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans sa position d'équilibre le tiroir de distribution clôt le cylindre principal, et par là, immobilise le pointeau. Un diaphragme calibré dans chaque cas particulier limite le débit d'huile, et par là le mouvement du pointeau, à une vitesse telle qu'en aucun cas la fermeture ne puisse provoquer dans la conduite forcée un coup de bélier dangereux.

Le temps de fermeture de l'injecteur peut être très grand, suivant la conduite. Ainsi à l'usine hydroélectrique de Fully, ce temps a été réglé à près de une minute. Il est réglé définitivement au montage.

Le fonctionnement s'opère comme suit. Lors d'une décharge brusque de la turbine, le déflecteur est rapidement baissé par son servo-moteur et dévie le jet hors de la roue, évitant ainsi que tout emballement puisse se produire. Au moyen d'un levier le régulateur pousse en même temps une came qui pivote autour du point *a* temporairement fixe (*fig.* 456). Cette came pousse le tiroir de distribution permettant ainsi l'entrée de l'huile sous pression dans le cylindre principal du servo-moteur.

La pression montant dans ce cylindre, l'équilibre est rompu et le pointeau se meut vers sa position de fermeture. Dans ce mouvement le pointeau agit sur le levier d'asservissement qui pivote autour du point *b* et ramène la came en arrière. Le tiroir sous l'effet d'un ressort revient à sa position d'équilibre et le pointeau est de nouveau immobilisé. En cas de décharge, le déflecteur suit le jet, sans le toucher.

Lors d'une charge, les mouvements du déflecteur, de la came, du tiroir de distribution et du pointeau, s'effectuent en sens inverse; l'huile du cylindre principal s'écoule, et le pointeau poussé par le piston à pression constante ouvre la tuyère jusqu'à ce que l'asservissement du servo-moteur immobilise le pointeau dans sa nouvelle position.

La turbine Pelton à laquelle ce dispositif est appliqué peut avoir plusieurs déflecteurs et pointeaux. Dans ce cas un seul servo-moteur suffit à actionner tous les déflecteurs et les pointeaux ont un servo-moteur commun ou particulier. Le fait d'actionner directement le pointeau par un servo-moteur propre présente sur le système à action directe par un servo-moteur placé au régulateur, l'avantage de supprimer les retards dus aux jeux et aux flexions des organes de transmission. Le déflecteur étant toujours tangent au jet suit avec précision et avec une grande sensibilité les mouvements du régulateur ; en cas de décharge il dévie donc le jet sans aucun retard quel que soit le diamètre de ce dernier.

A l'usine hydroélectrique de Sion, où il a été installé quatre turbines Pelton de 1.100 chevaux, on a constaté que l'augmentation de vitesse en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cas de décharge totale n'a été que de 8 0/0 supérieure à la vitesse de régime après la décharge, et la surpression presque nulle, par suite du temps très long de fermeture.

La (*fig.* 457) reproduit différents tachogrammes relevés pendant les

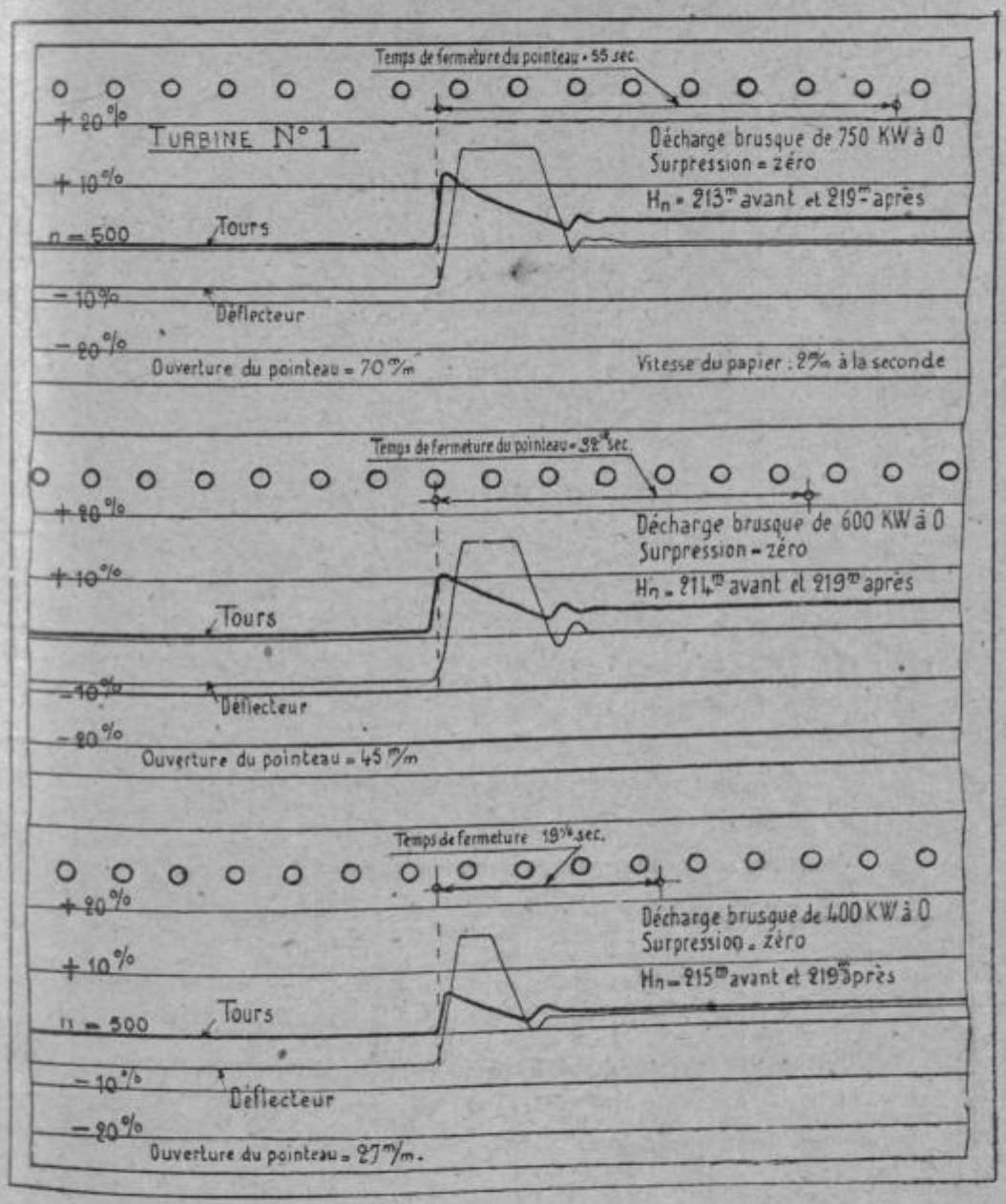


FIG. 457.

essais. Ce système de réglage permet de mettre un alternateur en phase sur le réseau dans un temps très limité ; à l'usine de Sion, ce temps n'est que de trente à quarante-cinq secondes à partir de la mise en marche.

Les augets s'usent assez rapidement sous l'influence des jets puissants

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui les actionnent, si surtout l'eau contient des sables. Il convient donc d'avoir des eaux pures et de disposer les augets sur le disque de la roue, pour en faciliter le remplacement.

Le tableau suivant fournit des données intéressantes sur les roues turbines à grande vitesse, construites par la maison Teisset, Chapron et Brault.

CHUTES en MÈTRES		NUMÉROS DES ROUES 1	2	3	CHUTES en MÈTRES		NUMÉROS DES ROUES 1	2	3
30	Débit....	12.30	21.82	49 16	90	Débit ...	21.28	37.79	85.12
	Chevaux.	4.21	7.47	16.90		Chevaux.	21.91	38.91	87 66
	Tours....	507	380	253		Tours ...	881	660	440
42	Débit....	14.53	25.80	58.12	102	Débit....	22.66	40.24	90.64
	Chevaux.	6.97	12.40	27.91		Chevaux.	26 45	46.97	106.06
	Tours ...	599	449	299		Tours ...	937	702	468
54	Débit....	16.46	29.23	65.84	120	Débit....	24.56	43.64	98.24
	Chevaux.	10.20	18.05	40.68		Chevaux.	33.75	60.10	135.30
	Tours ...	680	510	340		Tours ...	1016	762	508
66	Débit	18.18	32.28	72.72	150	Débit. ..	27.46	48.76	109.84
	Chevaux.	13.72	24.37	54 90		Chevaux.	47.23	83.95	189.13
	Tours ...	752	564	376		Tours ...	1137	852	568
78	Débit....	19.81	35.18	79.24	170	Débit....	30.08	53.42	120.32
	Chevaux.	17.68	31.40	70.74		Chevaux.	62 15	111.31	248.63
	Tours ...	820	615	410		Tours ...	1245	993	622

Force en chevaux des roues à plusieurs ajutages

CHUTES en MÈTRES	NUMÉROS DES ROUES 4 à deux ajutages	5 à deux ajutages	6 à deux ajutages	7 à deux ajutages	8 à trois ajutages	9 à quatre ajutages	10 à cinq ajutages
	chevaux	chevaux	chevaux	chevaux	chevaux	chevaux	chevaux
30	33.70	59.85	134.77	234.85	353.30	471.00	588.80
45	62.00	110.25	247.90	429.35	644.05	858.70	1073.40
60	95.40	169.31	381.37	661.50	992.35	1323.10	1653.90

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TURBINES PELTON A UN INJECTEUR

Séries courantes pour chutes jusqu'à 180 mètres

ÉTABLISSEMENTS PICCARD-PICTET ET NEYRET

H = Chute nette en mètres Q = Débit en litres par seconde
N = Puissance en HP n = Nombre de tours par minute.

MODÈLE N°	35			50			72			95			120		
H	Q	N	n	Q	N	n	Q	N	n	Q	N	n	Q	N	n
10	4.2	0.37	600	9.4	0.85	400	21	1.9	265	38	3.5	200	66	6.2	150
15	5.2	0.70	740	11.5	1.6	490	26	3.6	325	46	6.5	245	81	11.5	185
20	6	1.10	890	13.4	2.5	570	30	5.6	375	53.5	10	285	94	18	210
25	6.7	1.55	950	14.9	3.5	635	33.5	7.9	425	60	14.5	315	105	25.5	240
30	7.3	2	1040	16.4	4.6	695	36.5	10.5	465	66	19.5	350	115	34	260
35	7.9	2.6	1120	17.7	5.8	750	39.5	13.5	500	71	25	375	125	44	280
40	8.4	3.2	1200	18.9	7.2	800	42.	16.5	535	75	30	400	133	53	300
50	9.4	4.5	1340	21	10	900	47	23	595	84	42	450	149	75	335
60	10.3	6	1470	23	13.5	980	52	31	655	92	56	490	163	100	370
70	11.1	7.6	1590	25	17	1060	56	39	705	100	71	530	176	125	400
80	11.9	9.3	1700	26.5	21	1140	60	48	755	107	87	570	188	155	425
90	12.6	11.2	1800	28.5	25.5	1200	63.5	57	800	114	105	600	200	185	450
100	13.3	13	1900	30	30	1270	67	67	845	119	120	635	210	220	475
120	12.2	14.5	2090	27.5	33	1390	60	74	925	108	130	695	190	240	525
140	11.1	15.5	2250	25.5	36	1500	56	80	1000	137	140	750	178	260	560
160	10.3	16.5	2400	23.5	38	1600	52	85	1070	91	150	800	168	280	600
180	9.7	17.5	2550	22	40	1700	49	90	1130	86	160	850	160	300	640

Modèles renforcés pour 120 à 180 mètres de chute nette

MODÈLE N°	35			50			72			95			120		
H	Q	N	n	Q	N	n	Q	N	n	Q	N	n	Q	N	n
120	14.6	17.5	2090	32.5	39	1390	73	98	925	132	160	695	230	285	525
140	15.8	22	2250	35	49	1500	79	112	1000	141	200	750	250	365	560
160	16.8	27	2400	37.5	60	1600	85	138	1070	151	245	800	265	440	600
180	18	32.5	2550	40	72	1700	90	165	1130	160	295	850	280	525	640

142. Types de roues Pelton. — Les augets cylindriques à l'origine ont été remplacés par deux demi-ellipsoïdes déformés, accolés de façon à présenter toujours une arête médiane rectiligne ou augets ovoïdes échancrés à l'avant. Le disque portant les augets et les augets eux-mêmes sont faits en métal acier.

Les buses d'injection ou distributeurs des turbines ont la forme d'ajutages coniques fortement convergents avec réglage du débit par un pointeau, ce dernier organe ayant la forme d'une poire allongée avec une pointe très effilée, sur laquelle glisse la veine liquide convergente qui sort

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la buse conique. La buse à aiguille est due à l'ingénieur américain Doble. Comme pour les roues centripètes le maximum de rendement des

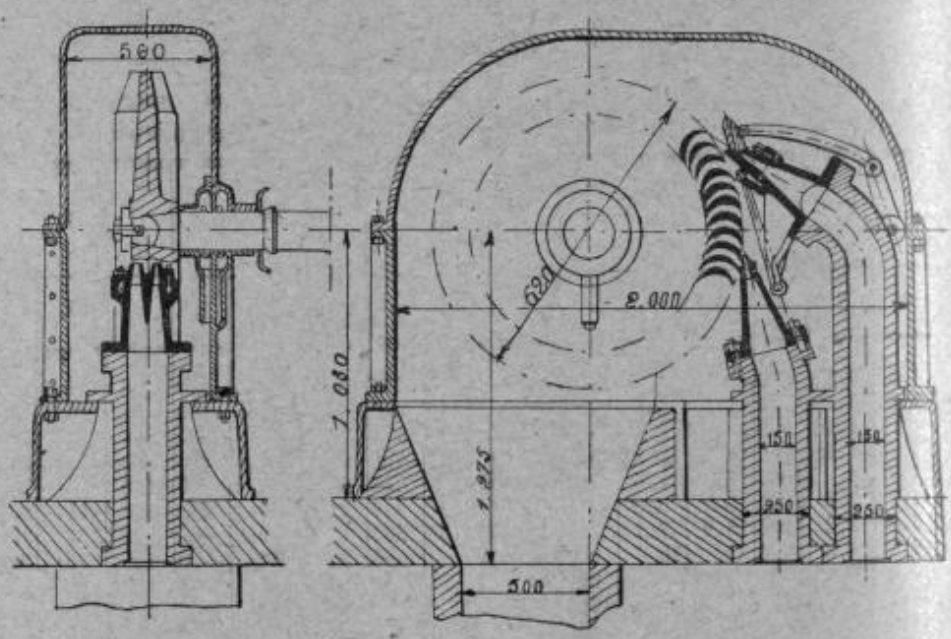


FIG. 458.

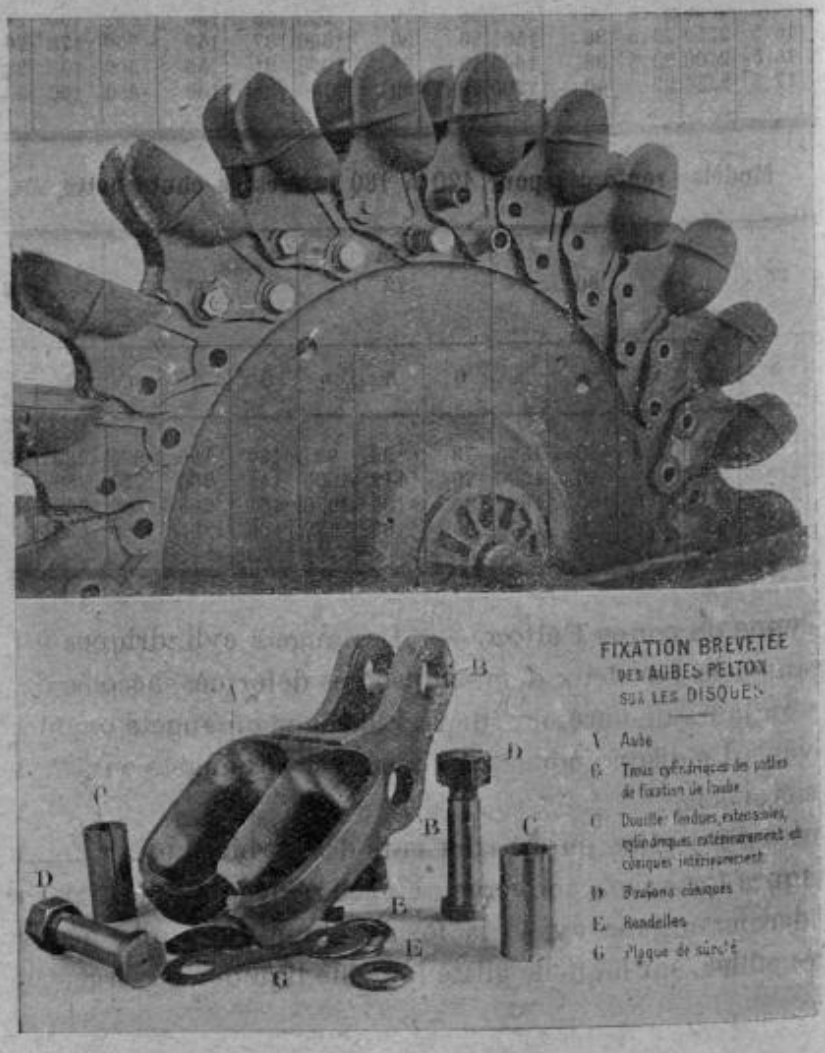


FIG. 459.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

roues Pelton correspond à 2/3 et même à 1/2 du débit maximum. Les turbines du genre Pelton de l'usine hydro-électrique de Campocologno (Suisse), construites par la maison Escher-Wyss et qui fonctionnent sous une chute de 440 mètres (§ 412), sont munies d'un servo-régulateur hydraulique et d'un dispositif de décharge qui dispense d'avoir un volant puissant, système qui convient bien quand les variations de charge sont peu importantes.

La fixation des aubes suivant le système Piccard-Pictet sur les couronnes des disques des roues de turbines Pelton se fait de la façon suivante. Chaque aube (*fig.* 459) possède deux fortes pattes d'attache qui viennent de part et d'autre de la couronne extérieure du disque sur laquelle l'aube se trouve ainsi placée à cheval. La fixation se fait au moyen de deux boulons que traversent, de part en part, le disque et les attaches des aubes.

Ces boulons sont légèrement coniques et engagés dans des douilles d'acier fendues sur toute leur longueur. Celles-ci ont à l'intérieur la même conicité que les boulons, tandis qu'à l'extérieur, elles sont rigoureusement cylindriques, ainsi que leurs logements dans les pattes des aubes et dans la couronne du disque, qui sont alésés avec précision.

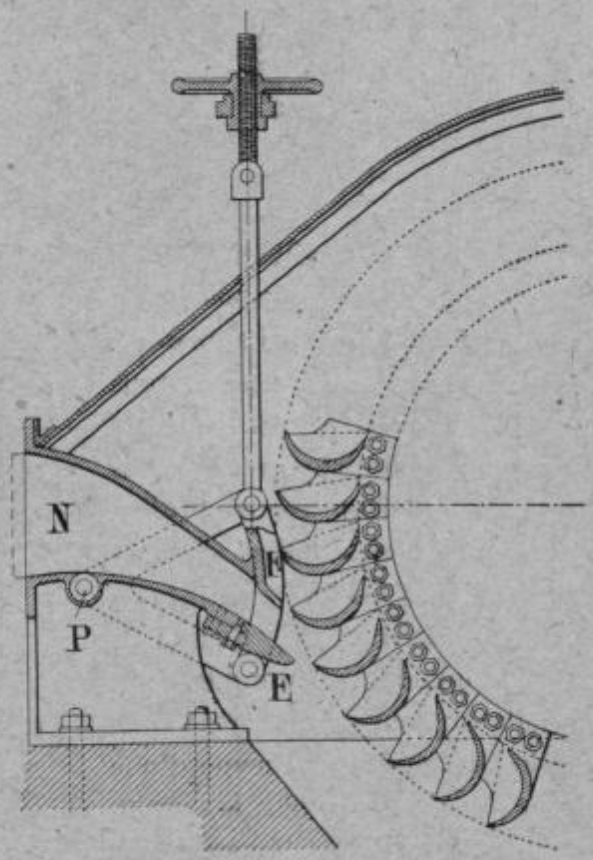
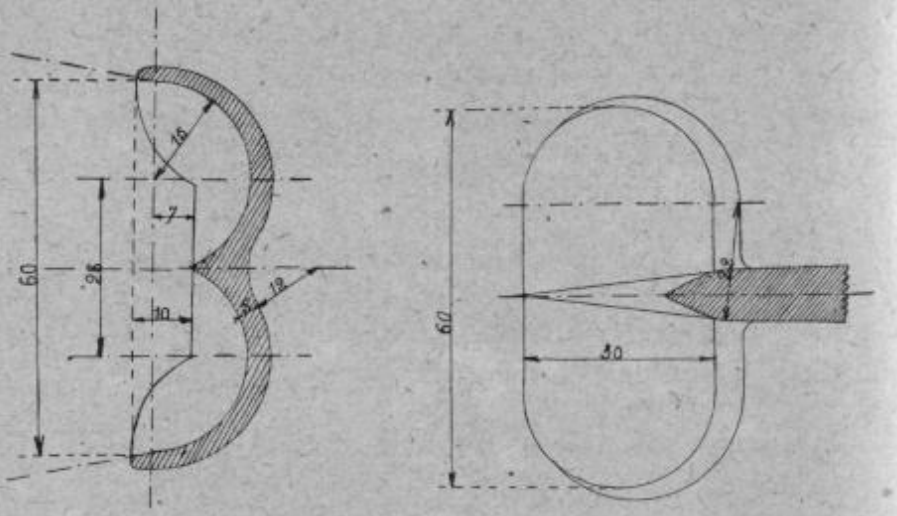


FIG. 460.

Cet assemblage permet de réaliser un serrage très puissant des douilles fendues contre les parois des trous dans les aubes et le disque. Les pattes des aubes sont en outre serrées contre les côtés de la couronne du disque grâce à des rondelles d'épaisseur déterminée, intercalées sous les têtes des boulons. Les écrous une fois serrés sont immobilisés par des plaques de sûreté qui sont recourbées d'un côté contre l'une de leurs faces et de l'autre contre une des pattes d'attache des aubes. En outre, des clavettes chassées entre les aubes, perpendiculairement au plan du disque, assurent la répartition sur les aubes voisines, des efforts périphériques supportés par l'une d'elles. Tout ébranlement des aubes sous l'effet des chocs répétés du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jet, à chaque tour de roue, est ainsi rendu impossible. C'est l'avantage très appréciable que présente cette fixation sur celles par boulons ajustés,



travaillant au cisaillement, qui finissent par se rompre sous l'effet des ébranlements qu'ils subissent. D'autre part, le fait que les trous dans le disque et les attaches des aubes sont cylindriques et percés avec des gabarits, assure l'interchangeabilité des aubes et leur remplacement facile.

Dans les turbines de l'usine de Campocologno, la tubulure par laquelle arrive l'eau est située à la partie inférieure et pourvue d'une vanne manœuvrée par le piston servo-moteur suivant la commande donnée par un petit volant à main, ainsi que d'un obturateur en forme de pointeau, manœuvré par le piston. Une conduite de décharge permet d'en effectuer la vidange et la vanne de cette conduite secondaire est solidaire d'un piston actionné par le régulateur, de façon à maintenir constant le débit de la conduite forcée, malgré les variations de charge et, par conséquent, de débit de la turbine.

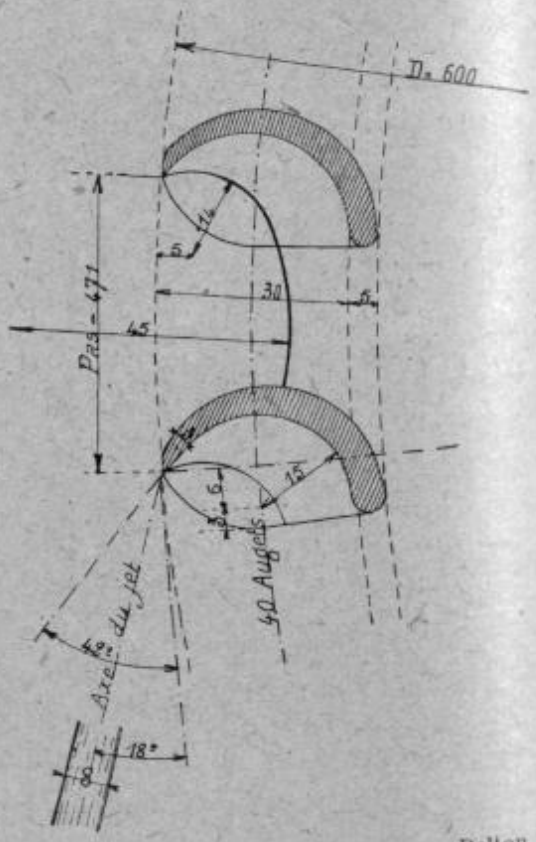


FIG. 461. — Roue tangentielle genre Pelton de 15 HP, sous 420 mètres de chute, installée à l'usine hydroélectrique d'Auzat (Ariège). Tracé de l'auget.

Des cataractes à huile amortissent les mouvements des tiges de commande des vannes et obturateurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 458) représente une roue du genre Pelton construite par M. Duvillard et dont la description est donnée au (§ 373).

Le récepteur de la *roue Pillmann* consiste en une simple roue à aubes ayant la forme de godets à double compartiment et de forme évasée, boulonnés sur la circonférence de la roue. L'eau vient frapper ces godets en leur centre et se trouve séparée en deux jets de chaque côté de la séparation médiane ; elle glisse sur la partie concave et provoque ainsi une rotation rapide continuelle et régulière.

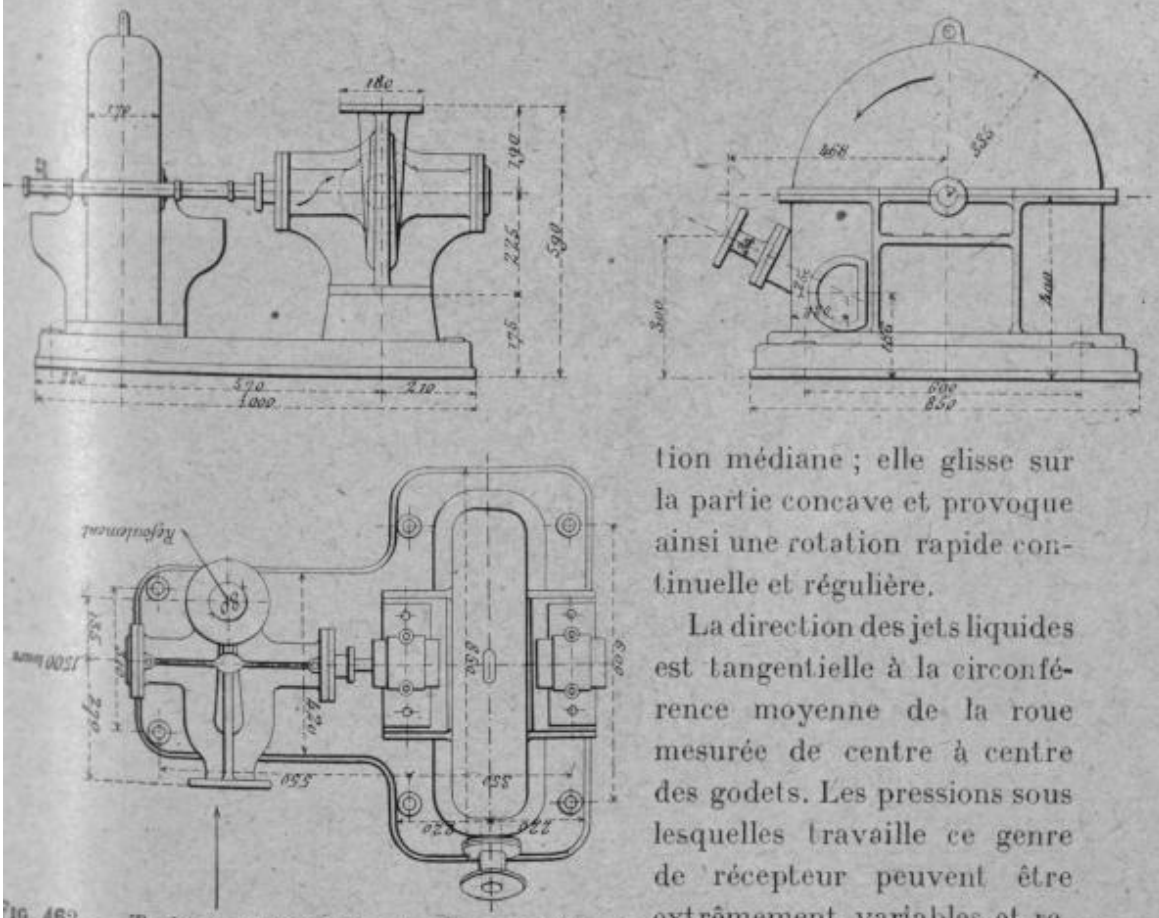


Fig. 462. — Turbine tangentielle et pompe centrifuge (Usine d'Auzat).

La direction des jets liquides est tangentielle à la circonférence moyenne de la roue mesurée de centre à centre des godets. Les pressions sous lesquelles travaille ce genre de récepteur peuvent être extrêmement variables et relativement faibles, 15 mètres de chute par exemple. Le rendement de ces roues atteint 84 0/0 au frein, pour toutes les ouvertures d'ajutage, et la variation de vitesse ne dépasse pas 2 0/0.

L'ajutage (*fig.* 460) comprend une partie fixe N et une autre mobile F commandée par un volant extérieur ; on peut de cette façon faire varier à volonté l'ouverture FE. Un régulateur du type centrifuge à boules actionne par roue dentée et vis sans fin le volant de manœuvre.

Les (*fig.* 461 et 462) montrent le tracé d'une roue genre Pelton, construite par la maison V^re^ Bonnet. Les exemplaires de la dite roue sont en fonctionnement à l'usine électrochimique d'Auzat (Ariège) où elles actionnent des pompes (§ 410).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

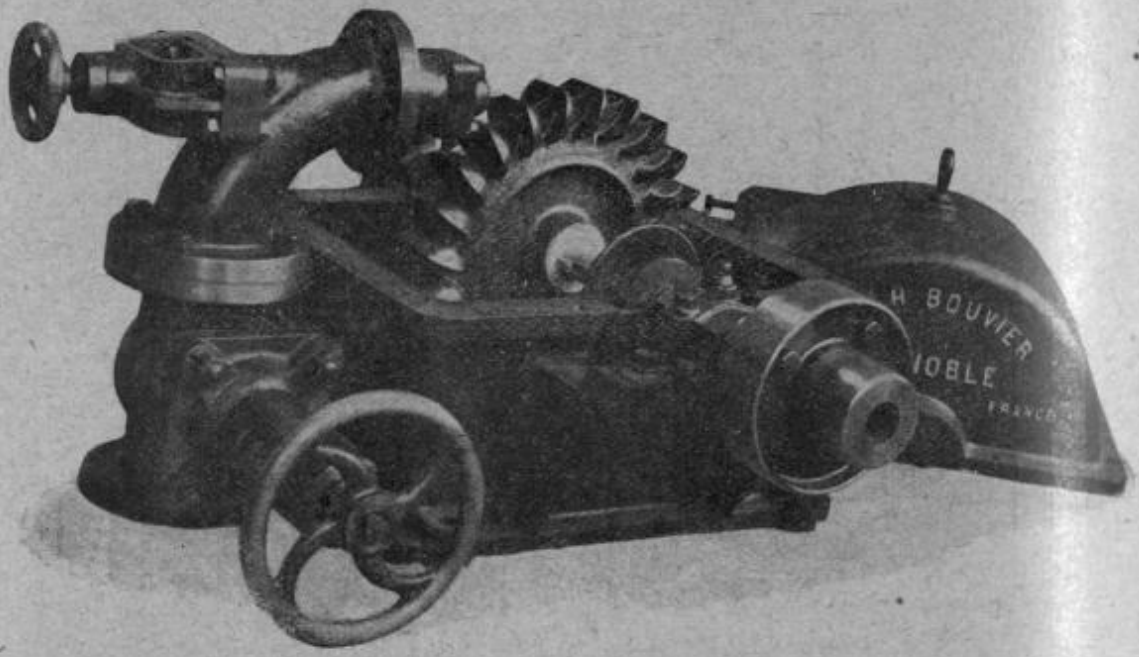


FIG. 463. — Turbine centripète genre Pelton (A. et H. Bouvier). Vannage par pointeau.

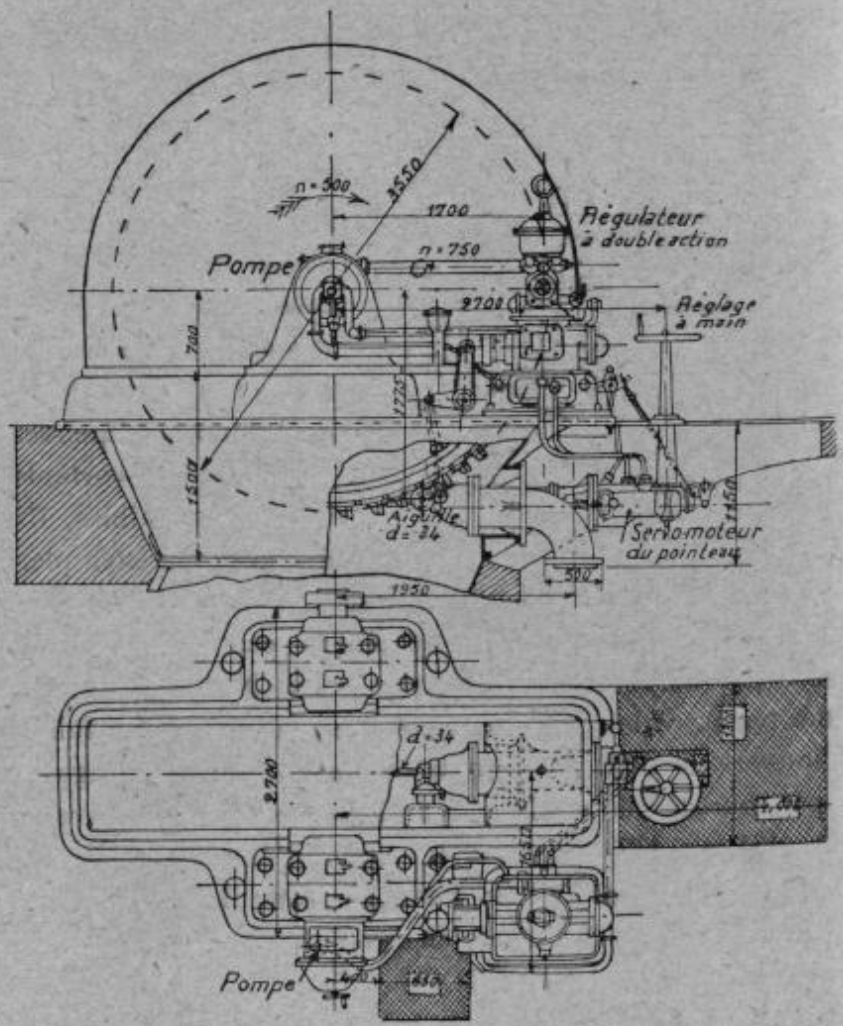


FIG. 464. — Turbine Piccard-Pictet de 3.000 HP fonctionnant sous 1.640 mètres (Usine hydroélectrique de Fully).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La roue-turbine « Excelsior », construite par MM. Singrün frères, est formée d'une roue motrice dont la périphérie est munie d'aubes réceptrices.

L'eau est amenée sur la roue par un tuyau portant à sa partie inférieure un robinet-vanne placé devant un injecteur à un ou plusieurs ajutages ; après avoir agi sur les aubes, l'eau quitte celles-ci sous un angle très faible et strictement suffisant à son évacuation, de manière que sa force est utilisée à peu près complètement dans l'aube. D'ailleurs, la section du jet est réglée instantanément, à la main ou automatiquement déterminant la conservation d'un effet utile très élevé, même avec les débits les plus réduits.

La (*fig.* 464) représente une des turbines fonctionnant à l'usine hydro-électrique de Fully. La roue motrice a $3^{m},550$ de diamètre, portant 54 aubes rapportées. L'une des extrémités de l'arbre porte le plateau d'accouplement pour l'alternateur et l'autre contient l'embrayage de la pompe à huile du servo-moteur entraînant de ce fait directement, à la vitesse de 500 tours par minute de la turbine.

143. Pertes d'énergie dans les turbines. — Les pertes d'énergie, dans les turbines hydrauliques, proviennent du passage successif de l'eau

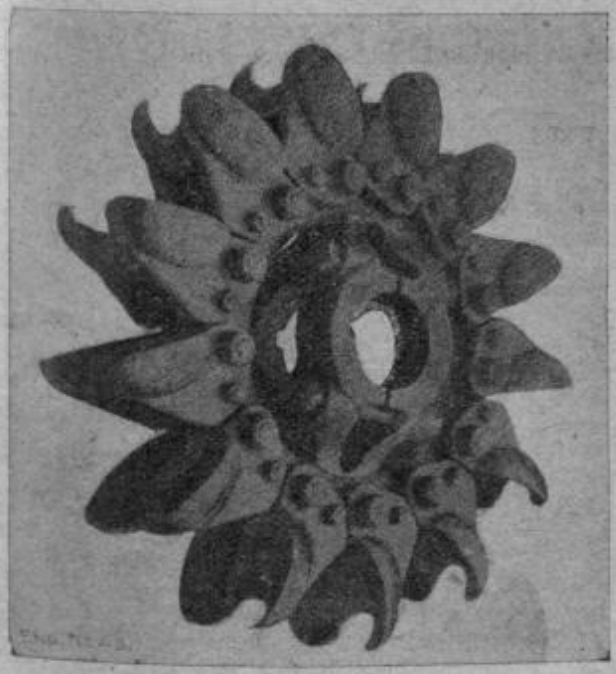


FIG. 465. — Roue Doble, genre Pelton.

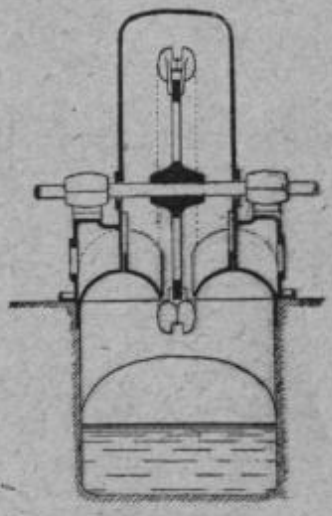


FIG. 466. — Coupe axiale d'une turbine Pelton.

dans le distributeur, la roue mobile, le tube de succion, dans le jeu entre les couronnes, et des résistances passives mécaniques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La perte e dans le distributeur est donnée par l'expression ci-après :

$$e = K_1 \frac{V'^2_0}{2g};$$

V'_0, vitesse moyenne absolue à la sortie du distributeur ; K_1, coefficient qui est égal à 0,125 selon Hænel et Francis.

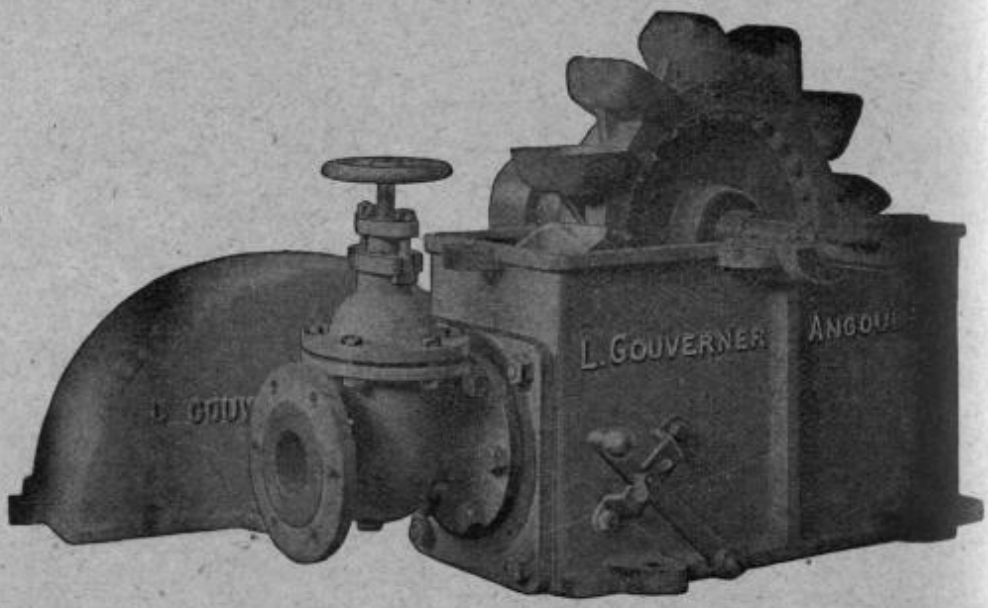


Fig. 467. — Turbine « La Houille Blanche », type Pelton.

Celle e' dans la roue mobile par :

$$e' = K_2 \frac{V_1^2}{2g};$$

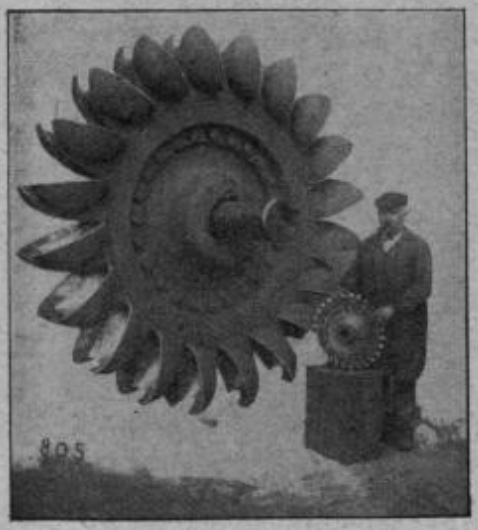


Fig. 468. — Roue de turbine Pelton moderne.

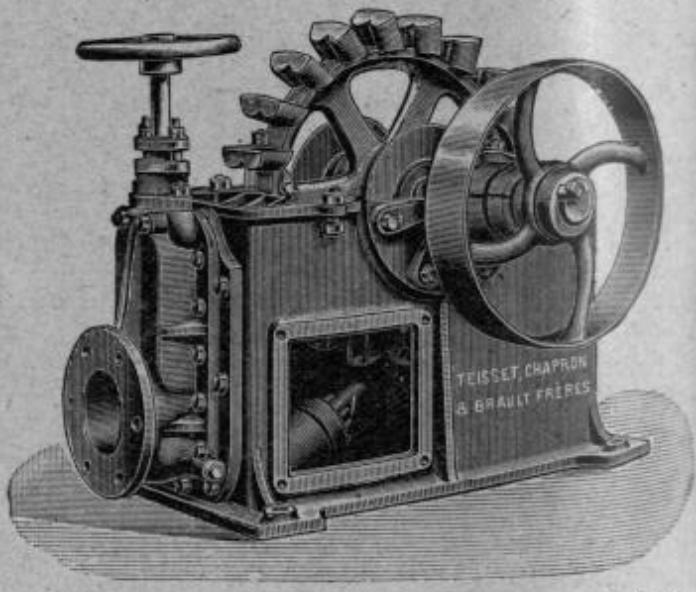


Fig. 469. — Roue-turbine américaine avec enveloppe métallique. (Teisset, Chapron et Brault frères, constructeurs)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

V_1, vitesse relative à la sortie des aubes mobiles ; K_2, coefficient = 0,10 à 0,20 d'après Hænel pour les turbines à réaction.

La perte de charge provenant du frottement de l'eau le long du tube de

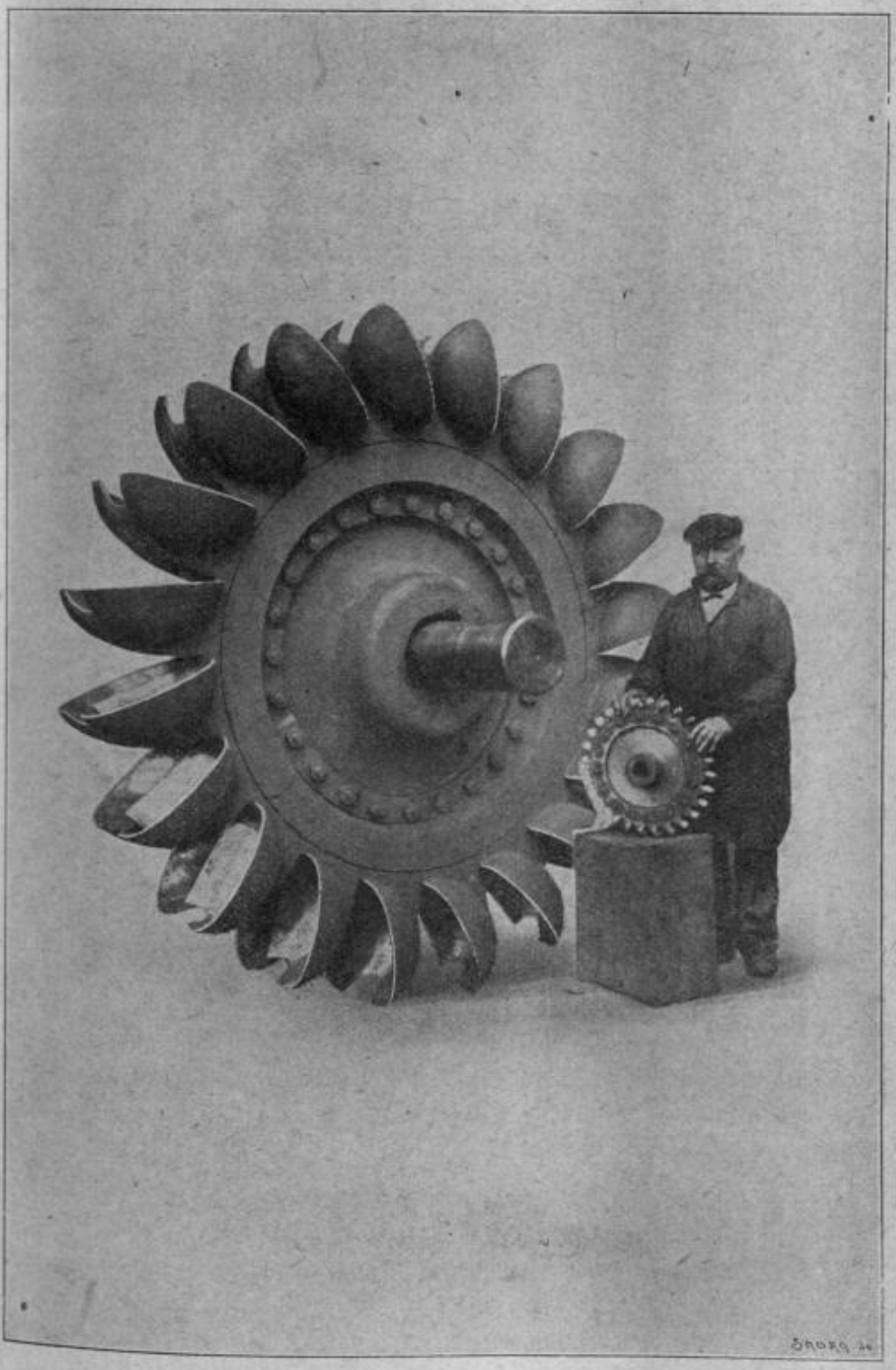


FIG. 470. — Roue mobile d'une turbine Pelton de 6.000 HP, sous 350 mètres de chute (Neyret, Beylier, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

succion et celle due au passage de l'eau, du tube au canal de fuite, se calculent comme il a été indiqué.

La perte d'eau à la seconde du fait du jeu est donnée par l'expression :

$$q = 0{,}7\ \sqrt{2gh'} \times 4\pi RS ;$$

S, hauteur du jeu (3 millimètres au moins) ; 2R, diamètre de la roue ;

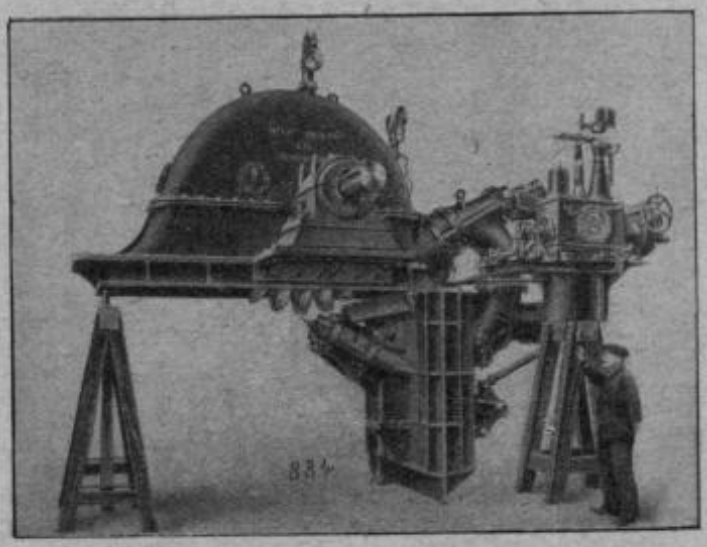


Fig. 471. — Turbine Pelton à deux injecteurs.

h', différence de pression entre l'orifice de sortie du distributeur et l'espace extérieur. Dans les turbines bien construites, q est inférieur à 5 0/0.

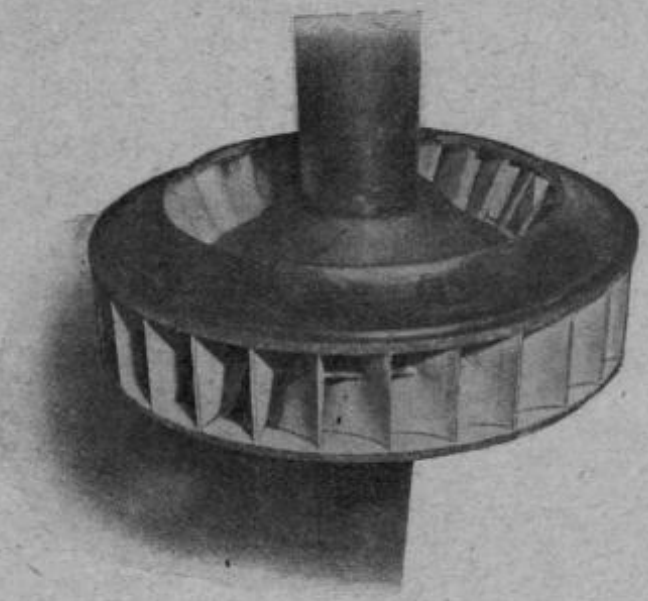


Fig. 472. — Roue mobile de turbine centripète à réaction (A. et H. Bouvier), développant 3.000 HP, 375 tours. Chute de 60 mètres.

Les résistances passives relatives au frottement de l'arbre dans ses

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

supports varient de 1 à 1,5 0/0 du travail effectué par la turbine, pour les turbines à admission complète. Elles atteignent 3,5 0/0 dans les turbines axiales du type Jonval.

Les pertes dans les turbines sont, d'une façon générale :

Pertes dans le distributeur et la roue.....	10,5 à 14	0/0
— dues aux fuites par le joint.....	2,5 à 4,5	
— dues aux résistances du mécanisme...	2 à 4	
Ensemble.....	15	22,5	0/0

VII. — FORMULES NOUVELLES POUR LE CALCUL DES TURBINES HYDRAULIQUES

M. Albitsky, professeur à l'Institut technologique de Kerkoff, a donné des formules et une classification des turbines tout autres que celles admises habituellement. D'après lui, toutes les turbines existantes sont à *réaction*, divisées comme suit : a) *turbines à pression variable* (turbines à action de la classification usuelle) ; b) *turbines à pression constante* (turbines limites ou à action de la classification usuelle) ; c) *turbines Girard*.

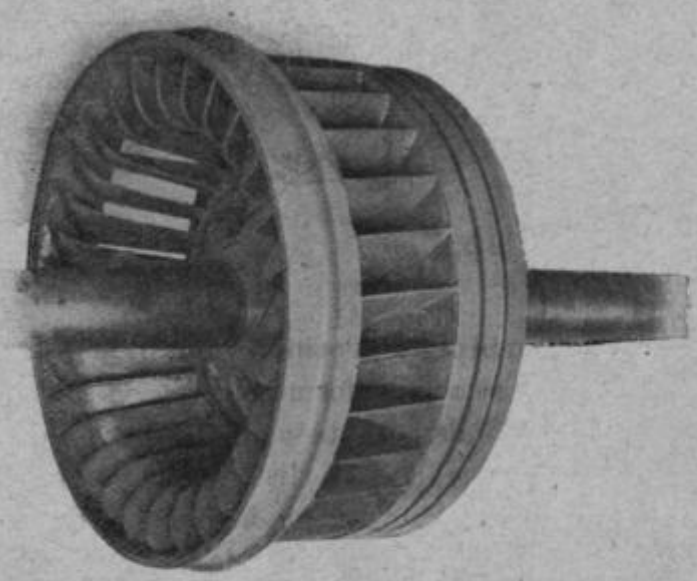


Fig. 473. — Roue mobile de turbine Francis (A. et H. Bouvier), de 1.450 HP, 300 tours, Chute de 31 mèt.

Dans les turbines limites, la pression n'est pas absolument constante, mais suit la loi hydrostatique ; les sections transversales des canaux moteurs y sont constantes. Dans les turbines Girard et dans la turbine limite radiale, la pression est effectivement constante sur tout le parcours de l'eau, à travers les canaux moteurs.

Nous avons jugé utile de consigner ici des formules qui aboutissent à certaines conclusions contraires aux idées régnantes et qui peuvent avoir

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une influence sérieuse sur la théorie et la pratique de la construction des turbines (1).

M. Albitsky, à la suite de ses observations personnelles sur différents types de turbines établies par lui et par d'autres, s'est rendu compte d'une déviation plus ou moins marquée de la direction de la vitesse C_a de sortie du canal moteur, contrairement à l'hypothèse généralement admise qui fait C_a perpendiculaire à la vitesse V_a (*fig.* 474).

De là, d'après cet auteur, le moyen d'obtenir des équations exactes, applicables à tous les types et formes de turbines hydrauliques et qui font l'objet des paragraphes (144 à 147) ci-après.

Nous appellerons W_a et W_e les vitesses relatives respectives par rapport aux points *a* et *e* ; V_a et V_e, les vitesses de rotation par rapport aux mêmes points, et C_a et C_e, les vitesses à la sortie et à l'entrée du canal moteur.

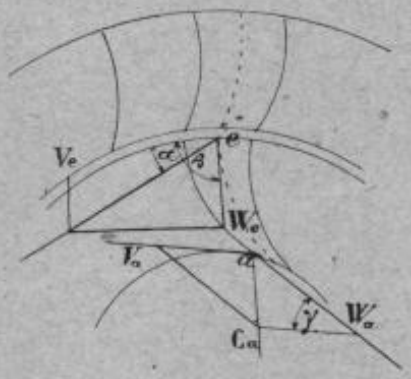


FIG. 474.

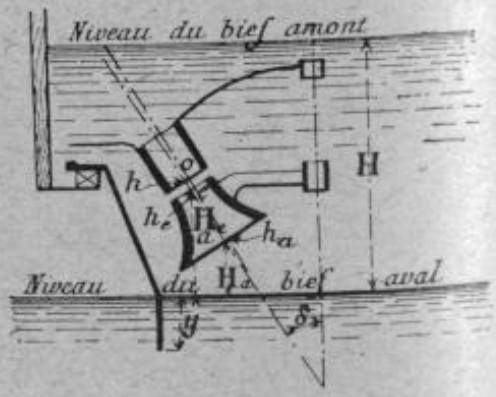


FIG. 475.

144. Turbines à pression variable. — La turbine conique (*fig.* 475) peut être prise comme forme générale, et soient : H, la hauteur de la chute d'eau ; H_e, la distance du centre de gravité de l'orifice *e* du canal moteur au niveau d'aval ; H_a, la distance du centre de gravité pour l'orifice de sortie *a* du canal moteur ; *y*, la longueur du tuyau aspirateur ; *h*, la hauteur piézométrique de l'orifice de sortie du canal directeur ; h_e, la hauteur piézométrique de l'orifice *e* du canal moteur ; h_a, la hauteur piézométrique pour l'orifice de sortie *a* du canal moteur ; C, la vitesse absolue de la particule centrale à la sortie du canal directeur ; C_e, la vitesse absolue de la particule centrale à l'entrée du canal moteur ; C_a, la vitesse absolue de la particule centrale à la sortie du canal moteur, et C^y, la vitesse absolue

(1) M. le professeur Dr H. Lorenz, de Dantzig, a exposé dans les colonnes de la *Houille Blanche* (octobre 1908 et mois suivants) une nouvelle théorie du plus grand intérêt que nous ne pouvons que signaler à nos lecteurs. L'étude de M. Lorenz ne se prêtant pas à une analyse, elle demanderait, pour être reproduite *in extenso*, une place pans cet ouvrage incompatible avec le cadre que nous nous sommes imposé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la particule centrale à la sortie du tuyau aspirateur. Le mouvement de l'eau depuis le niveau d'amont jusqu'à la sortie du tuyau aspirateur est représenté par les quatre formules ci-après :

$$H - H_e = h + \frac{C^2}{2g} + E_1 H \text{ (du niveau d'amont à la sortie de la roue directrice) ;}$$

$$h + \frac{C^2}{2g} = h_e + \frac{C_e^2}{2g} + E_2 H \text{ (de la sortie de la roue directrice à l'entrée de la roue motrice) ;}$$

$$H_e - H_a + h_e + \frac{W_e^2}{2g} + \frac{V_a - V_e^2}{2g} = h_a + \frac{W_a^2}{2g} + E_3 H \text{ (dans la roue motrice) ;}$$

$$H_a + y + h_a + \frac{C_a^2}{2g} = y + \frac{C_y^2}{2g} + E_4 H \text{ (à la sortie de la roue motrice).}$$

E_1, E_2, E_3 et E_4 désignent des parties de la hauteur H absorbées par les résistances hydrauliques pendant les différentes phases.

En ajoutant membre à membre et en simplifiant, on obtient l'équation générale suivante du mouvement de l'eau à travers la turbine :

$$H(1 - E_1 - E_2 - E_3 - E_4 - E_5) = \left(\frac{C_e^2 + V_e^2 - W_e^2}{2g}\right) + \left(\frac{W_a^2 - C_a^2 - V_a^2}{2g}\right),$$

dans laquelle la perte due à la force vive provenant de la vitesse de l'eau sortant du tuyau aspirateur est représentée par $E_5 H$.

M. Albitsky appelle le coefficient de H, coefficient de transmission de la charge à la turbine, que l'on peut désigner par E ; par suite :

$$2gEH = (C_e^2 + V_e^2 - W_e^2) + (W_a^2 - C_a^2 - V_a^2). \quad (1)$$

En remplaçant dans cette formule, en s'appuyant sur la condition d'entrée sans choc, l'expression :

$$C_e^2 + V_e^2 - W_e^2, \quad \text{par} \quad 2V_e C_e \cos\alpha,$$

les vitesses de sortie figurant dans la seconde parenthèse de la même équation seront remplacées par les vitesses d'entrée en se basant sur ce qui suit : soient r_e et r_a les distances de la ligne centrale du canal moteur à l'axe de la turbine, la vitesse V_a serait donnée en fonction de V_e par la relation :

$$V_a = \frac{r_a}{r_e} V_e. \quad (2)$$

La vitesse C_a, avec laquelle l'eau quitte la roue motrice, étant perdue presque entièrement sans utilité pour la turbine, il est rationnel de s'imposer une valeur de cette vitesse, telle que la perte soit petite et égale à un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

taux déterminé de la hauteur donnée H, et cette valeur sera fournie par la relation :

$$\frac{C_a^2}{2g} = \frac{p}{100} \times H, \tag{3}$$

p étant le nombre qui exprime le taux.

Désignons par ω_e et ω_a les aires de section du canal moteur, obtenues en menant des plans tangents passant par les premier et dernier points de la ligne centrale de ce canal et tangents aux surfaces d'entrée et de sortie. La permanence du régime de l'eau amène l'égalité du débit dans toutes les sections du canal moteur ; par suite, l'égalité du débit par les orifices d'entrée et de sortie est exprimée par :

$$\omega_e W_e \sin \beta = \omega_a W_a \sin \gamma. \tag{4}$$

D'où on tire :

$$W_a = \frac{\omega_e}{\omega_a} \times \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \times W_e.$$

Et en y remplaçant W_e par sa valeur tirée de : $\frac{W_e}{C_e} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, on obtient:

$$W_a = \frac{\omega_e}{\omega_a} \times \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \times C_e. \tag{5}$$

En remplaçant dans l'équation (1) W_a, V_a et C_a par leurs valeurs tirées des équations (2), (3) et (5), on obtient l'*équation générale* suivante de l'eau dans les turbines, depuis le niveau supérieur de la chambre à eau jusqu'à la sortie du tuyau aspirateur :

$$2gEH = 2V_e C_e \cos \alpha + \left(\frac{\omega_e}{\omega_a} \times \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\right)^2 C_e^2 - \left(\frac{r_a}{r_e}\right)^2 V_e^2 - \frac{2gp}{100} H. \tag{6}$$

En tenant compte de la condition d'entrée sans choc exprimée par :

$$\frac{V_e}{C_e} = \frac{\sin (\beta - \alpha)}{\sin \beta},$$

on obtient les nouvelles formules suivantes pour la détermination des vitesses d'entrée applicables à toutes les turbines dont le canal moteur est complètement rempli par la veine liquide :

$$\left\{\begin{aligned} C_e &= \sqrt{\frac{2gH(E + 0{,}01p}{2\cos\alpha \times \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin\beta} + \left(\frac{\omega_e}{\omega_a} \times \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\right)^2 - \left(\frac{r_a}{r_e} \times \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin\beta}\right)^2}}, \\ V_e &= \sqrt{\frac{2gH(E + 0{,}01p}{2\cos\alpha \times \frac{\sin\beta}{\sin(\beta-\alpha)} + \left(\frac{\omega_e}{\omega_a} \times \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} \times \frac{\sin\beta}{\sin(\beta-\alpha)}\right)^2 - \left(\frac{r_a}{r_e}\right)^2}}, \\ W_e = \frac{C^2 \sin\alpha}{\sin\beta} &= \sqrt{\frac{2gH(E + 0{,}01p)}{2\cos\alpha \times \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin\alpha}\sin\beta + \left(\frac{\omega_e}{\omega_a} \times \frac{\sin\beta}{\sin\gamma}\right)^2 - \left(\frac{r_a \sin(\beta-\alpha)}{r_e \sin\alpha}\right)^2}}. \end{aligned}\right. \tag{7}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces formules sont applicables à tous les types de turbines, excepté aux turbines Girard, et dans tous les cas possibles. Contrairement aux formules ordinaires, on peut donner aux angles α, β et γ toutes les valeurs possibles. De plus, comme ces formules contiennent les rapports $\left(\frac{\omega_e}{\omega_a}\right)$ et $\left(\frac{r_a}{r_e}\right)$, elles donnent des vitesses de valeurs différentes avec les différentes divergences des couronnes de la roue motrice et selon que l'on aura une turbine axiale, conique, radiale, centripète ou centrifuge.

Évidemment de telles solutions ne peuvent être obtenues qu'à la condition de donner à toutes les variables des valeurs appropriées.

Turbines limites (à section constante). — Ici les formules ci-dessus se simplifient par ce fait que les vitesses relatives de l'eau à l'entrée et à la sortie du canal moteur sont égales. En introduisant cette condition dans l'égalité (4), il vient :

$$\omega_e \sin \beta = \omega_a \sin \gamma, \tag{8}$$

vraie seulement pour les turbines limites, et M. Albitsky conclut que c'est par cette dernière qu'il convient de remplacer les égalités :

$$\beta = 2\alpha \qquad \text{et} \qquad \operatorname{tang} \beta = 2 \operatorname{tang} \alpha,$$

faussement employées comme caractéristiques des turbines Girard et des turbines limites.

En tenant compte de l'équation (8), les équations (7) se transforment en des valeurs applicables aux turbines limites.

145. Influence des divers facteurs entrant dans les nouvelles formules. — 1° *Turbines à pression variable.* — Au sujet de l'influence de $\left(\frac{\omega_a}{\omega_e}\right)$ sur les vitesses d'entrée, M. Albitsky admet que les sections transversales des canaux dans les turbines doivent varier aussi peu que possible et que cette variation soit en rapport, d'une part, avec la charge et, d'autre part, avec la longueur des canaux. Et, comme conséquence immédiate, il reconnaît comme meilleures les turbines limites, dans lesquelles la section reste constante sur toute la longueur des canaux.

Quant au rapport $\left(\frac{\omega_a}{\omega_e}\right)$, il lui assigne une valeur comprise entre 0,50 (pour $h = 1.000$ mètres) et 1,35 (pour $h = 1$ mètre).

Le rapport $\left(\frac{r_a}{r_e}\right)$ dépend du genre de turbine axiale, centrifuge et centripète. Pour les limites de ce rapport, elles seraient celles-ci après :

Turbines axiales.....	0,8 à 1
Turbines radiales centripètes.....	0,7 à 0,8
Turbines américaines.....	0,65 à 0,75
Turbines centrifuges.....	1,2 à 1,4

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En ce qui concerne l'influence de ce rapport sur les vitesses d'entrée, l'auteur trouve que l'élargissement de la couronne vers l'extérieur est tout à fait désavantageux et qu'il doit être remplacé par un élargissement vers l'axe de la turbine.

Influence des angles γ, α *et* β. — Pour l'angle γ, plus grande est sa valeur, plus grandes aussi sont les vitesses d'entrée C_e, V_e, W_e, et inversement. L'augmentation de l'angle γ accroît la vitesse V_a et diminue la vitesse W_a, laquelle détermine la vitesse C_a. M. Albitsky assigne à l'angle γ des valeurs plus élevées que celles actuellement admises, et il indique l'égalité :

$$\gamma = 20^\circ \text{ à } 40^\circ.$$

Pour l'angle α, quelle que soit la variation de vitesse, avec la diminution de α, le diamètre de la turbine augmente, et réciproquement ; par suite, dans la plupart des cas, il est préférable de donner à α les valeurs les plus grandes sans tomber dans l'exagération. On peut se tenir entre $\alpha = 28^\circ$ à 40°.

L'augmentation de β entraîne toujours celle de la vitesse de rotation V_e; et il est toujours avantageux de prendre la règle $\beta \geqq 90^\circ$.

Quant aux valeurs de E et de p, celles indiquées sont celles ci-après :

Turbines axiales.....	$E = 0{,}75$ à $0{,}80$; $p = 5$ 0/0 à 10 0/0
— radiales centripètes.	$E = 0{,}80$ à $0{,}85$; $p = 5$ 0/0 à 10 0/0
— — centrifuges.	$E = 0{,}75$ à $0{,}80$; $p = 8$ 0/0 à 15 0/0
— américaines.....	$E = 0{,}90$ à $0{,}95$; $p = 4$ 0/0 à 8 0/0

2° *Turbines limiles.* — Le rapport $\frac{r_a}{r_e}$ dépend de ce que, dans ces turbines, les sections transversales du canal moteur sont constantes sur toute la longueur ; il est indiqué :

Turbine centripète.....	$\frac{r_a}{r_e} = 0{,}75$ à $0{,}85$
— centrifuge....	$\frac{r_a}{r_e} = 1{,}15$ à $1{,}3$

La diminution du diamètre étant obtenue par l'augmentation de l'angle α et la vitesse C_e augmentant avec l'angle α, il sera plus pratique de donner à cet angle de grandes valeurs ; on prendra encore :

$$\alpha = 20^\circ \text{ à } 40^\circ.$$

Pour l'angle β, la valeur de 90° est encore la plus recommandable, et pour γ on adoptera $\gamma = 20^\circ$ à 40°.

Les petites valeurs de γ sont à employer dans les cas où on cherche à avoir un coefficient important de travail utile, et les grandes, quand on désire avoir une petite turbine moins lourde.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

146. Turbines à libre déviation ou turbines Girard. — Les vitesses d'entrée dans ces turbines sont données par les expressions :

$$C_e = \sqrt{2gE\,(H - H_e)},$$

$$V_e = \sqrt{2gE\,(H - H_e)\,\frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2\beta}} \quad \text{et} \quad W_e = \sqrt{2gE\,(H - H_e)\,\frac{\sin^2\alpha}{\sin^2\beta}}.$$

On voit que, dans ces formules, au lieu de H, il entre partout $(H - H_e)$, ce qui montre que dans ces turbines une partie de la chute (H_e) se perd toujours sans aucune utilité, ce qui est une cause d'infériorité de ces turbines. Cette circonstance ne permet l'emploi rationnel de la turbine Girard que dans les cas d'une forte chute ; mais alors W_e et W_a ont des valeurs très grandes et, par suite, la perte p due à C_a est aussi assez grande et atteint de 15 à 25 0/0. Le coefficient du travail utile, par suite, ne dépasse pas 70 à 75 0/0. Avec l'augmentation de l'angle α, la vitesse V_e diminue, tandis que la vitesse W_e augmente. Il est donc ici aussi avantageux de donner à l'angle α de grandes valeurs. On prendra $\alpha = 20^\circ$ à 40°. De plus, α allant en croissant, la longueur des canaux fixes et, partant, la hauteur de la couronne, peuvent être moindres, ce qui donne une roue fixe plus légère. Si on désire avoir un grand coefficient de travail utile, on donne à l'angle β une valeur de 90° ; si on désire une turbine tournant vite, on prendra $\beta > 90^\circ$ (90° à 120°).

Quant à γ, l'égalité $\gamma = 20^\circ$ à 30° est justifiée en s'approchant de la limite inférieure si on cherche une turbine à grand rendement, et vers la limite supérieure, si on désire une turbine de poids, de prix minima, et tournant vite.

147. Applications numériques. — a) *Turbine à pression variable type américain.* — Hauteur de chute H = 2 mètres ; débit Q = 5 mètres cubes à la seconde ; nombre de tours, 50 environ. Doit fonctionner jour et nuit, sauf en temps de crue ; grand coefficient de travail utile.

On prendra :

$$\frac{\omega_e}{\omega_a} = 0{,}7\,;\ \frac{r_a}{r_e} = 0{,}68\,;\ \alpha = 30^\circ\,;\ \beta = 90^\circ\,;\ \gamma = 30^\circ\,;$$

$$E = 0{,}9 \quad \text{et} \quad p = 5\ 0/0.$$

Alors :

$$C_e = \sqrt{\frac{19{,}62 \times 2\,(0{,}9 + 0{,}05)}{2 \times 0{,}87 \times 0{,}87 + (0{,}7)^2 - (0{,}68 \times 0{,}87)^2}} = 4^m{,}74,$$

$$V_e = \sqrt{\frac{19{,}62 \times 2\,(0{,}9 + 0{,}05}{2 + \left(0{,}7 \times \frac{1}{0{,}87}\right)^2 - (0{,}68)^2}} = 4^m{,}14$$

et :

$$W_e = C_e \times 0{,}5 = 2^m{,}37.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le diamètre de la turbine est donné par la relation :

$$D = \sqrt{\frac{Q}{W_e}} \sqrt{\frac{1}{\pi \times \varphi \times \psi \times \sin \beta}};$$

φ est le rapport de la distance des couronnes de la roue directrice au diamètre de la turbine, et ψ le rapport de la distance moyenne de deux aubes voisines à la sortie du canal directeur à la même distance moyenne des surfaces correspondantes de ces aubes, ou, en d'autres termes, le coefficient de diminution de l'aire de l'orifice de sortie du canal moteur et qui dépend de l'épaisseur des aubes de cet orifice.

En posant :

$$\psi = 0{,}90 \quad \text{et} \quad \varphi = 0{,}20,$$

il vient :

$$D = \sqrt{\frac{5}{2{,}37}} \sqrt{\frac{1}{3{,}14 \times 0{,}90 \times 0{,}2 \times 1}} = 1^{m},82$$

et :

$$n = \frac{60 \times V_e}{\pi D} = \frac{60 \times 4{,}14}{3{,}14 \times 1{,}8\,2} = 43^{\text{tours}},5.$$

Ayant ainsi déterminé le diamètre de la turbine avant toutes ses autres dimensions, il faut s'assurer si les valeurs de $\frac{\omega_e}{\omega_a}$, $\frac{r_e}{r_a}$, p et E, admises provisoirement, concordent avec celles qui doivent réellement correspondre à une turbine du diamètre trouvé plus haut.

Si on voulait admettre pour p une valeur sensiblement plus grande, on obtiendrait évidemment une turbine de plus petit diamètre ; mais il faudrait alors donner aux grandeurs $\frac{\omega_e}{\omega_a}$, $\frac{r_a}{r_e}$, α, β et γ des valeurs différentes de celles qui ont été admises plus haut.

En ce qui concerne le profil des aubes, M. Albitsky envisage la ligne droite comme un des profils les plus satisfaisants de l'aube de la roue fixe.

b) Pour le calcul d'une *turbine limite* dans les mêmes conditions que ci-dessus, en prenant :

$$\frac{r_a}{r_e} = 0{,}66,\ \alpha = \gamma = 30°,\ \beta = 90°,\ E + 0{,}1 \times p = 0{,}95 \text{ et } p = 5\ 0/0,$$

on trouve :

$$C_e = 5{,}09;\ V_e = 4{,}43;\ W_e = 2{,}54.$$

D'où :

$$V_a = \frac{r_a}{r_e} \times V_e = 2{,}92;\ W_a = W_e = 2{,}54;\ C_a = 8{,}53 + 6{,}35 - 12{,}91 = 1{,}97$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et :

$$p = \frac{C_a^2}{2g} \times \frac{100}{\pi}.$$

Posant $\varphi = 0{,}2$, on obtient :

$$D = 1^m{,}82 \quad \text{et} \quad n = 46^{tours},5.$$

c) Enfin, pour une *turbine Girard*, avec H = 8 mètres et Q = 1 mètre cube, remplissant les conditions ci-après : turbine axiale à axe vertical, vitesse 200 à 300 tours par minute, fonctionnement intermittent, économie importante dans les premiers frais d'installation, et oscillation du niveau d'aval pendant la période active de la turbine atteignant parfois la valeur de 1 mètre, on donne à E une valeur égale à 0,75 et on fait $\alpha = 30^o$ et $\beta = 90^o$.

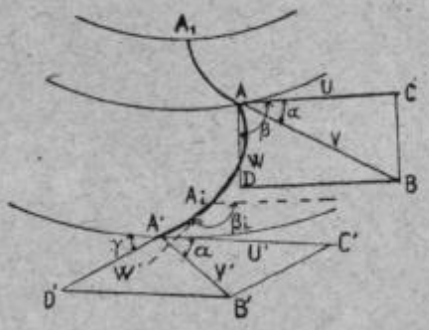


FIG. 476.

Alors :

$$C_e = \sqrt{2g\,(H - H_e)} \times E = 10{,}85; \quad V_e = C_e \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta} = 9{,}44$$

et :

$$W_e = C_e \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = 5{,}425.$$

Posons $\psi = 0{,}95$ et adoptons la valeur 0,18 D comme distance entre les surfaces de la couronne motrice à l'orifice d'entrée, on a :

$$D = \sqrt{\frac{Q}{W_e} \times \frac{1}{\pi \times \varphi \times \psi \times \sin \beta}} = 0{,}59.$$

Et le nombre de tours : $n = \dfrac{60 \times V_e}{\pi \times D} = 306$; ce dernier nombre étant trop élevé, on prendra $\varphi = 0{,}12$ D.

Alors le diamètre de la turbine devient

$$D = 0{,}59 \sqrt{\frac{0{,}18}{0{,}12}} = 0{,}72 \quad \text{et} \quad n = 250 \text{ tours.}$$

VIII. — MÉTHODES GRAPHIQUES POUR L'ÉTABLISSEMENT DES TURBINES

148. Exposés analytiques. — Notre collègue M. C. Benoit a fait paraître dans le *Bulletin technologique* (décembre 1912) une *étude graphique* des turbines à réaction. Partant de la formule : $\dfrac{V^2}{2gh} = 1 - \varepsilon$,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ε degré de réaction, où V^2 varie de 1 pour $\varepsilon = 0$ (turbine limite), à 0 pour $\varepsilon = 1$, l'auteur représente V^2 par une droite en prenant pour abscisses les valeurs de ε et pour *ordonnées* celle des vitesses. V est la vitesse à la sortie de l'eau du distributeur.

La vitesse tangentielle $\frac{v^2}{2gH}$ tirée de la formule $\left(\frac{v^2}{2gh}\right)$ est aussi figurée par une droite parallèle aux valeurs de ε ; H est la hauteur de chute sous laquelle la turbine travaille.

Si V' est la vitesse absolue à la sortie de la roue, la formule $\frac{V'^2}{2gH}$ est aussi représentée par une parallèle aux valeurs de ε.

On peut écrire : $vo^2 = w_a^2 + v^2 - 2\,V_a \cos\alpha$ pour la vitesse à la sortie du distributeur et : $V'^2 = v'^2 + w'^2\,2v'w' \cos\beta$ pour la vitesse à la sortie de la roue mobile.

La valeur de w_r^2 se trouve représentée par une droite parallèle à V_a^2 tracée à une distance de :

$$V_a^2 - w'^2 - v^2 + v'^2$$

de cette dernière.

La valeur de w_a^2 se trouve par la formule $w_a^2 = \frac{w_r^2}{0{,}775}$ et elle est aussi représentée par une droite concourante avec celle représentant w_r^2 au point où celle-ci coupe la ligne de ε.

Les indices a et r dont sont affectées les lettres entrant dans les formules résultent de leurs nouvelles valeurs pour tenir compte des pertes internes.

L'équation du rendement :

$$\rho_4 = V_r^2 + v^2 = w_a^2$$

est aussi représentée par une droite facile à tracer en calculant les deux points extrêmes. Enfin la courbe des cos α se déduit de la formule :

$$\cos\alpha = \frac{\rho_4 \times 2gH}{2Vrv}$$

L'auteur a appliqué sa méthode, à titre d'exemple, à l'étude des turbines de Livet installées par la maison Bouvier de Grenoble (deux turbines centripètes montées sur un même arbre horizontal ayant chacune un tuyau d'aspiration) et dont les données sont : chute utile 57 mètres, débit 4.750 litres, nombre de tours 375. Il en a tracé le diagramme des possibilités (avec $\alpha = 31°$, $\cos\alpha = 0{,}857$, $v = 0{,}70$ et $v' = 0{,}4627$) ; la construction des triangles des vitesses et les courbes de variation des valeurs de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ρ_1 et ε en se donnant $v^2 = 0{,}05$ = constante représentant la valeur de la perte par vitesse restante et $\alpha = 20^\circ$ constant en faisant varier v.

Pour $v = 0{,}45$, on obtient :

$$\rho_1 = 0{,}83 \text{ et } \varepsilon = 0.$$

Par suite c'est une turbine limite, le maximum de $\rho_1 = 0{,}92$ correspondant à $v = 0{,}725$, lequel varie très peu entre les valeurs de $v = 0{,}70$ à $0{,}75$ et que ε varie de $0{,}50$ à $0{,}57$. On voit ainsi que pour une turbine à grande vitesse, le rendement descend d'environ 6 0/0 sur le maximum, mais que ε augmente, ce qui indique que le distributeur doit être plus haut que pour le rendement maximum.

M. Dejust, l'excellent et regretté professeur à l'École Centrale des Arts et Manufactures, a soumis le calcul des turbines à une méthode graphique que nous résumons ci-après [1] :

Partant de l'équation générale :

$$\frac{V^2 - V'^2}{2g} + \frac{p - p'}{\omega} - \eta_d = H_1 - \frac{V''^2}{2g} \qquad (1)$$

dans laquelle (*fig.* 476) on trouve :

V et V' vitesse d'entrée et de sortie ; p et p' pression d'entrée et de sortie ; η_d perte de charge dans le récepteur; V'' la vitesse à la sortie de la conduite ; H la hauteur de chute réduite par les pertes de charge, et H_1 la chute réelle ou géométrique. L'énergie fournie à la turbine se décompose en deux parties :

Une énergie cinétique : $\frac{V^2 - V'^2}{2g}$ et une énergie potentielle : $\frac{p - p'}{\omega}$.

Il faut donc que les turbines soient construites de manière à réaliser les vitesses V, V' et V'' et les pressions p et p' pour obtenir le travail utile H_1. Si on désigne par u et u' les vitesses de la couronne mobile à l'entrée et à la sortie des aubes, l'expression du rendement de la turbine est :

$$\rho = \frac{Vu \cos \alpha - V'u' \cos \alpha}{g(H_1 + \eta_1 + \eta_d)},$$

η_d étant la perte de charge dans la couronne fixe. Le rendement total de l'installation est :

$$\rho_1 = \frac{Vu \cos \alpha - V'u' \cos \alpha'}{gH}.$$

Il faut rendre naturellement ces rendements aussi élevés que possible.

---

[1] *Des turbines*, par J. Dejust (Deuxième Congrès de la Houille Blanche. — Lyon, 1915)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut réduire V'' en donnant à l'extrémité de la conduite un diamètre suffisamment grand ; on peut réduire V' au minimum en faisant $W' = u'$ et γ très faible, égal au moins à 10° et l'équation (1) devient :

$$\frac{2\,Vu\,\cos\alpha}{2g} = H_1 \qquad (1\ bis)$$

Il faut résoudre cette dernière équation dans laquelle on ne connaît que H_1, mais on peut se donner *a priori* une valeur des pertes de charge de α qui ne dépend que de la couronne directrice.

On tire V de la formule :

$$\frac{V^2}{2g} = H_1\,(1-\varepsilon),$$

ε représentant la fraction d'énergie transmise à la roue sous forme d'énergie potentielle ou autrement dit le degré de réaction.

Connaissant V_1, α et H_1, l'équation (1 *bis*) fait connaître la vitesse de rotation u. On a ainsi les éléments pour tracer le triangle des vitesses à l'entrée que fait connaître la direction du premier élément de l'aube mobile. L'angle γ étant donné, on connaît le dernier élément et il suffit de tracer une courbe tangente pour avoir le profil de l'aube.

Enfin la relation :

$$\frac{u}{u'} = \frac{r}{r'},$$

dans laquelle on se donne le rapport des rayons, fait connaître u' et par suite V'.

La question du rendement peut s'appliquer d'une façon générale ou à un cas particulier et en envisageant dans ce dernier cas le rendement maximum.

Pour la première solution, il suffit de résoudre les trois équations :

$$\frac{2\,Vu\cos\alpha - 2\,V'u'\cos\alpha'}{2g} = H_1 - \frac{V'^2}{2g}$$

$$\frac{V^2}{2g} = H_1\,(1-\varepsilon) \quad \text{et} \quad \frac{u}{u'} = \frac{r}{r'}.$$

On se donne deux des inconnues ou bien deux équations de conditions compatibles avec les trois précédentes. Généralement on se donne α et l'autre dépend du système de turbine que l'on a en vue. Ainsi, si l'on veut une turbine de vitesse périphérique donnée, on se donne u ; si l'on vise un rendement maximum, on fait $W' = u'$, ou mieux une série de valeurs de u ; si c'est une turbine à aspiration, l'on fait $\alpha = 90°$, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La formule ci-après permet de tirer la valeur théorique du rayon moyen r de la couronne mobile :

$$Q = 2\pi rbV \sin \alpha$$

en se donnant le rapport $m = \frac{r}{b}$;

b, largeur de la couronne mobile à l'entrée de l'eau.

La condition à remplir, pour que l'eau se répartisse uniformément dans les canaux de la turbine, est qu'en un point quelconque l'élément de surface de l'aube mobile soit normal à l'accélération relative des molécules liquides en ce point.

149. Tracés géométriques.—Les formules que nous venons d'énoncer se traduisent géométriquement d'une manière très simple.

Ainsi l'équation (1 *bis*) peut s'écrire : en posant $\sqrt{2gH_1} = V_1$:

$$2Vu \cos \alpha = V_1^2$$

Et d'autre part l'équation :

$$\frac{V^2}{2g} = H_1 (1 - \varepsilon)$$

peut s'écrire :

$$V^2 = V_2^1 (1 - \varepsilon) = V_1^2 - \varepsilon V_1^2.$$

Or si on trace (*fig.* 477) d'un point M comme centre un cercle de rayon

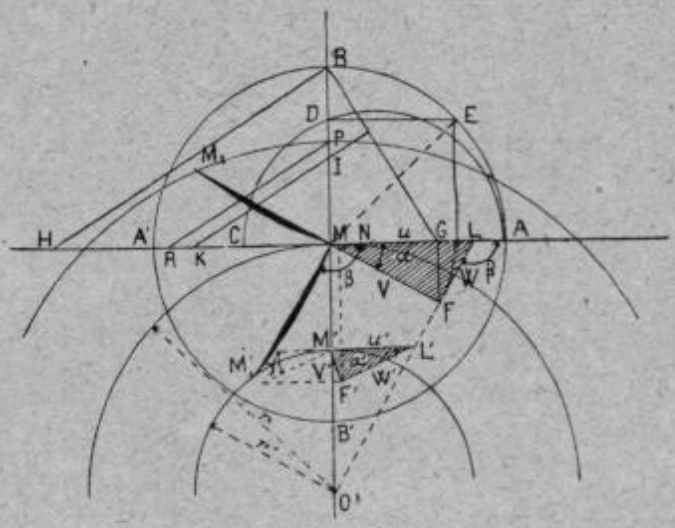


FIG. 477.

$MA = V_1$ et si on prend sur le rayon OA' un point C tel que : $\frac{MC}{MA'} = \varepsilon$, le demi-cercle décrit sur CA comme diamètre coupe le diamètre vertical BB' en un point tel que :

$$\overline{MD}^2 = \overline{MA} \times \overline{MC} = \varepsilon V_1^2$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'on trace ensuite la demi-corde DE perpendiculaire au rayon MB, on obtient un triangle MDE dans lequel :

$$\overline{DE}^2 = \overline{ME}^2 - \overline{MD}^2 = V_1^2 - \varepsilon V_1^2 = V^2$$

Donc la vitesse absolue d'entrée est donnée par DE.

Traçons au point M la ligne MF, faisant l'angle α avec le diamètre AA' et égal à V ; projetons le point F en G sur AA', traçons GB et élevons-lui en B une perpendiculaire qui coupe AA' en H ; le triangle rectangle GBH donne :

$$\overline{MB}^2 = MH \times MG$$

ou :

$$V_1^2 = MH \times V \cos \alpha.$$

Donc :

$$MH = 2u.$$

On peut avoir immédiatement u en menant par le milieu I de MB une perpendiculaire à GB qui coupe AA' en un point K qui est évidemment au milieu de MH et l'on a par suite $MK = u$.

Portons la valeur de u en ML et joignons LF, le triangle LMF est le triangle des vitesses à l'entrée.

Ce tracé étant indépendant du rapport $\frac{u}{u'}$ est le même pour toutes les turbines.

Le triangle des vitesses à la sortie dépend au contraire de la nature de la turbine, puisque la vitesse de sortie dépend du rapport des rayons. Si nous considérons une turbine centripète, qui est le cas de la figure, le point de sortie M' de l'aube est sur le cercle de rayon r' et de centre O, et la vitesse u' est donnée par les triangles semblables OML et OM'L' en M'L' ; on forme l'angle γ et l'on prend $L'F' = L'M'$, puisque $W' = u'$; on a ainsi en M'L'F' le triangle des vitesses à la sortie.

Le profil de l'aube mobile est une courbe telle que MM_1 qui coupe les cercles de la couronne mobile suivant les angles β et γ ; celui de l'aube fixe est généralement une droite parallèle à la direction α.

Le rendement hydraulique du profil peut se déterminer graphiquement aussi. En effet, l'expression de ce rendement est :

$$\rho_1 = \frac{2Vu \cos \alpha - 2 V'u' \cos \alpha'}{2gH_1},$$

qu'on peut encore écrire :

$$\rho_1 = \frac{2u \left(V \cos \alpha - V' \frac{u'}{u} \cos \alpha'\right).}{V_1^2}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Réduisons la vitesse V′ dans le rapport de u' à u, et projetons-la sur AA′, en MN, nous aurons :

$$NG = V \cos. \alpha - \left(V' \frac{u'}{u}\right) \cos \alpha' = \lambda_u.$$

C'est la valeur de l'effort tangentiel F_a, dont nous avons déjà parlé, rapporté à l'unité de masse.

On a donc :

$$\rho_1 = \frac{2u\lambda u}{V_1^2}, \qquad \text{ou :} \qquad \frac{\rho_1 V_1}{u} = \frac{\lambda_u}{\frac{V_1}{2}},$$

Portons λ_u en MP et menons la parallèle PR à IK, nous avons :

$$\frac{MR}{MK} = \frac{MP}{MI}, \qquad \text{ou :} \qquad \frac{MR}{u} = \frac{V_1}{\frac{\lambda_u}{2}};$$

donc :

$$MR = \rho_1 V_1, \qquad \text{et :} \qquad \rho_1 = \frac{MR}{MA}$$

La section transversale peut se déterminer graphiquement aussi, connaissant la largeur b à l'entrée. En effet, la formule :

$$2\pi r_1 b_1 W_1 \sin \beta_1 = 2\pi r b W \sin \beta$$

donne :

$$\left(b_1 \frac{r_1}{r}\right) W_1 \sin \beta_1 = bW \sin \beta = a^2.$$

Or, le tracé de l'aube fait connaître r_1, W_1 et β_1 et la constante a est moyenne proportionnelle entre b et $W \sin \beta$. Donc si nous traçons deux axes rectangulaires Ox et Oy (*fig.* 478), si nous traçons aussi la droite OA faisant l'angle β avec Ox et égale à W, si nous portons en Od la largeur de la couronne à l'entrée, b, le demi-cercle décrit sur ad comme diamètre coupera l'axe Ox en un point c tel que $Oc = a$. Puis, pour avoir la largeur en un point intermédiaire, on mène par le point O une parallèle à W_1 et qui lui est égale, on projette

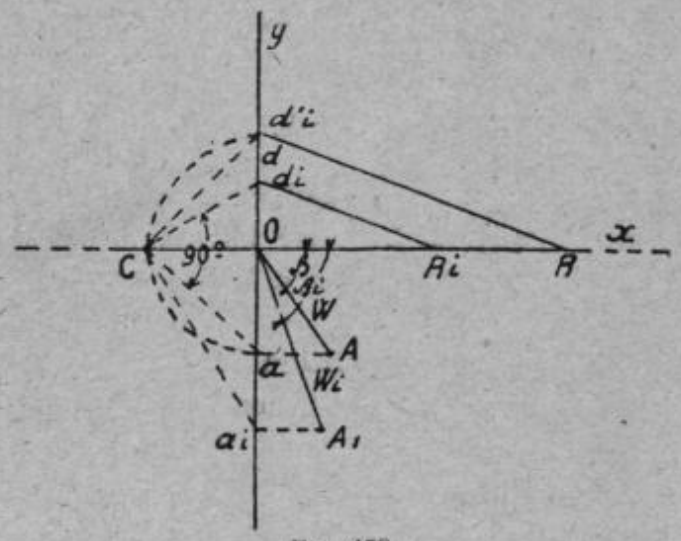


FIG. 478.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

son extrémité A_i sur Oy en a_i, on joint a_i à c, on élève en c une perpendiculaire à $a_i c$ qui coupe Oy en d_i ; on a par suite :

$$Od_i = b_i \frac{r_i}{r}.$$

En amplifiant Od_i dans le rapport de r à r_i, à l'aide des deux triangles semblables ORd_i et ORd'_i dans lesquels $OR_i = r_i$ et $OR = r$, on a :

$$Od'_i = b_i.$$

Remarques. — La forme du triangle des vitesses à l'entrée varie avec le degré de réaction.

Pour une turbine à réaction $\frac{1}{2}$, on a :

$$V = V_1 \sqrt{1 - \varepsilon} = \frac{V_1 \sqrt{2}}{2} ; \text{ d'où : } V_1 = \frac{2V}{\sqrt{2}}$$

En portant cette valeur dans l'équation (1 *bis*) on obtient : $u \cos \alpha = V_1$.

Donc le triangle est rectangle ; le premier élément de l'aube mobile est perpendiculaire au dernier élément de l'aube fixe.

Dans une turbine à réaction nulle, on a :

$$V = V_1 \text{ et } 2u \cos \alpha = V_1 ;$$

Le triangle est isocèle, $W = u$, $\beta = 2\alpha$ et la vitesse de rotation est moitié moindre que celle d'une turbine à réaction $\frac{1}{2}$.

Si la turbine est à libre déviation $p = p'$, la formule du degré de réaction donne : $\varepsilon = -\eta_i$, l'équation de la vitesse à l'entrée devient :

$$V^2 = V_1^2 (1 + \eta_i) = 2gH_1 (1 + \eta_i).$$

La vitesse d'entrée résulte donc de la hauteur réduite augmentée de la perte interne η_i. Le tracé fait comme précédemment montre que le triangle est scalène, que $u < W$ et que $\beta = 2\alpha$.

150. Efforts dynamiques. — Dans les turbines axiales, l'effort dynamique exercé par la masse liquide peut être décomposé en deux parties : l'une tangentielle F_u dont nous avons déjà parlé et l'autre F_y, parallèle à l'axe ; celle-ci est une poussée axiale qui s'ajoute au poids de l'eau ou s'en retranche si la turbine est à axe vertical, poussée qui a pour expression :

$$Fy = V \sin. \alpha - V' \sin \alpha'.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les turbines radiales, la composante F_y est radiale, puisque les filets liquides sont dans un plan perpendiculaire à l'axe.

Les turbines mixtes donnent lieu à une poussée radiale et à une poussée axiale.

151. Influence de l'angle et du degré de réaction sur les éléments du fonctionnement. — En appliquant le tracé ci-dessus pour une même valeur de α et pour différentes valeurs de ε on peut tracer les

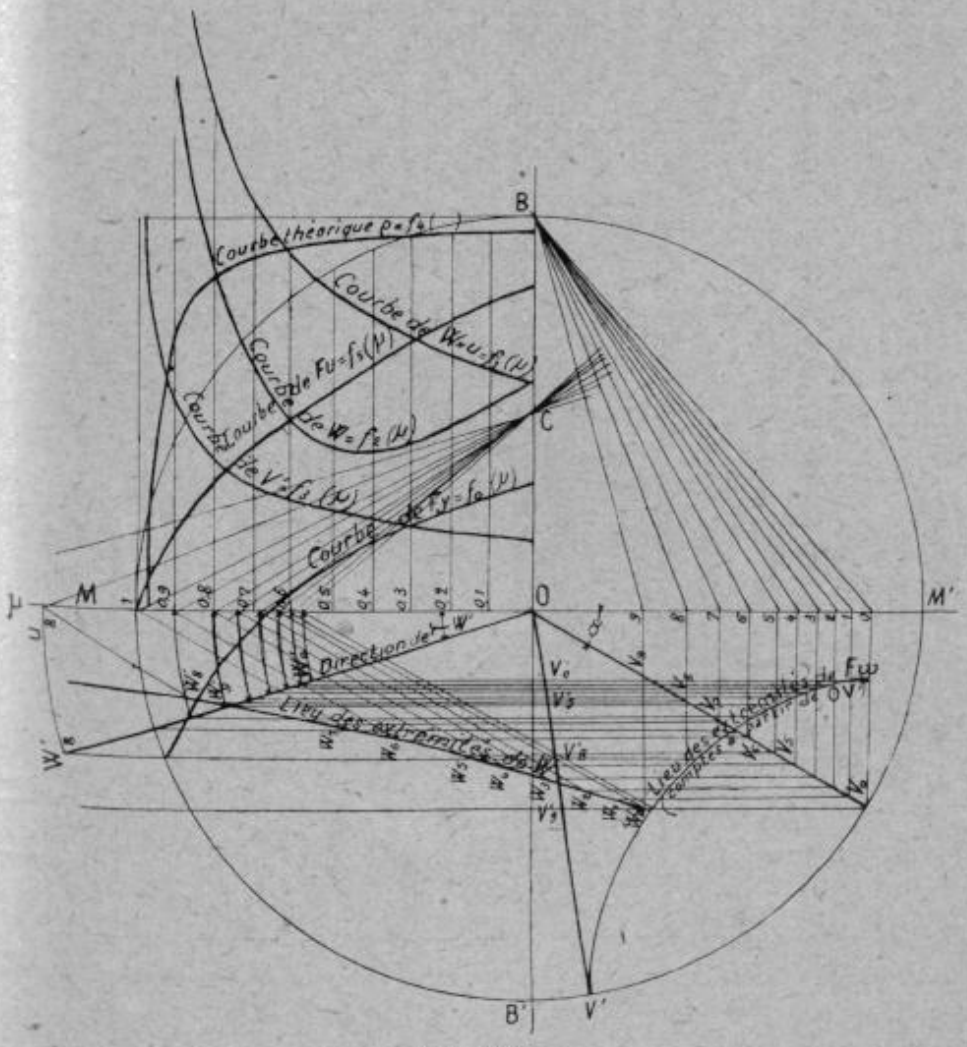


FIG. 479.

courbes représentatives des variations de u, W, V′ et ρ en fonction du degré de réaction.

On obtient de cette façon pour une turbine axiale le diagramme représenté par la (*fig.* 479). On y voit que ε, variant de 0 à 1, u varie de $\frac{V_1}{2\cos\alpha}$ à l'infini.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

V′ varie de $V_1 \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\cos \alpha}$ à V′, F_u décroit constamment et F_y décroit aussi en devenant négatif, c'est-à-dire de bas en haut, quand le degré de réaction est compris de 0,6 à 0,7, et que la vitesse relative passe par un minimum pour ε compris entre 0,4 et 0,5.

Or, comme le frottement dans la couronne mobile est proportionnel au

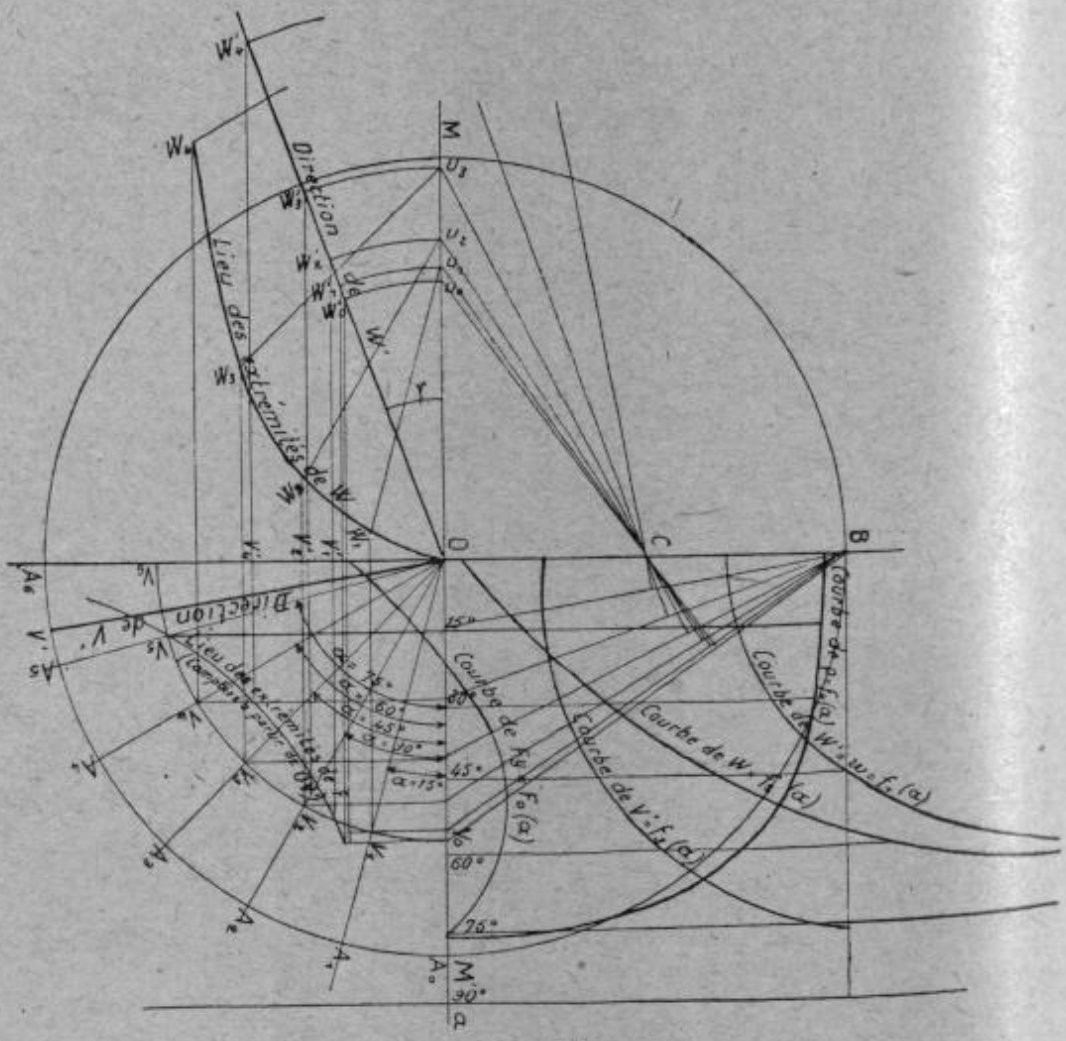


Fig. 480.

carré de la vitesse relative, on voit que pour les hautes chutes où W a une valeur importante, on a intérêt à adopter un degré de réaction voisin de $\frac{1}{2}$.

La courbe de rendement hydraulique montre que ce rendement est sensiblement constant jusqu'à $\varepsilon = 0{,}7$ et qu'au delà il décroît rapidement pour tomber à 0 quand V′ devient égal à V_1.

L'influence de l'angle α est donnée par l'épure de la (*fig.* 480) tracée pour un degré de réaction déterminé ; on y voit que les valeurs de u, W et V′

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

croissent avec α, notamment que celles de W croissent très rapidement ; la poussée axiale passe par un maximum pour α voisin de 45°, elle est négative entre 0 et 20° environ, positive de 20 à 75° ; le rendement est sensiblement constant jusqu'à 45°, puis il décroît rapidement et devient nul un peu au delà de 75°.

152. Fonctions caractéristiques des turbines. — Soit une turbine construite, de diamètre D donnant un rendement ρ sous une chute H et fonctionnant avec un nombre de tours n et un débit de Q mètres cubes par seconde pour donner un travail de N chevaux. Plaçons-la sous une chute différente N′ et cherchons quel devra être son nombre de tours n' pour qu'elle donne le même rendement, et quels seront alors son débit Q′ et sa puissance N′.

Pour que la turbine ait le même rendement dans les deux cas, il faut évidemment que les deux épures faites par la méthode graphique soient semblables ; on doit donc avoir :

$$\frac{u}{u'} \text{ ou } \frac{n}{n'}\frac{V_1}{V'_1} = \sqrt{\frac{H_1}{H'_1}} = \sqrt{\frac{H}{H'}}$$

De même :

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{W}{W'} = \frac{V_1}{V'_1} = \sqrt{\frac{H_1}{H'_1}} = \sqrt{\frac{H}{H'}}$$

Et comme :

$$N = \rho\,\frac{1000\,QH}{75}\,;\quad N' = \rho\,\frac{1000\,Q'H'}{75}\,,$$

on a :

$$\frac{N}{N_1} = \frac{QH}{Q'H'} = \left(\frac{H}{H'}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Considérons en second lieu, deux turbines semblables installées sous la même chute, leur rapport de similitude étant λ, et calculons les rapports $\frac{n'}{n}, \frac{Q'}{Q}, \frac{N'}{N}$ pour que le rendement soit le même.

Les deux turbines étant semblables, leurs épures sont identiques, on a :

$$\frac{n'}{n} = \frac{D}{D'} = \frac{1}{\lambda}$$

De même les valeurs de W donnent :

$$Q = \pi D b W \sin.\ \beta \text{ et } Q' = \pi D' b' W \sin.\ \beta' ;$$

d'où :

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{D'b'}{Db} = \lambda^2 .$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Et le nombre de chevaux fournis par les deux turbines est :

$$N = \rho \frac{1000\ QH}{75} \quad \text{et} \quad N' = \rho' \frac{1000\ Q'H}{75};$$

d'où :

$$\frac{N'}{N} = \frac{Q'}{Q} = \lambda^2.$$

Enfin considérons le cas général de deux turbines semblables T et T' placées sous deux chutes différentes H et H' et donnant le même rendement. Calculons les rapports $\frac{n'}{n}$, $\frac{Q'}{Q}$ et $\frac{N'}{N}$.

Supposons d'abord les deux turbines sous la même chute H et donnant le même rendement ρ avec les nombres n, Q et N pour la turbine T et n_1, Q_1 et N_1 pour la turbine T'.

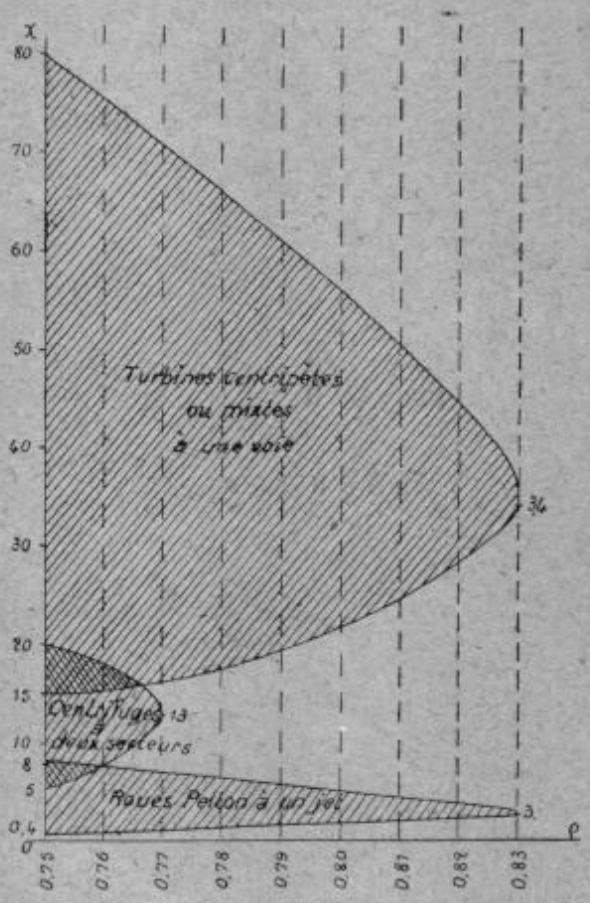


Fig. 481.

On a d'après ce qui précède :

$$\frac{n_1}{n} = \frac{1}{\lambda}; \frac{Q_1}{Q} = \lambda^2 \text{ et } \frac{N_1}{N} = \lambda^2.$$

Puis plaçons la turbine T' sous la chute H', elle donnera le même rendement ρ pour les nombres n', Q' et N', de sorte que :

$$\frac{n'}{n_1} = \sqrt{\frac{H'}{H}}; \frac{Q'}{Q_1} = \sqrt{\frac{H'}{H}}$$

$$\text{et } \frac{N'}{N} = \left(\frac{H'}{H}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Multiplions ces équations membre à membre, nous obtenons :

$$\frac{n'}{n} = \frac{1}{\lambda}\sqrt{\frac{H'}{H}}; \frac{Q'}{Q_1} = \lambda^2\sqrt{\frac{H'}{H}}$$

$$\text{et } \frac{N'}{N} = \lambda^2\left(\frac{H'}{H}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Supposons maintenant que la turbine T' soit placée sous une chute de un mètre et débite un mètre cube par seconde, son nombre de tours x sera donné par les formules précédentes dans lesquelles on fera $H' = 1$ mètre et où l'on donnera à λ une valeur telle que $Q' = 1$ mètre cube et on obtiendra :

$$x = n\sqrt{\frac{Q}{H\sqrt{H}}}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette fonction est appelée fonction caractéristique des turbines. Pour un genre de turbines déterminé, sa valeur varie avec le rendement, puisqu'elle est fonction de n, c'est-à-dire de u, de α et de ε ; d'autre part, cette valeur est limitée par les limites pratiques du débit d'une turbine qui dépendent du genre de cette turbine. Il en résulte que pour un rendement supérieur à 0,75, la fonction caractéristique varie, pour chaque genre, entre des limites déterminées.

Les diagrammes de la (*fig.* 481) représentent les variations de cette fonction pour les roues Pelton à un seul jet, les turbines centrifuges à deux secteurs et les turbines centripètes.

On peut ainsi choisir le type de turbine à employer, quand le nombre de tours est fixé, ou bien choisir à la fois le type de turbine et le nombre de tours qui conviennent au meilleur rendement ; on peut aussi déterminer le débit qui convient à une seule roue, et par suite, le nombre de roues à employer. Cette fonction rend de grands services aux constructeurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VIII

INSTALLATION DES TURBINES

I. — VANNAGES ET PIVOTS

153. Vannages des turbines. — Le vannage spécial à une turbine a pour but de modifier le débit en le proportionnant à la puissance à produire.

On peut diviser les vannages des turbines ou dispositifs de réglage en trois classes, savoir : ceux spéciaux aux turbines à réaction, ceux communs aux turbines à réaction et à action, et enfin ceux à admission partielle des turbines à action, axiales ou radiales.

Dans les vannages des turbines à réaction, on ouvre les vannages au

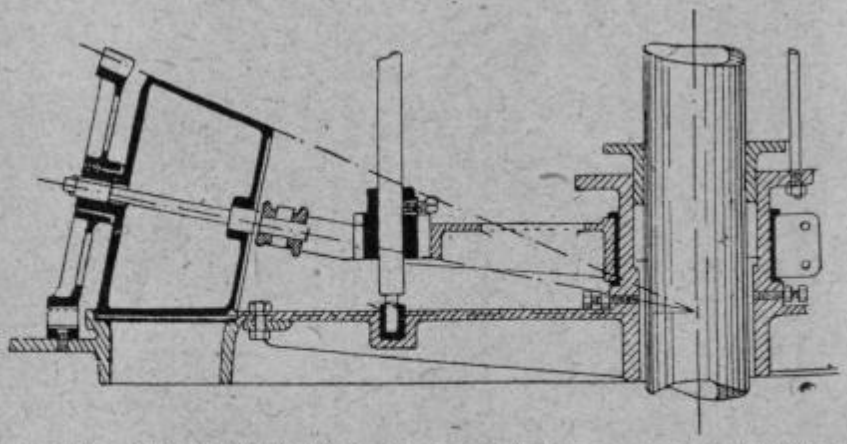


FIG. 482. — Vannage à rouleaux. Coupe verticale par l'axe d'un rouleau.

moyen de vannes ou *papillons* placés sur le tuyau d'arrivée de l'eau, de *clapets articulés* formant deux ou trois canaux à la fois, de *clapets mobiles* que l'on enlève ou que l'on place directement à la main, de *vannes cylindriques* actionnées à l'aide de tiges à crémaillère, comme pour les clapets articulés, enfin de *vannes doubles* qui comprennent par moitié une partie conique qui peut fermer la première partie de la couronne, et un segment plan qui a pour effet d'obstruer la seconde.

Les vannages communs aux turbines à réaction et à action comportent soit un *vannage à rouleaux* de Fontaine qui sont commandés par un sec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur denté et un pignon, soit des *vannettes à tambour* de Callon, guidées par des rainures pratiquées dans les joues de la couronne et manœuvrées à la main ou au moyen d'un tambour à gorge.

Dans le vannage à rouleaux, des pignons à dents spéciales servent à guider ces rouleaux ou cônes en engrenant avec une crémaillère fixe placée sur le rebord du distributeur. Ces pignons guides empêchent tout glissement sans s'opposer au soulèvement du tablier. La maison Teissei, Chapron et Brault emploie maintenant avec succès, pour la construction du tablier flexible, le cuir hydrofuge, qui jouit de la propriété précieuse de pouvoir se réparer.

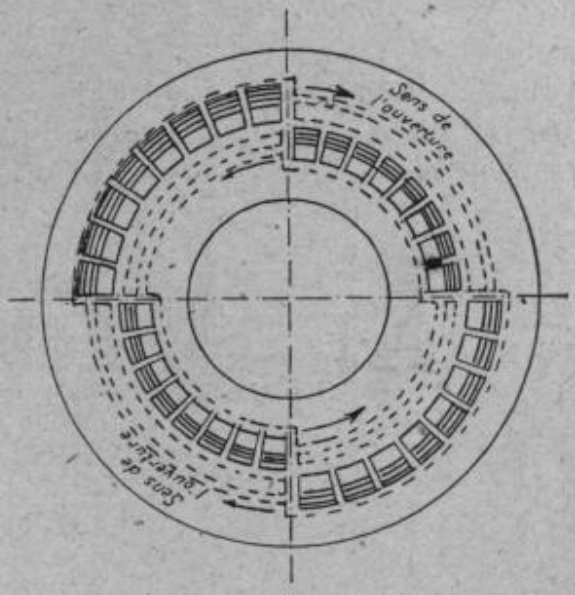


FIG. 483. — Vannage à rouleaux.
Plan de la couronne fixe.

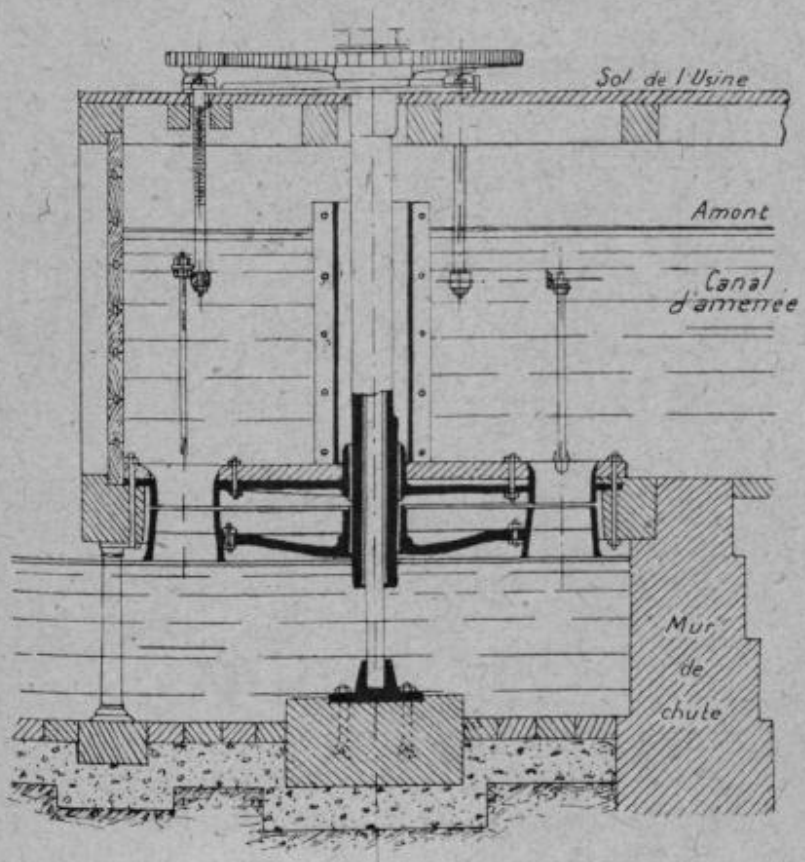


FIG. 484. — Turbine axiale munie d'un vannage à vannettes indépendantes, à commande par roue dentée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avec le vannage à papillon ordinaire les secteurs ne peuvent jamais découvrir à eux deux qu'une moitié de la couronne circulaire formée par le distributeur. Cette moitié est donc seule utilisable pour l'admission de l'eau. M. Schavaber a remédié à cet inconvénient avec son *papillon croisé*. Dans ce système (*fig.* 403) le distributeur est formé de deux paires de secteurs, de rayons inégaux à leur partie supérieure. Le plus grand rayon

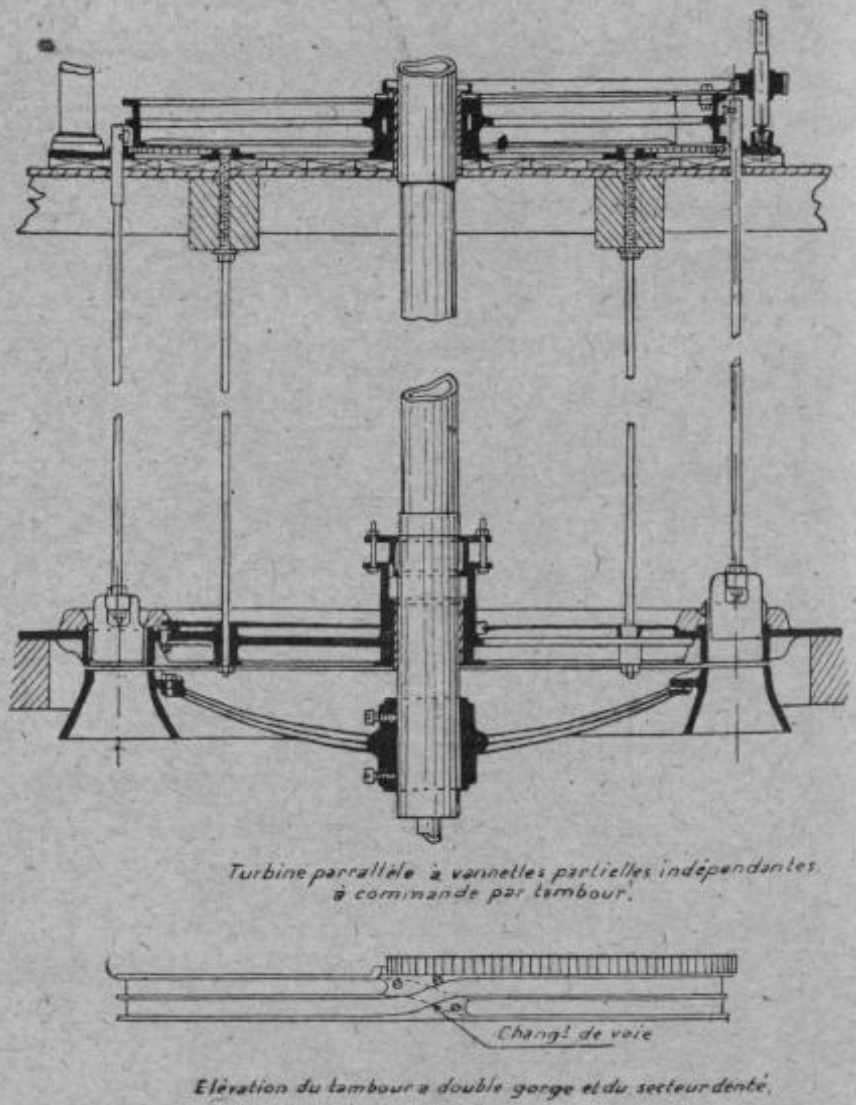


FIG. 485. — Turbine parallèle à vannettes partielles indépendantes à commande par tambour.

des secteurs intérieurs est précisément égal au plus petit rayon des secteurs extérieurs, et les quatre secteurs se raccordent à leur partie inférieure, pour former par leur juxtaposition une couronne circulaire de même rayon que la partie supérieure de la turbine proprement dite. Le papillon se compose aussi de quatre secteurs recouvrant exactement les secteurs du distributeur.

Et quand on fait tourner le papillon autour de son axe vertical, les sec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs de ce papillon démasquent les secteurs correspondants du distributeur, sans recouvrir les secteurs voisins. L'eau peut donc être admise à la fois sur tout le pourtour du distributeur.

Le papillon croisé obvie en partie aux inconvénients du vannage à rouleaux, qui sont : usure de la matière flexible et impossibilité d'utiliser l'admission de l'eau de la partie du distributeur occupée par les rouleaux à bout de course.

Le *vannage Victor*, préféré pour les turbines radiales, consiste en des pièces en fonte ou en bronze, fixées à des couronnes en fonte et mobiles autour de l'arbre de la turbine ; ce vannage est interposé entre le distributeur et la roue.

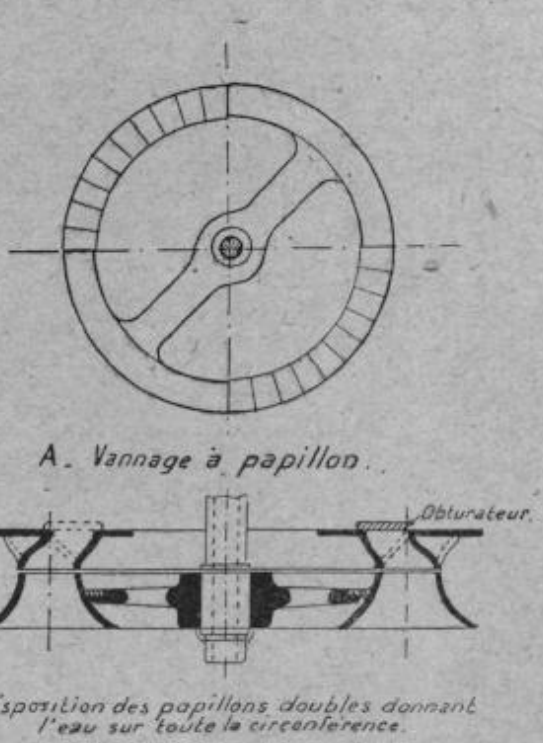


Fig. 486. — Vannage à papillons.

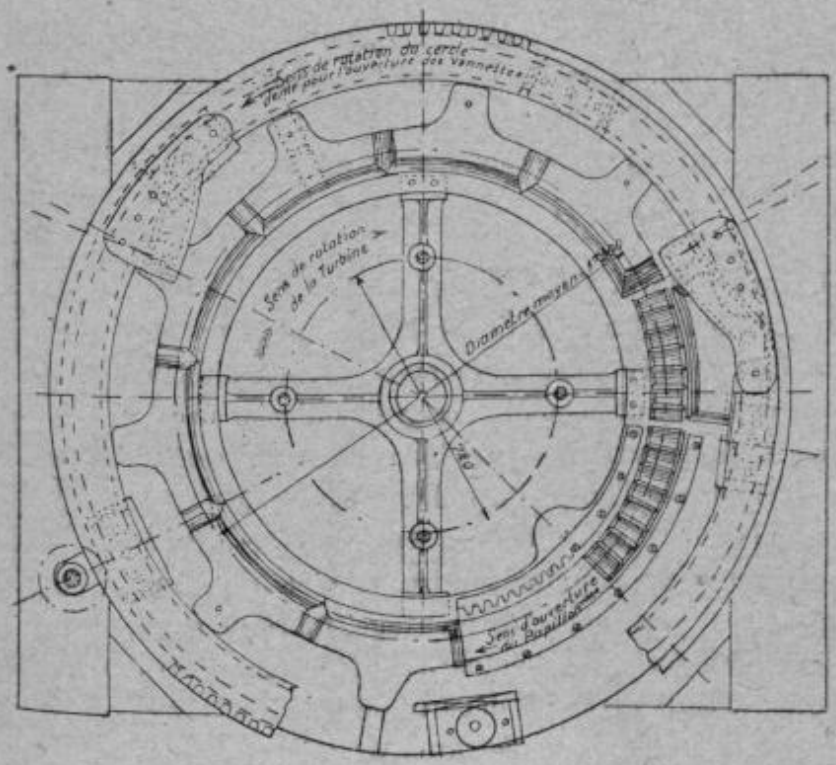


Fig. 487. — Vannage à tiroirs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En ce qui concerne les vannages applicables aux turbines à admission partielle, il y a lieu de distinguer entre ceux affectés aux turbines parallèles et ceux appliqués aux turbines centrifuges.

Pour les premières, on règle l'admission au moyen d'un *tiroir* ou vanne circulaire occupant deux quarts de cercle fondus avec un cylindre vertical qui porte la denture sur laquelle agit le moteur. Quant aux turbines centrifuges, recevant l'eau par un tuyau, et pour moyenne et haute chutes, la vanne circulaire équilibrée est placée à l'extérieur, entre la couronne des directrices et la roue, son mouvement de rotation étant fourni par un pignon extérieur.

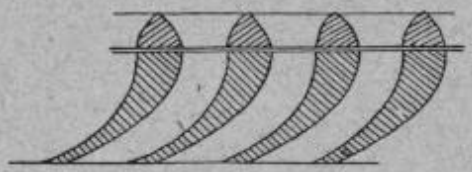


Fig. 488. — Vannage à persiennes.

Nous avons décrit (§ 139) les vannages employés pour les turbines mixtes et, en particulier, les vannages américains produits par les aubes directrices elles-mêmes, pivotées entre les deux plateaux annulaires de la couronne fixe et commandées par un secteur à bielles radiales.

Dans le tome II qui traite des usines aménagées et qui sont comme une synthèse des usines hydroélectriques classiques, nous donnons, pour chacune d'elles, une description spéciale des vannages employés par les constructeurs des turbines adoptées dans ces installations. On verra que le plus souvent les vannages sont mis sous la dépendance d'un système automatique comprenant : un relais à servo-moteur et un pendule centrifuge ou tachymètre rotatif dont l'équilibre et les fonctions pour la vitesse de régime, pour les accroissements ou les ralentissements d'allure, déterminent le jeu du servo-moteur et, par suite, celui du distributeur d'une manière opportune.

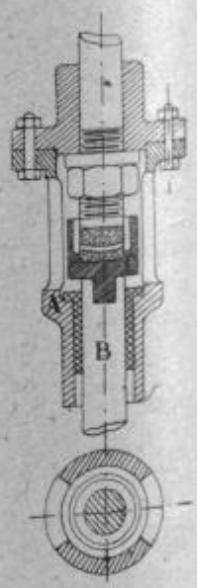


Fig. 489.

154. Pivots divers. — Calculs. — Les pivots des turbines fonctionnent noyés (Jonval) ou marchent en l'air ou hors de l'eau (Fontaine). Le pivot noyé est difficile d'accès (pour les remplacements des grains d'acier usés), d'entretien et de surveillance. Ces inconvénients ne sont que peu atténués par l'emploi des champignons de gaïac, en raison de l'usure inégale des parties frottantes. Pour que ce système de pivot puisse rendre de réels services, il faut qu'il soit très soigné de montage, fabriqué avec des matières premières excellentes, qu'il fonctionne toujours immergé à l'aval et que les eaux arrivent débarrassées de tout gravier.

L'accès, le réglage et l'entretien du pivot en l'air sont d'ordre plus facile, mais la construction de l'organe devient plus compliquée ; ainsi il exige

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

principalement un arbre creux A (*fig.* 489) en fonte, avec guidage à la

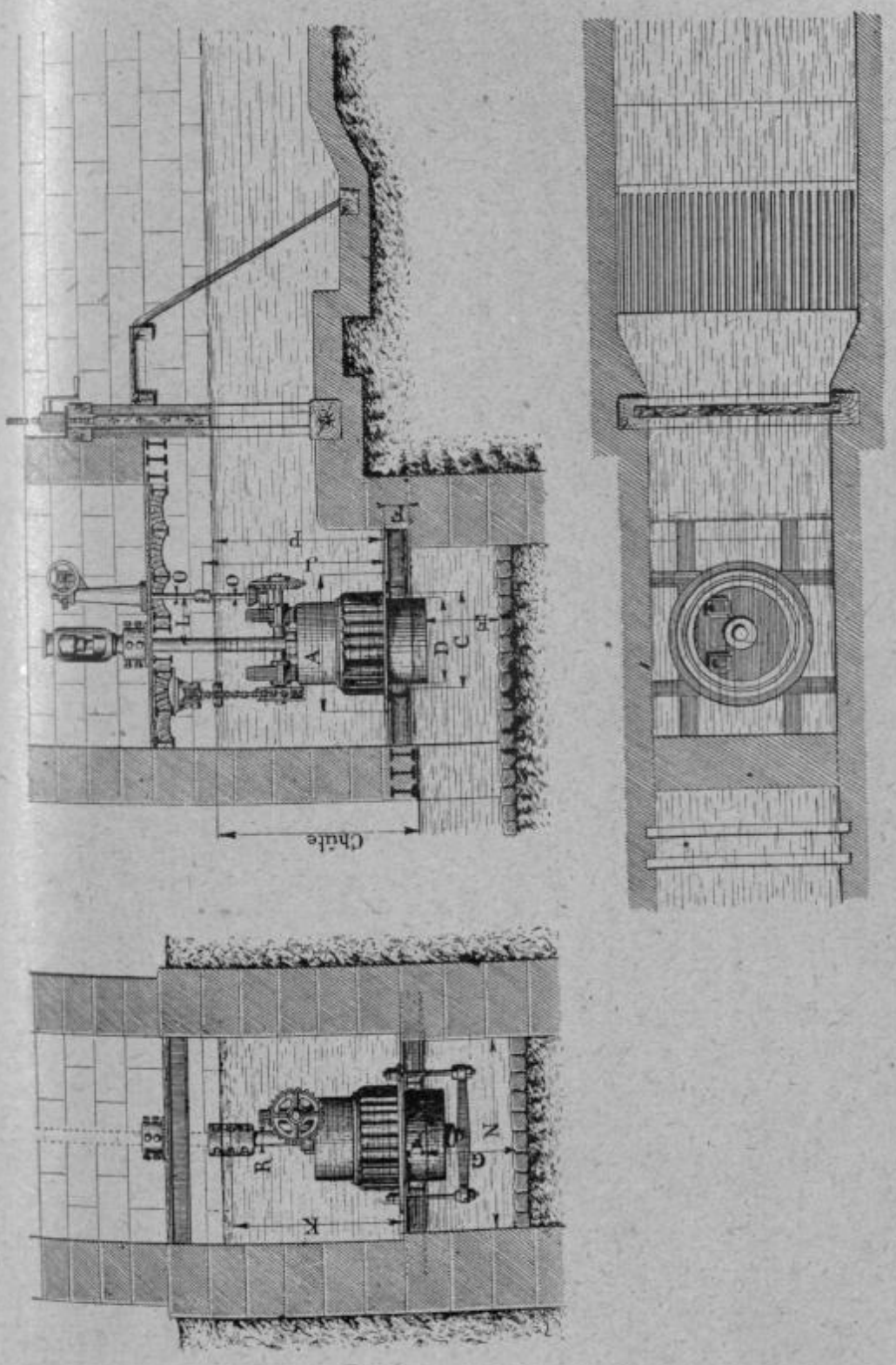


FIG. 490. — Installation de turbines « La Houille Blanche », avec pivot dans l'eau et hors de l'eau.

partie inférieure sur l'arbre fixe B, pour empêcher tout déplacement latéral de la turbine. L'arbre creux est revêtu à sa partie supérieure d'un cous-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sinet en bronze, et le pivot est fixé par une clé à l'axe mobile qui tourne dans la crapaudine.

Si on appelle P le poids total en kilogrammes que doit supporter l'axe

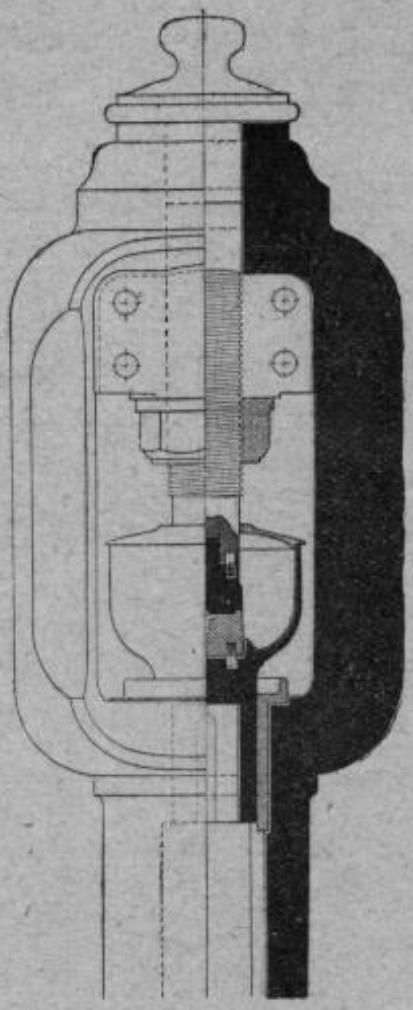


Fig. 491.

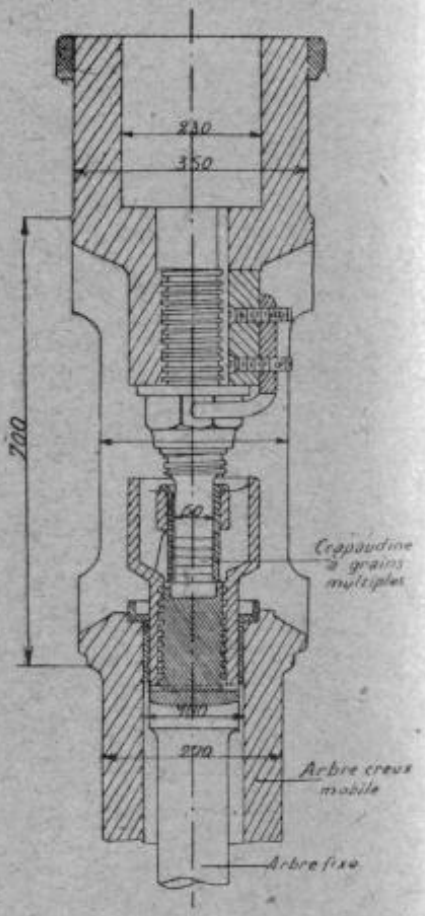


Fig. 492. — Pivot hors d'eau, système Arson.

fixe et d le diamètre de celui-ci, on obtient la valeur de ce dernier en faisant :

$$d = 0{,}7\sqrt{P} + 5 \text{ (pour le fer)}$$

et :

$$d = 0{,}4\sqrt{P} + 3 \text{ (pour l'acier)}.$$

Pour des arbres très longs, et si l est la longueur en millimètres, on prend : $d = 0{,}2\sqrt{l\sqrt{P}}$. La valeur maximum de la pression ne doit pas dépasser $0^{kg},7$ par millimètre carré. Quant à la hauteur du grain, d_1 étant son diamètre, on la prend égale à : $3{,}5\sqrt{d_1} + 5$.

Pour l'arbre creux en fonte portant la roue mobile, on a :

$$M = 0{,}1963\ \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_4}\ \sigma ;$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M, moment du couple de torsion ; d_1, diamètre intérieur ; d_2, diamètre extérieur (d'ordinaire $d_2 = 1{,}4d_1$) ; σ, effort unitaire à la torsion (qui est habituellement inférieur à 2 kilogrammes par millimètre carré).

Dans le cas de hautes chutes, la maison Teisset, Chapron et Brault applique avec succès un pivot à circulation d'eau pour éviter tout échauffement dû à la trop grande pression sur les pointes des turbines. Un serpentin en cuivre rouge est fixé dans le gobelet ; par un dispositif spécial, un courant d'eau froide circule dans ce serpentin et refroidit l'huile du pivot dès que le frottement tend à en élever la température.

Dans le pivot suspendu *Ganz*, l'arbre de la turbine, fileté dans la partie supérieure, est fixé directement à un manchon d'acier cylindrique qui tourne sur un collet de bronze phosphoreux placé dans une boîte remplie d'huile.

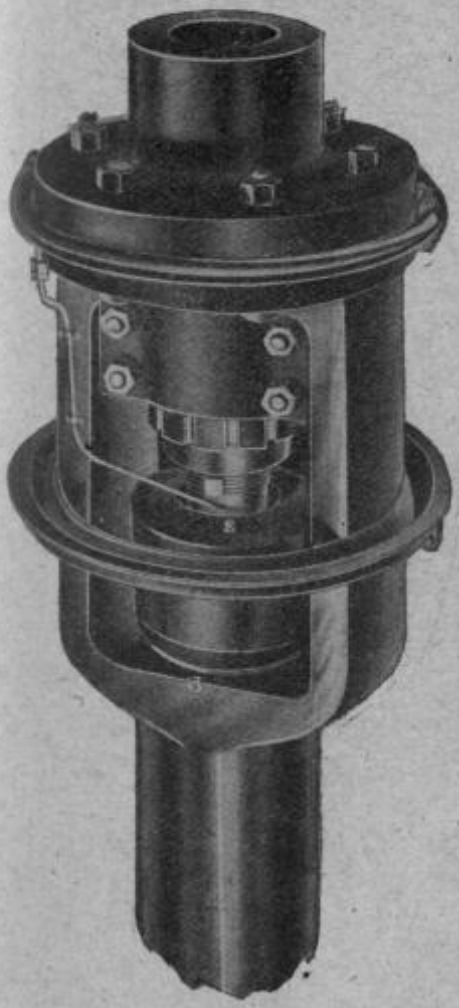


Fig. 493. — Pivot central hors de l'eau avec circulation d'eau froide autour de la crapaudine (L. Gouverner, constructeur).

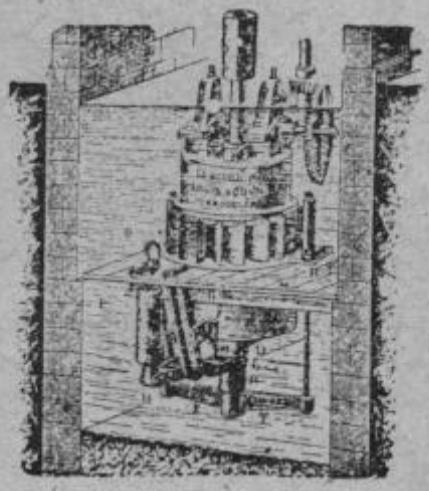


Fig. 494. — Pivot noyé visitable, système L. Gouverner.

La maison Neyret-Brenier utilise pour les arbres verticaux le pivot à lanterne système Arson (*fig.* 491). Un arbre plein solidement fixé est surmonté d'un gobelet au fond duquel est un grain d'acier. C'est sur ce grain que repose un pivot fileté supportant un arbre creux auquel est fixée la turbine.

Le réglage est fait par un écrou que l'on peut facilement manœuvrer grâce à deux larges fenêtres ménagées dans un renflement de l'arbre creux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le pivot supérieur est sans doute plus coûteux que le pivot inférieur en gaïac, placé sous l'eau, mais ce dernier a le grand défaut de n'être accessible que lorsque l'on vide le canal de fuite et en outre de s'user très rapidement si l'eau charrie du sable.

Quand la pression sur le pivot n'est pas considérable, ni la vitesse de rotation trop rapide, cette même maison emploie le pivot annulaire à suspension représenté par la (*fig.* 496). Lorsque la charge à supporter est trop forte, on soulage le pivot par l'emploi d'un piston fixé à l'arbre et sous lequel on admet l'eau sous pression. Un tuyau d'échappement, fixé à la partie supérieure du cylindre dans lequel tourne ce piston, permet l'écoulement de l'eau qui suinte entre le piston et son cylindre. Quelquefois la maison Neyret-Brenier combine ce dispositif avec la roue même de la turbine (usine de Servoz).

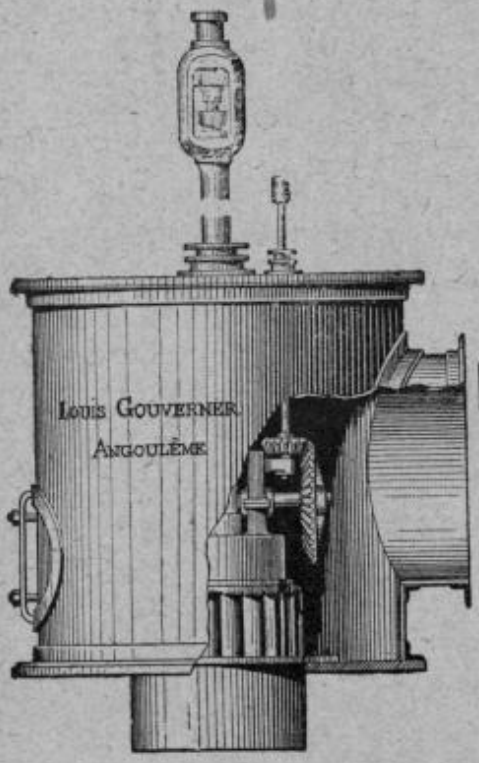


Fig. 495. — Turbine « La Houille Blanche » avec bâche et pivot central hors de l'eau.

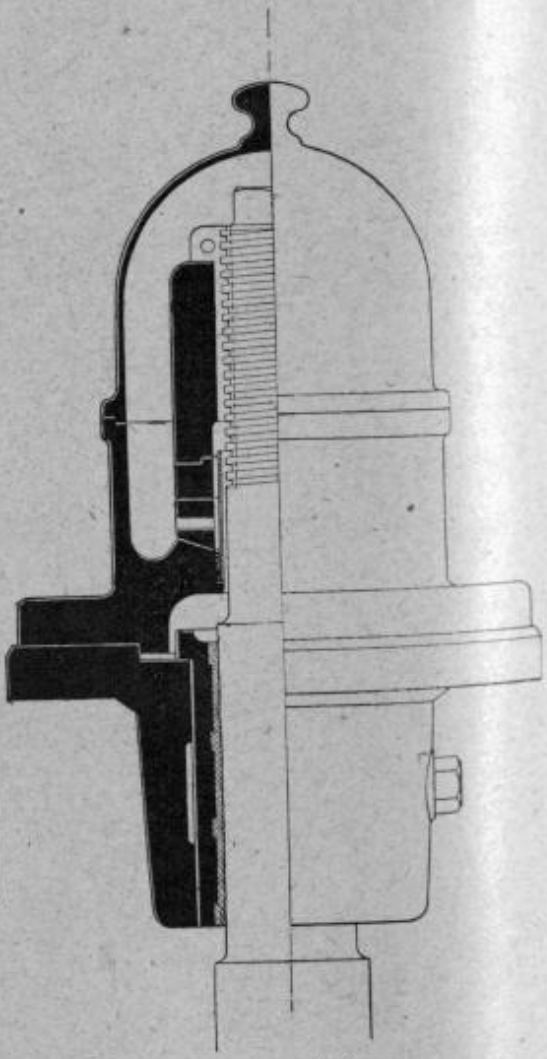


Fig. 496.

Dans le dispositif *Gouverner*, l'arbre est suspendu à un anneau vissé à son sommet, lequel anneau tourne au-dessus d'une table circulaire fixe, soit par l'intermédiaire de roulements à billes, soit avec interposition d'huile sous pression.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les types nouveaux le pivot dans l'eau est en bois dur imputrescible, le graissage à l'huile est supprimé ; c'est l'eau courante (et non pas

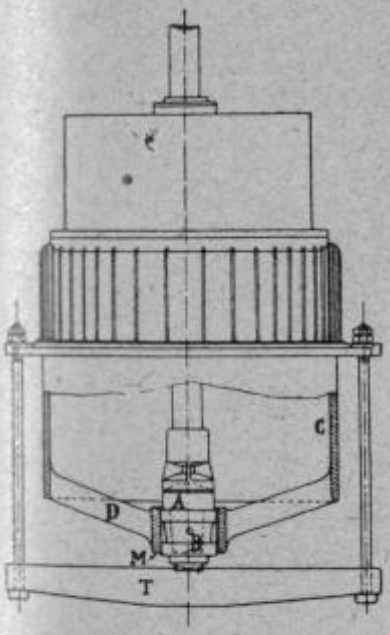


Fig. 497.

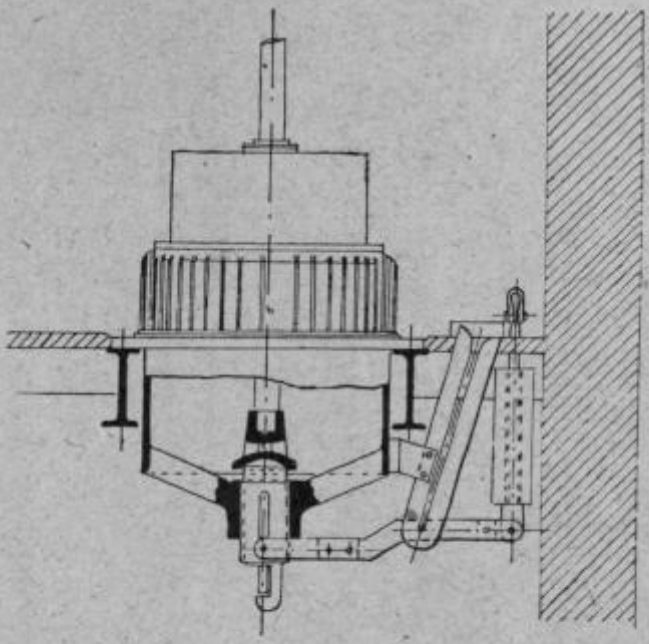


Fig. 498. — Turbine « La Houille Blanche ».

l'eau qui s'infiltre dans une boîte mal close) qui, par sa masse, est chargée de lubrifier les surfaces frottantes.

Le pivot en bois A (*fig.* 478) est contenu dans une boîte cylindrique B

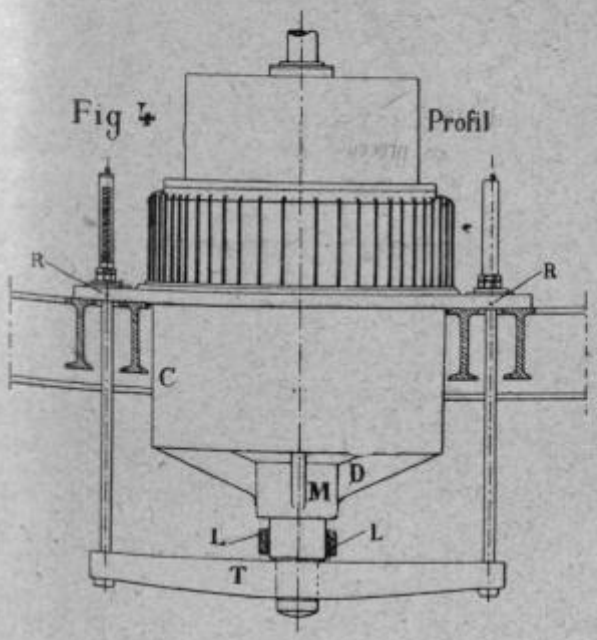


Fig. 499. — Profil.

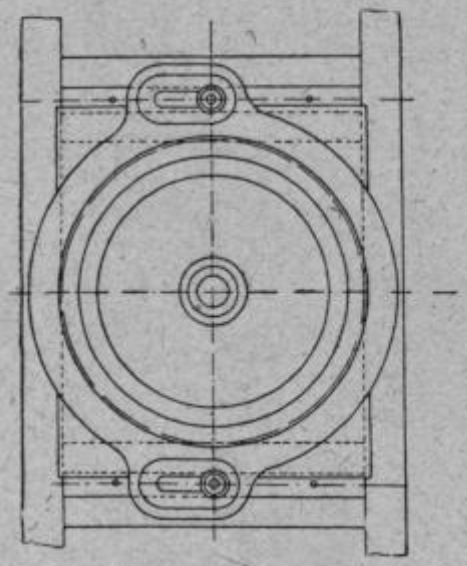


Fig. 500. — Vue en plan.

en fonte. Cette boîte est maintenue dans le moyeu M (*fig.* 497 à 500), à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'aide d'un croisillon à quatre bras D qui viennent se relier à la circonférence du tube d'évacuation ou tube hydropneumatique C.

La boîte contenant le pivot repose sur une traverse en acier T, supportée elle-même par deux tiges qui transmettent la charge au plancher de la turbine. Ces tiges sont filetées à leur partie supérieure et des écrous permettent de régler la hauteur du pivot.

Malgré la simplicité de ce pivot, quelques industriels hésitent à l'employer

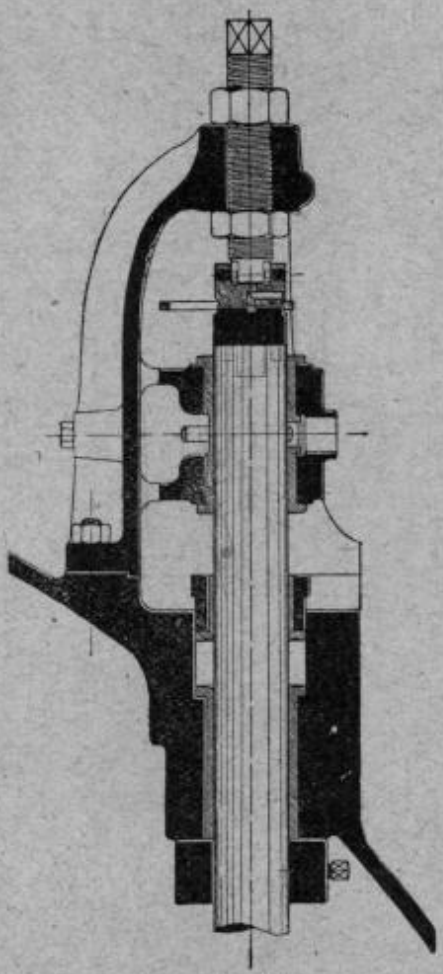


Fig. 501.

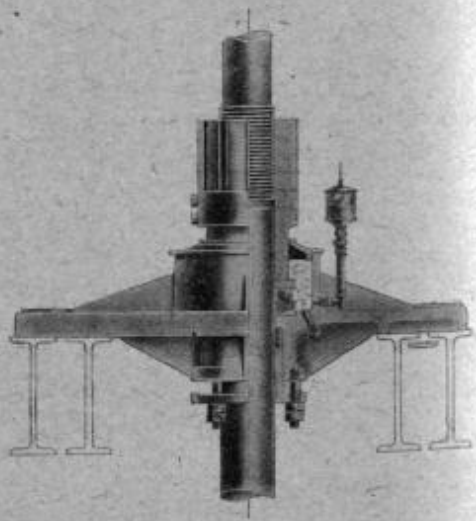


Fig. 502. — Pivot annulaire à billes.

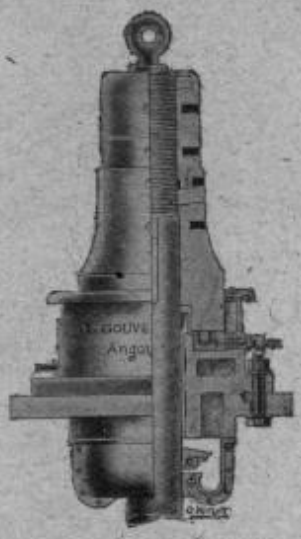


Fig. 503. — Pivot annulaire à pression d'huile.

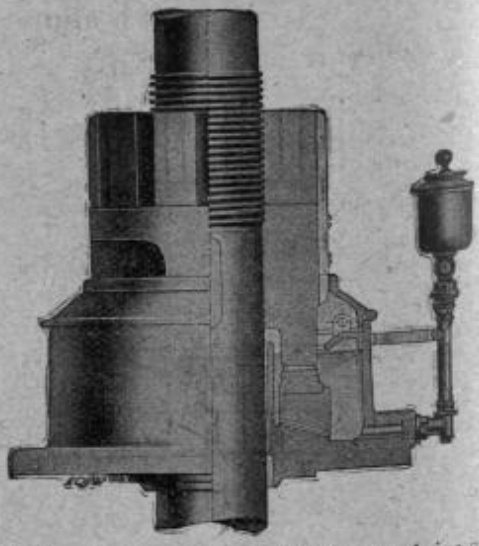


Fig. 504. — Pivot annulaire simple.

parce que sa visite ou son remplacement nécessitent soit le démontage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

complet de la turbine, soit l'établissement d'un batardeau dans le canal de fuite et la mise à sec de la partie de ce canal située sous la turbine. Quand la turbine est peu importante, l'inconvénient n'est pas grand ; dans certaines installations, on peut même à la rigueur se dispenser du batardeau, mais c'est l'exception. Au contraire, quand il s'agit d'une turbine d'une force moyenne ou de grandes dimensions, il faut renoncer à visiter le pivot, et son remplacement entraîne des dépenses élevées.

Il était donc intéressant de chercher un dispositif qui permît d'enlever le pivot, de le visiter, le remplacer et le remettre en place sans démonter aucun autre organe de la turbine ni vider le canal de fuite. On a résolu le problème de la façon suivante :

La boîte du pivot est supportée par une traverse en acier T. Cette boîte porte, suivant deux génératrices diamétralement opposées, deux rainures N dans lesquelles viennent s'engager des ergots fixés sur chacune des branches d'un levier double L.

L'axe E de ce levier est supporté par deux chaises F fixées soit contre la charpente, soit contre le tube d'évacuation ou de toute autre façon. Deux guides G partent du point d'appui et vont jusqu'au plancher supportant la turbine. L'extrémité H du levier reçoit une tige ou une chaîne qui aboutit en un point où il est possible d'exercer un effort d'enlèvement à l'aide d'un treuil, d'un palan ou de tout autre appareil de levage. La boîte du pivot se prolonge en forme d'échancrure dans laquelle vient se loger la traverse T. Les tiges qui supportent cette traverse sont filetées sur une longueur suffisante pour permettre la manœuvre décrite plus loin ; en outre les ouvertures R par lesquelles ces tiges traversent le plancher de la turbine sont de forme allongée. On dispose en un point quelconque de l'arbre de la turbine une butée limitant l'amplitude du mouvement de descente de cet arbre.

La manœuvre pour sortir le pivot est la suivante : on fait descendre la traverse T en manœuvrant les écrous des tiges qui la supportent et on déplace les tiges de façon à dégager la traverse T de l'échancrure pratiquée dans la boîte du pivot ; on agit en élevant la chaîne ou tige articulée en H ; on comprend que l'axe E après avoir pivoté glissera entre les branches du guide G. Le levier double L peut être amené avec le pivot en un point convenable pour pouvoir exécuter toute visite ou réparation.

Le pivot est remis en place par la manœuvre inverse de celle qui vient d'être décrite ; les détails de construction peuvent varier beaucoup, ils dépendent de la disposition locale qui change d'une turbine à l'autre.

Il y a lieu de remarquer que le système de leviers qui sert à manœuvrer le pivot ne subit aucun effort pendant la marche de la turbine ; mais il est prudent de sortir le pivot une ou deux fois par an, surtout quand l'eau est chargée de sels calcaires formant à la surface du métal des dépôts qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

doivent être enlevés avant qu'ils ne soient suffisants pour gêner la manœuvre.

Dans le cas des arbres horizontaux, on emploie des pivots-butées à graissage à bague avec grains à rotule ; un palier supporte l'arbre tout près du pivot. La (*fig.* 501) représente le dispositif employé par la maison Neyret-Brenier.

Dans certains cas spéciaux on fait appel aux paliers à cannelures, mais ils sont d'un entretien et d'une visite beaucoup moins faciles que les butées.

L'emploi des pivots à billes permet de diminuer le travail de frottement développé dans les pivots ordinaires ; dans ce cas, on peut soustraire ces organes à l'action de l'eau et leur appliquer un système de graissage à pression assurant la lubrification de façon parfaite. Pour ce genre de suspension, on fait : $P = Km\delta$ (m, nombre de billes ; δ, diamètre de chaque bille ; K, coefficient = 0,025 pour billes en acier et chemins de roulement en fonte et 0,030 pour billes et chemins de roulement en acier).

Si l'arbre de la turbine est horizontal, on a, en tenant compte de la torsion et de la flexion, et pour chaque tourillon d'extrémité :

$$d = \frac{P}{Kl}; \qquad \frac{l}{d} = \sqrt{\frac{0{,}2K_1}{K}}; \qquad l = \frac{PN}{C};$$

d, diamètre du tourillon ; l, longueur ; P, réaction de l'appui ; N, nombre de tours par minute ; K, pression unitaire ($0^{kg},1$ à $0^{kg},2$ par millimètre carré) ; K_1, effort de flexion ($4^{kg},50$ par millimètre carré pour la fonte, $3^{kg},50$ pour le fer) ; C, coefficient, inférieur à 4.000.

Le pivot *annulaire Singrün, du type hors de l'eau* et graissé à l'huile, a l'avantage de supprimer l'arbre creux et de supprimer le porte-pivot sous la roue motrice. Il se compose d'une douille pouvant glisser le long d'un arbre vertical, entraînée dans son mouvement de rotation par un prisonnier. Elle repose et tourne sur un anneau en fonte ou en acier encastré dans un second anneau en fonte dont la forme sphérique inférieure porte sur une rotule d'une cuvette qui assure à l'ensemble une position telle que malgré un petit défaut possible dans le montage de l'arbre vertical, le contact entre les deux parties frottantes de la douille et de l'anneau soit toujours parfait. La cuvette reçoit l'huile lubrifiante et un écrou permet le réglage du pivot.

Le pivot annulaire *Singrün* permet d'employer un arbre premier moteur en acier plein, et par conséquent, de donner à cet organe essentiel une robustesse et une sécurité complètes. La pression par unité de surface frottante étant très faible, le graissage est très efficace.

Les grains annulaires sont en fonte dure et en deux pièces ; ils reposent sur un anneau à rotule qui permet à l'ensemble du système d'osciller légèrement, et de prendre automatiquement la position qui correspond

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au portage rationnel des surfaces frottantes (Voir *fig.* 504 *bis*), à l'errata à la fin du livre.

Un niveau extérieur permet de s'assurer à tout instant, et pendant la marche de la hauteur de l'huile dans le réservoir, et une vis de vidange d'évacuer l'huile qui aurait perdu les qualités lubrifiantes.

Un couvercle recouvre la cuvette et évite les projections d'huile.

Les pivots hydrauliques de Girard, utilisés par quelques constructeurs, donnent d'excellents résultats. Ce genre de pivot consiste en principe en un plateau fixé sur l'arbre, sous lequel est une cuvette annulaire dans laquelle on injecte de l'eau sous pression. Le réglage s'obtient en élevant ou abaissant cette cuvette au moyen de vis disposées à cet effet (*fig.* 505).

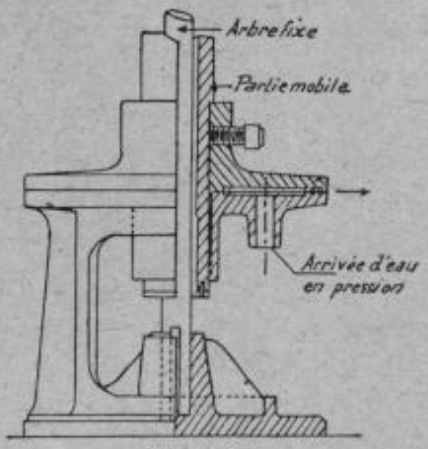


FIG. 505.

Lorsqu'on veut transmettre directement le travail de la turbine, on cale l'arbre de transmission sur un manchon formant la partie supérieure de pivot, ou bien l'arbre coulisse dans ce manchon par une longue clavette, son extrémité étant filetée pour recevoir l'écrou de réglage et le grain de frottement.

II. — MISE EN PLACE DES TURBINES

155. Montage des turbines. — En principe une turbine se compose d'un axe ou arbre vertical ou horizontal, d'une roue mobile fixée sur cet arbre ou couronne ou récepteur — dans lequel la force vive de l'eau se transforme en travail mécanique — d'une couronne fixe ou distributeur, d'un vannage ou dispositif de réglage du débit, et enfin d'une chambre en maçonnerie, en béton ou en tôle, appelée chambre d'eau et qui, en général renferme le récepteur, le distributeur et une partie de l'axe.

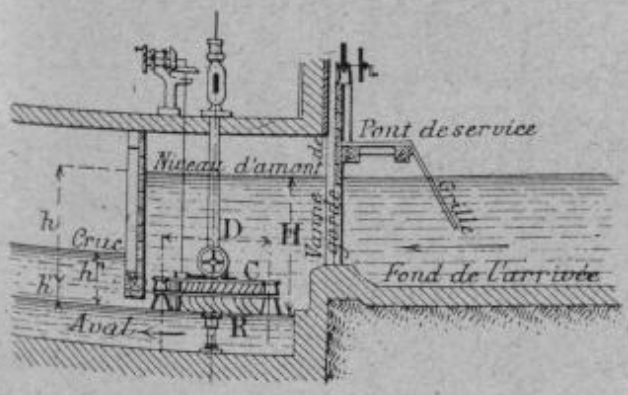


FIG. 506.

Pour l'établissement des chambres d'eau, il y a lieu de distinguer si la turbine est ouverte ou fermée. Dans le premier cas, le canal d'amenée pénètre dans l'usine, et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'eau est retenue dans une chambre en maçonnerie, sur le plancher de laquelle repose la turbine (*fig.* 506. Alors que la turbine comporte

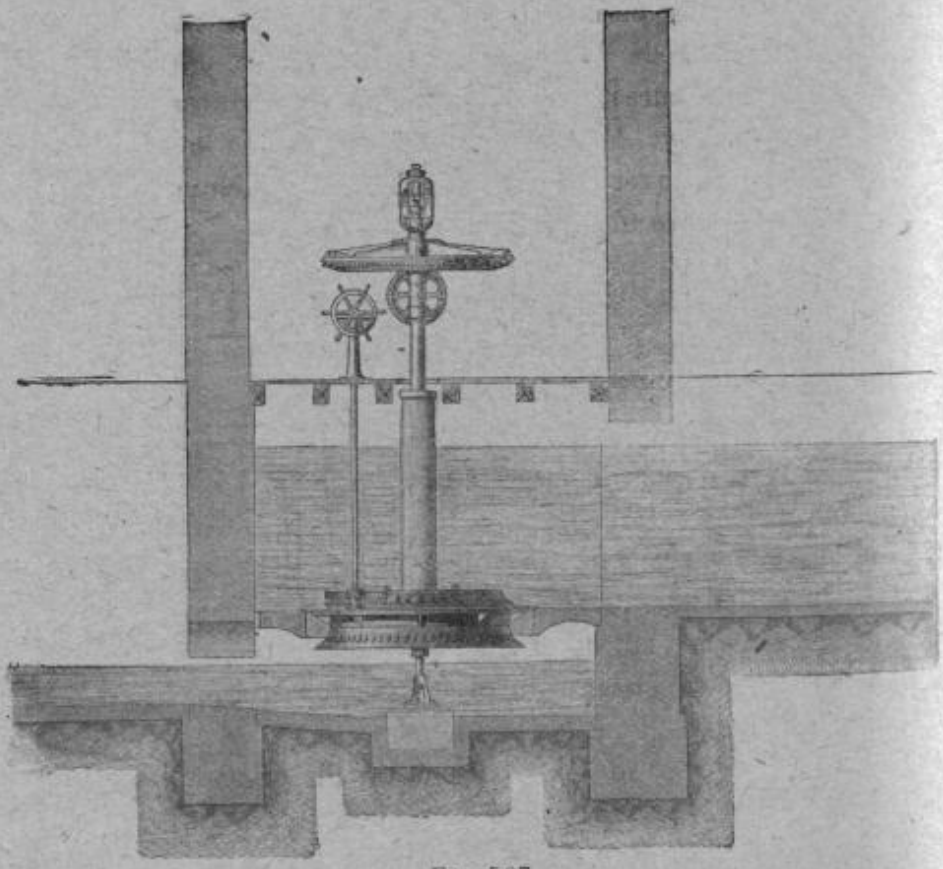


FIG. 507.

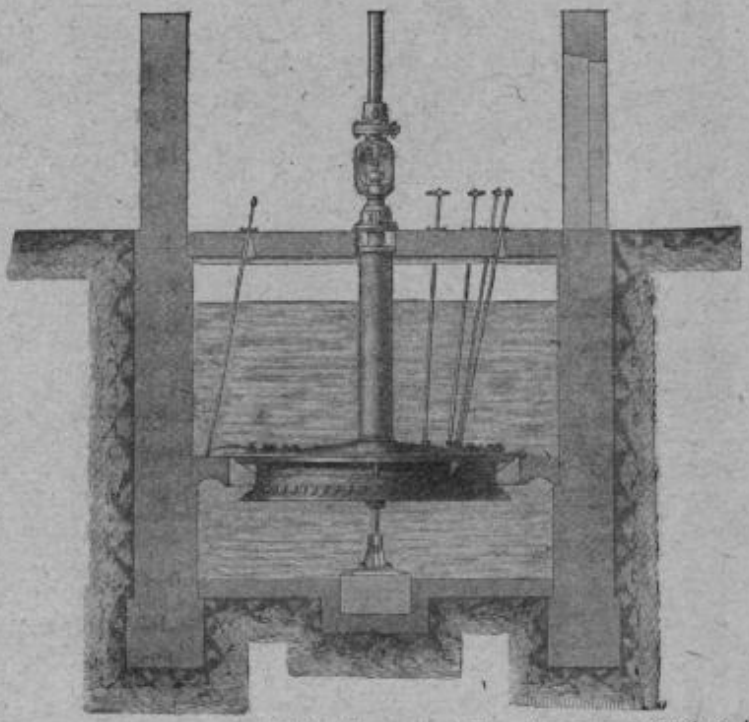


FIG. 508. — Turbine parallèle Neyret et Brenier, à admission totale et à chambre ouverte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un tube d'échappement, celui-ci doit toujours plonger dans l'eau d'aval de façon à utiliser la chute dans tous les cas.

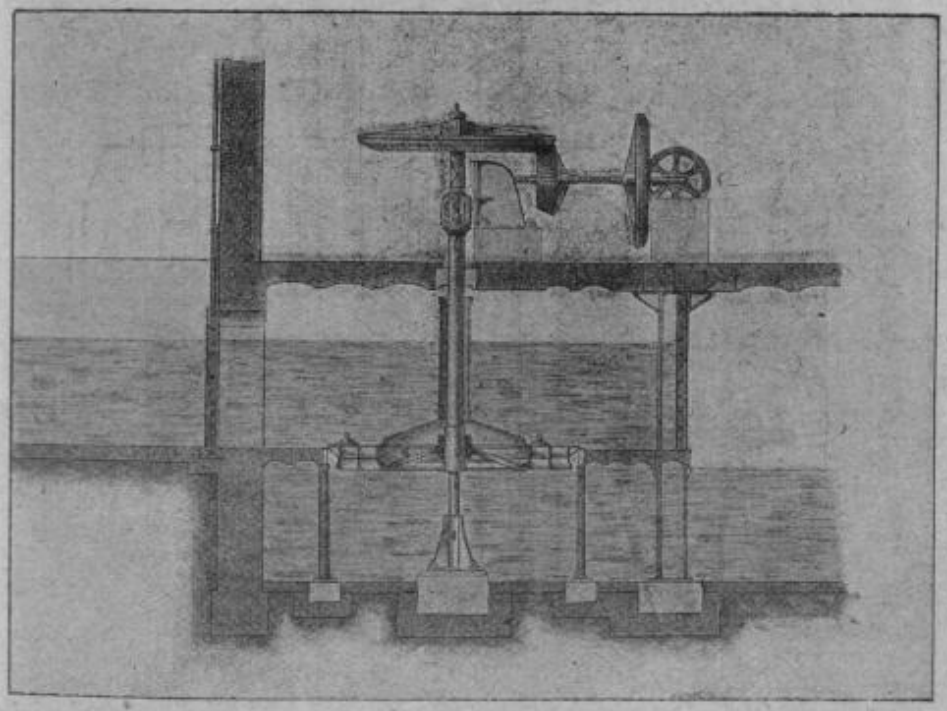


Fig. 509. — Turbine parallèle Neyret et Brenier, à chambre ouverte.

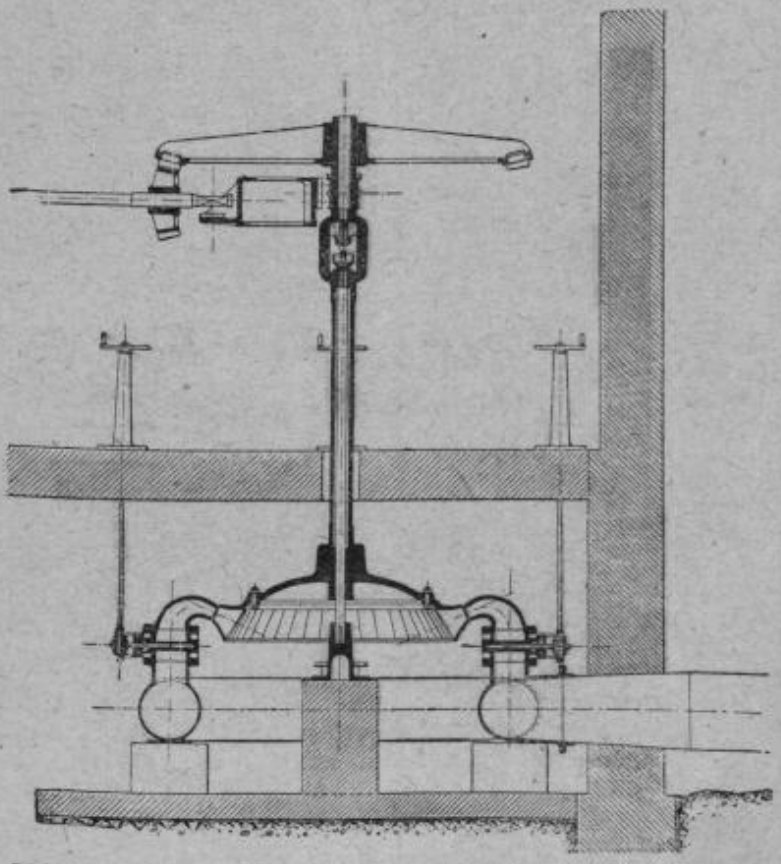


Fig. 510. — Turbine centripète Neyret et Brenier, à admission partielle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les chutes élevées et pour toutes celles où la chambre d'eau ne

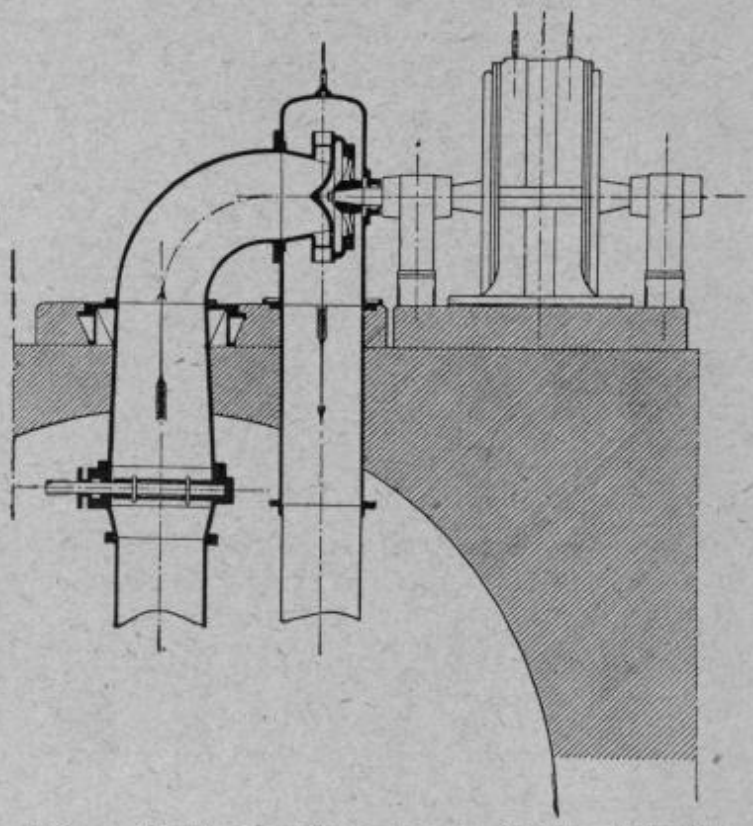


FIG. 513. — Turbine centrifuge à huche Neyret et Brenier.

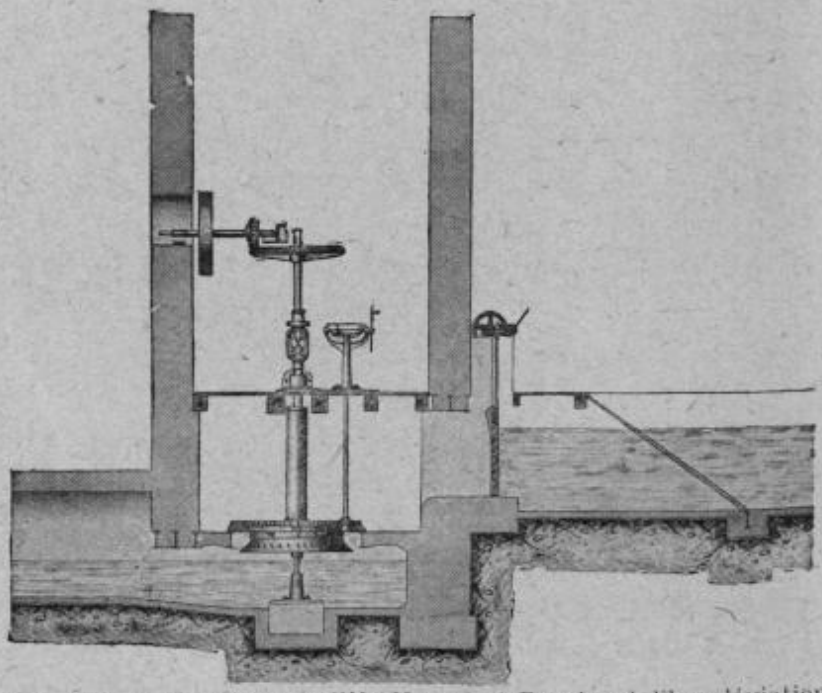


FIG. 514. — Turbine parallèle Neyret et Brenier, à libre déviation à admission partielle, à huche et à axe vertical.

peut être construite en maçonnerie, la turbine est disposée dans une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chambre métallique en fonte ou en tôle appelée bâche (*fig.* 513 et 514). Celle-ci affecte la forme d'une spirale, laquelle permet une vitesse d'arrivée plus grande de l'eau et partant une réduction du diamètre de la conduite forcée. Il en résulte une économie sensible lorsque la conduite atteint une grande longueur. L'emploi de la turbine double est surtout apprécié lorsqu'une grande vitesse de rotation est nécessaire ou lorsque le débit du cours d'eau varie dans de notables proportions. De plus les poussées axiales de sens contraire se neutralisant, selon la hauteur de la chute, on place l'axe de la turbine à 6 ou 7 mètres au-dessus du niveau d'aval tout en utilisant la hauteur totale de la chute.

Dans le cas d'une usine fonctionnant avec une seule turbine, le bâtiment recevant le récepteur est placé à une des extrémités de l'usine, ce qui est la disposition la plus connue, c'est-à-dire celle des moulins ; alors on place les outils les plus résistants près du récepteur. Si ceux-ci peuvent être rangés en deux groupes exigeant le même travail moteur (filatures de tissage, par exemple), on dispose le récepteur au milieu de l'usine.

Lorsque l'usine comporte plusieurs turbines, et si la force hydraulique est insuffisante pendant une partie de l'année, on place les récepteurs hydrauliques à une extrémité du bâtiment et la machine à vapeur de secours à l'autre extrémité. On monte les récepteurs sur deux arbres indépendants reliés, par une transmission propre à chacun, à un même arbre de couche. Quand on peut partager les outils de l'usine en deux groupes à peu près équivalents comme emplacement et résistance, on installe les récepteurs dans un bâtiment spécial, entouré de part et d'autre par deux autres bâtiments qui constituent les locaux de l'usine proprement dite.

Si on a affaire à une usine hydraulique dont la chute est variable, avec un débit suffisant pour fonctionner en tout temps, on peut accoupler plusieurs turbines sur le même arbre de couche. Cette disposition s'impose dans le cas d'une usine dont la puissance est très variable ; on y adjoint une machine de secours si on juge cette puissance insuffisante à certains moments.

Pour faire fonctionner simultanément deux turbines à axe vertical, on les réunit à l'aide d'engrenages coniques à un arbre horizontal, et un appareil de débrayage permet d'arrêter l'une ou l'autre.

Si on veut faire travailler sur un arbre commun une turbine et une machine à vapeur, on relie la turbine à l'arbre au moyen d'engrenages, et le moteur à l'aide d'organes élastiques (courroies, câbles), ou mieux on réunit les deux moteurs à la transmission par des embrayages à friction (1).

Dans certains cas on peut employer avec avantage le système de com-

(1) *Traité des appareils de levage et de manutention*, par E. Pacoret. J. Loubat et Cie, éditeurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mande par enrouleur dit « le Lenix » jouant le rôle d'embrayeur ou de débrayeur.

Les (*fig.* 515 à 520) montrent quelques dispositions d'installations de turbines de différents systèmes.

Le sol de la salle des machines doit être nécessairement placé plus haut

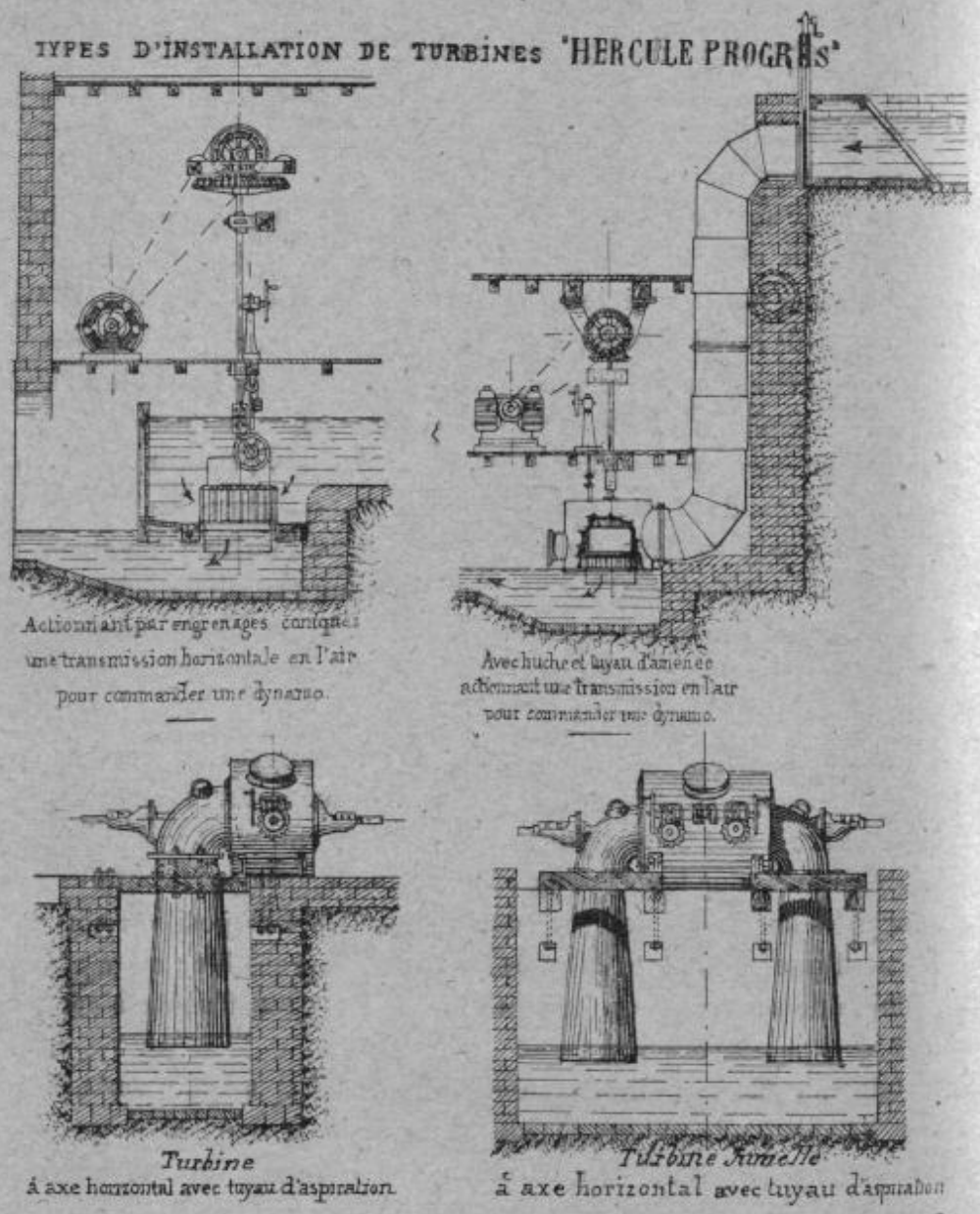


Fig. 515.

que le niveau aval en temps de hautes eaux. Pour ne pas perdre de la chute aux périodes de basses eaux, on a recours au tube aspirateur ; mais le cas demande à être soigneusement examiné, car, pour les petites unités, il est bien rare que l'aspiration soit recommandable, et pour les grandes chutes, il convient de ne pas perdre de vue que les turbines noyées à axe vertical donnent d'excellents résultats.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tableau ci-après, qui nous a été fourni par la maison Piccard et Pictet, concerne des turbines de petites forces pour chutes de 10 à 200 mètres.

NOMBRE de tours	FORCE en chevaux	DÉBIT en litres secondes	DIAMÈTRE de la Tubulure	CHUTE en mètres	NOMBRE de tours	FORCE en chevaux	DÉBIT en litres secondes	DIAMÈTRE de la Tubulure
200	6,5	64,8		10	160	6,5	64,8	
285	18,4	91,8	300 mm.	20	225	18,4	91,8	350 mm.
350	33,8	112,0		30	275	33,8	112,0	
400	51,9	130,0		40	320	34,6	86,5	300 mm.
450	29,0	58,1		50	360	48,4	96,7	
495	38,2	63,6		60	395	38,2	63,6	
535	48,0	68,6	250 mm.	70	425	48,0	68,6	250 mm.
570	58,8	73,5		80	455	58,8	73,5	
605	70,1	77,9		90	480	70,1	77,9	
640	51,3	51,3		100	505	51,3	51,3	
670	59,3	53,9		110	530	59,3	53,9	
700	67,5	56,2	220 mm.	120	555	67,5	56,2	220 mm.
730	76,0	58,6		130	580	76,0	58,6	
755	85,1	60,8		140	600	85,1	60,8	
780	56,6	37,8		150	620	56,6	37,8	
805	62,3	39,0		160	640	62,3	39,0	
830	68,3	40,2		170	660	68,3	40,2	
855	74,4	41,3	180 mm.	180	680	74,4	41,3	180 mm.
880	80,7	42,5		190	700	80,7	42,5	
900	87,1	43,6		200	720	87,1	43,6	

La (*fig.* 521) montre un schéma d'installation d'une turbine centripète (Francis) à axe horizontal avec chambre ouverte, construite par les établissements Teisset, Chapron et Brault frères.

La turbine est calée sur un arbre en acier reposant sur deux paliers graisseurs à bague à longue portée ; l'un de ces paliers porte une butée pour parer à la poussée axiale lorsque la turbine est simple ou, quoique double, lorsqu'un côté est appelé à fonctionner seul. Des presse-étoupes sont disposés au passage de l'arbre dans les murs pour éviter les rentrées d'air et les fuites d'eau. Ces presse-étoupes sont accessibles même pendant la marche.

L'arbre de la turbine est toujours placé au-dessus du niveau aval et le mécanisme d'ouverture et fermeture prolongé jusque dans la salle de l'usine. Un grillage et une vanne commandent l'entrée de l'eau.

Pour les turbines fonctionnant sous la pression d'une conduite, la bâche affecte la forme d'une spirale. Comme dans les turbines à chambre ouverte, l'arbre horizontal est en acier, tournant dans des paliers à longue portée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

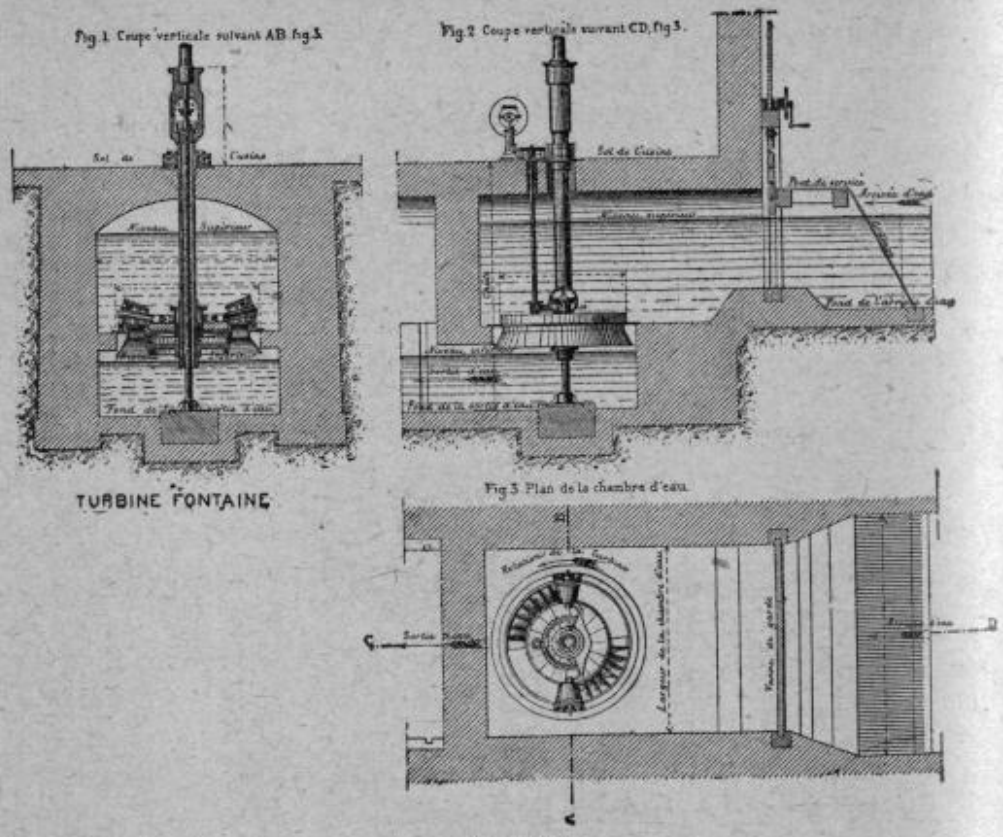


FIG. 516.

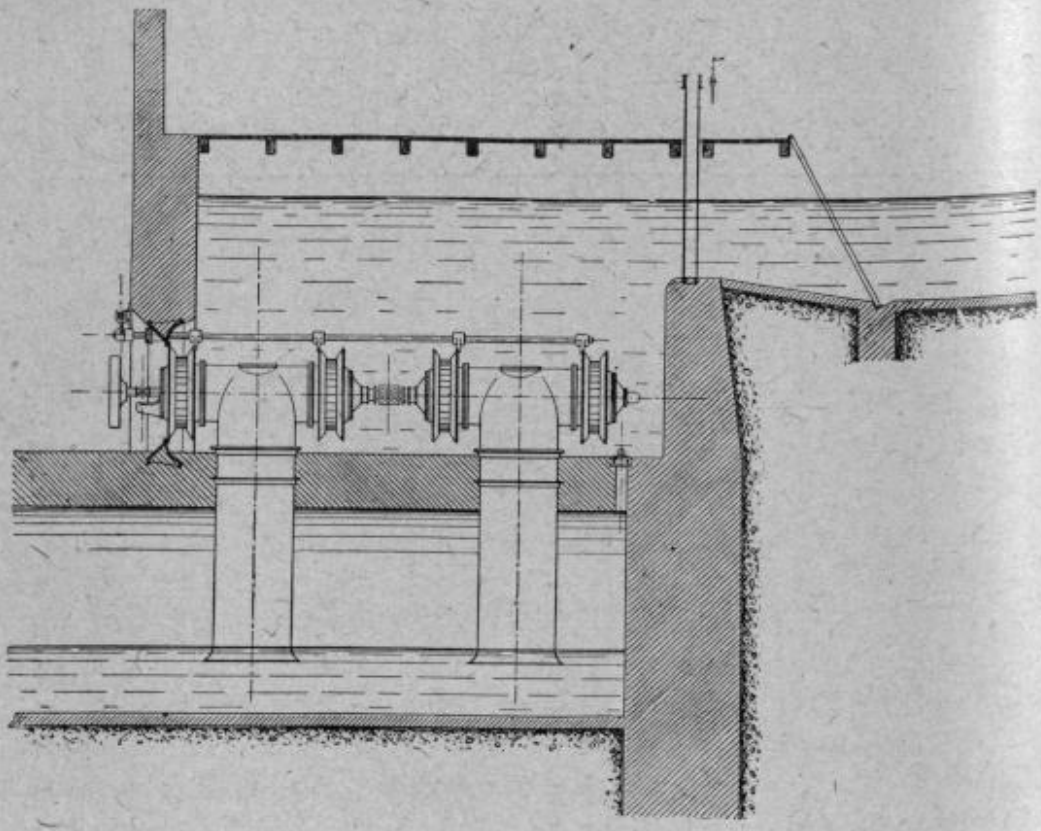


FIG. 517. — Turbine Neyret et Brenier centripète, horizontale, quadruple, à directrices mobiles et chambre ouverte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'évacuation de l'eau s'opère par un tube coudé prolongé par un tuyau tronconique vertical.

Les mouvements de réglage s'opèrent à l'aide de biellettes ou à l'aide d'un mouvement de manœuvre avec anneau quand on veut réduire l'encombrement à son minimum. Lorsqu'on désire une grande vitesse de rotation, on fait emploi des turbines doubles ou quand le débit du cours d'eau varie dans de notables proportions.

Les turbines diffèrent entre elles notamment par leurs vitesses angulaires et leurs prix. La vitesse circonférencielle est seule limitée par la

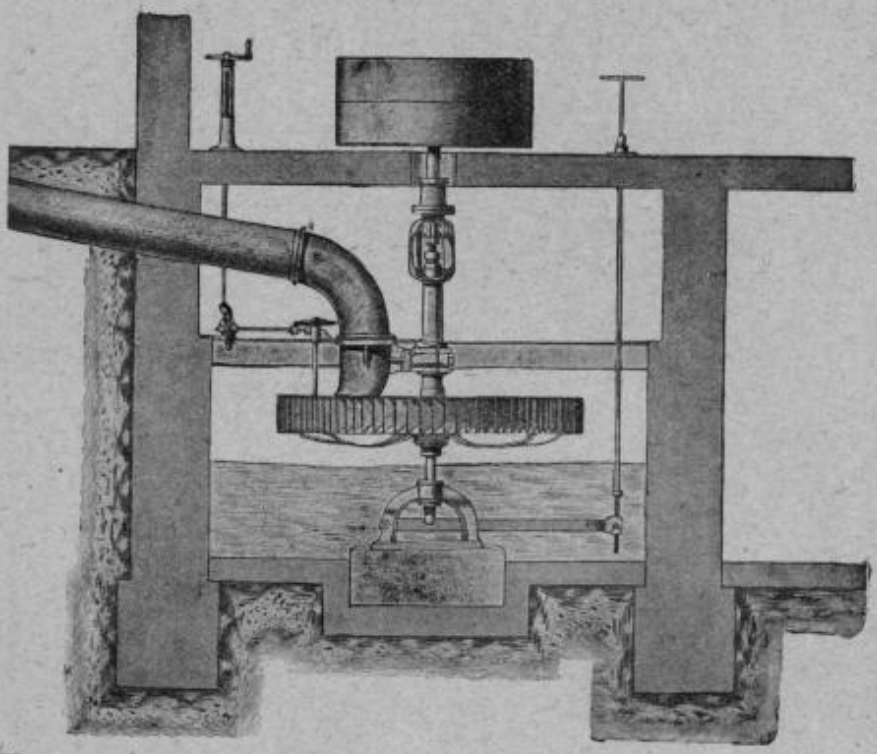


Fig. 518. — Turbine Neyret et Brenier, centrifuge, horizontale et à admission partielle.

hauteur de chute, et la vitesse angulaire dépend du dessin adopté ; la turbine sera d'autant moins coûteuse que la vitesse angulaire sera plus grande.

C'est cette dernière qui fixe celle de la dynamo à atteler à la turbine.

A cause des sables entraînés, il convient de disposer les turbines pour que les parties qui s'usent soient détachables facilement pour les remplacer.

On peut faire ces parties amovibles en fonte ou en aluminium.

Il y a avantage à employer des turbines dont la puissance maximum soit supérieure à la puissance normale, quoiqu'elles doivent alors marcher toujours fractionnées, ce qui n'est pas la meilleure condition au point de vue de l'effet utile. Une turbine ne peut être poussée comme une machine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à vapeur ; à ouverture complète, si la charge résistante croît considérablement, la vitesse diminue, et il n'y a pas d'autre moyen que d'augmenter la puissance pour équilibrer la charge. Or les dynamos peuvent supporter

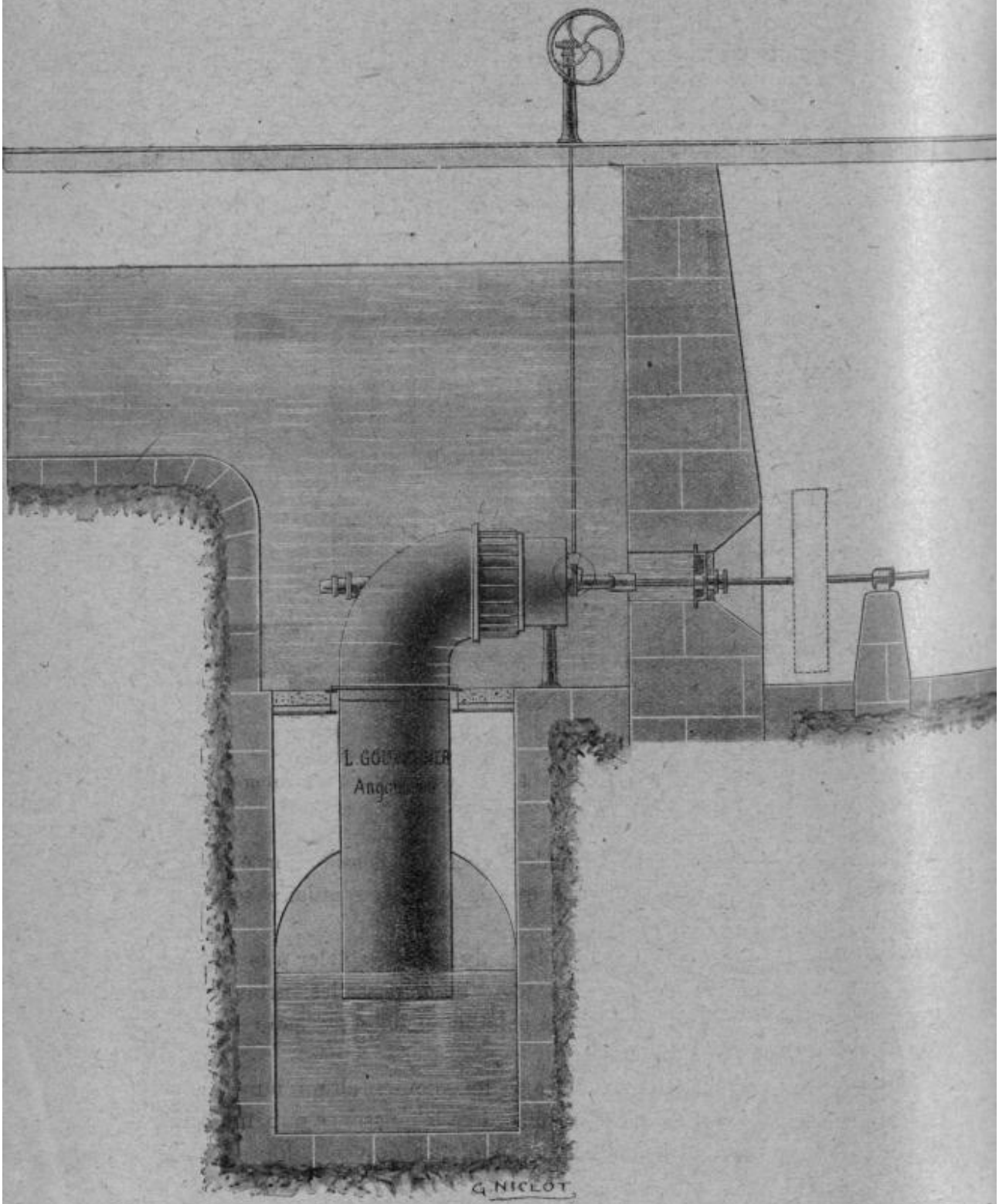


Fig. 519. — Turbine simple L. Gouverner.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sans inconvénient de fortes surcharges pendant quelque temps, et elles y sont soumises très souvent par suite des variations de charge de l'emploi

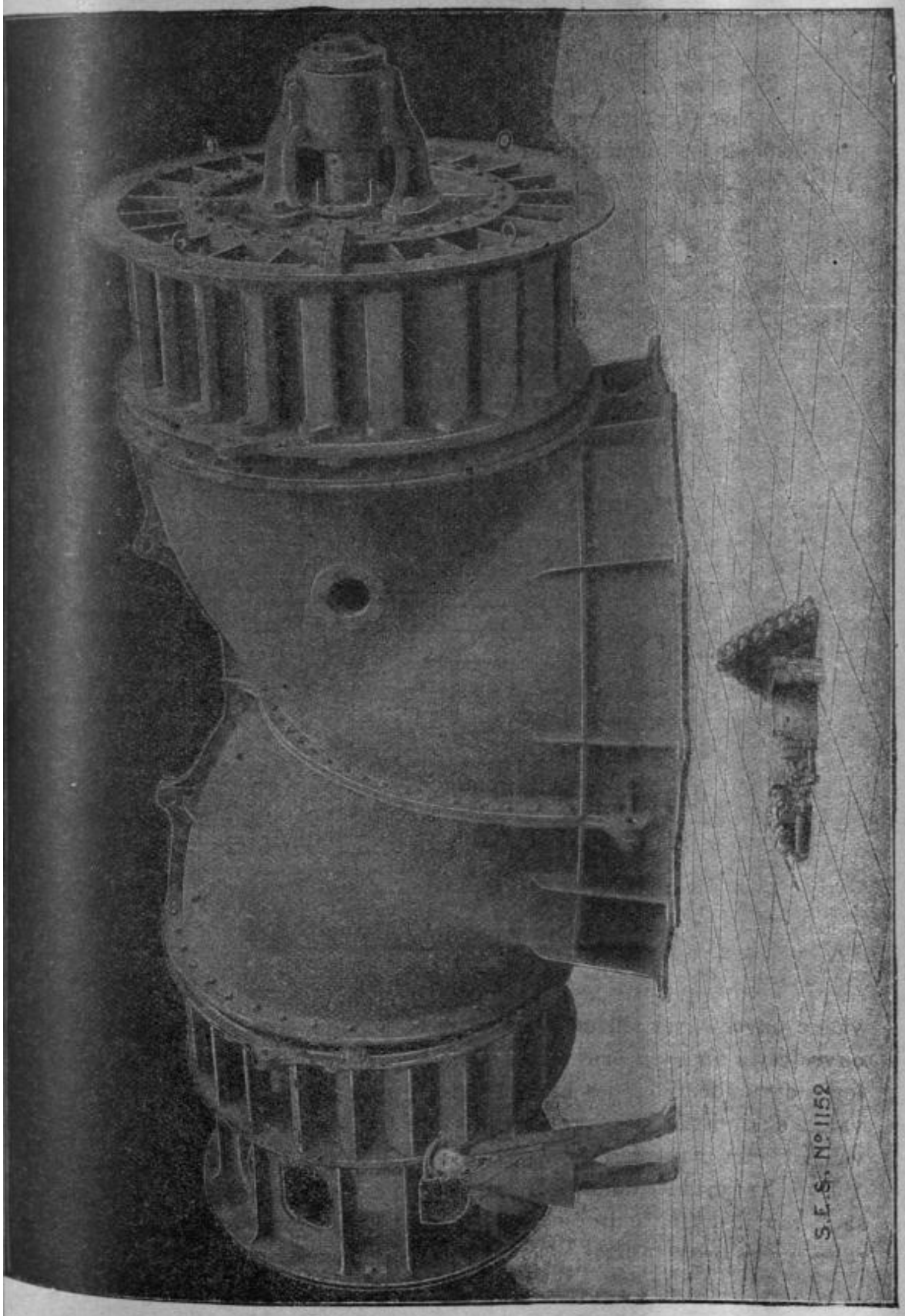


FIG. 520. — Turbine à directrices mobiles double Singrün.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de l'énergie. Pour cette raison, il y a avantage à avoir des récepteurs hydrauliques qui puissent répondre à cette augmentation soudaine. On sera dans de bonnes conditions en choisissant la puissance maximum égale aux 8/7 de la puissance normale.

Les variations de la chute influent sur la puissance et amènent un changement de vitesse des turbines.

Pour obvier aux inconvénients des variations de hauteur de chute, on peut disposer les turbines pour qu'elles fonctionnent normalement avec

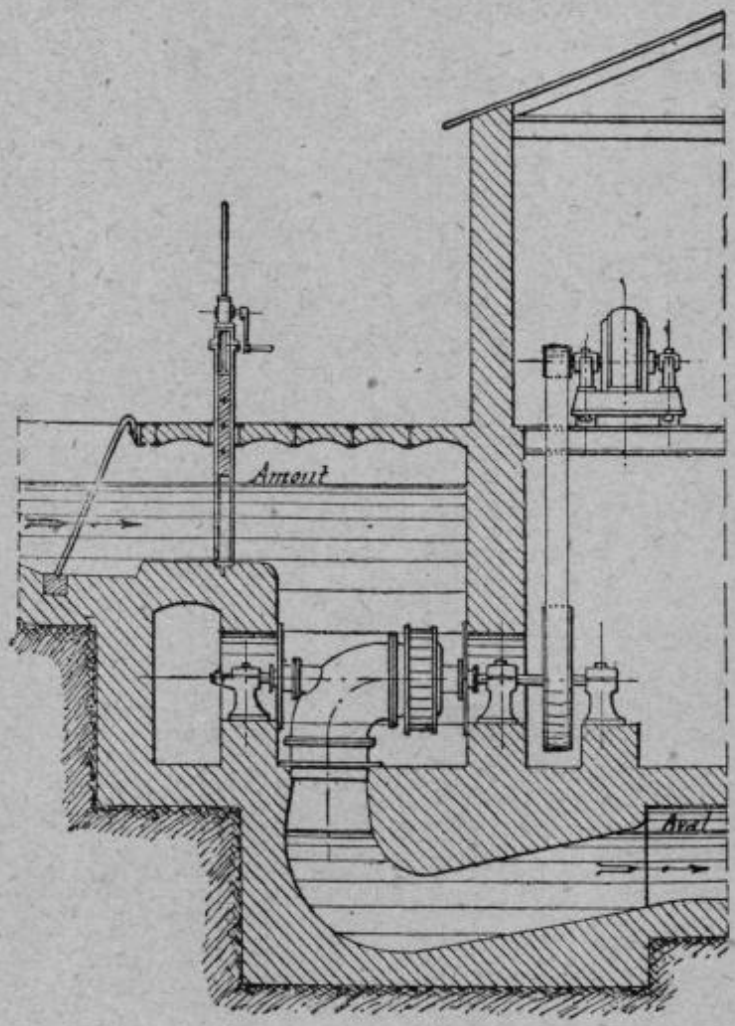


FIG. 521.

vanne ouverte partiellement, et alors, à l'époque des basses eaux, on ouvre cette vanne entièrement, et l'on obtient ainsi l'accroissement de force demandé. Pour les hautes chutes, on ferme encore davantage la vanne d'admission des turbines. Ce système présente néanmoins l'inconvénient d'un mauvais rendement pendant une grande partie de l'année.

Dans les turbines doubles, en prenant la disposition horizontale et faisant travailler l'une à droite et l'autre à gauche, on évite les poussées latérales sur les organes fixes, et on obtient en même temps une plus grande

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vitesse de rotation permettant de diminuer considérablement les masses des génératrices électriques tout en les commandant électriquement. La disposition de Chèvres (§ 298) est critiquable en ce sens que la disposition verticale pour de grosses masses mises en mouvement produit, sur les pivots, de grands échauffements et une usure très difficile à combattre.

L'appareil de M. Meunier, que nous avons signalé, permet de placer les turbines à action au-dessus du niveau d'aval. Schématiquement, cet appareil consiste en un récipient mis en communication, haut et bas, avec le tube-siphon au moyen de tubulures munies de robinets. Dans ce récipient est placé un flotteur suspendu à une soupape équilibrée qui établit la communication du tube avec l'atmosphère et permet que le niveau de l'eau dans le tube-siphon reste sensiblement stationnaire à la hauteur qui correspond à l'équilibre du flotteur.

Pour passer commande des turbines aux constructeurs, et pour obtenir un avis éclairé de ces praticiens, il faut préciser le plus possible les conditions dans lesquelles elles doivent fonctionner. Nous donnons, à titre d'indication, le formulaire ci-après, qui naturellement doit être complété par des spécifications usuelles de rendement, de solidité, de garanties de fonctionnement, etc.

1. — Hauteur de la chute mesurée entre les niveaux d'amont et d'aval.

2. — La force que doit produire la turbine, en chevaux ; ou bien le débit, en litres-seconde, qu'elle doit pouvoir absorber.

3. — Si le débit disponible est variable, indiquer quel est le minimum en temps de sécheresse.

4. — S'il faut une conduite forcée, mentionner sa longueur ? Si elle existe déjà, en donner le diamètre.

5. — Indiquer si la turbine est alimentée directement par le cours d'eau ou par un réservoir de retenue.

6. — Si les niveaux d'amont et d'aval sont fixes ou variables ; dans ce dernier cas préciser les variations.

7. — Indiquer la nature de l'eau motrice : claire ou quelquefois chargée de limon ou de gravier.

8. — Mentionner si la turbine doit être à axe horizontal ou vertical ; dans le premier cas dire si sa force doit être transmise par courroie ou par manchon d'accouplement.

9. — Dans ce dernier cas, spécifier si la force doit être transmise d'un seul côté ou des deux côtés.

10. — Indiquer le nombre de tours que doit faire la turbine, ou entre quelles limites on peut le choisir.

11. — Enfin, lorsqu'une turbine à régulateur est destinée à actionner une dynamo, indiquer le moment d'inertie de cette dernière, ou bien les poids de ses parties tournantes et leur rayon moyen de giration.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

156. Accouplement des turbines. — L'accouplement direct de la turbine avec la machine électrique, peu encombrant et fort commode, s'effectue aisément avec des récepteurs à axe horizontal ou à axe vertical. Les joints employés à cet effet sont ou rigides ou élastiques. Ces accouplements établissent une liaison absolue entre l'arbre et la turbine et celui de la machine conduite ; ils exigent naturellement que ces arbres soient parfaitement en ligne, et de plus, ils forcent la roue mobile de la turbine à participer au va-et-vient continuel, dans le sens de l'axe de la pièce tournante de la dynamo. C'est là un inconvénient très préjudiciable à la conservation des butées.

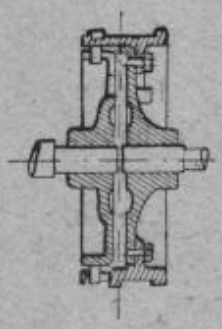


FIG. 522.

Les accouplements élastiques, au contraire, peuvent permettre un léger défaut dans le montage en ligne et surtout ne font pas participer la turbine au jeu latéral de la dynamo.

En outre, ils offrent l'avantage d'amortir les heurts dans le cas de brusques surcharges et d'atténuer les petites variations de vitesse.

Les joints élastiques sont ou parfaitement élastiques, comme celui de Sayers à petites lames d'acier, ou avec amortissement, comme celui de Raffard à anneaux en caoutchouc. Ces derniers sont préférables quand ils sont robustes, parce que le système n'a pas d'oscillations autour de la position d'équilibre.

Un joint très employé est celui de Zodel (*fig.* 522), qui est à la fois robuste, souple (ce qui permet d'éviter des chocs nuisibles dans le cas de surcharges brusques) et peu coûteux. Cet appareil est formé de deux plateaux à bords relevés, dont l'un se trouve à l'intérieur de l'autre ; une bande de coton passe par des fentes pratiquées dans les bords et mises en correspondance. Les deux plateaux se trouvent comme cousus l'un à l'autre.

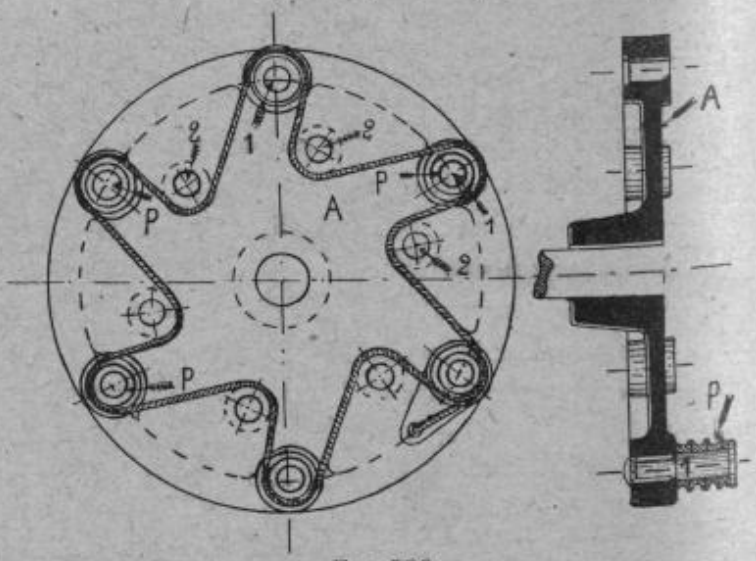


FIG. 523.

Les accouplements dont nous venons de parler peuvent non seulement permettre une déviation des axes des machines accouplées mais ils sa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

surent aussi l'isolement électrique l'une de l'autre. Pour les faibles puissances, la masse du joint est suffisante pour jouer le rôle de volant.

La (*fig.* 523) représente le manchon élastique à cordage mouflé construit par la maison Neyret-Brenier. Le système a pour but d'éviter la cherté du caoutchouc et l'usage toujours long et pénible des manchons à courroie de cuir.

Un plateau A est monté à l'extrémité d'un des arbres à réunir, et porte une série de tourillons 1, 1... sur lesquels peuvent tourner des galets P. Le deuxième arbre porte un plateau tout semblable, mais les tourillons 2.2...

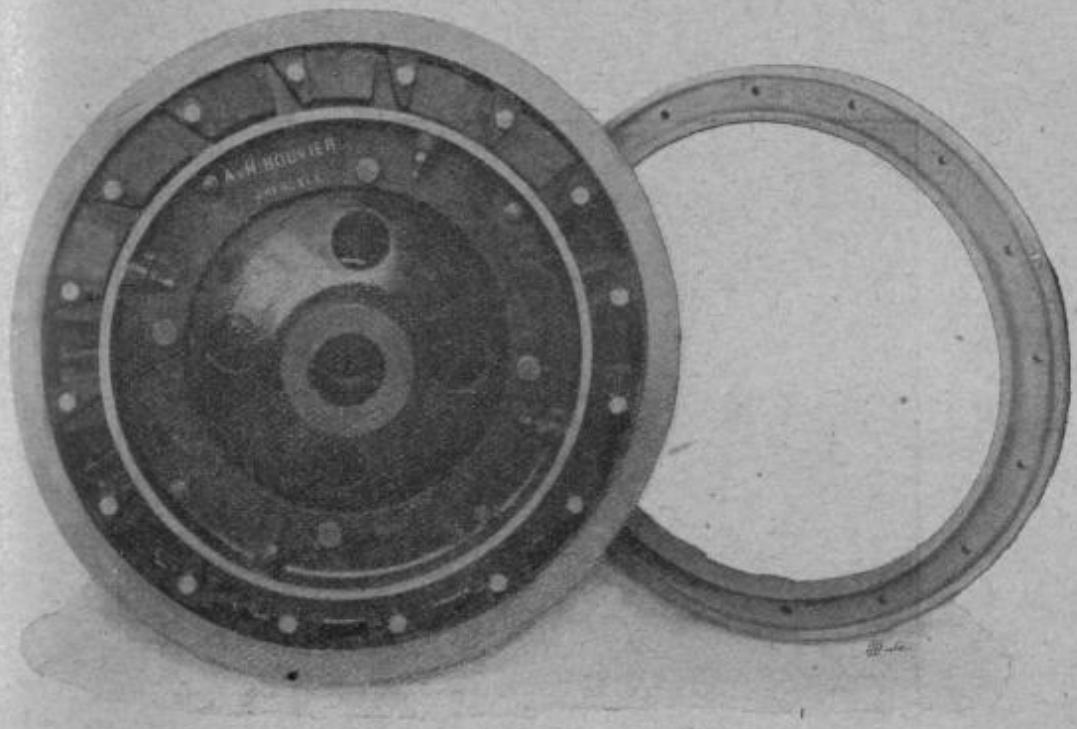


Fig. 524. — Manchon d'accouplement élastique à blocs de caoutchouc. Système A. et H. Bouvier.

sont répartis sur une circonférence de diamètre moindre. Le cordage, qui est passé sur les poulies alternativement en dessus et en dessous, a ses extrémités fixées l'une à un plateau, l'autre au second. En faisant varier le nombre de brins on peut faire travailler le cordage à un taux aussi faible qu'on le veut et obtenir ainsi la sécurité que l'on désire.

Au point de vue des oscillations de vitesse autour de la vitesse moyenne, l'accouplement des dynamos aux turbines à l'aide de joints élastiques n'a pas une importance primordiale, parce que le couple moteur est constant ainsi que la résistance ; tel est le cas d'alternateurs polyphasés dont les circuits extérieurs ont des coefficients d'auto-induction égaux et qui sont également chargés ; mais de brusques variations de surcharge nécessitent tout de même l'emploi des joints élastiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — APPLICATIONS DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE TURBINES

157. Utilisation des turbines selon le débit et la hauteur de chute. — Les turbines parallèles à axe horizontal, si elles sont à pleine admission, doivent être placées dans une bâche fermée, prolongée par un tube-siphon plongeant dans l'eau d'aval (turbine Girard).

L'établissement de turbines en chambres ouvertes n'est guère applicable que dans le cas de chutes ne dépassant pas 10 à 15 mètres parce que l'on aurait affaire au-dessus, à de telles pressions, que l'installation deviendrait trop coûteuse. D'où l'idée d'enfermer les turbines Francis dans des

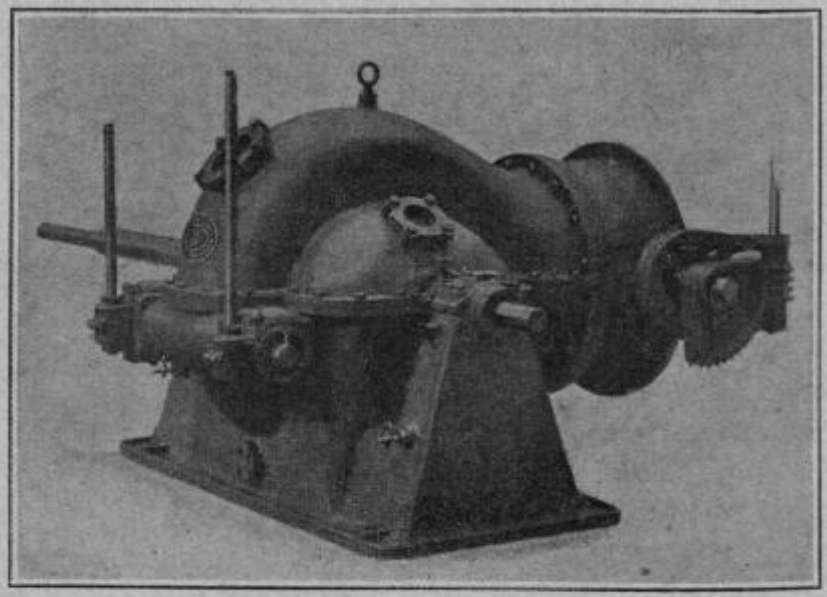


FIG. 525. — Turbine Francis centripète, double, horizontale, bâche fermée avec vannage à directrices mobiles, pour chutes de 5 à 30 mètres (Société alsacienne de constructions mécaniques).

caisses métalliques étanches et d'y amener l'eau par des canalisations, la forme la meilleure et la plus élégante étant celle en spirale, d'où le nom que l'on a donné aux turbines de ce genre. Elles sont complètement étanches et peuvent ainsi être disposées dans la salle des machines et les conduites d'aspiration passent sous le sol. Si la turbine a besoin d'une visite, il suffit d'enlever le couvercle et les aubes apparaissent libres.

Les turbines spirales sont comme les autres susceptibles d'être jumelées. Parfois avec de très grandes hauteurs de chute, on emploie des arrivées d'eau axiales et des turbines jumelées, ou des turbines doubles spirales. La différence consiste en ce que la turbine jumelée a deux caisses et une conduite, tandis que la turbine double a une caisse et deux conduites.

La maison J. Voith établit les turbines spirales en faisant passer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'arbre à travers des joints étanches ménagés dans le coude de départ d'eau et les couvercles. Il y a deux joints à l'aspiration pour éviter toute projection d'eau sur les courroies ou les dynamos. L'arbre est graissé de chaque bout par des graisseurs circulaires.

La vitesse linéaire des turbines, prise à la circonférence moyenne, est plus considérable dans les turbines à réaction que dans celles à libre déviation, et la vitesse relative de l'eau, à l'intérieur de la turbine à réaction, plus faible que celle correspondante du récepteur à action. Les résistances offertes par le distributeur sont, dans les turbines à réaction, moitié moindres qu'avec la turbine d'action.

On peut dire que, pour les grandes vitesses, la turbine à impulsion s'impose, surtout si l'alimentation est restreinte à une fraction de la circonférence. Dans les autres cas, la turbine à réaction est tout indiquée.

Dans les installations hydrauliques, les variations du débit et de la

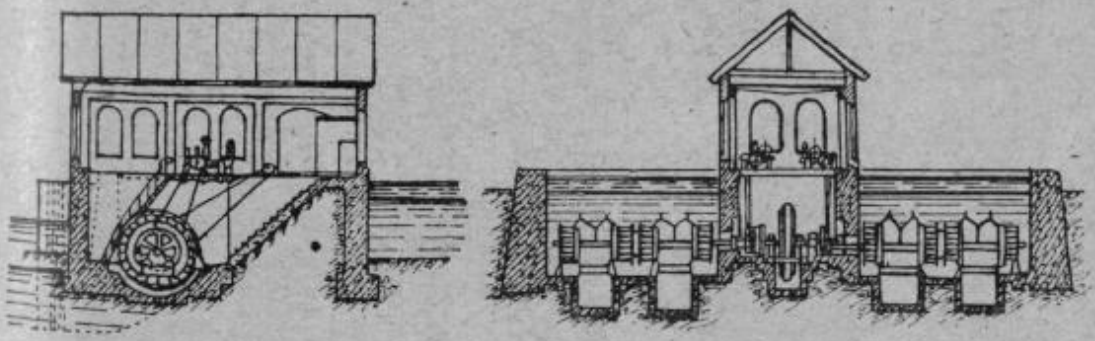


Fig. 526. — Usine hydroélectrique de Korsnäs (Suède).
Installation de 4 turbines (8 roues) sur le même arbre.

chute, à la vérité, se produisent en sens opposé, mais elles n'entraînent pas moins des variations importantes de la puissance des usines à charge faible, car l'accroissement de la chute à faible étiage n'est pas suffisant à beaucoup près pour compenser l'affaiblissement du débit. Le problème consiste donc à rechercher un rendement aussi élevé que possible pour la période des basses eaux. Tout compte fait on ne peut que se contenter du débit jusqu'à une certaine limite dictée par les considérations économiques et qui sert de base pour l'étude de la turbine, le rendement allant en diminuant avec la hauteur de chute même si le débit augmente. Dans ce cas, la turbine débite moins et l'eau en excès se perd sans passer par le récepteur. Les moyens préconisés pour augmenter le rendement en profitant des augmentations temporaires du débit sont dans leur ordre chronologique, le renforceur de chute, la double transmission mécanique par engrenage conique et l'aménagement total ou partiel des turbines pour les hautes eaux.

L'aménagement partiel ou total des turbines pour l'acceptation des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

hautes eaux a été un problème qui a donné lieu à des solutions successives où l'on devait tenir compte à la fois du rendement du récepteur et de son coût d'installation. On est ainsi arrivé pour les turbines horizontales à construire des turbines doubles avec cloison séparatrice dans le tuyau d'évacuation. Ce sont en fait deux unités séparées bien que réunies pour

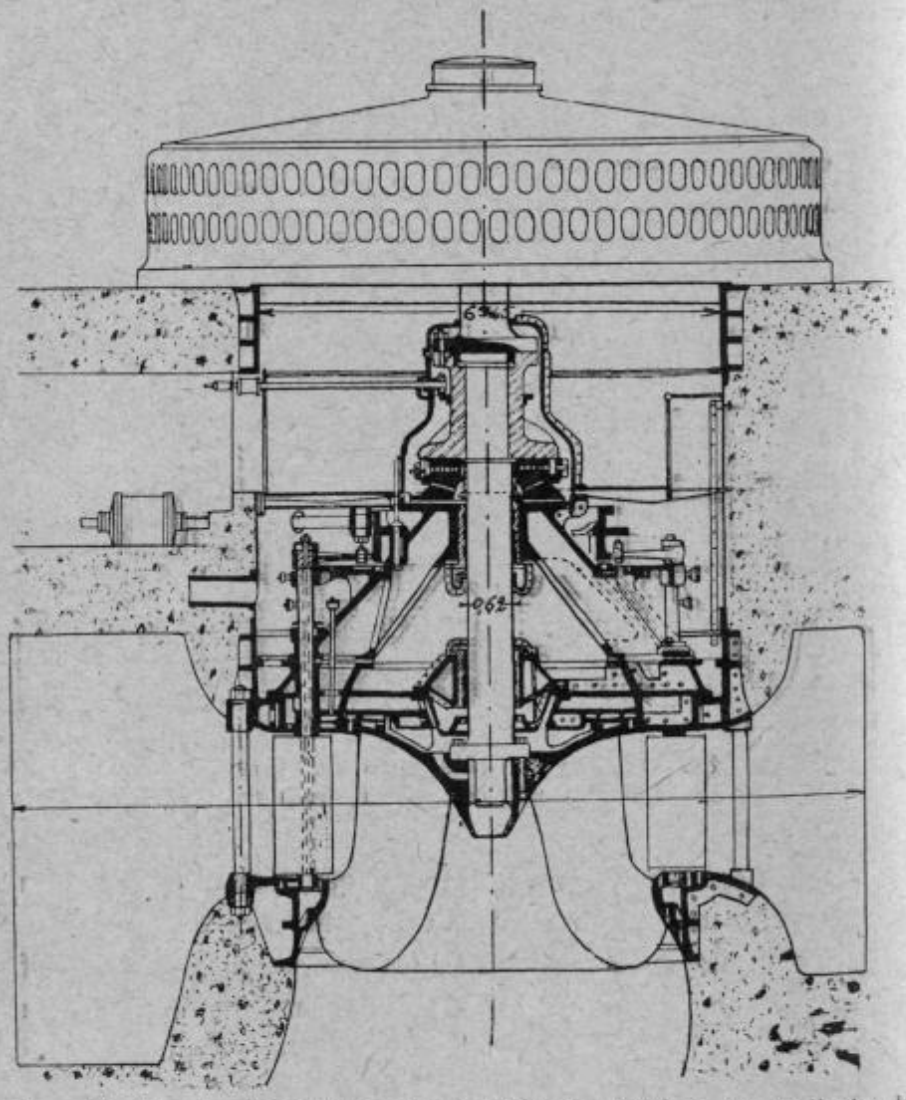


FIG. 527. — Turbine hydraulique à simple rotor de 10.000 H. P. de l'usine hydro-électrique de Kœkuk (Hauteur de chute 6 à 12 mètres).

faire un engin unique ; leurs roues mobiles ont, en général, la même capacité d'absorption, mais rien n'empêche d'établir aussi les deux turbines pour des débits différents, quoiqu'il soit préférable de les séparer absolument tout en leur faisant mener le même arbre.

Avant de monter ces turbines, on avait eu recours pour utiliser les débits à fortes variations aux turbines verticales à étages dont un des premiers exemplaires a été installé à l'usine de Chèvres (Suisse) (§ 298).

Puis on eut recours aux turbines à couronnes multiples où le principal

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

inconvénient consiste en ce que le débit moyen correspondant à la plus grande partie de l'année n'est utilisé qu'avec un faible rendement.

La maison Voith-Œserten pare à cet inconvénient par la création d'un type de turbine à deux étages (usine hydroélectrique de Hamn en Westphalie) qui actionne au moyen d'engrenages coniques un arbre de commande attelé directement à la génératrice électrique. L'engrenage conique muni de dents fer et bois attaque par dessus l'arbre de commande, disposition qui permet d'asseoir solidement sur le plafond de la chambre des turbines les paliers de l'arbre ainsi que le collet de l'arbre de la turbine.

La question des renforceurs de chute est traitée spécialement (au paragraphe 156). Il nous reste à examiner la solution de la double transmission mécanique par engrenage conique.

Disons d'abord qu'avec la grandeur des turbines et le choix des types employés le mode de groupement des unités a une influence considérable sur les frais d'établissement. Dans les installations exceptionnelles, pour lesquelles la solution la plus avantageuse consiste toujours à adopter des unités indépendantes, on reconnaît que la disposition la moins onéreuse et la plus satisfaisante au point de vue mécanique comporte l'accouplement direct des turbines entre elles et avec l'arbre moteur.

En cas d'impossibilité on peut du moins atteler ensemble les turbines, si elles sont à axe horizontal et actionner l'arbre par une seule transmission. La (*fig.* 526) représente l'installation à l'usine de Korsnäs (Suède) de quatre paires de turbines soit huit turbines accouplées, sur un même arbre. La chute n'est que de 2 mètres. La vitesse de rotation de ces turbines est de 107 tours à la minute et la puissance 420 chevaux. Quant aux turbines à axe vertical on peut les faire agir par engrenage conique sur un arbre connu, associé aussi directement que possible à l'arbre moteur principal. Tandis que dans le premier cas toutes les turbines doivent tourner à la même vitesse, dans le second cas la transmission peut avoir une multiplication différente pour chaque turbine et les vitesses de marche peuvent être réglées pour deux hauteurs de chute différentes.

La double transmission par engrenage conique permet d'approprier l'effet utile, mais ce procédé n'agit pas sérieusement sur la capacité d'absorption des turbines, l'augmentation de rendement est faible et le rendement reste incomplet dans les périodes de réduction de la chute.

Les turbines du type Francis Zwilling de l'usine de Sao Paulo (Brésil qui fonctionnent sous $22^{m},86$ de chute et un débit voisin de 19 mètres cubes par seconde offrent les particularités suivantes. La partie extérieure de la turbine est un caisson raccordé à un bout à la tuyauterie, d'où l'eau pénètre dans les deux roues distributrices de la turbine. L'évacuation se fait au centre. Dans les deux premières turbines le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

caisson est en fonte, tandis que dans les turbines suivantes, il est en tôle. Les deux roues distributrices ont 350 millimètres de large et possèdent 24 aubes à orientation réglable par déplacement d'un anneau spécial dont la position est commandée par servo-moteur. Les roues mobiles ont $1^{m},400$ d'alésage. Il y a deux paliers. Ce'ui placé du côté de l'arrivée d'eau se trouve au milieu d'un capot en fonte dans lequel on peut pénétrer grâce à une cheminée de 850 millimètres de diamètre, qui aboutit à la partie inférieurs du caisson. Ce palier a 220 millimètres de diamètre et 440 millimètres de portée. Le palier du côté opposé, côté de la génératrice électrique, a 300 millimètres de diamètre et 600 millimètres de longueur. Le caisson possède plusieurs trous d'homme de 600×450.

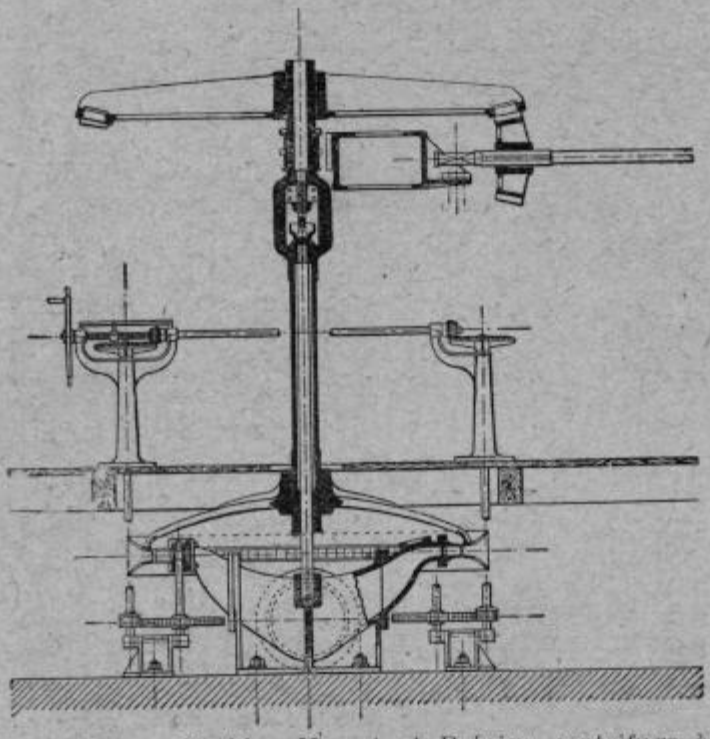


Fig. 523. — Turbine Neyret et Brénier, centrifuge à admission partielle et avec vannage à tiroir cylindrique.

Les turbines nouvelles (sauf les deux premières) ont leur régulateur, servo-moteur pompe à huile, compresseur d'air, réunis dans le même appareil, sur un même bâti. La pompe à huile est actionnée par une roue spéciale qui reçoit de l'eau empruntée à l'admission de la turbine. Le socle forme réservoir à huile. L'huile est utilisée sous une pression de 15 kilogrammes. Le réglage s'effectue par le moyen de deux cylindres de diamètres différents, avec piston différentiel.

Pour les très hautes chutes, le moteur employé généralement est la turbine radiale à libre déviation, centripète ou centrifuge, à axe horizontal, à cause de la facilité de la mise en place des injecteurs, de la grande vitesse à donner à la turbine, et à cause du rendement. On peut faire les angles d'injection et d'évacuation chacun égal à 20°. En réduisant la couronne fixe à un segment annulaire au-dessus duquel vient déboucher un injecteur de même forme, on réduit la vitesse de rotation et on augmente la section des aubages, condition favorable pour prévenir les obstructions.

La turbine Duvillard, utilisée pour la chute du lac de Tanay (§ 427), qui tourne à 1.000 tours, comporte des couronnes à disques au lieu de roues à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rayons. A Chapareillan et à Chedde (§ 387), on a installé des turbines centrifuges Neyret-Brenier et Bouvier ; à Lancey (§ 415), des turbines centrifuges à libre déviation Neyret-Brenier ; à Terni, des turbines centrifuges

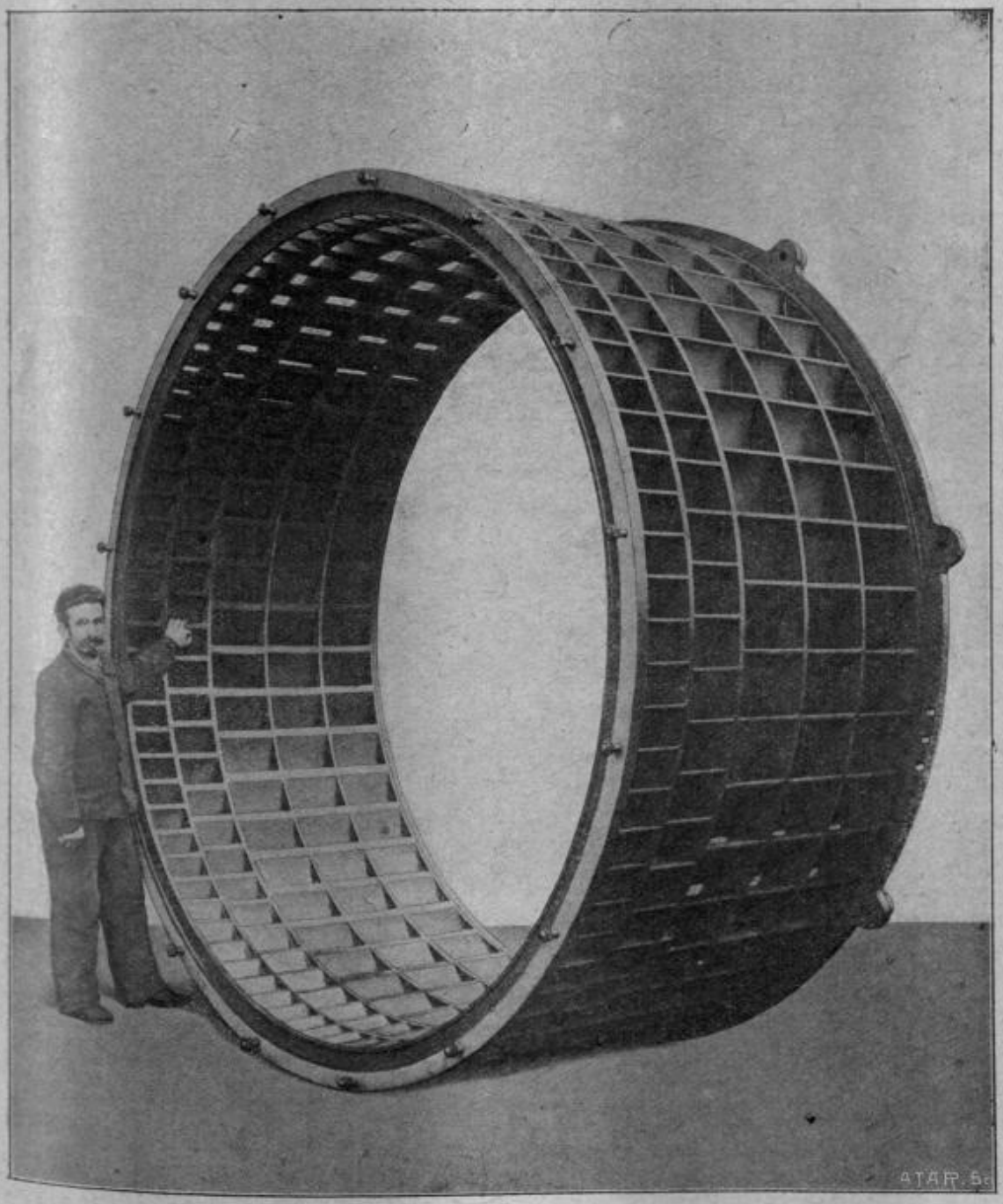


Fig. 529. — Turbine à basse chute Piccard et Pictet. Distributeur à cinq étages.

Rieter, de Winterthur ; à Gurtnellen, des turbines Piccard et Pictet. Le tableau de garde du (**Tome II, Usines améragées**) comporte d'utiles indications à cet égard.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

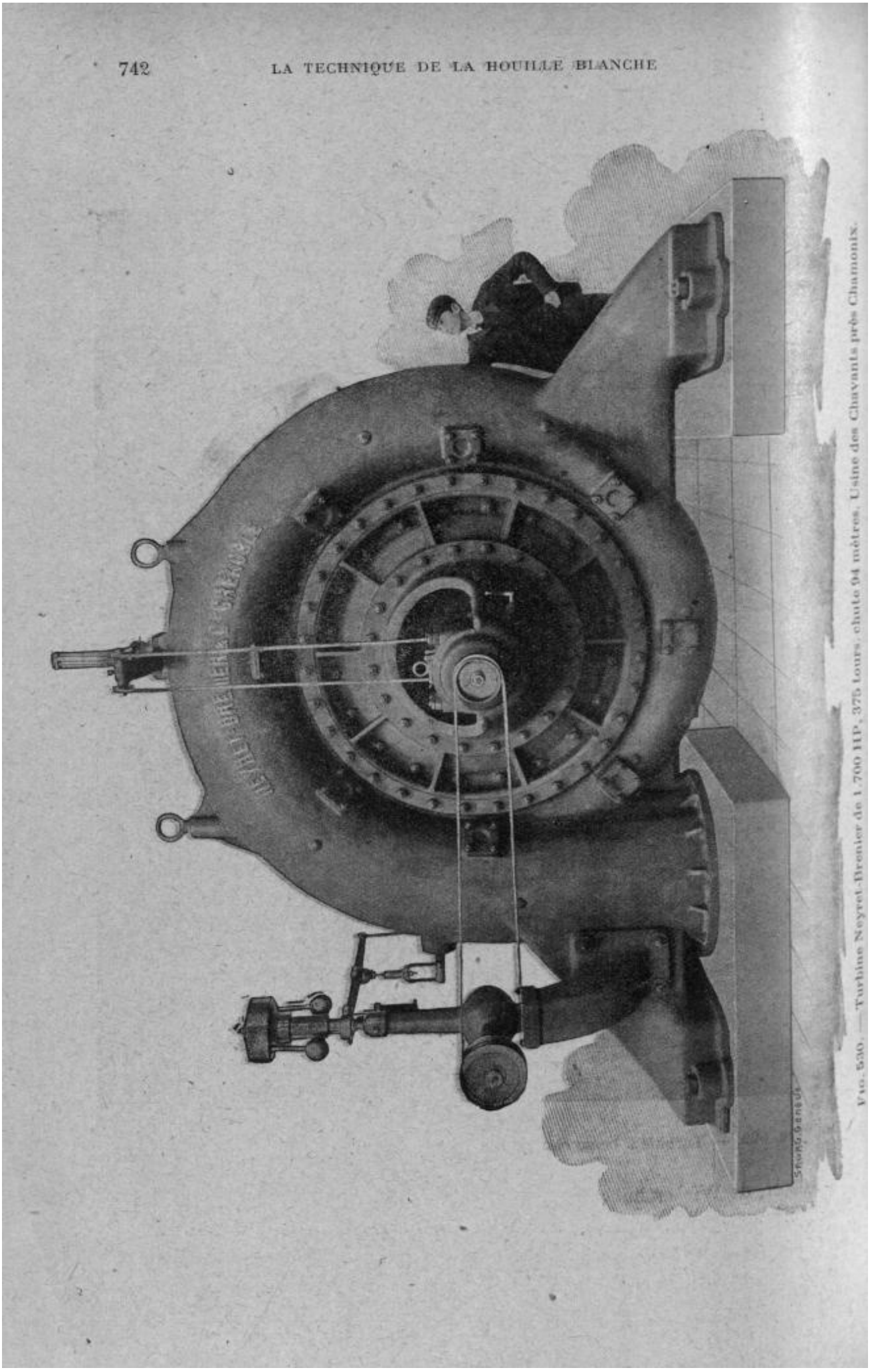


FIG. 530. — Turbine Neyret-Brenier de 1 700 HP, 375 tours, chute 94 mètres. Usine des Chavants près Chamonix.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Toutes les fois que cela est possible, on adopte la disposition à axe horizontal et on met la turbine directement en porte-à-faux à l'extrémité de l'arbre de la dynamo sans manchon intermédiaire.

Ce genre d'installation a été réalisé à Vouvry (§ 427).

Les roues Pelton simples ou doubles conviennent pour les installations de 50 à 500 mètres et plus de hauteur de chute : usines de Saint-Georges (§ 371), de Gaucin (§ 378), de Caffaro (§ 393), de Rio de Janeiro (§ 403), d'Obermatt (§ 404), de la Siagne (§ 406), de la Rageat (§ 409), de Campocologno (§ 412), de Stanislaus (§ 413), de Vernaraz (§ 416), d'Auzat (§ 410), de Viège (§ 422), de Somport (§ 380), de Tivoli (§ 381), de Rutz (§ 382), d'Empreza (§ 383), de Rjukamfos (§ 399), de Look Leven (§ 400), de Los Angelès (§ 401), de Porte et Fontpedrouse (§ 417), d'Eget (§ 423), de Capdela (§ 425), de Boulder (§ 418), d'Adamello (§ 414), de La Cassagne (§ 411), etc. A l'usine de Los Angelès (Californie) qui utilise une chute de 287 mètres de hauteur, les roues à double impulsion ont une puissance unitaire de 14.000 chevaux et à l'usine de Rjukamfos les turbines Pelton doubles atteignent une puissance unitaire de 19.500 chevaux.

A l'usine de Gesse, sur l'Aude dont la chute est de 184 mètres de hauteur, on a installé des turbines Pelton de 1.650 chevaux à un seul injecteur et des turbines de 3.300 chevaux constituées par deux roues à un injecteur chaque. Cette disposition assure à la fois le meilleur rendement et l'interchangeabilité absolue des organes susceptibles d'usure.

A l'usine de Saint-Georges on a remplacé les turbines Jonval par des turbines Francis simples, les autres étant des Francis doubles.

Pour les chutes moyennes, la turbine centripète à réaction convient parfaitement. Ces turbines ne produisent tout leur maximum d'effet utile qu'autant qu'elles reçoivent l'eau par tous leurs canaux, ce qui les a fait dénommer turbines à débit constant. Le rendement pour l'admission totale est de 0,75 à 0,80 et, pour une admission à moitié, 0,70 à 0,75.

Les turbines Bell de l'usine hydro-électrique de Pontebrolla (chute de 35 mètres), qui fournit le courant au chemin de fer électrique de Locarno, sont montées à l'effet d'obtenir une compensation de pression entre deux chambres de pression, et peuvent subir avec leur arbre un mouvement de va-et-vient de quelques millimètres dans le sens de l'axe. Pour égaliser le vide de chaque côté des roues, et pour diminuer la pression axiale résultante sur les paliers, on a prévu un canal de tirage débouchant dans le canal d'aspiration immédiatement derrière les roues.

Le réglage de la roue conductrice se fait par des aubes mobiles. Un régulateur à huile sous pression assure le réglage automatique de chaque turbine.

Pour ne pas créer dans la conduite des différences de pression qui eussent exigé pour leur égalisation l'emploi d'appareils coûteux, on n'a pu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

choisir la durée du temps, nécessaire au régulateur pour fermer la conduite d'admission, inférieure à quatre secondes. Les conditions réclamées, très rigoureuses, pour le réglage automatique furent remplies de la manière la plus favorable, en proportionnant le mouvement d'inertie au temps de réglage relativement court. Dans ce but, les accouplements élastiques furent pourvus d'anneaux servant de volants.

Un bandage d'acier, calculé avec une charge de 150 kilogrammes par centimètre carré, donne toute sécurité en cas d'emballement. Mais la charge du bandage a été calculée à raison de 450 kilogrammes par centimètre carré, pour la mise à chaud, de sorte que dans le cas le plus défavorable la charge du matériel ne dépasse pas 600 kilogrammes par centimètre carré.

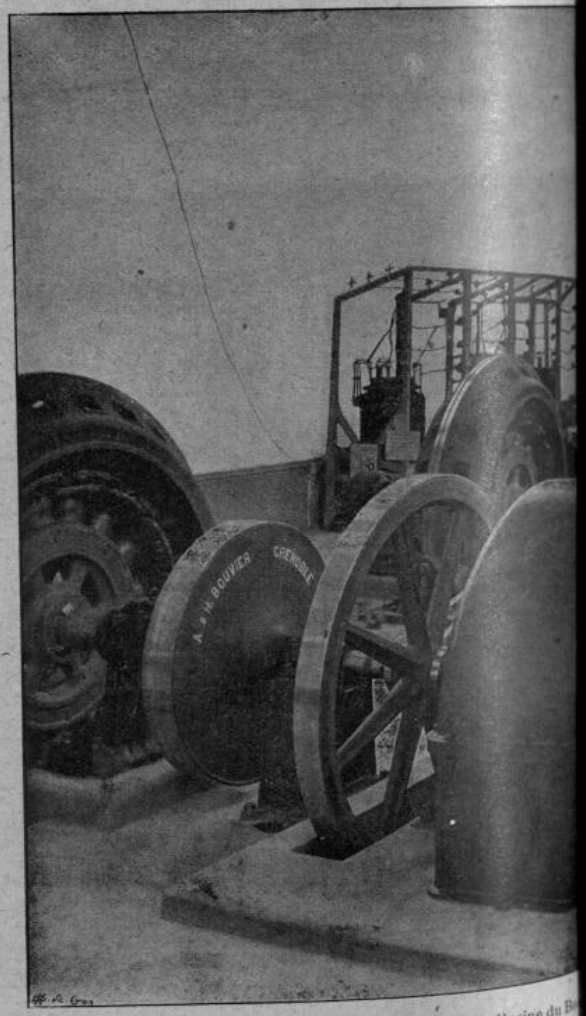
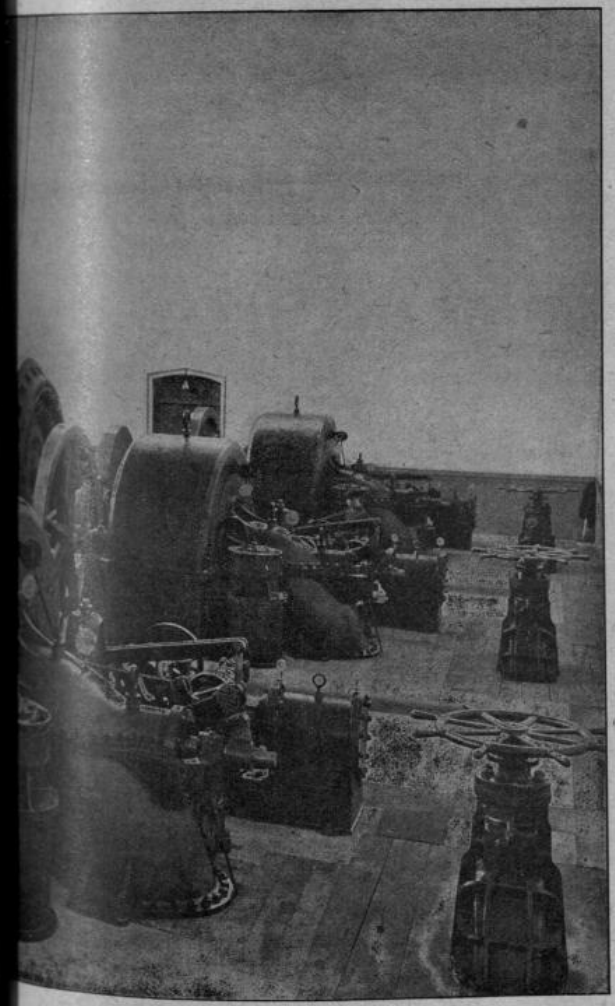


Fig. 531. — Turbines de 1.250 HP de l'usine du Be

Les turbines Francis simples, doubles, triples ou quadruples sont très utilisées pour les moyennes chutes. Le moteur centripète à axe horizontal simple, double, triple ou quadruple a été utilisé aux usines d'Avignonet (§ 317)

de Livet (§ 342), de Pont-de-Risse (§ 358), de Champ, de Collierville (§ 309), de Saut-Mortier (§ 317), du Fier (§ 318), de Kikkelsrud (§ 319), d'Entraygues (§ 322), de Queille (§ 326), de Marklissa (§ 327), de Piano d'Orte (§ 332), de Vizola (§ 330), de Sauviat (§ 331), de Paderno (§ 332), de la Valteline (§ 333), de Saint-Maurice (§ 334), de Trollhattan (§ 335), de Séchilienne (§ 348), de Jajce (§ 361), de Thusis (§ 365), de Heimbach (§ 368), de Pescara (§ 370), d'Ontorio Power (§ 339), d'Eymoutiers (§ 340), de Ventavon (§ 341), de Swälgfos (§ 342), du Refrain (§ 350), de Bucay (§ 351), de Molinar (§ 355), de Brême (§ 299), d'Augst et Wilhem (§ 300), de Hanfort (§ 303), du canal de Guiliari (§ 307), d'Albi et Rungdalen (§ 312), d'Aelf Karleby (§ 313), de Gullspang (§ 321), de Fersina et Sarcat (§ 364).



mandées par un régulateur central A. et H. Bouvier.

C'est le moteur centripète à réaction placé dans une huche close et muni d'un tube de succion qui a été adopté dans ces installations.

A l'usine de Snoqualmie-Falls (E.-U.), les turbines horizontales Francis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

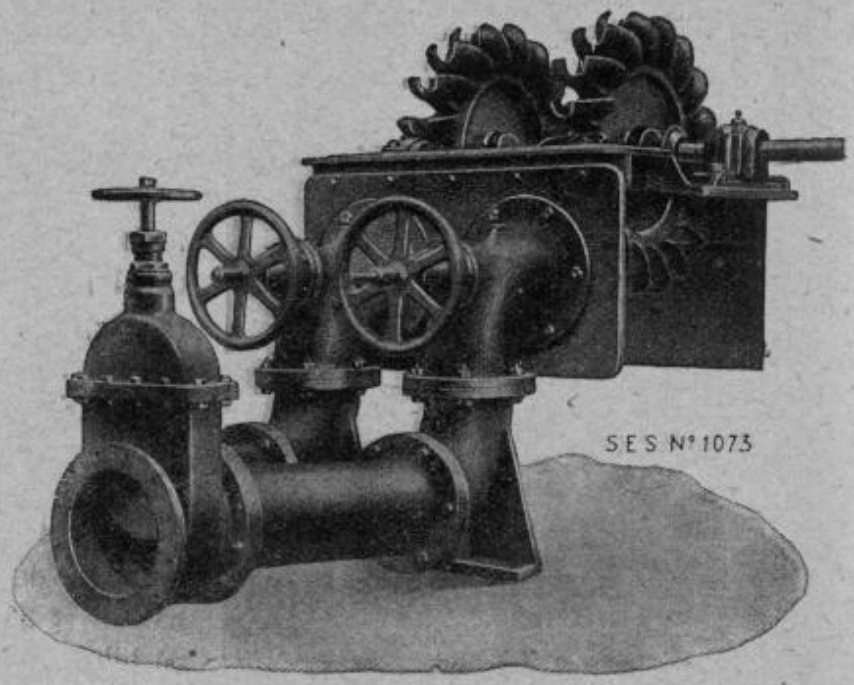


FIG. 532. — Turbine tangentielle, genre Pelton, double. Construction Singrün.

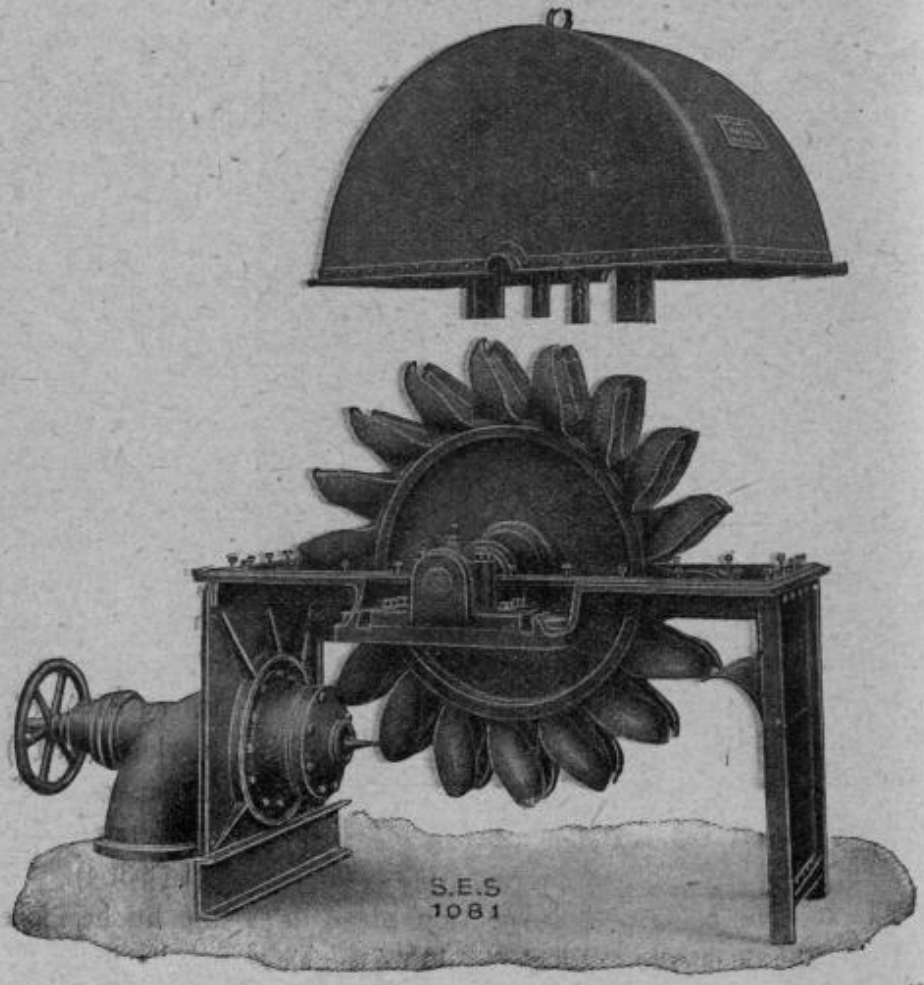


FIG. 533. — Turbine tangentielle, genre Pelton, pour être montée sur massif en maçonnerie. Construction Singrün.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 10.000 HP qui y fonctionnent sont à une seule roue et à admission par toute la périphérie et évacuation centrale. Un servo-moteur Lombard règle automatiquement le mouvement des aubes de la roue directrice. La vitesse sous une chute de 82 mètres est de 300 tours. Les turbines verticales de l'Électrical Development and Cº, qui fournissent 12.500 HP (Niagara), sont des turbines doubles. Enfin, à Shawnigan-Falls (Canada), la Compagnie Morris a installé des turbines de 10.500 HP sous une chute de 39 mètres. Les dimensions en sont : 9 mètres de hauteur, 6 mètres de largeur et 8m,10 de longueur entre coussinets. Leur poids est de 150 tonnes.

A l'usine de Gullspang (Suède) (§ 321) où on utilise une chute de 20m,50,

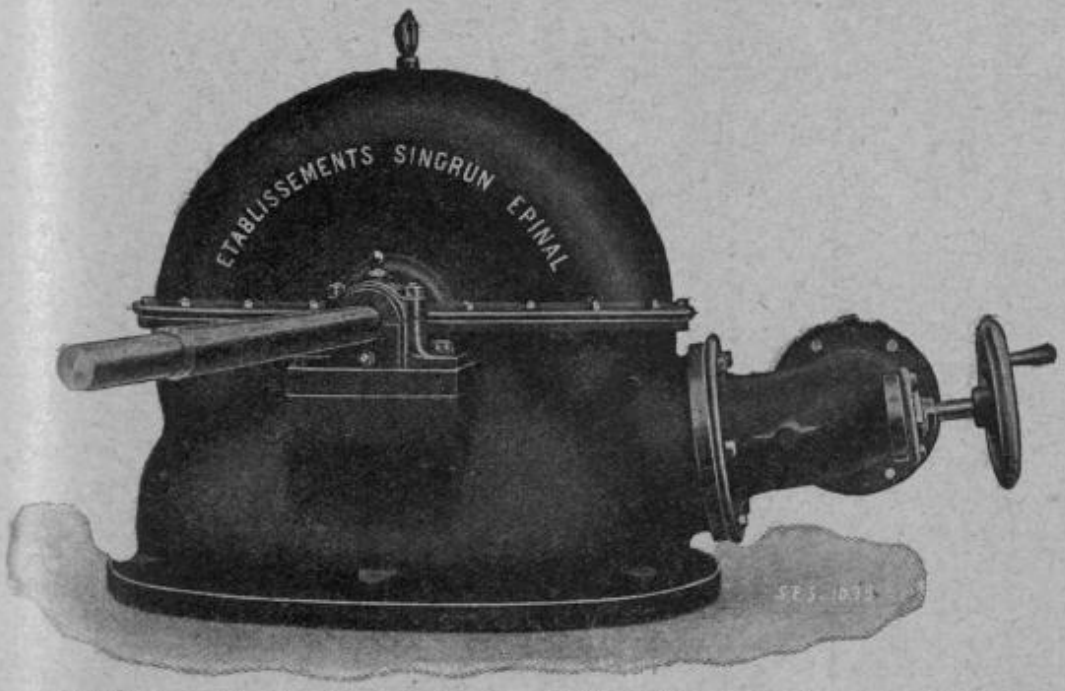


Fig. 534. — Turbine tangentielle, genre Pelton, dans son enveloppe en fonte. Construction Singrün.

les turbines à deux roues sont constituées par des aubes en tôle cintrées à la forme voulue et montées en fonderie sur une couronne de fonte portée par un moyeu. Les guides qui conduisent l'eau dans la roue sont montés sur pivot et par leur mouvement on peut faire varier les ouvertures et régler ainsi la quantité d'eau admise d'après la puissance demandée. Ce système de régulation permet à l'eau d'être toujours projetée sur les aubes de la roue avec l'angle convenable et améliore évidemment le rendement aux faibles charges. Pour des chutes entre 100 et 500 mètres on a utilisé parfois la turbine centrifuge à libre déviation [usines de Calypso (§ 377), de Chedde (§ 387), d'Engins (§ 398), d'Auzat (§ 410), de Cernon (§ 421), etc.].

Pour les basses chutes, on peut utiliser les turbines axiales à réaction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

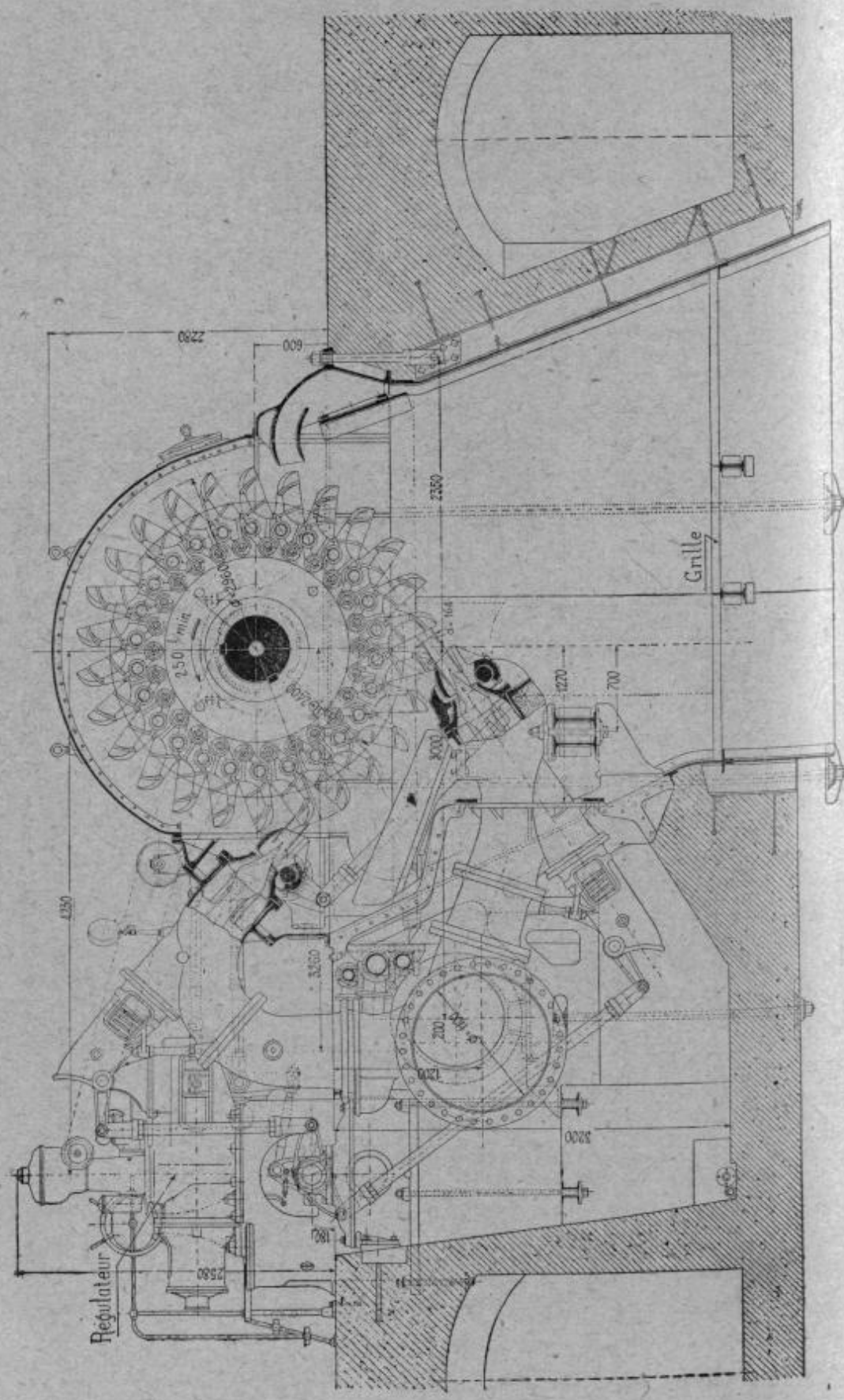


FIG. 535. — Turbine Pelton pour l'usine de Saaheim. — Échelle 1 : 60. $H = 253$ m. ; $N = 16.400$ HP ; $n = 250$ t/min.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque la variation du débit est peu considérable, on alimente le moteur sur toute sa circonférence et, pour obtenir un bon rendement, on fait tourner la turbine à une faible vitesse.

Si la rivière a un grand débit, la turbine à axe vertical munie d'un tube de succion est indiquée si le niveau d'aval est peu variable. On peut employer soit le type radial, soit le type axial ; mais, dans ce dernier cas, le vannage des turbines parallèles est plus simple.

Quand la rivière offre de grandes variations de débit, mais sans que

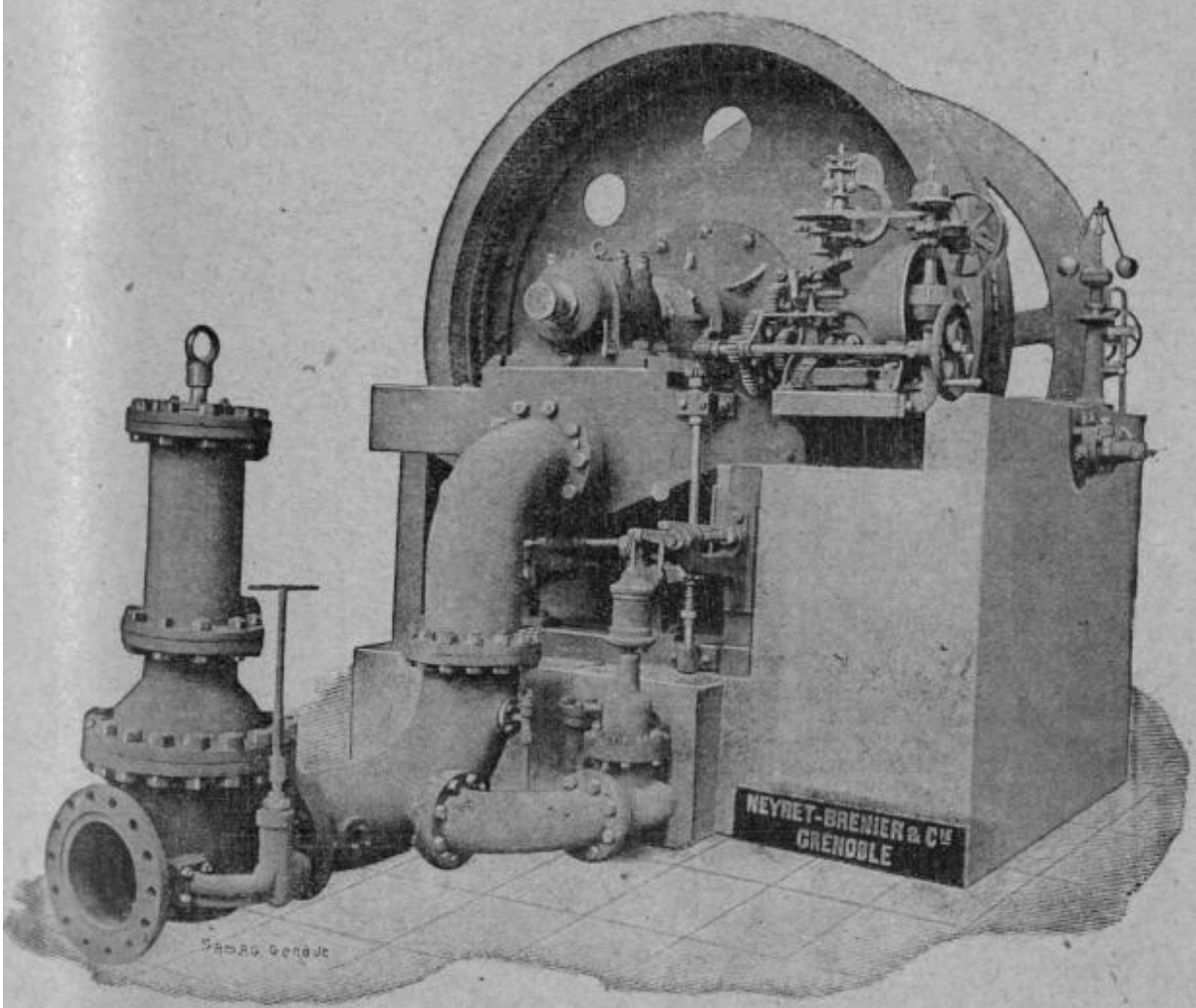


Fig. 536. — Turbine Neyret-Brenier de 1.500 HP, 375 tours, chute 560 mètres (Usine de Fure et Morge).

pour cela le niveau d'aval soit sujet à des variations de niveau notables, on s'adresse à la turbine parallèle à impulsion avec marche à petite vitesse. Lorsque, dans le cas de variations de débit importantes, l'énergie disponible est toujours supérieure à celle demandée par l'usine, on peut appliquer la turbine à libre déviation et à grande vitesse.

Les turbines Fontaine à double couronne et à double mouvement de rouleaux sont précieuses dans le cas où le débit varie du simple au double,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alors que la chute diminue à mesure que le débit augmente. On peut conserver sur l'arbre une force et une vitesse constantes ; la couronne extérieure est seule ouverte durant les basses eaux, quand la chute est maxima et que la turbine marche dénoyée. Dès que le débit augmente et que la chute se réduit, la turbine est noyée ; on ouvre alors les deux couronnes. Pour les hautes chutes, ces turbines peuvent être installées dans une bâche en tôle.

Dans les installations hydrauliques à basse chute de ces dernières

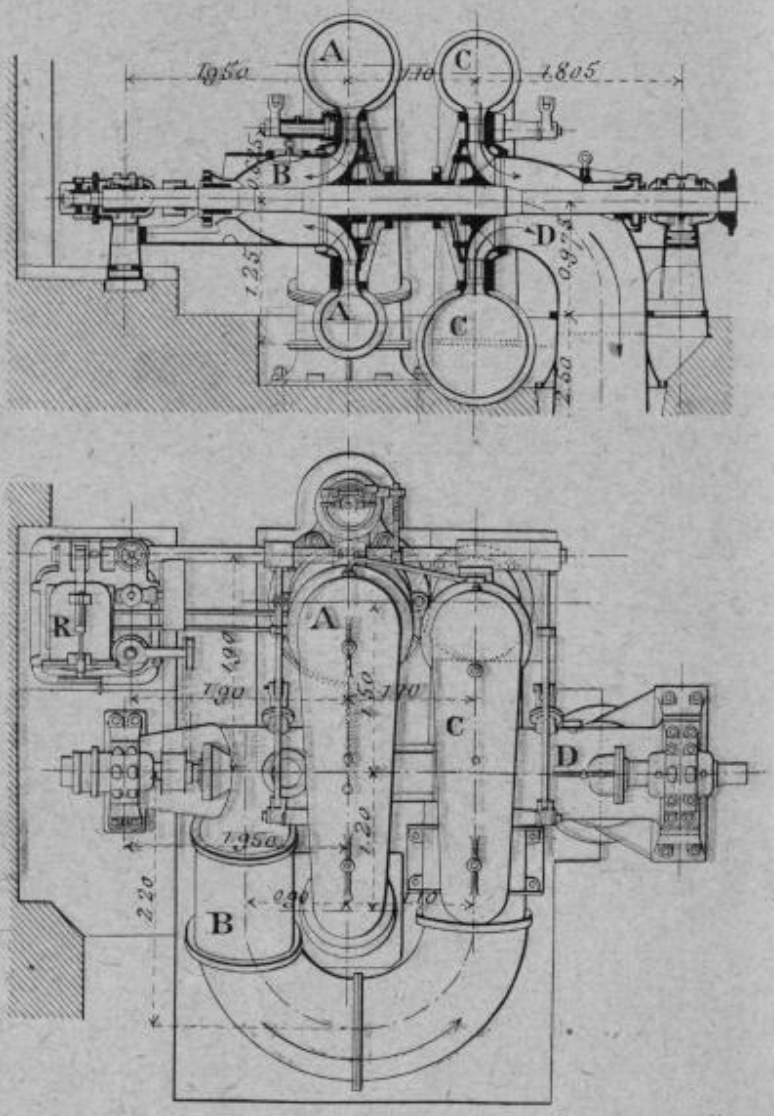


Fig. 537. — Turbine de l'usine de Wiesberg (Tyrol).

années, tant en Allemagne qu'en Suisse, on a fait de nombreuses applications de turbines axiales à réaction.

On dispose parfois deux turbines sur le même arbre, l'une servant à produire la vitesse et la puissance sous la hauteur de chute ordinaire, et l'autre en cas de besoin imprévu. Parfois l'on monte les deux turbines sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le même axe horizontal ou vertical, l'une ne fonctionnant pas ou tournant à vide, lorsque son concours n'est pas nécessaire.

Les turbines compound de 2.000 HP de l'usine hydro-électrique de Wiesberg (Tyrol) (*fig.* 537) fonctionnant sous une chute de 87 mètres, dont chaque roue utilise la moitié de la puissance de la chute, ont montré, par leur excellent fonctionnement, que ce genre de récepteur permet d'obtenir des résultats équivalents à ceux des roues du genre Pelton.

Ces turbines sont d'une construction analogue à celle d'une pompe centrifuge compound. L'eau y entre par la volute A de la première turbine, traverse cette turbine et en sort par l'œillard ; elle se rend ensuite, par le conduit B, à la volute C de la deuxième turbine qu'elle traverse comme la première, et s'échappe enfin par le conduit d'aspiration D. Les deux roues sont à aubes directrices mobiles et ces aubes, rendues solidaires, sont actionnées par un régulateur R, mais celles de l'une des moitiés de la turbine peuvent néanmoins être légèrement déplacées par rapport à celles de l'autre, de façon à permettre de répartir également le travail entre les deux roues.

La pression effective sur les aubages est réduite de moitié et le diamètre de chacune des couronnes est moindre que dans le cas d'une turbine simple donnant la même vitesse. Les joints étanches sont donc raccourcis et supportent une moindre pression, ce qui diminue les fuites. Pour annuler les poussées axiales, il suffit de disposer les deux couronnes en série, de façon que leurs deux poussées se contre-balancent, et de répartir la charge entre elles ; la petite différence de poussée est en outre équilibrée au moyen d'un palier de butée.

A la vitesse maxima, 368 tours, le rendement a été constaté de 79,9 0/0 et la puissance à peu près constante.

On emploie aussi des turbines doubles dont les roues mobiles et directrices sont disposées en deux ou trois séries d'aubes concentriques et que l'on peut utiliser isolément ou toutes ensemble suivant la hauteur de chute disponible [usines de Chèvres (§ 298), de la Beznau (§ 301), de Hagneck (§ 302), de Jonage (§ 308), etc.]. Cette disposition permet de réaliser une grande économie d'eau à charge normale.

Les turbines de l'usine hydroélectrique de la Beznau (*fig.* 538) sont du type à trois étages d'aubages et sont de deux genres dits HP et BP, différant entre eux principalement par les dimensions des aqueducs et des aubages et aussi par la forme des chambres d'eau qui sont spiraloïdes pour les dernières.

Le rendement garanti pour les turbines BP (qui donnent 900 HP avec $3^m,20$ de chute et 1.200 HP avec $3^m,70$) était de 66 0/0 avec une chute brute de $3^m,20$ et la consommation était limitée à 37 mètres cubes d'eau par seconde et par turbine. Pour les turbines HP, ces chiffres variaient de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

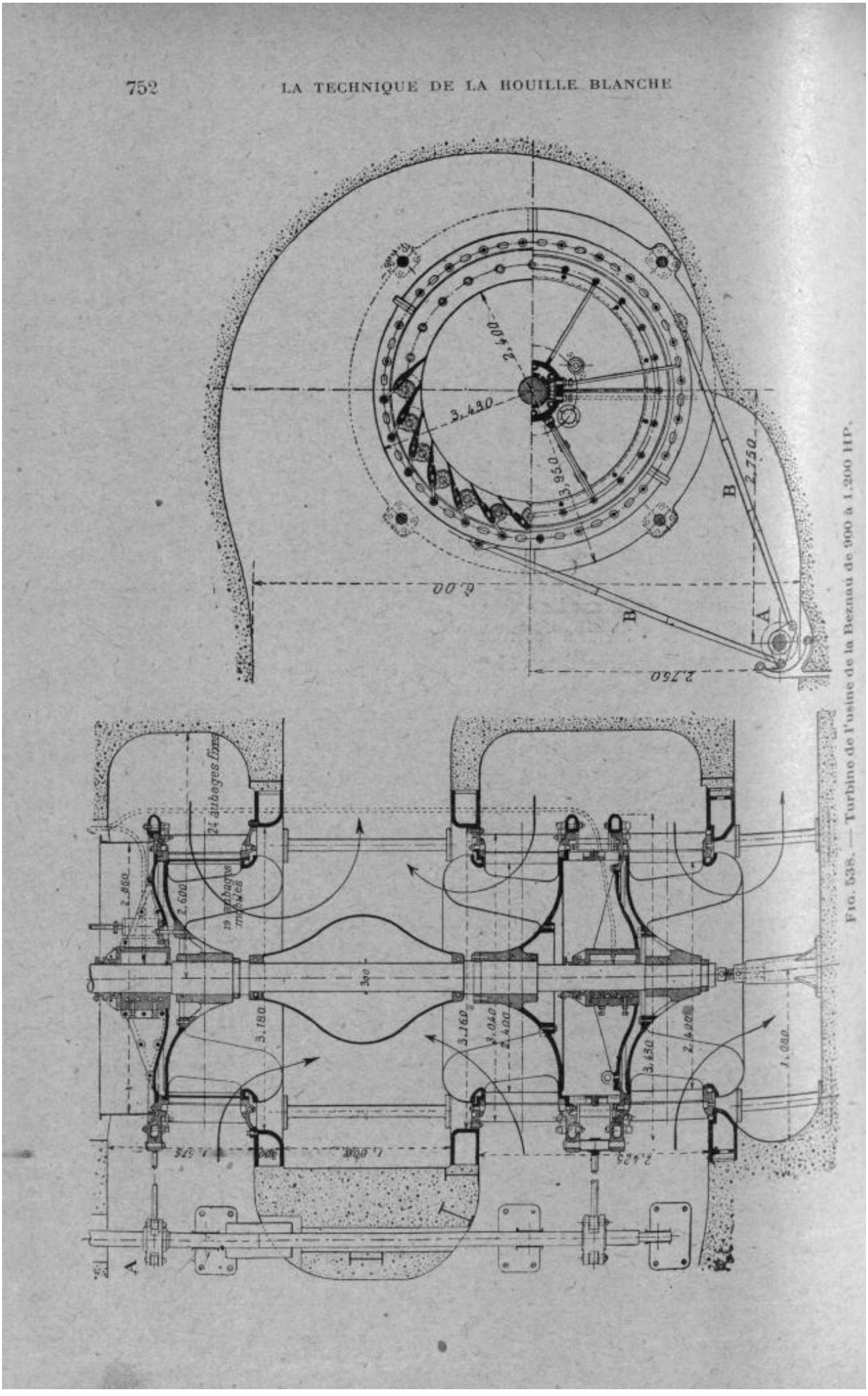


Fig. 538. — Turbine de l'usine de la Beznau de 900 à 1,200 HP.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

72 à 76 0/0 et de 23^{m3},6 (pour 3^{m},30 de chute nette) à 18^{m3},3 (pour 5^{m},70 de chute nette, chiffre maximum). On a obtenu dans les meilleures conditions un rendement de 81 0/0 à la puissance de 1.050 HP.

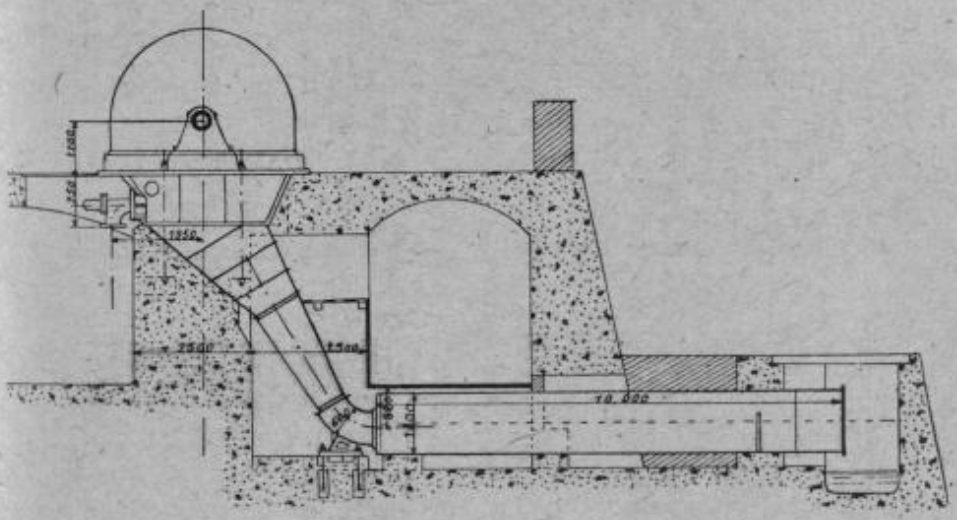


Fig. 539. — Dispositif pour l'échappement de l'eau. (Turbine Pelton. Usine de Fully.)

Le passage de l'eau dans les aubages a lieu comme l'indiquent les

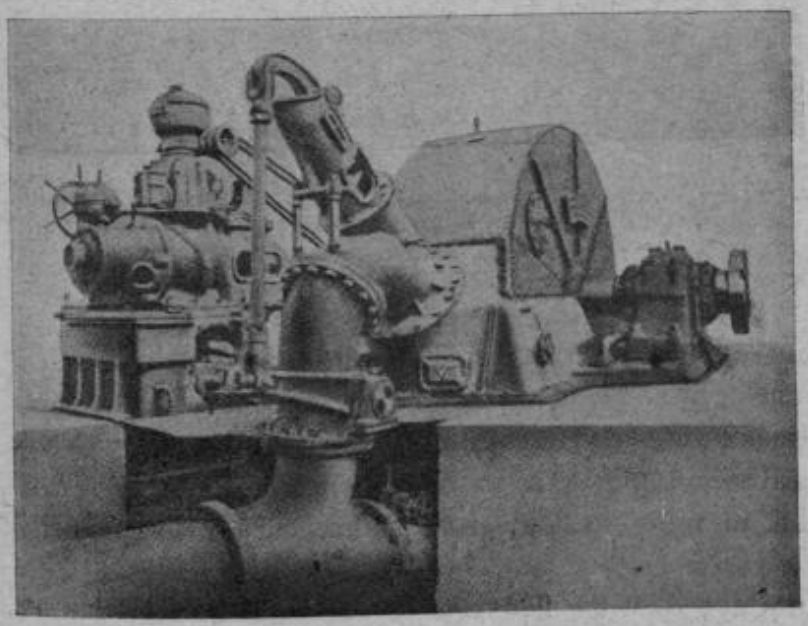


Fig. 539 *bis*. — Turbines Pelton de 13.500 HP. Usine de Tyssedal (Norvège).

flèches ; on voit que les poussées de haut en bas sont partiellement équilibrées. L'effort supporté par le pivot n'en reste pas moins de 21 à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

32 tonnes, suivant les hauteurs de chute, le poids total de la partie mobile d'un turbo-alternateur étant de 45 tonnes. Cet effort vertical est équilibré par l'huile sous pression (18 à 25 kilogrammes) qui circule dans le pivot supérieur suivant le dispositif bien connu.

L'huile du pivot est refroidie par circulation dans un serpentin immergé dans un courant d'eau venant du canal et s'échappant dans la rivière. Les paliers inférieurs sont lubrifiés à la graisse consistante et protégés contre les graviers. L'eau s'échappe par des galeries en béton qui forment tubes de succion.

On peut enfin employer deux turbines par unité mécanique ; l'une agit

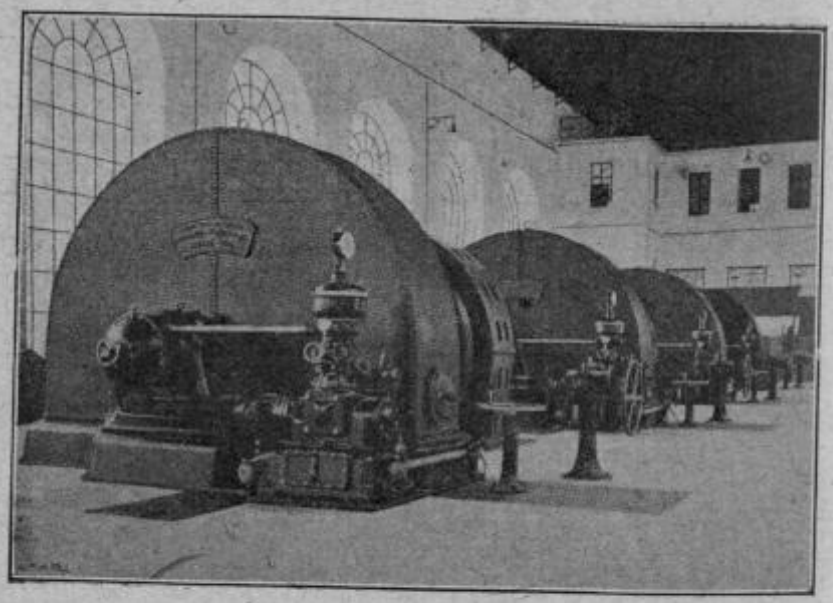


Fig. 540. — Vue générale de la turbine Pelton, de Fully, côté régulateur.
H = 1.650 mètres ; N = 3.000 HP ; n = 500 t/min.
(Piccard et Pictet, constructeurs).

directement, l'autre par l'intermédiaire des courroies, la première réservée à la marche normale, l'autre pendant les périodes de faible chute. La station hydroélectrique de Hales-Bar (États-Unis), établie sur la rivière Tennessee, utilise une puissance de 56.000 chevaux au moyen d'un barrage qui produit un relèvement d'eau s'étendant sur une longueur de 240 kilomètres.

Lorsque le niveau du fleuve monte et qu'il faut laisser s'écouler la majeure partie de l'eau sans la faire passer par les turbines, la hauteur de chute disponible baisse rapidement et peut descendre jusqu'à $6^m,10$ pour un débit de 7.000 mètres cubes par seconde, alors qu'elle est de $12^m,20$ quand le débit est minimum et réduit à 140 mètres cubes.

Le problème de la meilleure utilisation de la puissance de l'eau a été

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résolu en disposant sur chaque arbre du moteur vertical trois turbines ; les deux du bas ont un grand rendement sous une forte pression et pour de petits débits, tandis que celle du haut est construite pour de grands débits sous petite pression.

Elles sont montées sur des arbres tubulaires concentriques à pivots dénoyés et accouplées directement à un même alternateur.

A l'usine de Brême sur le Weser où la chute est de 5 mètres on a installé des turbines Francis horizontales quadruples de 3.000 chevaux chaque tournant à 107 tours. Les quatre roues sont calées sur le même arbre et la turbine est entièrement noyée. Les chambres des turbines sont munies d'une première grille à barreaux espacés. Ces chambres sont divisées en deux compartiments qui peuvent être fermés chacun par une vanne, et en avant de chaque turbine est une grille inclinée à barreaux plus rapprochés. Par le jeu combiné de ces vannes on peut opérer le nettoyage des grilles.

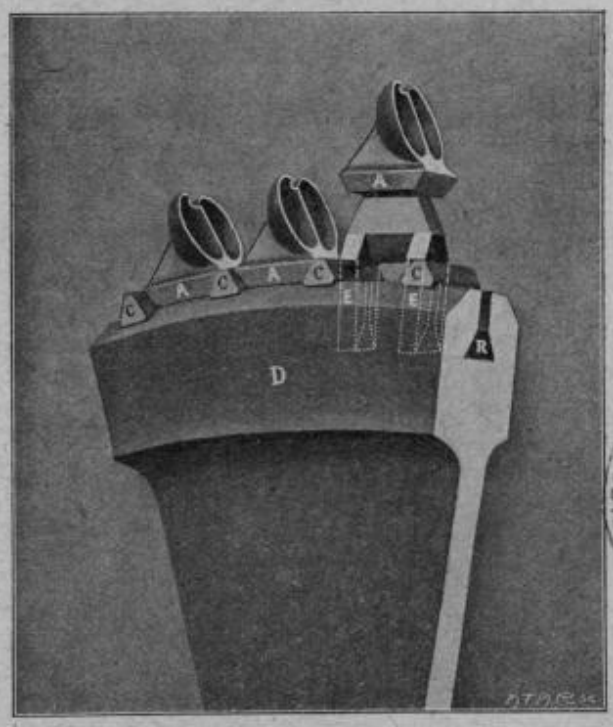


Fig. 541. — Mode de fixation des aubes de Fully (modèle réduit). (Piccard et Pictet, constructeurs.)

CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

Si nous désignons par A la quantité d'eau en mètres cubes par seconde utilisable d'une chute donnée, par H la chute utile en mètres, et par N la puissance totale de l'appareil moteur hydraulique, on a :

$$N = \frac{A \cdot H \cdot 10^3}{75}.$$

Le rendement dépend de la chute utile H, de N et de la vitesse de rotation n en tours par minute. Ces trois grandeurs peuvent être réunies dans une expression telle que :

$$K_n = \frac{n}{H}\sqrt{\frac{N}{\sqrt{H}}}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rendement de la turbine dépend du facteur K_n qui, pour des turbines Francis, varie de 350 à 50. Le chiffre 350 indique une turbine à grande vitesse de rotation, et celui 50 une vitesse de rotation très faible. Le meilleur rendement est atteint pour des valeurs moyennes de K_n, soit 125, qui correspond à 84 0/0.

Pour les roues Pelton, ce coefficient se tient entre 20 et 5, et le rendement le plus élevé correspond à 5 (81 0/0) et le moins élevé à 20 (75 0/0). Si on veut se placer dans des conditions de rendement maximum, on risque d'arriver à des vitesses de rotation trop faibles et à des prix trop

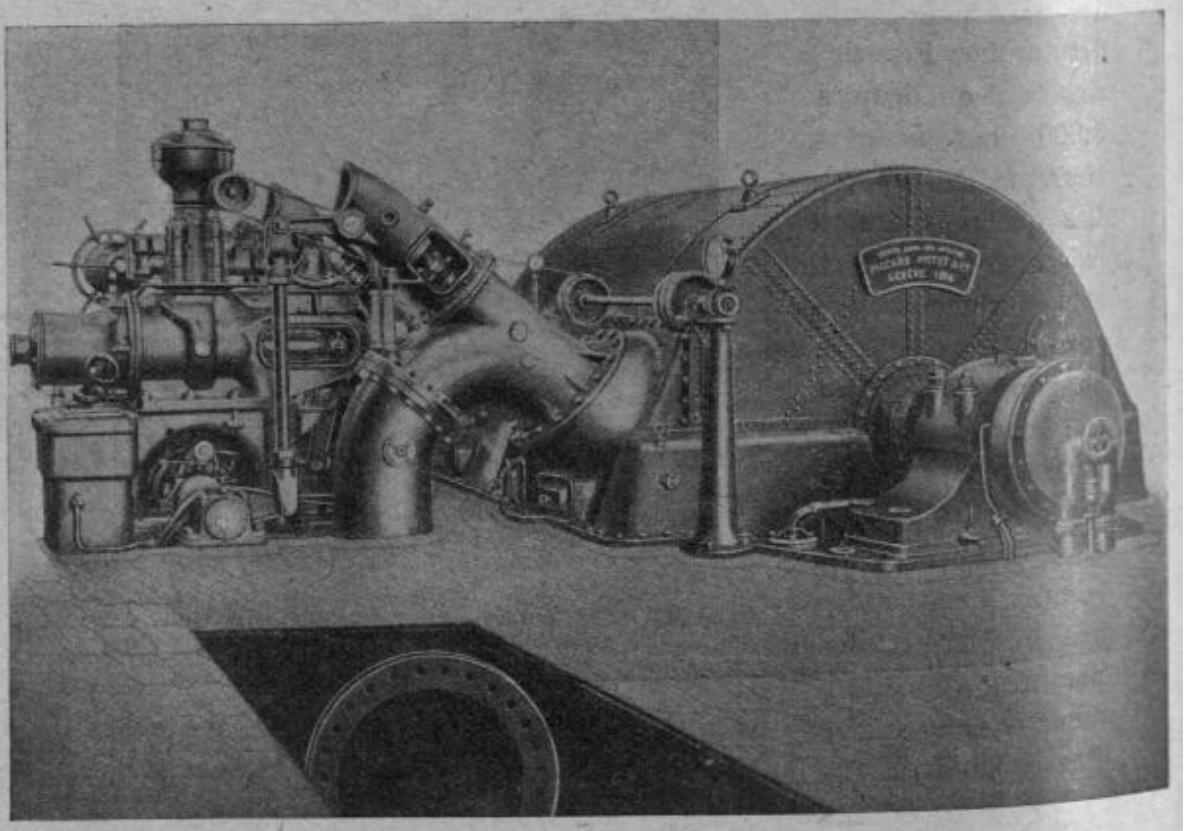


Fig. 542. — Turbine Pelton de 16.400 HP, pour l'usine de Saaheim. (Piccard et Pictet, constructeurs.)

élevés pour de basses chutes, et au contraire, la vitesse de rotation serait trop élevée pour de hautes chutes. Pour augmenter cette vitesse, le meilleur moyen consiste, pour les turbines Francis, à prendre des moteurs doubles, triples ou même quadruples. Quant aux roues Pelton, on obtient le même résultat ; à savoir une vitesse plus élevée pour un rendement donné ou un rendement élevé pour une vitesse donnée, en employant plusieurs distributeurs agissant sur la même roue ou en plaçant plusieurs roues sur le même arbre.

Dans les turbines dites de « Série », le facteur caractéristique K_n est le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même, alors qu'on destine le moteur hydraulique à travailler sous différentes chutes ou sous la même chute. Pour une même hauteur de chute, les vitesses de rotation sont inversement proportionnelles au diamètre, les quantités d'eau et les puissances directement proportionnelles au carré du diamètre. Quand il s'agit de chutes différentes, les vitesses de rotation et les débits sont proportionnels aux racines carrées des hauteurs de chute. Les puissances correspondantes sont proportionnelles à $H\sqrt{H}$. Par suite, toutes les dimensions intéressantes peuvent être rapportées au diamètre de la roue.

Ainsi, si on a à établir le projet d'une turbine Francis à arbre horizontal de 800 HP à 220 tours par minute, sous une chute de 30 mètres, le facteur caractéristique est donné par :

$$\left(\frac{220}{30}\sqrt{\frac{800}{\sqrt{30}}}\right) = 85.$$

On cherche alors parmi les turbines Francis un type établi dont le facteur soit de 85, et on relève son diamètre, le nombre de tours et la hauteur de chute. Soit, par exemple, une turbine qui fournit 1.000 HP à 300 tours sous une chute de 35 mètres ; on a alors :

$$\frac{\sqrt{30}}{220} \cdot \frac{\sqrt{35}}{300} = 1{,}3.$$

La turbine à établir sera donc dimensionnée 1,3 fois celle en fonctionnement.

La turbine Francis convient bien pour les chutes de 1 à 120 mètres et la roue Pelton pour celles de 80 mètres et au-dessus. Donc entre 80 et 120 mètres le choix peut être embarrassant et demande à être étudié de près.

La turbine Francis utilise toute la hauteur disponible, tandis que, avec la roue Pelton on perd toujours la hauteur entre le distributeur et le niveau de décharge, mais par contre, la première exige un mécanisme plus coûteux et en outre, pour les grandes hauteurs, elle exige une construction irréprochable qui en élève le prix d'achat.

En pratique, selon M. Salvatore Spera, on peut adopter une formule basée sur un rapport existant entre le rendement de la chute et la vitesse de rotation de la turbine, formule qui donne le facteur caractéristique du moteur et qui s'écrit :

$$\varphi = \frac{n}{H}\frac{\sqrt{N_t}}{\sqrt{\sqrt{H}}},$$

dans laquelle φ est le facteur caractéristique, H la hauteur en mètres utile

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

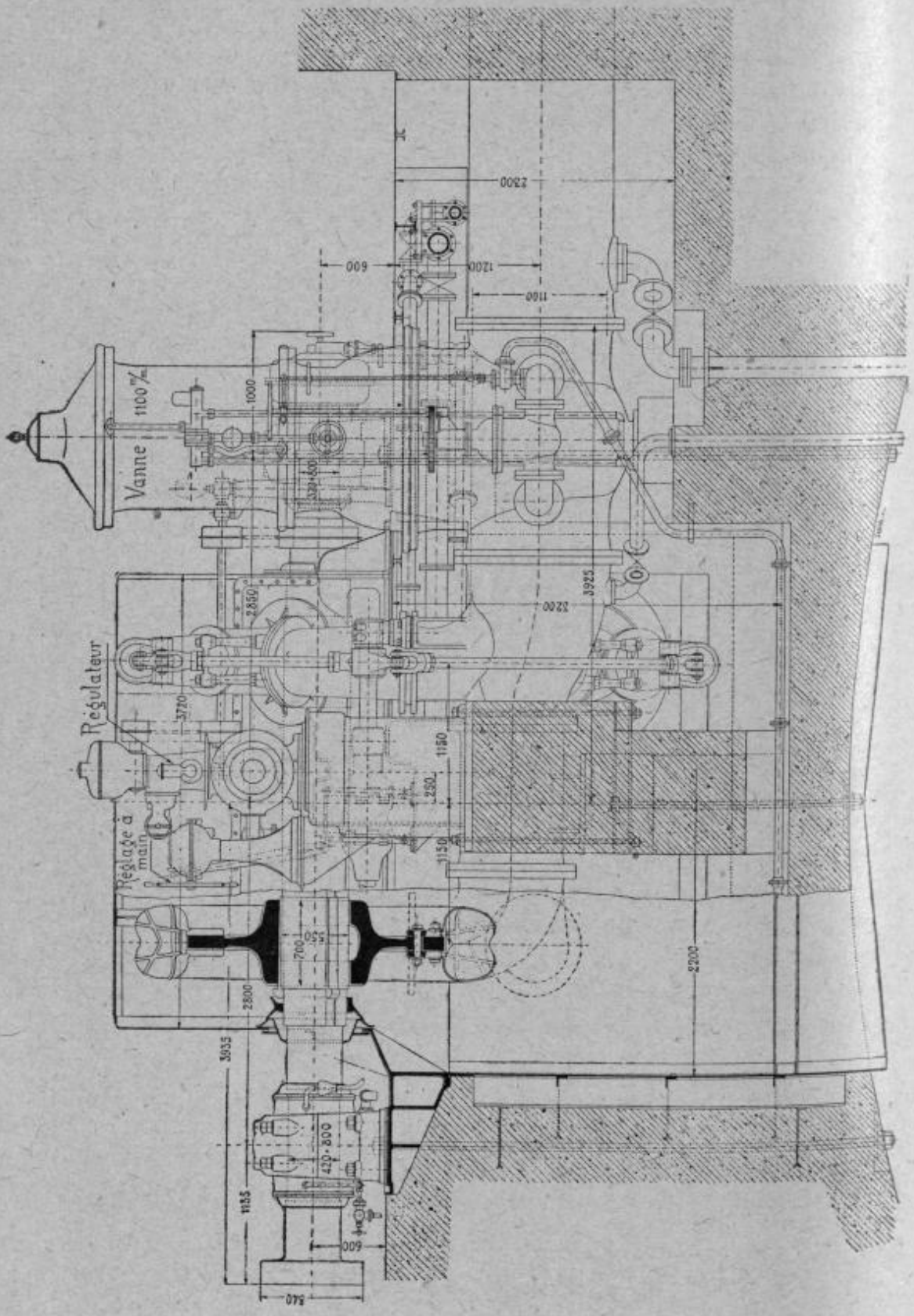


FIG. 543. — Turbine Pelton pour l'usine de Sanheim. — Échelle 1 : 60. $H = 253$ m. ; $N = 16.400$ HP ; $n = 250$ t/min. (Piccard et Pictet, constructeurs.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la chute, n le nombre de tours par minute et N_1 la puissance théorique en chevaux.

Les tables ci-après, établies avec cette formule et après essais de plusieurs turbines, donnent le coefficient de rendement φ rapporté au facteur η ; la première table se rapporte à des turbines Francis et la seconde à des roues Pelton.

φ	η	φ	η
5	81	15	77
7,5	80	17,5	76
10	79	20	75
12,5	78	22,5	74

φ	η	φ	η	φ	η
50	80	150	83	250	79
75	82	175	82	275	78
100	84	200	81	300	77
125	84	225	80	325	76

Les turbines hélico-centripètes (type Francis) et la turbine Pelton répondent actuellement au mieux à tous les desiderata industriels. Le rendement optimum qu'elles permettent d'obtenir est très élevé dans toute la zone d'utilisation pratique des turbines.

Dans les grandes centrales, il est rare que l'on utilise une turbine à pleine ouverture, car à ce moment le régulateur est fatalement sans action dans le cas où la charge du réseau augmente ; pratiquement, dès que la charge d'un groupe hydroélectrique atteint à peu près les trois quarts de sa puissance maximum, on met en route un deuxième groupe et on exécute un couplage. Il y a donc intérêt à ce que le rendement maximum de la turbine corresponde aux 2/3 ou aux 3/4 du débit total, ce qui est le cas pour les turbines Francis. Et c'est le vannage par directions mobiles, dû à Flinck, qui a permis d'obtenir ce résultat, qui est aussi une des améliorations les plus utiles apportées aux turbines centripètes.

Ainsi il suffit de calculer normalement la turbine pour les 3/4 du débit maximum et la turbine fonctionnant avec son rendement maximum et à pleine ouverture, son rendement n'est diminué que de 3 à 4 0/0.

Pour une même chute, les poids des turbines de puissances différentes, mais de même série, sont à peu près dans le rapport $\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{\frac{5}{2}}$ à $\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$, l'exposant $\frac{5}{2}$ s'employant quand $\frac{D_2}{D_1} < 1$, et l'exposant 3 lorsque $\frac{D_2}{D_1} > 1$. Pour une même puissance, les poids des turbines fonctionnant sous des chutes différentes sont à peu près dans le rapport $\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\frac{2}{3}}$ à $\frac{H_2}{H_1}$, l'exposant $\frac{2}{3}$ s'appliquant quand $\frac{H_2}{H_1} < 1$, et la puissance première lorsque $\frac{H_2}{H_1} > 1$. Enfin,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quand $\frac{D_2}{D_1}$ et $\frac{H_2}{H_1}$ ont des valeurs voisines, on peut admettre approximativement que le prix est proportionnel au poids.

158. Renforceurs de puissance pour chute d'eau. — M. Clemens Herschel a imaginé un dispositif très simple et peu coûteux permettant, en utilisant l'eau surabondante en temps de crue, d'augmenter la pression

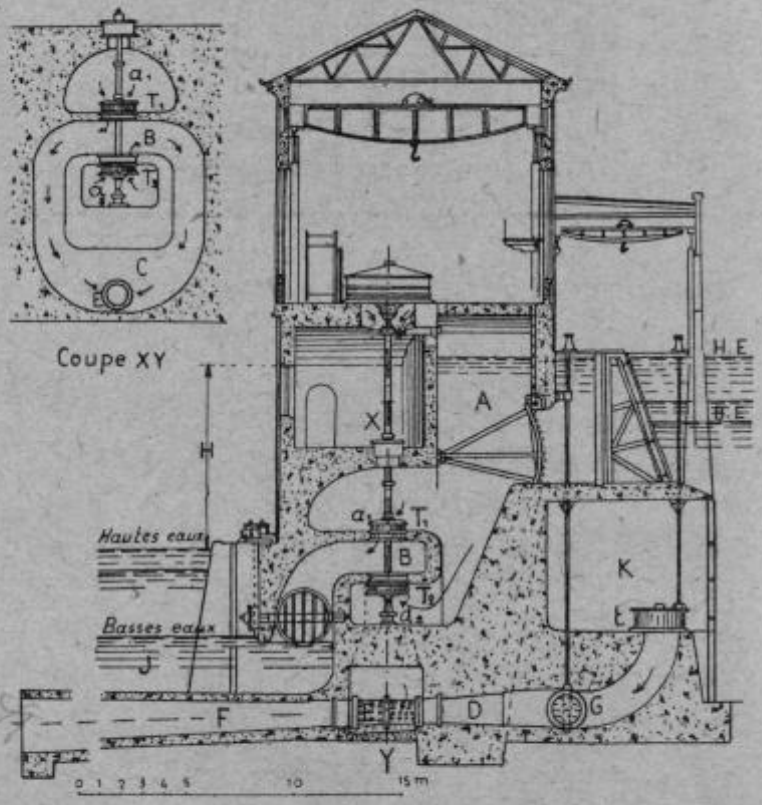


FIG. 544. — Coupes verticales d'une installation de turbines avec renforceur de puissance.

d'eau agissant sur les turbines dans le cas de chutes de faible hauteur. Le procédé consiste à diminuer la pression de l'eau dans la chambre de décharge de la turbine, ce qui revient à augmenter la pression effective, en y faisant un vide partiel au moyen d'une véritable trompe utilisant de l'eau sous pression puisée dans la chambre de prise d'eau.

La (*fig.* 544) montre les dispositions adoptées pour le cas de deux turbines T_1 et T_2, calées sur un même arbre, et alimentées en a_1 et en a_2 par l'eau provenant de la chambre de prise A. La chambre de décharge commune B à ces deux turbines communique, par la chambre à vide C, avec les ouïes de l'aspirateur à trompe DEF. Cet aspirateur fonctionne au moyen de l'eau prise en K dans une chambre communiquant avec la chambre A ; il se compose d'une conduite d'amenée G, d'un cône métallique DE percé d'orifices d'aspiration en E et d'un diffuseur ou cône diver-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gent F. Il va de soi que, quand la trompe n'est pas utilisée, la vanne v, qui permet de faire communiquer la chambre de décharge B avec le canal de fuite J, est fermée.

Dans tous les cas, il serait facile d'imaginer une disposition produisant le même effet et, bien souvent même, il sera possible d'appliquer le dispositif à une installation déjà existante. Les canaux G et F peuvent être simplement ménagés dans la maçonnerie.

Il était intéressant de déterminer par l'expérience les conditions pratiques de fonctionnement de ce dispositif. M. Herschel a essayé différents types de trompes ; pour quelques-unes le rendement maximum atteint 0,33 ; mais d'une façon générale, il reste peu élevé. Ce fait est sans importance puisqu'en fait on utilise de l'eau surabondante.

Soit Q le débit de la conduite G amenant l'eau à la trompe, c'est-à-dire le volume d'eau agissant dans l'unité de temps pour produire l'effet cherché. Il est naturel de rapporter ce débit à celui de la turbine elle-même : celui-ci se compose de Q_1, débit qu'aurait la turbine sous la hauteur d'eau H dont on dispose si la trompe ne fonctionnait pas, et de Q_2, accroissement de débit produit par la trompe.

Le rapport ρ des débits est donc :

$$\rho = \frac{Q_1 + Q_2}{Q} = \frac{\text{volume d'eau passant dans la turbine}}{\text{volume d'eau entrant dans la trompe}}.$$

D'après cela, on voit que le volume d'eau sortant du diffuseur pendant l'unité de temps est $Q + Q_1 + Q_2$.

La trompe fonctionne sous la hauteur d'eau H et produit un accroissement de pression h dans la turbine ; celle-ci fonctionne donc, en réalité, sous la pression effective $H + h$. Par suite, l'accroissement de pression unitaire φ est donné par :

$$\varphi = \frac{h}{H}.$$

Soit h' la charge additionnelle correspondant à la dépression produite par le renforceur de chute, on aura pour le débit et la puissance correspondants :

$$q' = m\omega\sqrt{2g\,(h+h')} \qquad p' = q'\,(h+h') = m\omega\sqrt{2g}\,(h+h')^{\frac{3}{2}}$$

et l'accroissement de puissance ressort à :

$$\Delta P = q'\,(h+h') - qh = q'\left(\frac{(h+h')^{\frac{3}{2}} - h^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{h+h'}}\right)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si q'' est le volume d'eau envoyé dans le renforceur de chute; le rendement de l'opération $\rho = \frac{\Delta P}{q''h}$ sera, suivant Herschel,

$$\rho = \gamma\left(1 - \eta_1 - \frac{1}{\sqrt{1+\eta_1}}\right)$$

γ désignant le rapport $\frac{q'}{q''}$ et η_1 le rapport $\frac{h'}{h}$.

Les volumes q' et q'' sont d'ailleurs limités par les nécessités pratiques. Aussi Herschel, dans l'étude qu'il a faite pour l'aménagement de l'usine hydroélectrique de la Plaine à Genève, a prévu deux renforceurs pour chacune des turbines en leur donnant une section elliptique à grand axe horizontal pour diminuer l'encombrement en hauteur.

Mais le rendement pratique de cet appareil n'est pas élevé, tout au plus 10 à 15 0/0. Pour atteindre le rendement maximum, il faut que la consommation totale de la turbine et du renforceur dépasse le triple de la consommation seule et l'effort du renforceur ne se fait sentir que pour une consommation totale double de la capacité d'absorption de la turbine.

Les appareils analogues, tel que le récupérateur Conrad Biel et Alfred Binsch, qui comporte un approfondissement dans le canal de dérivation, à l'ouverture d'évacuation des turbines, n'offrent pas des avantages supérieurs au renforceur.

159. Usure anormale des turbines. — Il se produit dans les turbines hydrauliques, comme dans toutes les autres machines de travail, une usure normale inévitable et même prévue qui ne saurait être confondue ou seulement comparée avec l'usure anormale, qui se présente sous deux aspects caractéristiques ; une usure accidentelle ou une usure localisée. A cet effet M. J. Dalemont, professeur à l'université de Fribourg, s'est livré à des recherches dont les résultats particulièrement suggestifs montrent, qu'à cet égard, les formes et les dispositifs d'alimentation et de réglage des turbines ont une influence très grande et presque prépondérante.

L'auteur n'a pas envisagé les accidents provenant de chocs accidentels ou d'action momentanée et violente, car le passage de corps un peu gros dans les aubes d'une turbine est suffisamment protégé par la double ou triple protection de la roue motrice utilisée dans les installations. L'usure étudiée est celle provenant de l'écoulement du sable entraîné par la veine liquide.

Tantôt l'aube est presque intacte dans son ensemble et n'accuse que deux ou trois perforations locales, tantôt l'aube se trouve profondément entamée et la corrosion peut même atteindre les parois latérales qui réunissent les aubes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. Dalemont a constaté que lorsque le dispositif de réglage provoque le brisement brusque de la veine liquide, il entraîne une usure localisée, plus ou moins rapide par suite de l'action tourbillonnaire de l'eau.

Il s'ensuit que les turbines à libre déviation fonctionnant sans aspiration et avec injection partielle réglée par la variation du nombre des orifices d'injection, ou par la variation de la section de la veine injectée, ne donnent pas d'usure.

Avec les turbines Francis, l'usure se produit à l'entrée des aubes, où se produisent d'ailleurs les variations le plus sensibles dans la forme des veines liquides introduites et aussi les remous les plus violents. Le déplacement des directrices autour de leur axe a pour effet d'étrangler plus ou moins la veine à l'entrée de la roue motrice, et le jeu qui doit exister entre ces directrices et les parois latérales auxquelles sont fixés leurs axes explique la présence des remous et de la corrosion.

Dans les roues Pelton, où l'injection n'a lieu qu'en un point de la périphérie, l'action de l'eau sur chaque aube se modifie pendant un tour, par suite ce genre de turbine ne présente que peu d'usure malgré les fortes pressions d'eau que l'on utilise avec elles. Par contre le distributeur de ces roues est soumis à une action constante, puisque l'eau s'en échappe invariablement et que la veine est seulement étranglée plus ou moins suivant la charge de la machine. C'est donc au distributeur que l'on constate des corrosions, qui en affectent les bords latéraux principalement.

M. Dalemont ayant soumis à l'analyse chimique des morceaux de fonte provenant de turbines corrodées, en même temps que des morceaux appartenant à des parties intactes de ces mêmes turbines, put se rendre compte que les seules différences notables résidaient dans la teneur en graphique.

Dans l'état actuel de la question on peut admettre de ce fait deux hypothèses : 1° au point où se produit le tourillon, grâce à la présence de l'air et au moindre lavage de la paroi, il se produit une attaque chimique ; 2° l'action tourbillonnaire s'exerçant inégalement sur les éléments qui composent la fonte, notamment sur le graphite libre, peut produire d'abord des dislocations locales, d'autant plus admissibles que les vibrations de la masse les favorisent encore ; certaines petites particules se détachent et sont alors le point de départ d'un ébranlement de plus en plus grand et de destructions, toujours circonscrites d'ailleurs aux limites du tourbillon.

L'on sait que les exploitants d'usines hydrauliques ont le plus grand intérêt à éviter l'introduction des limons et surtout des sables dans les conduites forcées. Nous avons signalé quelques procédés proposés et mis en application dans ce but. Un des plus récents est celui suggéré par MM. Levy-Salvador et E. Maynard dont les noms font autorité dans la science hydraulique. L'appareil est basé sur les propriétés de la force cen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trifuge, ainsi qu'on les utilise dans les écrémeuses et les pompes centrifuges.

La pompe-turbine de clarification (*fig.* 545) proposée aurait ses aubes disposées coniquement de manière que l'eau trouble puisse subir rapidement l'action de la force centrifuge, sans éprouver des remous susceptibles de troubler le travail de séparation. L'appareil aurait sa place en aval du bassin de mise en charge, à l'origine des conduites forcées et à un niveau tel que l'orifice de sortie de l'eau clarifiée soit au niveau de l'eau dans la chambre de mise en charge des conduites forcées, afin qu'il n'y ait pas élévation de l'eau. La chambre d'eau serait alors partagée en deux compartiments séparés par la chambre logeant la pompe-turbine.

En temps de crue, lorsque le sable et le limon véhiculés par les eaux développeront, par leur accumulation dans le tuyau de sortie, une pression

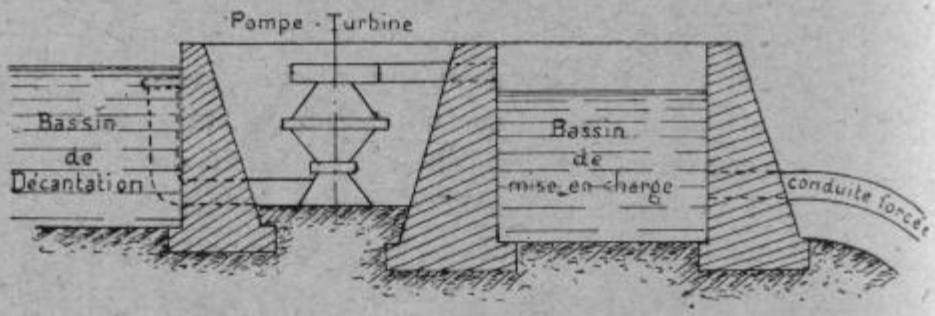


FIG. 545.

supérieure à la résistance du clapet, elles s'écouleront par le dit tuyau et l'eau clarifiée, continuant son mouvement ascensionnel, débouchera dans la conduite forcée.

En temps ordinaire, le jeu se répètera semblablement dès qu'il y aura une accumulation de dépôts suffisante pour agir sur le clapet. On conçoit donc que le jeu puisse être automatique et qu'il suffit de régler convenablement les ressorts du clapet.

IV. — ESSAIS DES TURBINES

160. Essais au frein. — La mesure de la puissance peut être effectuée une fois pour toutes directement par un frein dynamométrique ou autrement. Dans le cas de transmission par l'électricité, elle peut être indiquée en permanence par les appareils de mesure de courant, si l'on connaît le rendement des intermédiaires.

L'essai au frein d'une installation hydraulique permet, dans un grand nombre de cas, d'accroître son rendement en fournissant une courbe de puissance des turbines en fonction de la vitesse et un moyen de s'assurer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que la vitesse normale adoptée correspond au maximum de rendement de ces turbines.

Supposons que nous ayons à faire l'essai d'une turbine à axe horizontal.

On cale la poulie d'un frein de Prony sur l'arbre de la turbine et l'on équilibre l'effort du frein par un poids P que l'on place dans le plateau de l'appareil ; lorsque cet équilibre est obtenu, on relève le nombre de tours par minute et on applique la formule :

$$\text{N chevaux } \frac{2\pi P' L n}{60 \times 75} = 0{,}0014 P' L n,$$

dans laquelle $P' = (P + p)$ kilogrammes et p est le poids propre du frein réduit à la distance L (L, longueur du bras de levier, en mètres); pour une turbine à axe vertical, il faut tenir compte en outre du travail absorbé par l'engrenage conique et du travail de frottement des coussinets. Pour le premier, on prend la formule :

$$T_e = T_n + f\pi \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{a'^2}},$$

dans le cas où les axes forment un angle de 90°.

Le travail T_n est celui relevé au frein ; f, coefficient de frottement, peut être pris égal à 0,15 (bois sur fonte) ; a' et a sont les nombres de dents de la roue et du pignon.

Le travail du frottement dans les coussinets est donné par la formule :

$$T = \frac{f' C \times 2\pi N r}{60};$$

f', coefficient de frottement fer sur bronze = 0,08.

Pour l'essai des grosses turbines, dont la puissance dépasse 1.000 HP, le frein à absorption Alden est d'un usage beaucoup plus commode que le frein de Prony. Il se compose d'un disque de fer graissé et lisse, tournant entre deux disques de cuivre refroidis et appliqués contre lui au moyen d'eau sous pression. Le disque en fer est calé sur l'arbre moteur et l'enveloppe solidaire des disques en cuivre est folle sur cet arbre, mais chargée, du côté convenable, de poids empêchant son entraînement par le couple résultant des frottements. Le total de ces poids additionnels permet d'évaluer la puissance disponible sur l'arbre moteur.

Parallèlement et simultanément à l'opération du frein, on doit relever la hauteur de chute et mesurer le débit. Pour ce dernier, on y arrive en installant un moulinet volumétrique actionnant un cinémomètre enregistreur. Celui-ci comprend, en outre du cinémomètre destiné à marquer la vitesse de rotation du moulinet, un manomètre enregistreur relié à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conduite d'alimentation de la turbine, pour en marquer la pression effective pendant la marche de l'essai, et un linimètre qui marque en même temps les positions du distributeur de la turbine, c'est-à-dire ses degrés d'ouverture. Les trois facteurs du fonctionnement ainsi enregistrés s'inscrivent sur le même tambour horaire dont l'appareil est muni. En repérant sur le diagramme du cinémomètre attelé au moulinet, pour des débits successifs et bien étalonnés, le volume d'eau écoulé, la simple lecture du diagramme donne le chiffre du débit dans la turbine.

Le moulinet, dont les ailes occupent par leur évolution tout le diamètre de la conduite cylindrique, peut être immobilisé quand on ne fait pas de mesures, sans que ses ailettes soient un obstacle sérieux.

La vitesse de rotation de la turbine est un fait facile à réaliser et à enregistrer.

Pour le jaugeage du débit de la turbine à l'aide des méthodes décrites au (chapitre IV), suivant la disposition des usines, le genre des ouvrages de captation, et l'emplacement de la turbine, on opère sur le canal d'amenée ou le canal de fuite, ou bien, sur la conduite forcée ou la chambre de mise en charge, mais c'est le plus souvent sur le canal de fuite qu'on édifie le déversoir parce que cet endroit offre plus de commodité pour son emplacement et pour les opérations de mesurage.

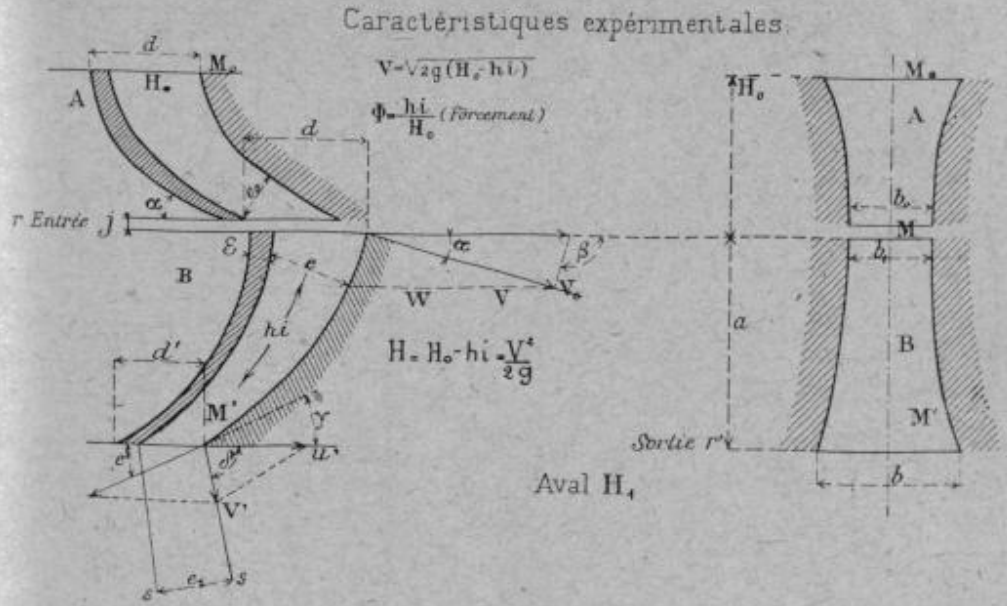
Lorsque le canal de fuite, en sous-sol d'une usine, est difficilement accessible, on emploie avec avantage les hydromètres pour la mesure de la charge sur le seuil. La cloche de l'appareil est immergée à $1^{m},50$ ou 2 mètres en avant du déversoir et un tuyau filiforme relie celle-ci au cylindre manométrique d'un enregistreur posé à une certaine hauteur au-dessus de l'eau sur le bord du canal. Pour mesurer la cote de charge sur le déversoir, il suffit de relever sur le diagramme enregistré la valeur de l'ordonnée correspondant à une arrivée d'eau nulle, ce que l'on obtient en arrêtant la turbine un moment, et en faisant tourner le cylindre de l'enregistreur quand le plan d'eau en amont effleure juste la crête du déversoir.

161. Caractéristiques expérimentales. — M. L. Ribourt donne le nom de « caractéristiques expérimentales » à des courbes qui permettent de déterminer les conditions de marche d'une turbine, en fonction des ouvertures progressives des obturateurs à toutes allures du moteur hydraulique.

La (*fig.* 546) a trait à des diagrammes pour turbines à veines libres (ou à libre déviation ou à veines limites), et la (*fig.* 547), à des turbines à veines forcées (ou à réaction ou en forcement). Les abscisses correspondent à l'ouverture du distributeur, soit à Ω sections effectives du débit des aubages fixes, dont les valeurs successives, depuis la position de fermeture aux recouvrements, s'il y a lieu, jusqu'au maximum, forment la base des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déterminations concernant les caractéristiques. Les désignations de ces dernières sont inscrites sur les figures mêmes avec les lettres conventionnelles. Le débit Q résulte des jaugeages effectués pendant l'essai auquel la



TURBINES A VEINES LIBRES

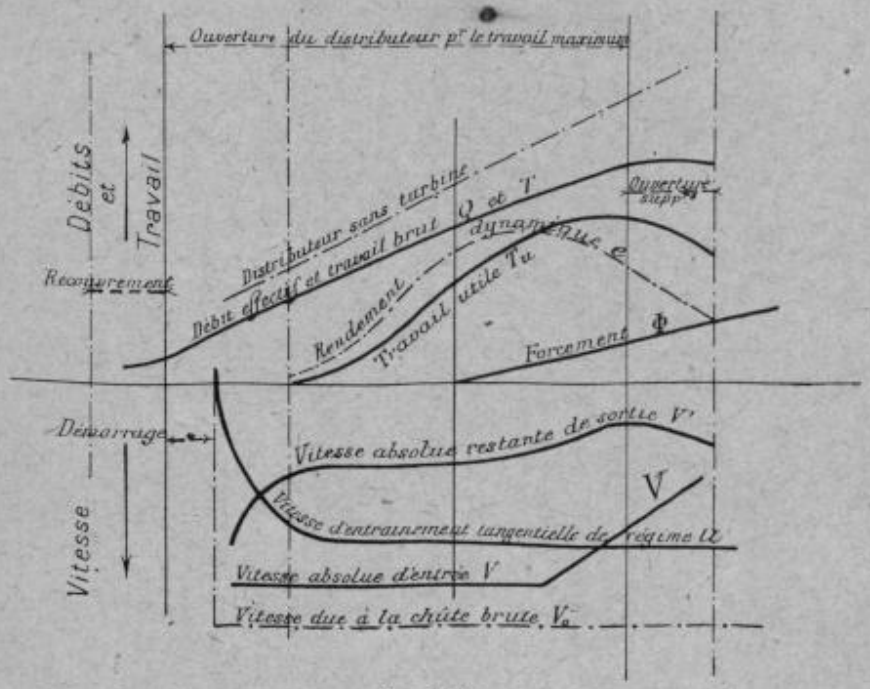
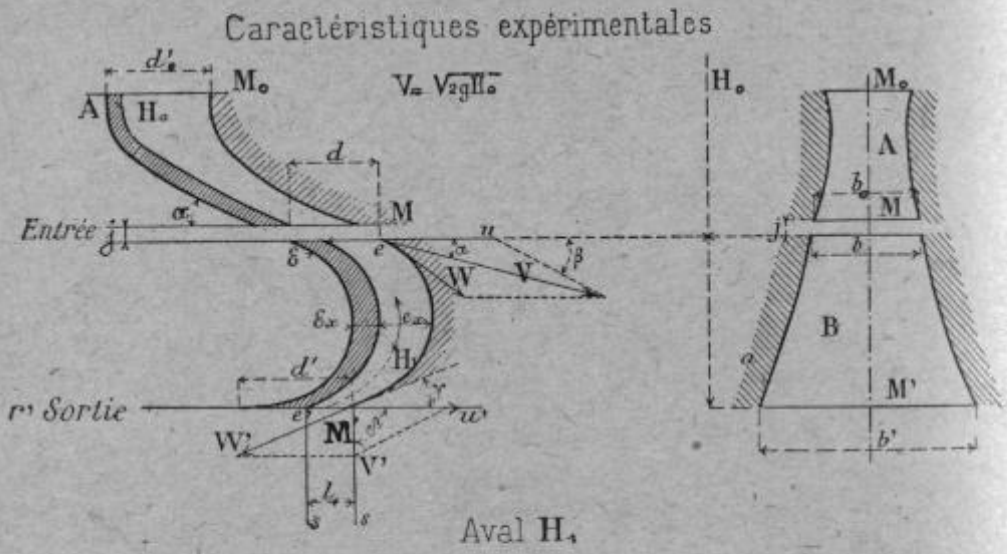


FIG. 546.

turbine est soumise. Le travail utile T_u, développé par la turbine, est donné soit par un frein dynamométrique approprié, soit par un dynamomètre enregistreur *ad hoc*. U est la vitesse tangentielle d'entraînement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moyenne de la couronne mobile de la turbine à l'entrée ; c'est la vitesse de régime fixée par l'*installation industrielle*.



TURBINES A VEINES FORCÉES

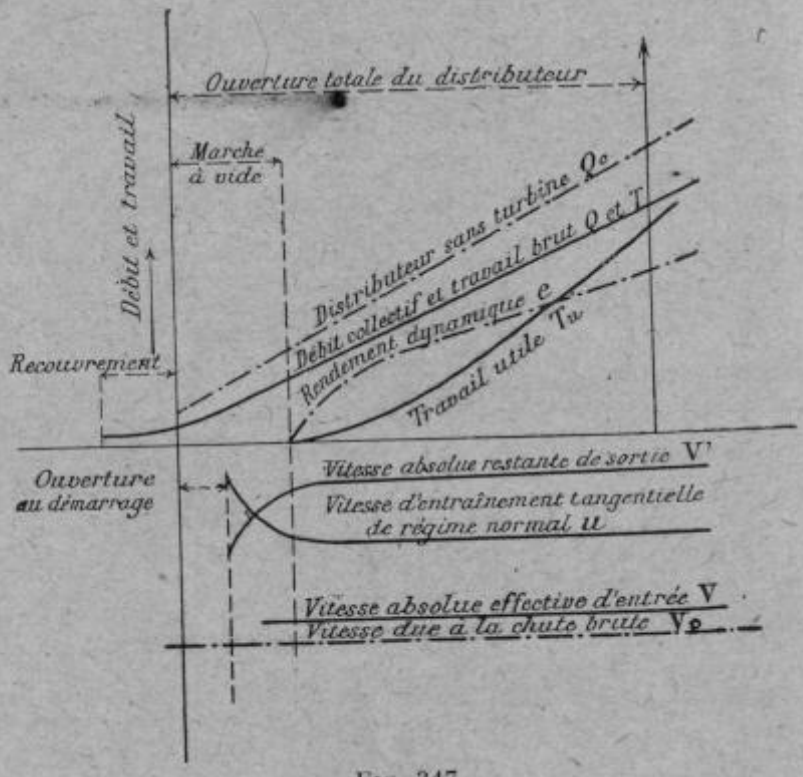


FIG. 347.

V_0 est la vitesse d'écoulement de l'eau due à la chute brute donnée par $V_0 = \sqrt{2gH_0}$; V est la vitesse absolue fournie par: $V = \frac{Q}{K\Omega}$.

V′ est la vitesse absolue restante de l'eau à la sortie de la couronne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mobile, dont la détermination résulte directement de l'observation de l'angle des filets liquides à la sortie par la construction géométrique suivante (*fig.* 522). En un point M′ on trace l'angle γ de construction de l'aubage mobile à la sortie, ainsi que l'angle δ observé des filets liquides sortant de la turbine.

FIG. 522.

Si on porte U′, vitesse d'entraînement à la sortie qui résulte du nombre de tours de la turbine et du rayon, le parallélogramme des vitesses U′, W′ et V′ s'ensuit, qui définit par conséquent les inconnues V′ et W′. L'angle δ doit être déterminé expérimentalement. Une valeur de cet angle, voisine de 90°, est celle qui réduit la vitesse restante V′ à son minimum ou à des valeurs approchantes.

162. Installations pour les essais de turbines. — Les essais de rendement des turbines se font assez souvent à l'endroit même où elles sont installées, mais cela nécessite des conditions telles que les résultats sont pour ainsi dire illusoires. Ainsi la mesure des débits, pour de gros volumes, si l'on veut se rendre compte à 1 0/0 ou 2 0/0, nécessite des opérations précises et d'une grande minutie ainsi que des installations subordonnées à une exécution assez longue et toujours délicate. Il en va de même pour les mesures du régime de marche de la turbine. En raison de ces difficultés on a été amené à créer des stations d'essais comme celles dont nous allons donner une description succincte. En Amérique, la Société des Forces hydrauliques de Holyoke a créé sur la rivière Connecticut une chute dont la force, utilisée par une grande quantité de turbines, est louée à des industriels de la ville. A leur réception à l'usine et avant leur installation définitive, les récepteurs hydrauliques sont essayés dans un bief d'épreuve, où chacun d'eux subit 30 ou 40 épreuves dans des conditions variées. En outre la Société, en vue d'utiliser son bief d'épreuve, le met à la disposition des particuliers pour l'essai de leurs turbines. Le déversoir, avec écoulement en mince paroi, sans contractions latérales, est aménagé pour fonctionner avec des débits et charges variables. Un dispositif ingénieux permet l'entrée de l'air sous la nappe déversante, laquelle ne subit ainsi aucune des déformations connues sous le nom de nappes déprimées ou nappes adhérentes.

La puissance produite est mesurée par un frein de Prony. La simultanéité des observations, portant sur la hauteur de chute, la charge, sur le déversoir, les poids placés sur le plateau du frein, est obtenue au moyen d'un avertisseur électrique sonnant auprès des trois observateurs.

L'installation est remarquablement complète et présente toute garan-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tie : Le conduit A (*fig.* 549), muni d'une vanne à son entrée, amène l'eau dans une première chambre B, renfermant les vannes G. L'eau passe ensuite dans une seconde chambre C et arrive dans la partie D, destinée à recevoir les turbines à éprouver. E est le canal de fuite. Le tuyau F sert à alimenter une petite turbine dont l'enveloppe est figurée en H et qui fournit

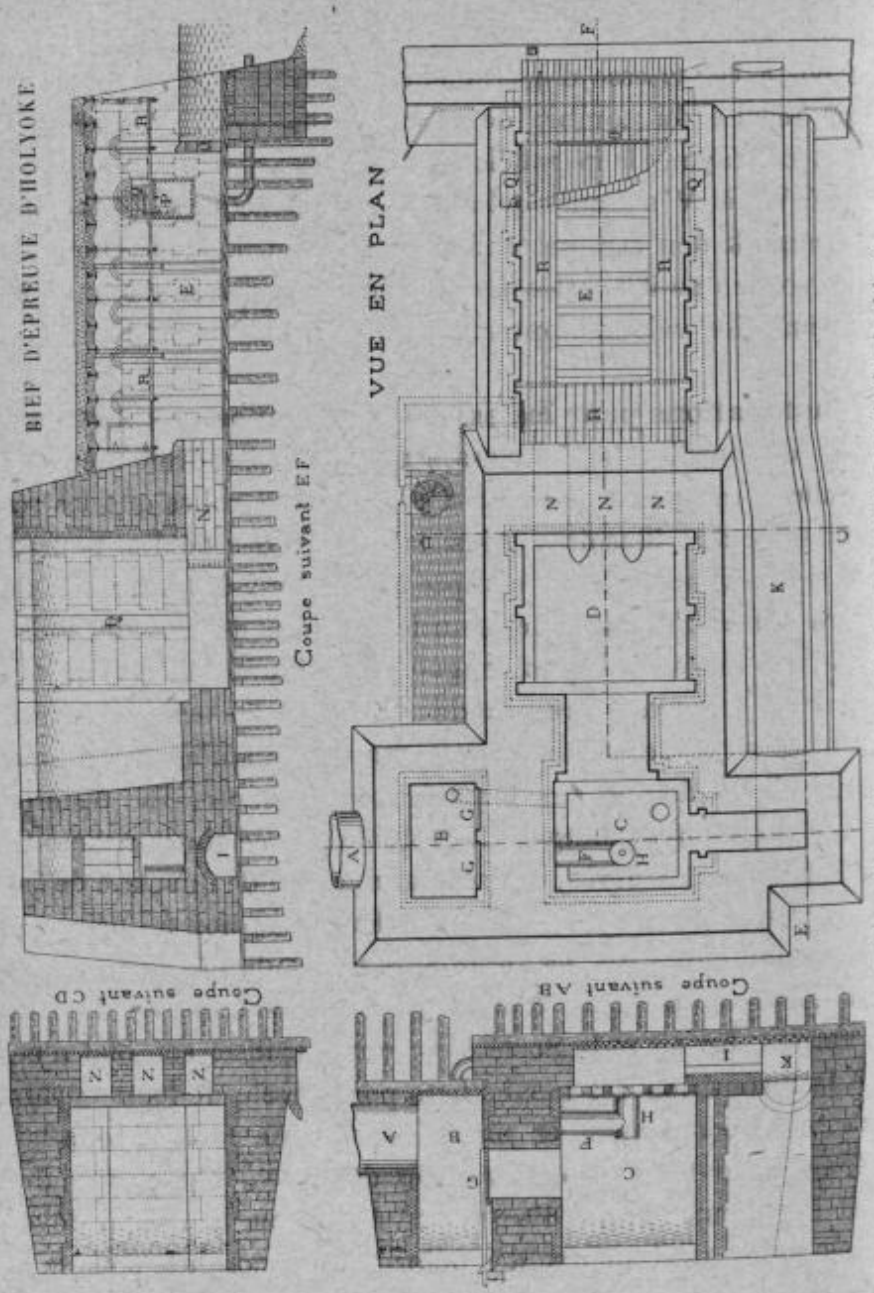


Fig. 549. — Bief d'épreuve d'Holyoke pour les essais des turbines.

de la force motrice à un atelier de réparations annexé au bief d'épreuve.

La chambre C reçoit à volonté des plateaux dans deux logements verticaux pour créer un trop-plein dans le cas où l'on opère avec des turbines de peu de hauteur de chute. (La hauteur de chute peut varier de $1^{m},22$ à $5^{m},49$). L'ensemble du dispositif brise le courant de l'eau et amène celle-ci.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si on prend une turbine de puissance P débitant normalement avec une aire de passage ω, un volume Q sous une chute H, on aura :

$$Q = m\omega\sqrt{2gH} \quad \text{et} \quad P = QH = m\omega\sqrt{2g}\,H^{\frac{3}{2}}$$

Les hautes eaux réduisant la chute à h, le volume débité et la puissance deviennent :

$$Q = m\omega\sqrt{2gh} \quad \text{et} \quad p = qh = m\omega\sqrt{2g}h^{\frac{3}{2}}$$

étant admis que le débit varie proportionnellement à la racine carrée de la chute, quoique le nombre de tours de la turbine reste inchangé.

Le jaugeage de l'eau se fait sur le déversoir O dont la crête est formée par une lame en fer forgé, de telle sorte que l'écoulement se fait en mince paroi.

La détermination des charges sur le déversoir se fait à $2^m,50$ environ de la crête, au moyen d'un tube P placé dans une niche Q à parois étanches, dans laquelle l'observateur peut très commodément relever les mesures nécessaires, la surface de l'eau se trouvant à hauteur de sa poitrine. La crête du déversoir est de la largeur du canal : $6^m,10$; les contractions latérales sont ainsi supprimées ; mais le déversoir n'est utilisé dans toute sa largeur que lorsque le débit dépasse $3^{m3},360$. Quand le volume est plus faible, on réduit la largeur de l'appareil ; la nappe est alors contractée des deux côtés et, pour que la contraction soit suffisamment complète, on ne réduit jamais le déversoir de moins de $0^m,915$ de chaque côté. La hauteur de la crête au-dessus du fond est de $1^m,83$. La puissance produite est mesurée par un frein de Prony ; elle varie d'un cheval à un peu plus de 200 chevaux.

La formule employée à Holyoke pour déterminer le volume écoulé en déversoir est celle presque universellement adoptée aux États-Unis :

$$Q = 0{,}4152\sqrt{2g}\,(L - 0{,}10nH)\,H^{\frac{3}{2}};$$

Q, volume débité ; L, largeur du déversoir ; n, nombre de contractions latérales ; H, charge sur le déversoir. Cette formule cesse d'être applicable quand H est plus grand que $\frac{L}{3}$.

D'après M. A. Blanchet, il résulterait :

1° Pour un déversoir sans contractions latérales :

a) Que les débits calculés par la formule américaine sont inférieurs à la réalité, dont la formule de M. Bazin donne une évaluation plus exacte, et notablement en dessous des volumes calculés d'après les formules les plus usitées en France ;

b) Qu'il résulte de ce fait que les rendements des récepteurs, obtenus par l'application de la formule américaine, accusent des écarts désavantageux pour les turbines françaises, toutes choses égales d'ailleurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Pour un déversoir avec contractions latérales :

Que là aussi, mais avec une influence moins grande, le calcul est fait en Amérique de telle sorte qu'il favorise un bon rendement.

L'École technique supérieure de Berlin possède une installation d'essais qui se compose d'un canal d'amenée, d'une chambre d'eau disposée pour faciliter l'installation et le remplacement des turbines, d'un canal de fuite de section constante sur une longueur de 10 mètres seulement, et des appareils permettant d'effectuer les mesures nécessaires.

Le niveau de l'eau dans les canaux d'amenée et de fuite est mesuré au moyen de flotteurs et la hauteur de chacun d'eux est enregistrée automatiquement sur une feuille de papier enroulée sur un tambour tournant à une vitesse constante et réglable. Devant ce tambour se trouvent encore quatre traceurs qui inscrivent l'un les secondes, un autre les tours de la turbine. Les deux derniers servaient, au début, à enregistrer les nombres de tours de deux moulinets ; actuellement l'un d'eux est employé pour inscrire les chemins parcourus par un écran roulant sur des rails le long du canal de fuite.

Pour la mesure du débit de la turbine, on a d'abord soigneusement étudié les variations d'écoulement dans le canal d'amenée aux différents points d'une de ses sections, et essayé de déterminer dans quelles positions doivent être placés les moulinets pour mesurer directement la vitesse moyenne.

Ces essais n'ont toutefois pas donné des résultats suffisamment constants de sorte qu'on est obligé, à chaque essai, de procéder à la mesure directe de la vraie vitesse en un grand nombre de points de la section ou de mesurer la vitesse moyenne à l'aide d'un écran mobile. La première de ces mesures peut se faire avec une célérité suffisante en pratique au moyen de trois moulinets employés simultanément et d'un appareil d'enregistrement spécial.

Pour la seconde, qui est encore plus rapide, on a installé, dans la partie de section constante du canal de fuite, un écran mobile obturant toute la section de ce canal et se déplaçant avec une vitesse égale à la vitesse moyenne de l'eau.

Le laboratoire hydraulique Pierre-le-Grand de l'Institut Polytechnique à Pétrograd peut mettre en jeu une puissance d'une centaine de chevaux sous des hauteurs de chute de 0 à 5 mètres, 14 mètres et 35 mètres. On y essaie des turbines de petite force. L'eau arrive au haut d'une tour de 35 mètres au moyen de pompes centrifuges et d'une pompe à rouleaux.

La station d'essais de la maison Voith comprend une installation pour turbines à chambre ouverte (chute de 1 à 5 mètres, débit de 0 à 8.000 litres-seconde) et une installation pour turbines à pression (chute de 100 mètres, débit de 0 à 500 litres-seconde). On peut essayer des turbines jusqu'à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

500 HP. Dans ce dernier cas, on peut faire varier la hauteur de chute par étranglement de la colonne d'eau, pour les fractions de 10 à 100 mètres. Les mesures de puissance utile des turbines se font au moyen de frein de Prony et de génératrices étalonnées ; celles de débit par les méthodes du déversoir et de l'écran mobile et celles de pression à l'aide d'indicateurs de niveau et de manomètres.

En France, il existe une station d'essais au conservatoire des Arts et Métiers, pour des turbines jusqu'à 150 HP. La mesure des débits s'effectue par un compteur Venturi et par des déversoirs et les turbines qui peuvent être freinés par une dynamo.

La station de Santhia (Lombardie) est établie sur le canal d'Ivrea, où on a pu facilement établir le bassin de jaugeage et les dérivations nécessaires ; l'eau s'écoule dans le canal Cavour en contre-bas de 7 mètres du canal d'Ivrea. Les dérivations permettent d'avoir des débits de 12 mètres cubes, 3 mètres cubes et 300 litres. Elles peuvent alimenter un bassin de jaugeage d'une capacité de 1.750 mètres cubes ; avec un débit de 12 mètres cubes, ce bassin est rempli en 145 secondes et l'on peut, dans ce cas, obtenir, dans les expériences, une précision d'environ 1 0/0. Un château d'eau permet de faire des mesures sur le débit de l'eau s'écoulant sous une pression de 5 mètres.

La manœuvre des vannes devait être rapide et précise pour permettre d'obtenir l'exactitude nécessaire dans les expériences ; on a eu recours à l'air comprimé à 7 atmosphères.

A titre de document, nous mentionnerons les résultats des essais effectués sur les fameuses turbines de 12.000 HP de l'usine de Svaeegfos (Norvège), sous la direction du professeur Reichel.

	HAUTEURS DE CHUTE EN MÈTRES	QUANTITÉS D'EAU EN MÈTRES CUBES	TOURS PAR MINUTE	RENDEMENT EN HP	EFFET UTILE 0/0	
					OBTENU	GARANTI
1	44,867	14,557	244	7.395	84,94	81
2	44,682	18,393	242,2	9.440	86,16	78
3	44,204	23,598	268,2	11.215	80,65	76
4	45,161	12,001	244	6.712	79,07	
5	46,500		250	11.750		

VARIATIONS DE CHARGE		AUGMENTATION MAXIMA EN 0/0 du nombre de tours		AUGMENTATION MAXIMA EN 0/0 de pression	
DE	A				
		mesurée	garantie	mesurée	garantie
7.600 kw = 11.000 HP	0	15,5	»»	39,5	50
6.300 kw = 8.000 HP	0	10	12	28,4	»»
4.100 kw = 6.000 HP	0	6	»»	26,4	»»
2.700 kw = 4.000 HP	0	5	5	23,6	»»
1.500 kw = 2.300 HP	0	2,5	2,5	13,3	»»
0	2.900 kw = 4.000 HP	— 5,4	— 6	— 10,6	»»
0	1.400 kw = 2.150 HP	— 2,5	— 3	»»	»»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

163. Nouvelles installations d'essais préconisées en France. — a) *Méthode Ribourt au moyen d'une chute artificielle à récupération.* — Soit un moteur hydraulique de puissance P en chevaux effectifs, dont le rendement mécanique est représenté par φ, lequel est à déterminer. La puissance brute équivalente est, par exemple, exprimée par :

$$\frac{1}{\varphi} 75\,P = 1.000QH,$$

en désignant par Q le volume d'eau en mètres cubes à débiter par seconde et par H la hauteur effective de la chute d'eau en mètres. Le volume Q est restitué d'une manière continue de l'aval à l'amont de la turbine pendant l'essai, dans les conditions suivantes.

Une partie (mQ) est refoulée par une pompe actionnée par la turbine même à expérimenter ; l'autre partie [$Q(1 - m)$] l'est par une autre pompe commandée par un moteur auxiliaire dans la proportion strictement nécessaire et réglée au prorata de (mQ), soit automatiquement, soit par l'opérateur, suivant la marche de l'essai.

En supposant à la pompe actionnée par la turbine une utilisation dynamique fixée par φ_a, le débit en est caractérisé par :

$$1.000mQH = 75\varphi_a P_a,$$

P_a étant la puissance motrice correspondante à sa fonction, laquelle est précisément celle développée par la turbine en essai, d'où :

$$75P = \frac{1}{\varphi_a} = 1.000mQH \quad \text{et} \quad 1.000mQH = \varphi_a \varphi . 1.000QH.$$

Finalement : $m = \varphi_a \varphi$ caractérise le débit de la pompe en question. L'autre pompe doit fournir seulement un débit effectif donné par l'expression $(1 - \varphi_1 \varphi)$ Q, dont la puissance motrice est à affecter d'un coefficient de rendement analogue φ_2, pour en fixer la dépense de marche.

Les débits effectifs, aux divers moments de l'expérience, sont donnés par la lecture de simples diagrammes obtenus au moyen de moulinets volumétriques totalisateurs, actionnant chacun un cinémomètre enregistreur. Le facteur H de la puissance brute (QH) est fourni par un manomètre de précision combiné avec un cinémomètre et enregistré sur le diagramme même du débit. Pour déterminer les caractéristiques de la turbine en essai à différents degrés de puissance, l'appareil enregistreur est complété par un limnimètre, qui marque sur le diagramme principal les ordonnées proportionnelles aux ouvertures du distributeur de la turbine.

Un appareil désigné sous le nom d' « hydro-dynamomètre » ou manchon

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'accouplement reliant les deux arbres de rotation de la turbine motrice et de sa pompe, sert à déterminer le couple moteur effectif développé par la turbine, en mettant en pression proportionnelle au couple moteur des capacités closes remplies de liquide et communiquant en permanence, pendant la rotation du système, avec le cinémomètre enregistreur de précision. On obtient ainsi un diagramme continu, dont les ordonnées sont fonction du couple moteur transmis, lesquelles, combinées avec celles du diagramme d'un cinémomètre complétant cet appareil et enregistrant la vitesse de rotation du moteur, donnent ainsi les facteurs de la puissance utile développée : FR et ω, F étant l'effort utile au rayon R d'action des pièces d'attelage de l'accouplement, et ω la vitesse angulaire du système.

Pour la réalisation du projet de M. Ribourt, il faudrait disposer d'un important jeu de pompes de toutes puissances et de toutes pressions pour que l'installation ait un caractère réellement pratique.

b) *Laboratoire hydro-technique Barbillon.* — M. Barbillon a montré qu'on

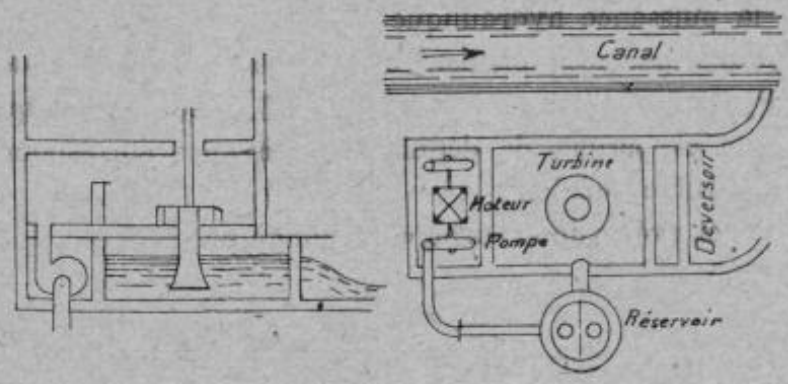


FIG. 550.

était autorisé théoriquement à essayer sous une chute H une turbine pour fonctionner sous une chute H_1 quelconque, quand l'on peut disposer d'un débit Q suffisant. Pratiquement le dispositif préconisé par M. Barbillon devait comporter une station d'essais pour turbines à haute chute et une station d'essais pour turbines à basse chute. Pour réaliser le système on aurait installé : 1° le radier du canal de fuite de l'installation à peu près au niveau de l'eau dans le canal d'alimentation (ce canal de fuite pouvait avoir 15 à 20 mètres de long et 8 mètres de large, avec déversoir à son extrémité aval) ; 2° à $1^m,50$ au-dessus de ce canal de fuite, le plancher de la huche d'essais, lequel devait servir de plate-forme d'essais.

La huche elle-même aurait eu des murs de 8 mètres environ de hauteur et aurait été divisée en deux compartiments (*fig.* 550). Les pompes refoulaient l'eau dans le premier, et de là au deuxième compartiment en pas-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sant en déversoir par dessus une cloison ; pour éviter les remous, les turbines à essayer auraient été placées dans le second compartiment ; enfin un canal spécial menait le trop-plein au canal d'alimentation.

Pour l'essai des turbines à haute chute, la conduite forcée débouchait dans l'un des bajoyers de la huche, ce qui permettait un raccordement facile aux tubulures des turbines. Au-dessus de la huche se trouvait le plancher de la salle des essais au frein.

Ce projet datant de 1909 avait été présenté à la chambre syndicale des Forces hydrauliques. Depuis M. Barbillon a élargi son programme en préconisant une installation qui permettrait de faire des essais réels de presque toutes les turbines actuelles, ainsi que la vérification préalable des appareils servant aux mesures de rendement dans toutes les conditions possibles de marche.

L'installation permettrait de réaliser des débits jusqu'à 10.000 litres-seconde et des pressions jusqu'à 50 atmosphères.

Schématiquement la disposition se présente comme suit : la turbine à essayer étant alimentée à la pression normale convenable par une pompe, on mesure la puissance hydraulique P_1 fournie en eau à cette turbine, laquelle entraîne par accouplement direct une génératrice étalonnée. La puissance P_3 rendue par cette génératrice est mesurée à chaque instant avec précision et permet de déduire la puissance correspondante sur l'arbre de la turbine, soit P_2.

Le rendement précis de la turbine est donné par :

$$\rho = \frac{P_2}{P_1}$$

La pompe étant actionnée par un moteur électrique, celui-ci absorbe à ses bornes une puissance P_0, constituée par P_3, à laquelle le réseau fournit l'appoint nécessaire tel que :

$$P_1 + P_2 = P_0$$

Admettons les rendements suivants : moteur électrique, 0,92 ; pompe, 0,85, turbine 0,80 et la machine électrique, 0,92.

On a :

$$P_3 = P_0 \times 0{,}92 \times 0{,}85 \times 0{,}80 \times 0{,}92 = 0{,}58\ P_0$$

D'où :

$$P_1 = P_0 - 0{,}58\ P_0 = 0{,}42\ P_0$$

Et si la turbine essayée développe 2.000 HP à pleine charge, on a :

$$P_0 = \frac{2000}{0{,}80 \times 0{,}85 \times 0{,}92} = 3200\ \text{HP}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Et enfin $P_4 = 0{,}42 \times 3.200 = 1.345$ HP seulement, soit 1.000 kilowatts.

Pratiquement les pompes seraient du type à piston, à longue course, marchant par groupes de trois.

Pour les turbines à pression, le laboratoire serait muni d'un jeu complet de tous diamètres des tubulures d'alimentation, prévus pour la pression maximum. Les récepteurs seraient boulonnés au-dessus d'un canal de fuite et orientés d'une façon convenable, canal de fuite assez profond pour faire l'essai des turbines à aspiration.

Le canal de fuite aboutirait à une chambre d'eau dans laquelle se ferait l'aspiration des pompes, la même eau servant continuellement dans le circuit fermé : pompe-turbine, canal de fuite.

Pour les turbines de basse chute, une chambre d'eau serait aménagée spécialement au-dessus du canal de fuite et à une hauteur convenable et avec tous dispositifs nécessaires.

Les génératrices de charge (à courant continu de préférence), dont les puissances seraient de 10, 50, 100, 500, 1.000 et 1.500 kilowatts, seraient capables de fonctionner à toutes les vitesses à envisager pour les différentes turbines. On connaîtrait leurs courbes de rendement en fonction de la puissance pour chacune de ces vitesses, une fois pour toutes, sauf vérification de temps à autre.

On effectuerait au wattmètre les mesures de P_3, d'où la puissance utile sur l'arbre de la turbine.

Pour chaque régime, bien établi, le débit exact des turbines serait indiqué aux pompes et la pression, par un manomètre branché à l'amont immédiat de la turbine. L'organisation permettrait l'étude technique complète des turbines (caractéristiques mécaniques, emballement, etc.).

Une telle installation, supposée à Grenoble, la capitale de la houille blanche, rendrait les plus grands services tant aux constructeurs qu'aux industriels et aiderait au développement de l'industrie de la Houille blanche.

c) *Laboratoire d'hydraulique de l'Institut Electrotechnique de Toulouse.*— Dans un réservoir de 80 mètres cubes, une pompe centrifuge aspire l'eau pour la refouler dans un réservoir supérieur, de 20 mètres cubes, situé à 20 mètres de hauteur. Cette eau alimente trois turbines et retourne au réservoir inférieur. La conduite forcée d'alimentation des turbines possède un compteur d'eau Venturi, muni de deux manomètres à mercure.

Les turbines alimentées sont : 1 turbine Francis (Gros Singrün) de 92 litres fonctionnant sous 17 mètres de chute ; 1 turbine à vannage cloche de 134 litres, sous 17 mètres également ; 1 roue Pelton, 28l,5 et 14 mètres de chute.

Les mesures de débit des turbines Francis sont faites à l'aide du Venturi et la turbine chargée au moyen d'une dynamo-frein.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La roue Pelton est munie d'un frein de Prony à circulation d'eau intérieure.

Le canal de fuite a un déversoir en minces parois dont les dimensions peuvent être facilement modifiées. Avant le déversoir sont placés des dispositifs spéciaux : flotteurs, cellules amortissantes, destinés à amortir les oscillations de la surface libre. Dans le canal libre, on peut placer des tubes Pitot et des moulinets de Voltmann.

Toutes les méthodes de mesure de débit, y compris celle chimique peuvent y être réalisées. Enfin le laboratoire est outillé pour faire des mesures de toutes sortes.

d) *Station d'études de turbines de Riouperoux* (Isère). — L'installation comprend une prise d'eau faite sur l'une des conduites d'amenée aux tur-

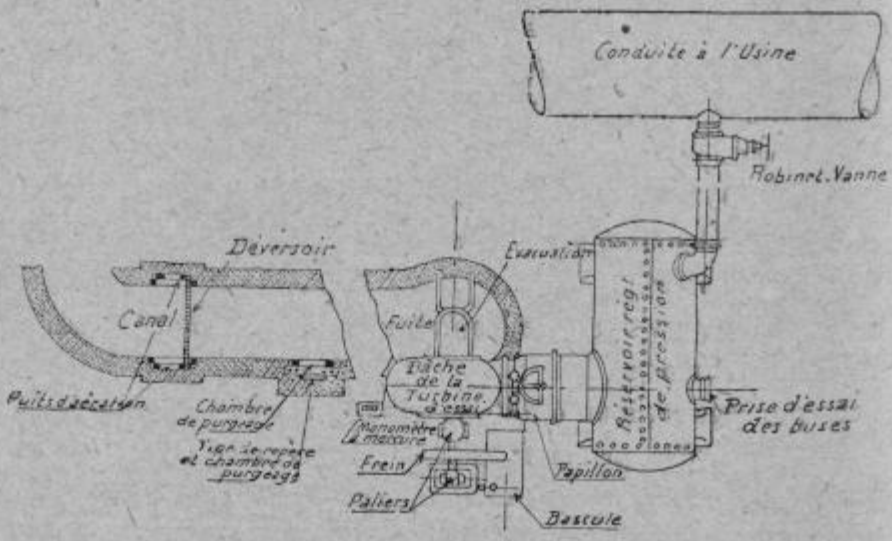


FIG. 551.

bines de l'usine, en un endroit où la pression est de 30 mètres. Un robinet-vanne (*fig.* 551) permet de réduire cette hauteur de chute à volonté, et pour régulariser la pression, l'eau, au lieu d'arriver directement à la bâche d'essai, traverse d'abord un réservoir spécial. Sur celui-ci on peut brancher des buses et des injecteurs de turbines, ce qui permet d'étudier la forme des jets. La puissance des turbines essayées est effectuée au frein de Prony dont le bras repose sur une bascule. La pression à l'axe de la bâche est assurée au moyen d'un manomètre à mercure à bec libre.

Les débits sont mesurés au moyen d'un déversoir en mince paroi, du type décrit par Bazin dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de 1888 et 1896.

164. Méthode d'essai chimique. — Soit un réservoir contenant un poids inconnu P d'eau, et dans lequel on introduit un poids déterminé *p*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une solution concentrée d'un sel convenablement choisi. Appelons $\frac{m}{n}$ le degré de concentration de cette solution. La quantité p de solution contient :

$$\frac{p_m}{m+n} \text{ de sel} \quad \text{et} \quad \frac{p_n}{m+n} \text{ d'eau.}$$

Cette quantité de sel introduite dans la masse va, en se diluant, donner une nouvelle solution de concentration $\frac{a}{b}$ que l'on peut déterminer par l'analyse. Le rapport $\frac{a}{b}$ une fois connu, il est facile de déduire le poids P.

Ce poids P est donné par la relation :

$$P = \frac{p}{m+n}\left(\frac{mb}{a} - n\right) \text{ kilogrammes.}$$

M. Louis Charles, qui a exposé cette méthode, pense qu'il serait possible de l'appliquer au jaugeage des cours d'eau et, en particulier, à la mesure du débit des turbines. Dans ce cas, on injecte par seconde la quantité de solution concentrée à l'aide d'un appareil approprié, et à une distance très faible des aubes, dans la conduite d'amenée d'une turbine débitant P kilogrammes d'eau par seconde ; alors le rapport $\frac{a}{b}$ peut se déterminer par l'analyse chimique, en prélevant des prises d'eau à la sortie de la turbine. Ce rapport une fois connu, on détermine comme ci-dessus le poids P de l'eau traversant la turbine par seconde.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IX

RÉGLAGE DES TURBINES

Dans beaucoup d'usines et notamment dans les stations hydroélectriques, il est nécessaire de conserver aux turbines une vitesse de rotation constante. Deux moyens se présentent : régler à la main l'ouverture du vannage distributeur selon la puissance absorbée ou bien adjoindre à ce vannage un régulateur chargé d'en régler automatiquement l'ouverture. La seconde disposition a l'avantage de ne pas nécessiter la présence continuelle d'un surveillant.

165. Rôle des régulateurs de vitesse. — On sait que le rôle d'un régulateur de vitesse est de corriger le plus rapidement possible toute perturbation due à un écart entre la puissance et la résistance, en limitant au minimum l'amplitude de variation de la vitesse angulaire. Dans les régulateurs pour moteurs hydrauliques, la manœuvre des vannes exige des efforts si considérables que l'action directe du régulateur est généralement impossible, et qu'il devient indispensable d'interposer entre le vannage et l'appareil centrifuge ou tachymètre un mécanisme spécial dont la force est empruntée au moteur même ou à une source extérieure d'énergie. En ces conditions, l'effet du régulateur dépend beaucoup plus de l'inertie des boules que de l'action plus ou moins prolongée et plus ou moins énergique du mécanisme de commande du vannage.

L'importance du réglage de la vitesse des turbines s'est surtout fait sentir depuis leur application à la conduite des dynamos, et en particulier, des alternateurs, car dans ces dernières machines, il faut maintenir constante la tension aux bornes ainsi que la fréquence du courant, laquelle est proportionnelle à la vitesse. Nous avons dit que la constance de la vitesse exige qu'à chaque instant la puissance de la turbine soit égale à la somme des résistances à vaincre. En d'autres termes, il faut que le produit du rendement de la machine, dans les conditions spéciales où elle travaille, de son débit et de la hauteur de chute effective soit constamment égal à la somme des résistances. En agissant sur le vannage d'une turbine on fait varier, suivant le genre de turbine, soit l'une, soit plusieurs des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quantités que nous venons d'indiquer, et par suite leur produit. C'est donc cet organe qu'il faut mettre en action pour opérer le réglage.

Mais les régulateurs directs ont un défaut qu'ils communiquent naturellement aux servo-moteurs ; l'ensemble machine-régulateur est d'autant moins stable que la machine est moins chargée. De patientes recherches faites sur ce point spécial ont permis aux hydrauliciens de construire des régulateurs d'une stabilité parfaite et d'une très grande sensibilité (1).

On distingue les régulateurs mécaniques, les régulateurs hydrauliques, les régulateurs électriques, les régulateurs de pression, les régulateurs absorbeurs, les régulateurs de niveau, et les hydrotachymètres.

166. Équation du réglage de la vitesse des turbines (2). — Le réglage s'opère suivant une loi complexe que M. Léauté a tout particulièrement étudiée et qui en a donné une interprétation graphique. Mais comme la vitesse de régime n'a pas constamment la même valeur après chaque action du modérateur, on a recours à des compensateurs qui sont des correcteurs de l'action des modérateurs. Dans les compensateurs tachymétriques, on fait généralement le temps comme seconde variable ; on est ainsi conduit à tolérer des écarts momentanés dans la vitesse. On peut également faire intervenir comme seconde variable la charge du groupe électrogène mesurée à l'aide d'un wattmètre. Le réglage électromécanique peut convenir pour le réglage de la vitesse des turbines, auquel cas il faut prévoir une petite génératrice auxiliaire donnant une tension proportionnelle à la vitesse. Les avantages qu'il présente dans ce cas sur les régulateurs tachymétriques sont la suppression de tous les effets perturbateurs qu'entraînent les frottements et l'inertie propre du régulateur, des oscillations grâce à l'action énergique et modérable à volonté de l'asservissement magnétique, la réalisation du réglage à la vitesse rigoureusement constante grâce à la compensation qui se produit automatiquement et instantanément dès que l'asservissement magnétique cesse d'agir, l'augmentation considérable de l'énergie mise en jeu par le régulateur, enfin la possibilité de faire du réglage initial et d'imposer à tous les groupes en service le même degré d'admission, d'où économie dans l'installation et suppression du pompage. Soient : Ω la vitesse angulaire normale ; M le couple maximum pour la

(1) Dès 1873, le grand constructeur J. Farcot avait réalisé pratiquement un relais-moteur asservi aux indications du tachymètre pour la manœuvre des organes de réglage des machines marines. Il avait aussi signalé leur adoption aux récepteurs hydrauliques.

(2) *Le réglage des groupes électrogènes*, par M. L. Routin (*la Lumière électrique*, 40, rue des Ecoles, Paris).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pleine ouverture et la vitesse normale; $\frac{e}{E}$ le degré d'ouverture défini par le rapport du déplacement e de la vanne à sa course totale (E); ω la vitesse angulaire; U la vitesse angulaire maximum que peut atteindre la turbine lorsque la charge est nulle.

On peut admettre que le couple moteur m est à très peu près fonction linéaire de la vitesse et qu'il est, d'autre part, proportionnel au degré d'ouverture de la vanne.

On peut donc poser :

$$m = \frac{e}{E}(a + b\omega).$$

Les constantes a et b se déterminent par la considération ci-après ; pour $\omega = U$, on doit avoir : $m = 0$; et pour $\omega = \Omega$, $m = M\frac{e}{E}$.

En faisant ces substitutions, on obtient les deux équations :

$$0 = \frac{e}{E}(a + bU) \quad \text{et} \quad M\frac{e}{E} = \frac{e}{E}(a + b\Omega)$$

qui donnent :

$$a = -\frac{MU}{\Omega - U}; \qquad b = \frac{M}{\Omega - U}.$$

En remplaçant a et b par ces valeurs, il vient :

$$m = M\frac{e}{E}\frac{U - \omega}{U - \Omega}. \qquad (1)$$

La puissance P fournie par une turbine peut donc se mettre sous la forme :

$$P = m\omega = M\frac{e}{E}\frac{U - \omega}{U - \Omega}\omega.$$

Pour une ouverture déterminée du vannage, la valeur de ω qui correspondrait théoriquement à la puissance maximum est donnée par l'équation : $\frac{dP}{d\omega} = 0$. On trouve ainsi ; $\omega = \frac{U}{2}$.

En réalité, la loi de variation de m, en fonction de ω, est plus complexe ; mais on peut, néanmoins, toujours appliquer, au voisinage de la vitesse normale, la formule (1), à condition de remplacer la vitesse d'emballement par une vitesse fictive que nous allons définir.

Si l'on détermine expérimentalement les valeurs du couple moteur en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fonction de la vitesse, pour la pleine admission et si l'on reporte ces résultats sur un graphique, on trouve une courbe telle que $A_1 B_1$ (*fig.* 552).

Pour une vitesse ω, la puissance P fournie par la turbine est représentée par la surface du rectangle $O\omega MN$.

Si l'on représente graphiquement les valeurs de P, en fonction de ω, on trouve une courbe d'allure parabolique telle que OGB.

Théoriquement, on devrait admettre pour vitesse de régime la valeur Ω de la vitesse pour laquelle la courbe qui représente P admet une tangente horizontale ; mais, pratiquement, on peut choisir une valeur quelque peu différente, car la fonction P varie très lentement tant qu'on reste au voisinage de Ω.

Désignons par H le point où la verticale correspondant à Ω coupe la courbe A_1B_1 qui représente le couple moteur et considérons la droite AHB,

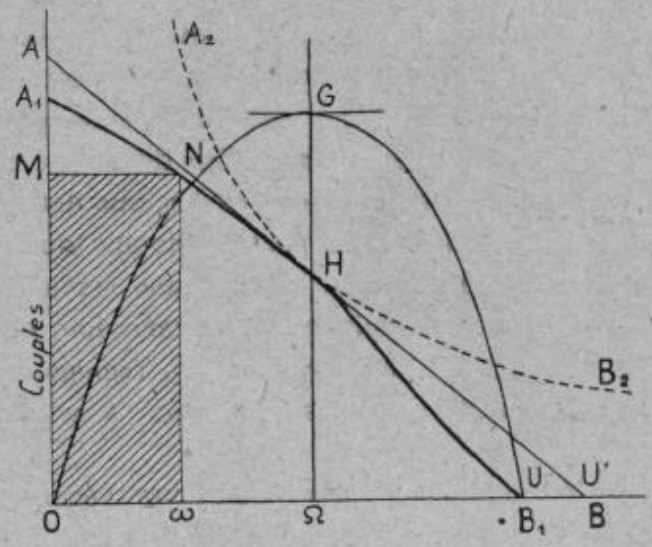


FIG. 552.

tangente en H à la courbe A_1B_1 ; la droite AB coupe l'axe des vitesses en un point qui détermine la vitesse fictive d'emballement U′ qui doit figurer dans la formule (1).

Dans sa remarquable étude, M. Léauté a admis que, pour un degré d'ouverture déterminé, le couple moteur pouvait être considéré comme inversement proportionnel à la vitesse. Si l'on rapproche cette hypothèse de celles qui nous ont servi pour l'établissement de la formule (1), on voit que $\left(\text{pour } \Omega = \frac{U'}{2}\right)$ ceci revient à considérer l'hyperbole A_2B_2 au lieu de sa tangente AB ; il est évident que si la vitesse ne s'écarte pas trop de sa valeur normale, les deux expressions peuvent être considérées comme pratiquement équivalentes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

167. Régulateurs mécaniques. — Ainsi que nous venons de l'expliquer, le régulateur à boules est insuffisant pour vaincre directement la résistance d'un vannage quelconque. Pour obtenir ce résultat, on interpose entre le levier du manchon et le vannage un appareil mécanique dit « servo-moteur », qui forme ainsi un ensemble de transmission de mouvement réversible au moyen d'un système d'embrayage sur lequel agit le pendule (*fig.* 553).

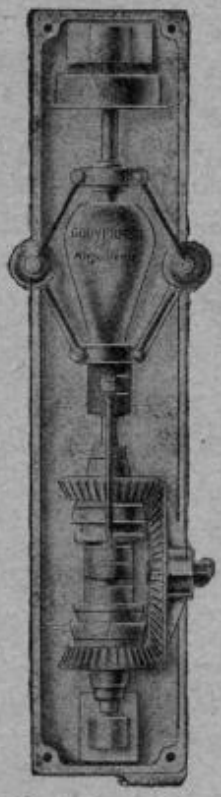


FIG. 553. — Régulateur mécanique.

Grâce à cet *asservissement* la position de la vanne de réglage de la turbine est complètement déterminée, en *régime permanent*, par celle de l'index du tachymètre, tandis que ses déplacements d'ouverture ou de fermeture en sont, dans une certaine mesure, indépendants pendant la période de régime troublé.

Les régulateurs mécaniques sont les plus simples, les plus précis, les plus économiques des régulateurs ; mais ils nécessitent des dimensions considérables.

Les *régulateurs tachymètres* dits aussi centrifuges qui ne sont, à proprement parler, que des modérateurs de vitesse, sont basés sur le principe qui consiste à admettre qu'on peut tolérer une certaine variation de vitesse et à utiliser cette variation elle-même pour commander les organes de réglage. Ces appareils, comme nous l'avons mentionné plus haut, sont à action directe et à action indirecte.

Le principe du fonctionnement des régulateurs mécaniques s'explique ainsi : lorsque la vitesse vient à augmenter, les points *a* et *b* s'élèvent (*fig.* 554) et l'embrayage a lieu en *c* ; alors la vis *d* tourne et détermine la fermeture du vannage. Lors du mouvement de descente, la vanne entraîne la douille *b* et désembraye *c* ; le mouvement de la vanne s'arrête dès que la vitesse cesse de croître. Si celle-ci continue à augmenter, la vanne continue à descendre et ne s'arrête que lorsqu'il y a équilibre entre l'effort moteur et l'effort résistant.

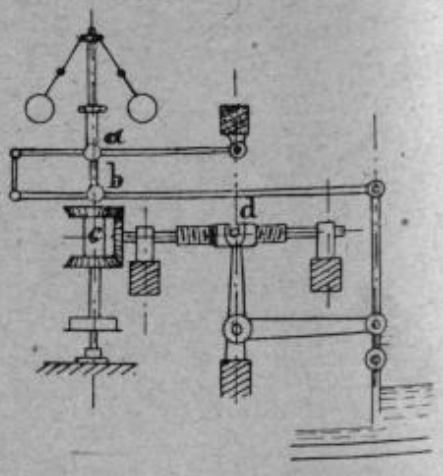


FIG. 554.

Dans le régulateur de MM. *Singrün frères*, la tige du pendule reçoit son mouvement de rotation d'une paire de roues coniques, dont l'une est calée sur un arbre commandé par la turbine, lequel attaque un excentrique qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

imprime, au moyen de leviers, un mouvement continuel de va-et-vient des cliquets. Ce sont ces derniers qui modifient la position de la vanne.

Le régulateur de M. *Piccard* (*fig.* 555) est aussi basé sur un système d'encliquetage.

Le tachymètre A (*fig.* 555) reçoit son mouvement de l'arbre de la turbine. La crémaillère E, soumise à un mouvement alternatif de va-et-vient, est reliée au registre distributeur. Les rochets K et K′ peuvent engrener l'un ou l'autre avec la roue F, calée sur l'arbre D. Sur la figure, c'est le rochet K qui est engagé. Il s'ensuit que la pièce oscillante C fait marcher la crémaillère E dans le sens de la flèche (ferme). Or, le rochet K est en prise avec la roue F parce que le manchon s'est élevé au-dessus de la position moyenne. Si le manchon prend la position moyenne, le talon *a* viendra accrocher le nez *b*, K se dégagera de F et la crémaillère restera immobile. Quand le manchon s'abaisse, la crémaillère avance dans le sens de la flèche (ouvre). Cette crémaillère tend toujours à ramener le heurtoir M dans sa position moyenne, que cette crémaillère marche vers la droite ou vers la gauche.

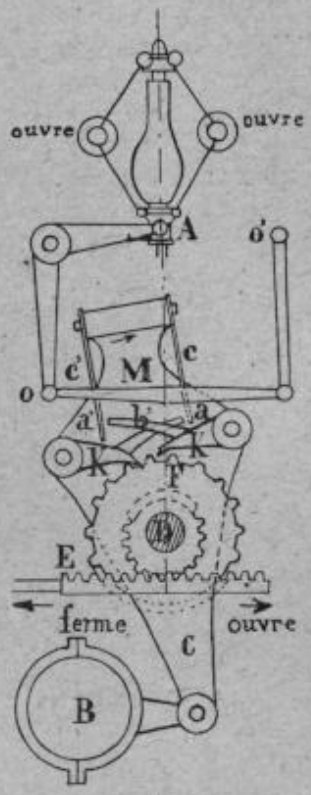


FIG. 555.

Il faudra donc un nouveau déplacement du manchon pour obtenir un nouveau déplacement de la crémaillère, et de cette manière, si le manchon se déplace d'une façon continue, le déplacement de la crémaillère sera lui-même continu.

Les régulateurs de vitesse à encliquetage ont l'inconvénient de ne pouvoir être employés pour parer à des variations de charge instantanées et importantes qu'avec l'emploi de volants considérables. La maison A. et H. Bouvier y obvie en accouplant un régulateur à encliquetage avec un régulateur absorbeur. Ce dernier appareil, au moment d'une décharge brusque importante, absorbe instantanément la force disponible et maintient la vitesse du moteur pendant que l'encliquetage ferme progressivement le vannage de la turbine pour obtenir l'équilibre entre l'effort moteur et l'effort résistant.

Dans certains cas, les turbines doivent fonctionner à vitesse rigoureusement constante quelle que soit la charge ; le vannage étant asservi au tachymètre on effectue le réglage en deux phases ; pendant la première, le vannage se déplace avec le tachymètre, c'est-à-dire avec une variation de vitesse ; pendant la seconde, le tachymètre est ramené à sa position initiale, pour laquelle la turbine reprend la même vitesse. Pendant la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seconde phase, on compense l'excès de vitesse pris pendant la première par un ralentissement équivalent, au moyen de dispositifs d'avertissement pourvus, en plus, d'un palier de compensation avec galet et d'un dash-pot à ressort.

Dans le cas de turbines marchant en parallèle, où le maintien d'une vitesse constante n'est pas compatible avec plusieurs d'entre elles, on remplace le palier de compensation par une rampe montante ou descendante, suivant qu'on désirera une réduction ou un accroissement de la vitesse de régime.

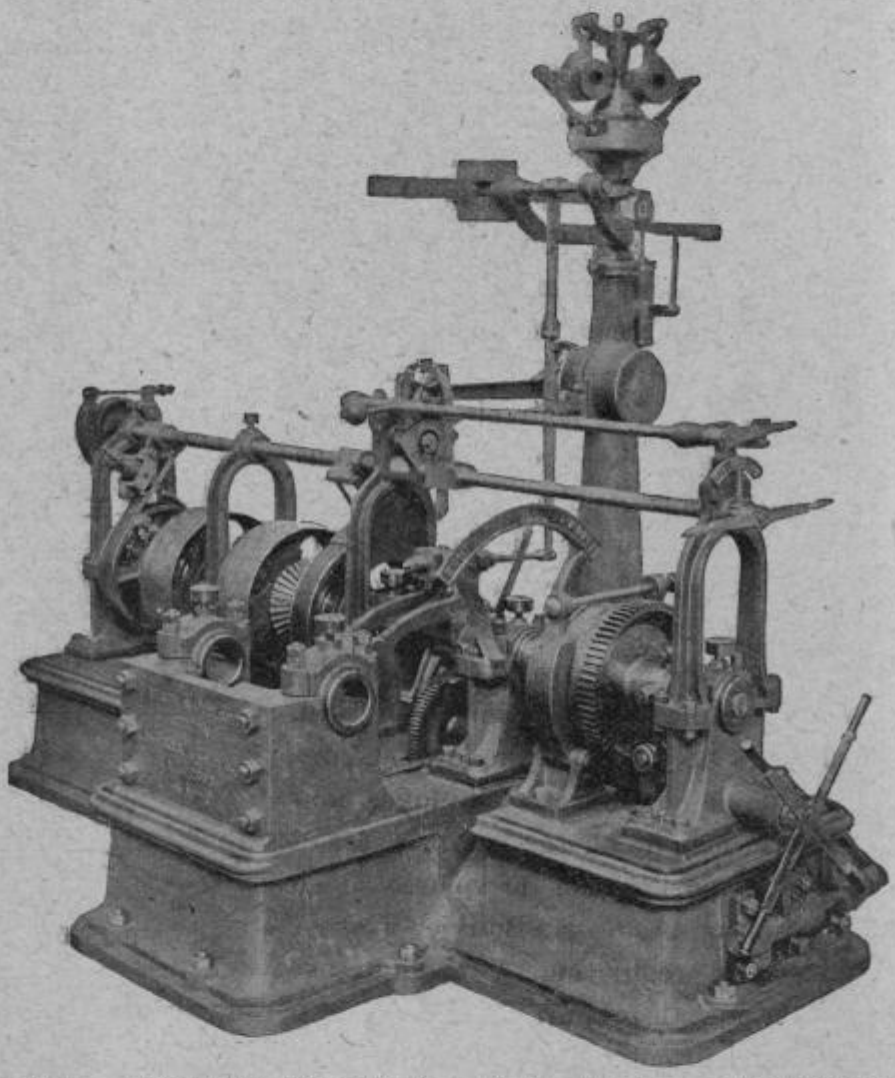


FIG. 556. — Régulateur servo-moteur à déclic et friction, système Piccard.

L'asservissement d'un régulateur indirect conduit à admettre une certaine différence de vitesse entre la marche à vide et la marche en charge. Le plus généralement on est conduit, pour la stabilité, à avoir un asservissement tel que cet écart de vitesse est trop considérable étant donnés les besoins actuels de la pratique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Afin d'éviter cet inconvénient il est alors nécessaire de munir le régulateur d'un dispositif appelé compensateur, qui détruit lentement l'effet de l'asservissement et ramène par conséquent la vitesse à sa valeur normale par une série de petits mouvements correctifs.

La marche avec compensateur n'est cependant pas indiquée lorsque plusieurs régulateurs commandent des turbines actionnant des alterna-

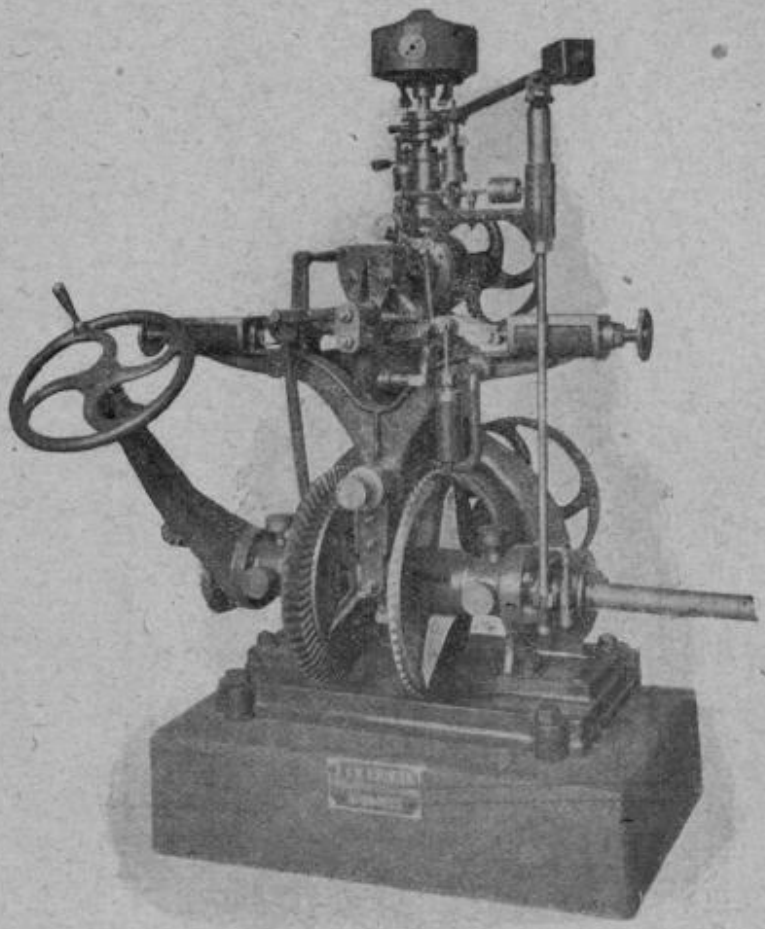


Fig. 557. — Régulateur à servo-moteur mécanique A. et H. Bouvier.

teurs couplés en parallèle. Dans ce cas il y a lieu d'admettre une certaine différence de vitesse de quelques centièmes entre la marche à vide et celle en charge, en empêchant la compensation d'être totale. C'est donc un dispositif de décompensation qu'il y a lieu d'introduire dans le jeu du régulateur.

Le servo-moteur mécanique *Wordward* est pourvu d'un double cône de friction, embrayé au moment voulu par un tachymètre centrifuge à boules. Pour fixer le vannage dans la position correspondant à un régime de marche déterminé, éviter les oscillations à longue période, il y a un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mécanisme compensateur pour lequel le vannage est empêché de passer la position correcte, et ainsi sont supprimées les chances d'excès de vitesse.

Le régulateur *Bell* se compose en principe de deux jeux d'engrenages enfermés dans des boîtes de protection et chassant l'huile contre une soupape de réglage. Suivant la position de leviers à poids, il se produit une augmentation de pression sur l'un ou l'autre des jeux d'engrenages. De cette augmentation résulte l'arrêt du mouvement de rotation de l'un des engrenages en question et l'accélération de l'autre engrenage par l'intermédiaire d'un mécanisme différentiel. En marche normale, la soupape se trouve dans sa position médiane, et l'arbre de réglage est au repos. La plus petite variation du nombre de tours déplace la soupape et donne un mouvement de rotation à l'arbre de réglage. Le fonctionnement de cerégulateur est donc le même que celui d'un régulateur hydraulique.

Lorsque le relais du régulateur utilise comme fluide moteur l'eau sous pression on l'emprunte économiquement à la chute elle-même, en greffant la tuyauterie nécessaire sur la conduite forcée.

Quand la pression de l'eau est trop faible on emploie l'huile sous pression

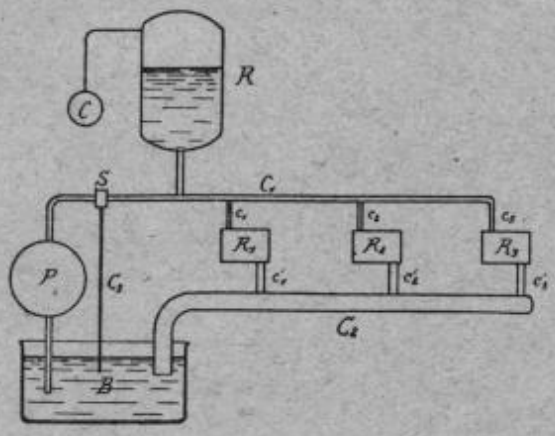


FIG. 558. — Distribution d'huile, premier système.—B, *bâche* ; P, *pompe* ; $C_1C_2C_3$, *conduites* ; $R_1R_2R_3$, *régulateurs* ; R, *réservoir* ; c, *compresseur* ; S, *soupape de décharge*.

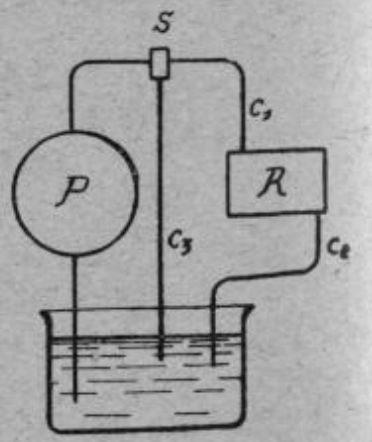


FIG. 558 *bis*. — Distribution d'huile, second système. — B, *bâche* ; P, *pompe* ; R, *régulateur* ; $C_1C_2C_3$, *conduites* ; S, *soupape de décharge*.

fournie par des pompes spéciales. On a recours à deux dispositions, la plus ancienne (*fig.* 558) consiste en une ou plusieurs pompes qui refoulent l'huile dans une conduite principale sur laquelle sont branchés les régulateurs ; une seconde conduite recueille cette huile et la ramène dans la bâche où puise la pompe. Un accumulateur contenant de l'air comprimé à sa partie supérieure est branché sur la conduite principale. Ce système donne lieu à des difficultés de réglage et peut être la cause de dangers relativement aux coups de bélier. Le second système

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

consiste à munir chaque régulateur d'une pompe à débit constant pouvant fournir à elle seule la quantité d'huile nécessaire pour assurer la vitesse d'action que l'on s'impose ; la pompe refoule soit utilement pour le régulateur, soit inutilement au travers d'une soupape de décharge et de réglage de pression (*fig.* 558 *bis*).

Le régulateur universel hydromécanique *Escher Wyss* (*fig.* 559) est composé d'une chambre remplie d'huile, de deux pompes foulantes fixées

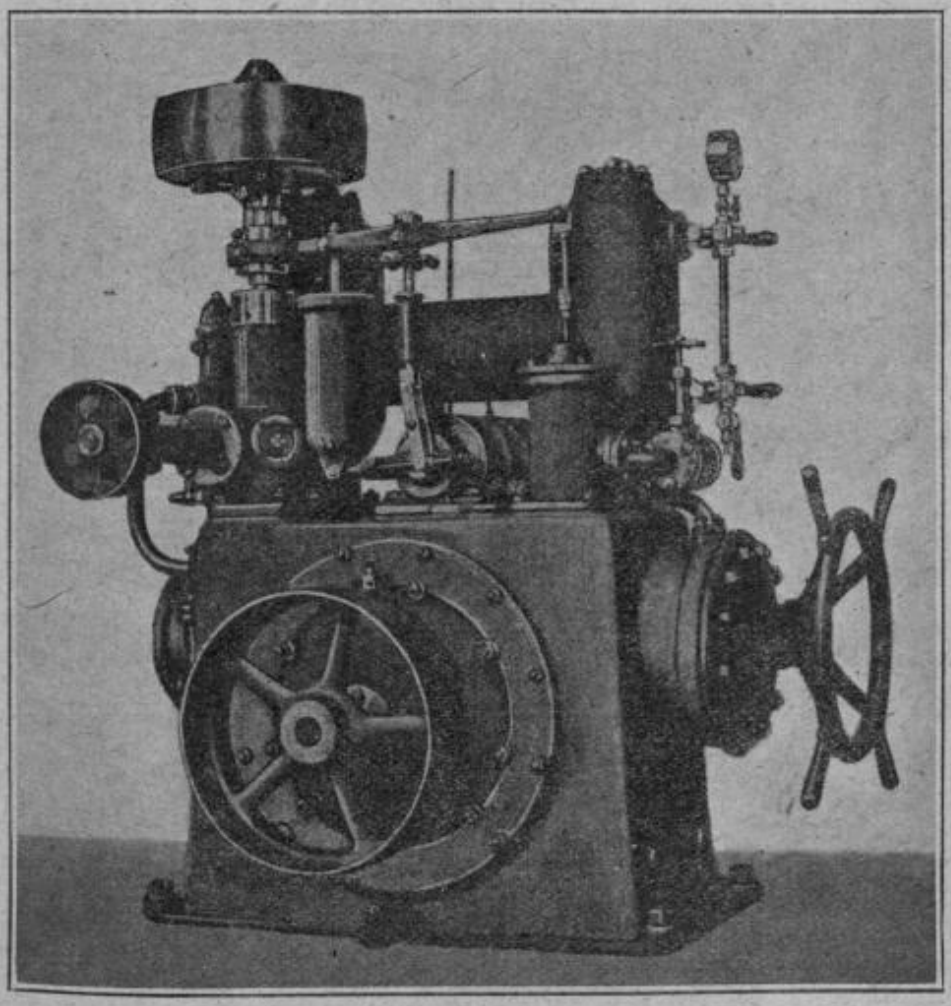


FIG. 559. — Régulateur à pression d'huile, système Escher Wyss.

par une de leurs roues à un arbre central vertical commandé par une poulie. L'appareil est complété par un tachymètre, un cylindre distributeur et une transmission qui agit sur le vannage de la turbine.

Quand une pompe foulante tourne dans le sens de rotation indiqué, l'aspiration et le refoulement ont lieu normalement ; mais, au moment de la fermeture du refoulement, l'huile ne pouvant plus s'échapper de la chambre de la pompe, les deux roues de celle-ci sont empêchées de fonc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tionner l'une dans l'autre, et l'arbre central entraîne toute la chambre de la pompe dans sa rotation. L'ouverture du refoulement est reliée par une conduite au distributeur, et le moindre mouvement du tachymètre peut la fermer de la pompe supérieure ou inférieure, et par là l'accouplement de la pompe foulante voulue avec l'arbre central. L'ouverture de l'aspiration est toujours en communication avec la chambre remplie d'huile. Le sens de rotation de l'arbre de la transmission qui agit sur le vannage de la turbine, et par conséquent l'action du réglage pour l'ouverture et la fermeture du vannage, est déterminé par les pompes foulantes, selon que c'est la supérieure ou l'inférieure qui engrène.

Tous les organes qui constituent cet appareil, étant noyés dans l'huile, il s'ensuit que l'usure est réduite au minimum.

Un avantage tout particulier de ces régulateurs consiste en un dispositif qui ferme automatiquement la turbine, lorsque la pression de l'huile augmente ou faiblit à un point tel qu'il puisse arriver que le régulateur perde tout pouvoir sur la turbine.

En cas d'arrêt de la commande du pendule, un dispositif d'arrêt de sécurité entre en action, lequel d'ailleurs ne peut fonctionner que si cela est vraiment nécessaire. L'appareil agit dans ce sens que le pendule n'étant plus actionné, et le manchon de celui-ci tombant tout en bas, est fortement freiné et rapidement arrêté. Le pendule surmonte alors une résistance placée sous le manchon et ouvre par là une conduite d'huile sous pression allant à la soupape de commande, de sorte que cette dernière est forcée de fermer la turbine. Il est encore possible de rendre cette disposition inactive pendant la mise en marche par la fermeture d'une soupape.

Le temps de fermeture dans ces régulateurs pour la course complète du servo-moteur s'élève à une ou deux secondes. Toutefois, le temps de fermeture peut être choisi à volonté plus long, si cela est rendu nécessaire par les conditions spéciales de l'installation.

Les régulateurs Escher Wyss sont construits en série de six dimensions différentes, d'une capacité de réglage variant de 50 à 1.300 kgm. Mais on établit des appareils pour un travail de réglage de 2.500, 5.000 et 10.000 kgm., fabriqués selon les besoins.

La (*fig.* 560) représente le régulateur *Michaud* appliqué aux roues Pelton, dont nous donnons la description au (§ 418).

Le régulateur auto-régénérateur de pression *Singrün* est à servo-moteur par pression d'huile, mais il ne comporte qu'une seule pompe, et un dispositif spécial maintient une pression constante toujours prête à agir, qui donne à l'appareil une vitesse d'action très rapide et une grande sensibilité. Un dispositif de sécurité agit sur la fermeture de la turbine en cas de chute d'une courroie ou d'accident et arrête la marche.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le régulateur absorbeur *Rüsch* offre un exemple de ce type de régulateur dans lesquels on maintient constante l'action résistante, en créant, quand le travail de l'usine diminue, une résistance auxiliaire qui vient rétablir l'équilibre. Ces appareils sont constitués élémentairement par une pompe à huile, à circulation continue, actionnée par le récepteur qui puisant l'huile dans un réservoir la refoule autravers d'un orifice dont la section variable est réglée par un pendule conique. En augmentant ou en diminuant cette section, suivant que la vitesse du pendule s'abaisse ou s'accélère, on diminue ou on augmente le travail absorbé par la pompe,

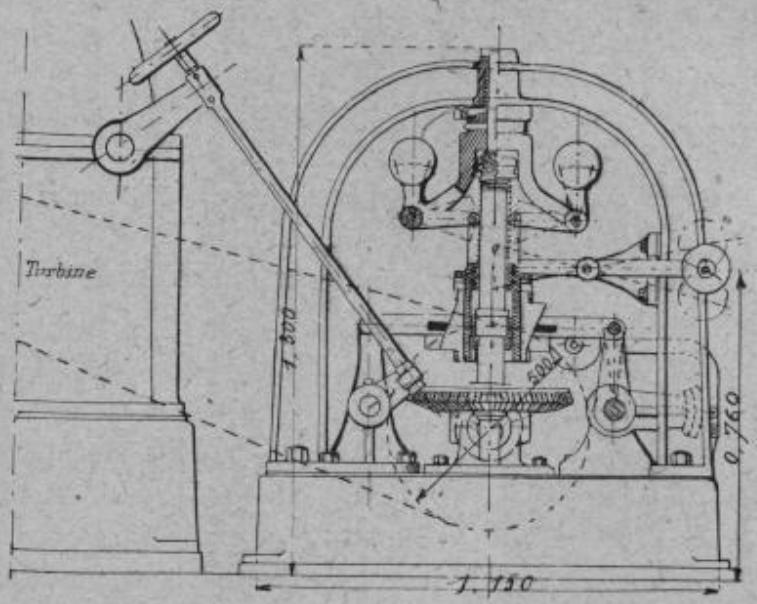


FIG. 560. — Régulateur Michaud.

c'est-à-dire la charge du récepteur. On peut ainsi arriver à une variation de vitesse à 2 ou 3 0/0 de la normale.

168. Régulateurs hydrauliques. — Les dispositifs de ce genre sont très nombreux.

La (*fig.* 561) représente un appareil construit par la maison Neyret et Brenier. Un piston différentiel P, se mouvant dans un cylindre, commande directement le vannage de la turbine. La partie J de ce cylindre est en communication soit avec l'eau sous pression arrivant par la conduite p, soit avec l'échappement par la tubulure e, suivant la position de la soupape équilibrée N_1, commandée par le levier du régulateur à force centrifuge, dont l'axe d'oscillation O est porté par une tige verticale OO_2 constamment sollicitée vers le bas par un ressort r. La partie H du cylindre est en relation constante avec l'eau sous pression.

S'il survient un accroissement de vitesse, le manchon du régulateur s'élève, M_1 monte, et l'eau sous pression admise dans la cavité H pousse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le piston P vers la droite pour fermer le vannage ; en même temps le galet O_2 s'élève en franchissant la rampe K et fait pivoter le levier OMO_1 autour de M, et abaisse M_1 de façon à arrêter le mouvement du piston P dès qu'il a exécuté un parcours proportionnel au déplacement du man-

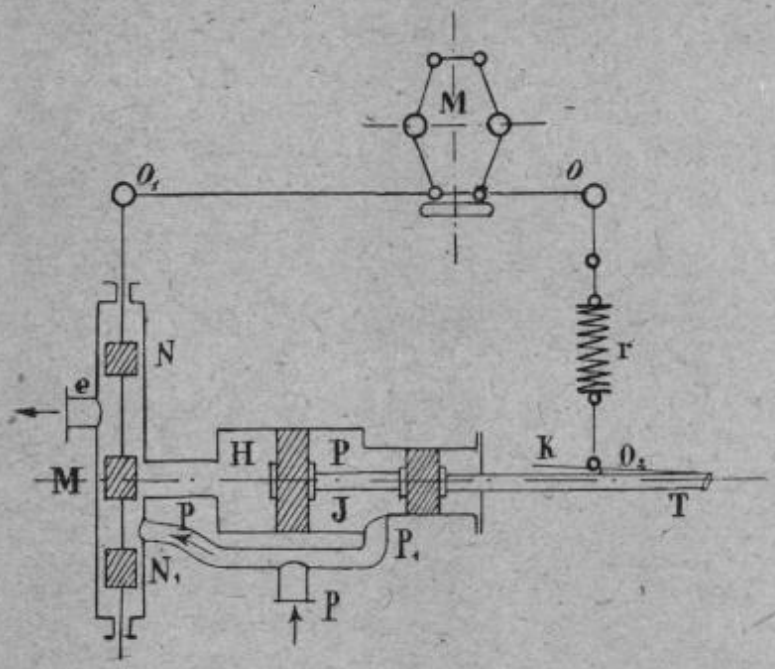


FIG. 561.

chon M du régulateur. L'effet inverse se produit pour une diminution de vitesse de la turbine.

MM. *Rietter et C*ie ont un servo-moteur où le vannage de la turbine s'opère par un piston différentiel recevant sur les deux côtés la pression de l'eau motrice ou de tout autre liquide (de l'huile, par exemple), expressément comprimé.

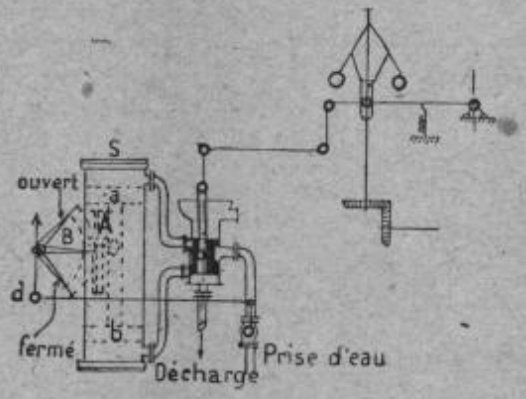


FIG. 562.

La pression sur la petite face du piston est constante, et celle sur la grande face variable sous l'influence d'un tachymètre qui ouvre ou ferme une soupape suivant que la vitesse de la turbine tend à augmenter ou à diminuer. Cette variation de pression produit le mouvement du vannage, de sorte que sa marche est toujours proportionnelle au déplacement du manchon.

Pour les récepteurs de grande puissance, quelques constructeurs emploient le dispositif représenté par la (*fig.* 562), où le tiroir, qui est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indépendant du servo-moteur, est manœuvré par le manchon du régulateur à boules. Le piston du servo-moteur est double, et son mouvement est utilisé pour mettre en action une crémaillère A qui engrène avec un secteur denté B calé sur l'arbre du vannage.

Quand le tiroir s'éloigne de la position moyenne ou d'équilibre, la partie inférieure ou celle supérieure du cylindre est mise en communication avec le tuyau de décharge, le piston se déplace dans le sens de la pression

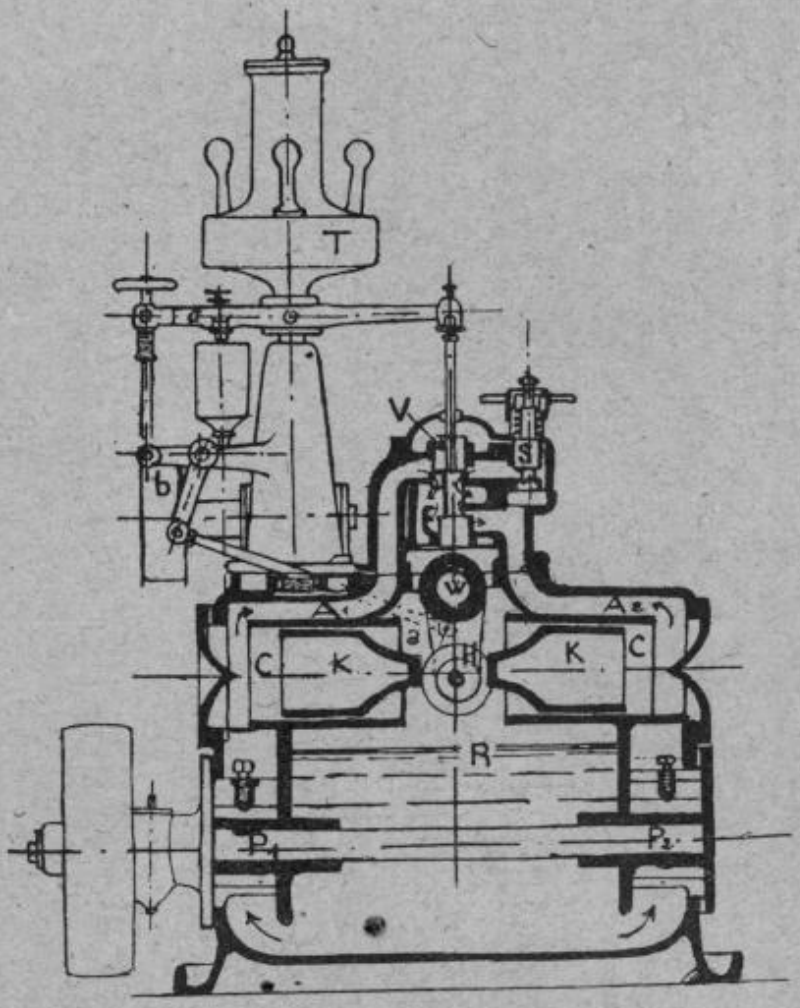


FIG. 563.

la plus grande, et le secteur tourne de façon à augmenter ou à diminuer la masse d'eau dans le moteur. L'arbre du vannage, en tournant, a aussi pour effet de déplacer la tige *dd*, qui commande le robinet *e* placé sur le tuyau de prise avant le distributeur, de façon à ralentir le mouvement ascensionnel ou de descente du double piston.

Comme régulateur à servo-moteur à huile, nous citerons le régulateur *Ganz*, qui consiste, en principe, en un pendule centrifuge du type *Hartung*, lequel actionne le piston du distributeur de l'huile. Ce distributeur con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duit l'huile comprimée aux deux cylindres du servo-moteur ou la laisse sortir, suivant le cas. Le servo-moteur déplace directement les aubes directrices ; toute variation de la vitesse de la turbine, ayant pour conséquence une variation de l'appareil centrifuge, est suivie d'une variation de la pression entre les deux cylindres du servo-moteur, faisant ainsi augmenter ou diminuer l'admission de l'eau. L'huile sortant du servo-moteur est de nouveau pressée dans l'accumulateur par les pompes à huile actionnées par les turbines.

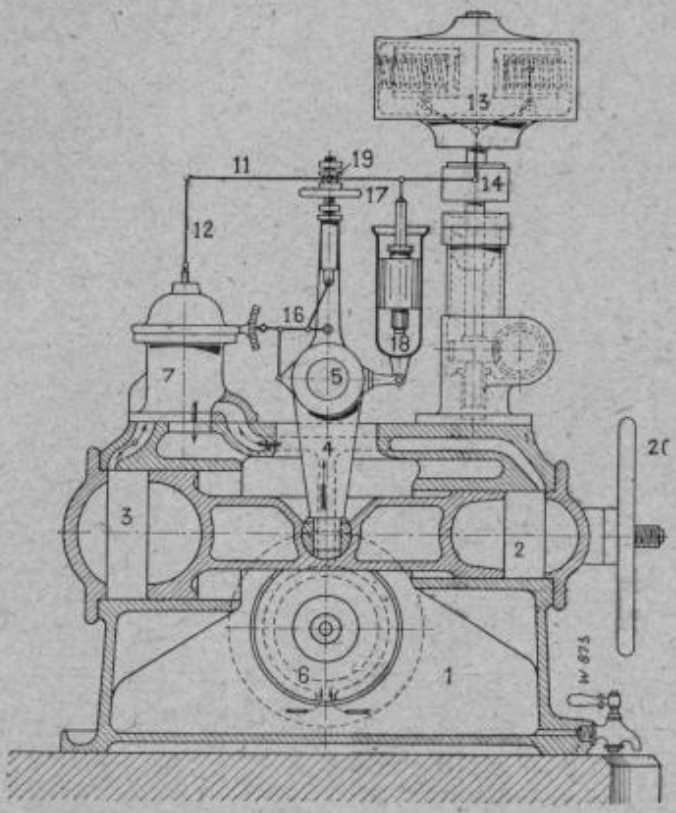


FIG. 564. — Régulateur à pression d'huile Escher Wyss.

La Société alsacienne de Constructions méca-

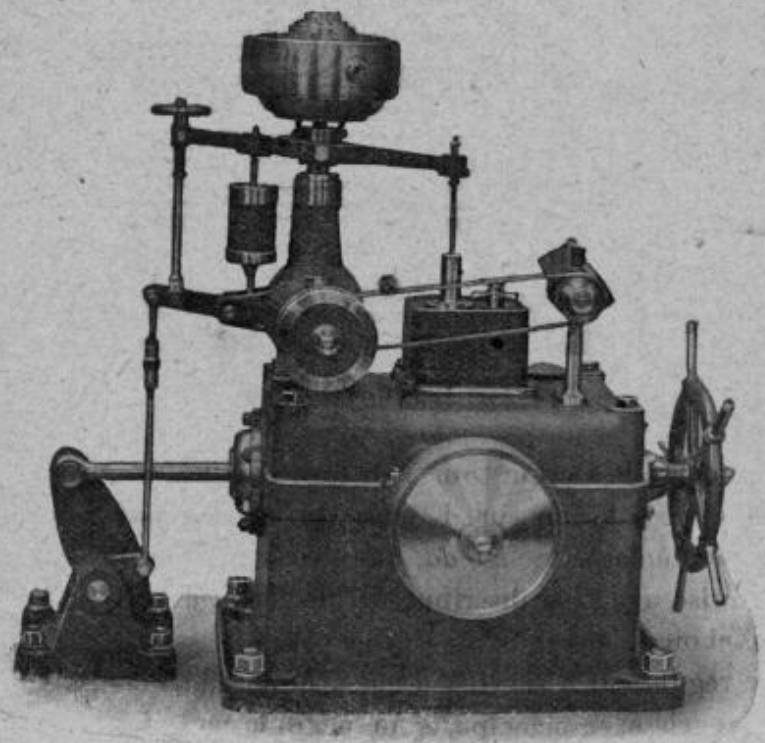


FIG. 565. — Régulateur, système Minetti.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

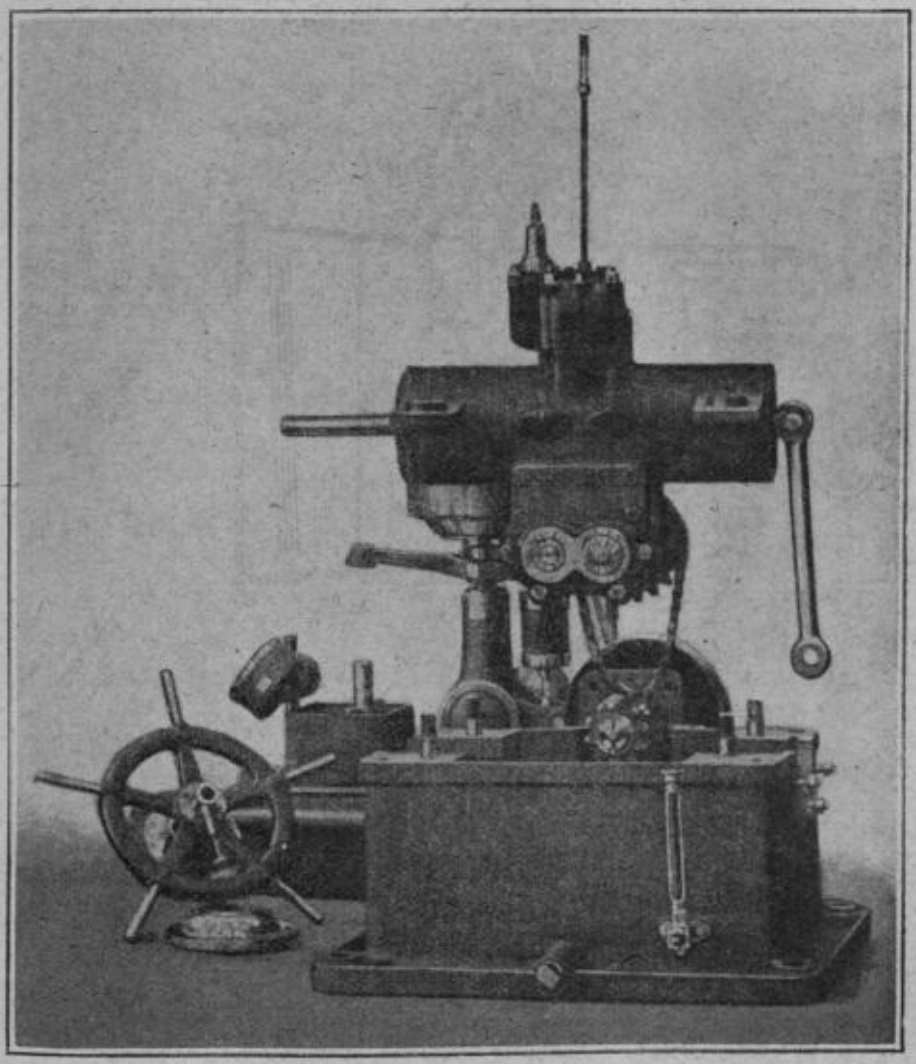


FIG. 566. — Régulateur à huile sous pression. Organes intérieurs. (Société Alsacienne de constructions mécaniques).

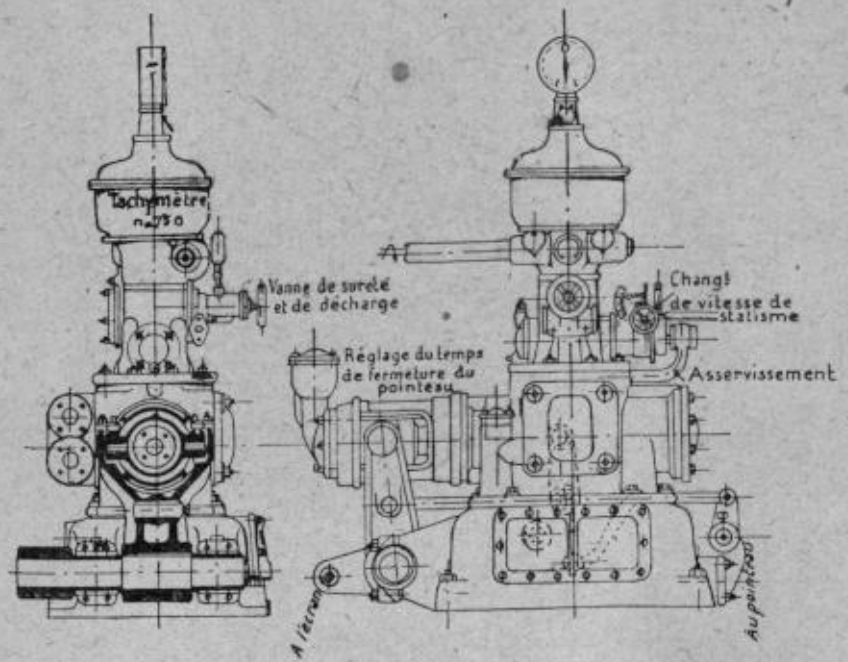


FIG. 567. — Régulateur automatique à double action, sur l'écran déviateur et sur le pointeau du distributeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

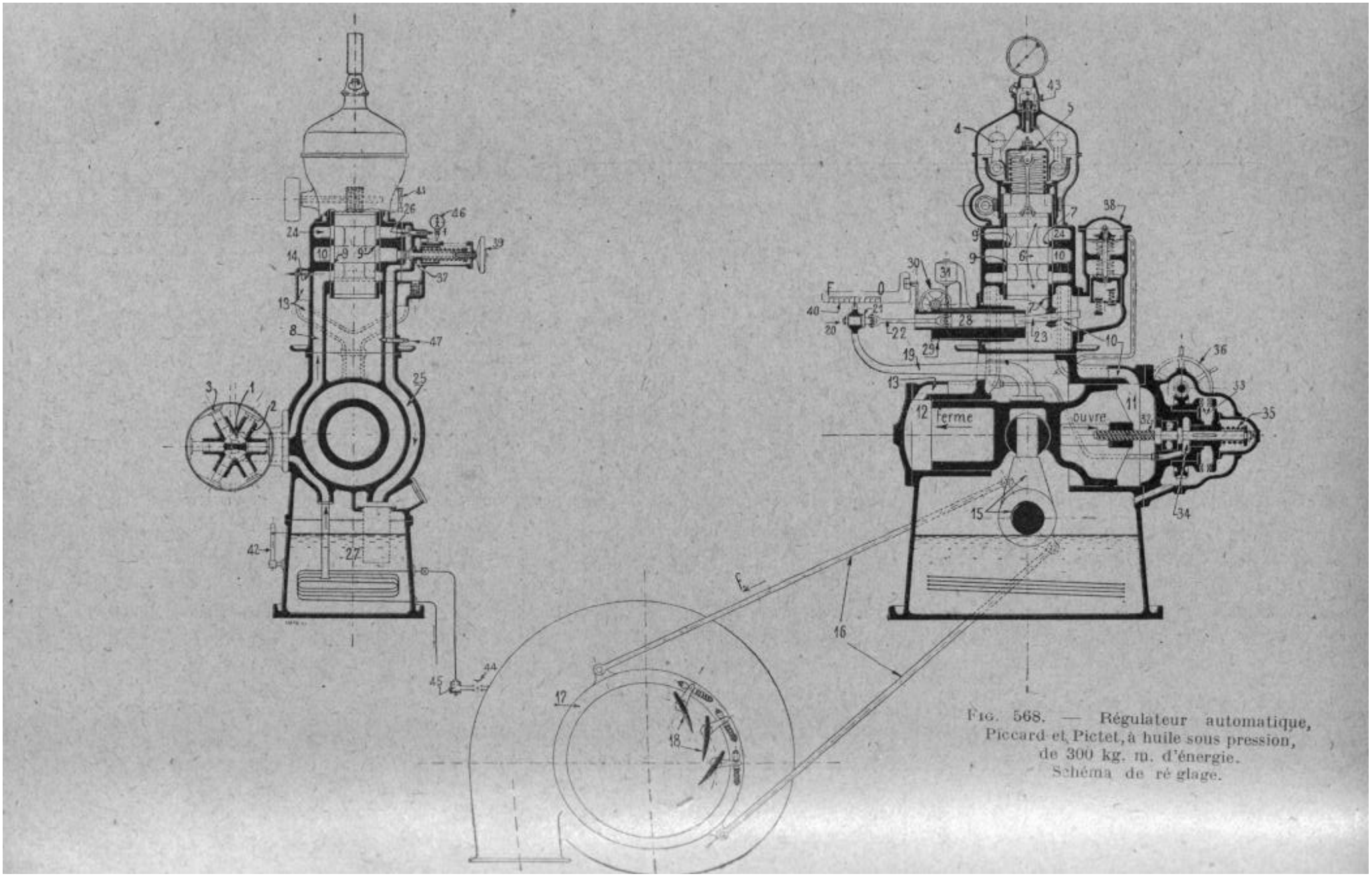


FIG. 568. — Régulateur automatique, Piccard et Pictet, à huile sous pression, de 300 kg. m. d'énergie. Schéma de réglage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

niques a établi un type de régulateur à servo-moteur hydraulique, *système Minelli* (*fig.* 563 et 565), fonctionnant sans avoir en réserve un liquide sous pression constante, comme c'est le cas avec les autres systèmes où il faut disposer d'une forte chute pour pouvoir se servir de la pression de l'eau motrice, ce qui constitue un grave inconvénient dû aux impuretés en suspension dans l'eau ou entraînées avec elle, ou bien il faut avoir recours à une installation toujours coûteuse et compliquée de pompes avec réservoir accumulateur absorbant une certaine énergie.

L'appareil se compose de deux cylindres *cc* (*fig.* 563), dont les pistons K-K peuvent exercer chacun, en sens opposé, une poussée contre

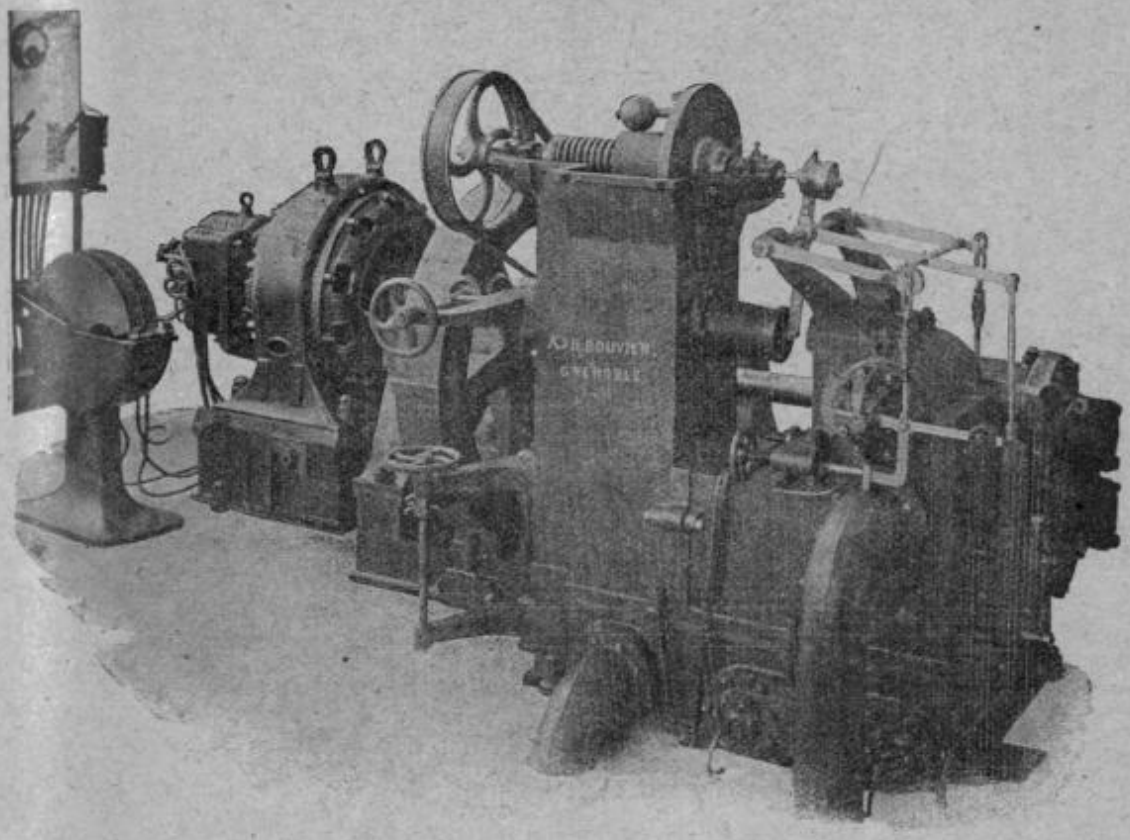


Fig. 569. — Régulateur central A. et H. Bouvier actionné par un moteur synchrone.

un galet relié à un levier. Ce dernier communique son mouvement à la couronne de la turbine, à laquelle sont réunis des obturateurs par l'intermédiaire de tringles spéciales.

Deux pompes rotatives P_1-P_2 produisent la pression pour la poussée sur les pistons, et un pendule à force centrifuge agit sur une soupape de distribution V à obturateur double équilibrée, destinée à admettre la pression sur l'un ou l'autre des pistons.

Le liquide (huile ordinaire pour paliers), amené aux cylindres par la rotation des pompes, peut faire retour au réservoir sans avoir subi de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pression appréciable et sans avoir une influence sur les pistons. L'alimentation de la turbine reste alors constante.

La pression sur un piston ou sur l'autre ne se produit qu'à l'instant même où doit avoir lieu le réglage, proportionnellement à la résistance des organes à vaincre.

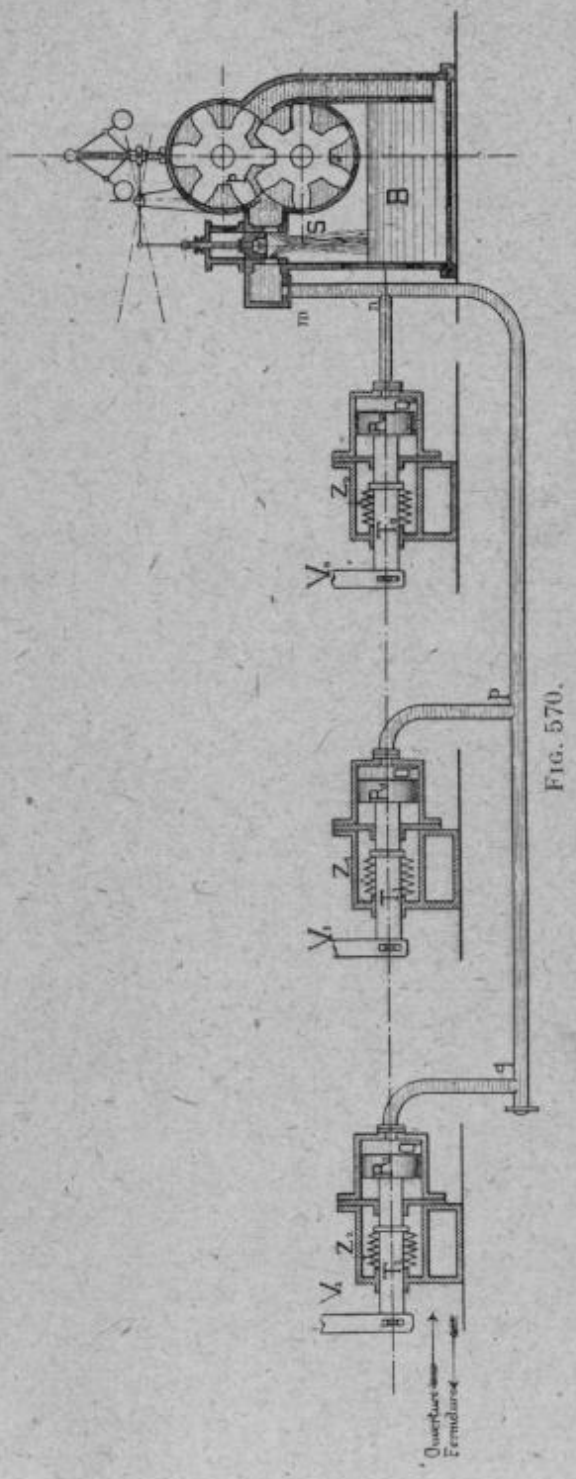


Fig. 570.

Les pompes rotatives peuvent fournir une pression de travail jusqu'à 10 atmosphères. Pour les régulateurs de grande puissance, lorsqu'il s'agit de mouvoir des vannages extrêmement lourds, les pompes rotatives sont remplacées par d'autres à mouvement alternatif, lesquelles peuvent atteindre des pressions de 20 à 30 atmosphères. La soupape de distribution est parfaitement équilibrée ; elle est pourvue d'un mouvement de retour à sa position moyenne par les leviers *a*, *b* et *c*. Il suffit d'un déplacement très petit de la soupape de distribution pour provoquer immédiatement le fonctionnement du servo-moteur et l'incompressibilité de l'huile assure l'action instantanée du réglage. Pendant la marche normale du moteur, l'huile ne fait que circuler et le travail absorbé par les pompes est presque insignifiant.

Une rupture accidentelle, pouvant résulter de l'interposition d'un corps dur dans les organes de réglage de la turbine, est évitée par la soupape S, laquelle agit comme organe de sûreté, en limitant la pression maxima dans l'appareil à celle nécessaire pour la manœuvre du vannage.

Le pendule est à ressort avec dispositif tout nouveau permettant d'en varier (dans certaines limites) le degré d'irrégularité et la vitesse de ré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gime. Le temps nécessaire pour passer de l'ouverture à la fermeture complète du vannage peut être très court, trois à quatre secondes environ, suivant les conditions de l'installation.

La maison A. et H. Bouvier a créé un autre système de régulateur dit régulateur central (*fig.* 570) où le tachymètre agit sur une soupape S qui règle l'orifice d'évacuation d'un liquide refoulé par une pompe rotative P à débit sensiblement constant, actionnée par la turbine elle-même. La variation d'ouverture des orifices produit des variations de pression du liquide refoulé qui s'exercent sur un piston récepteur R équilibré par un ressort Z ; par suite, à chaque pression, c'est-à-dire à chaque vitesse, correspond une position déterminée du piston récepteur. Celui-ci commande directement lui-même le tiroir d'un servo-moteur complet actionnant le vannage.

Si, la turbine étant en marche de régime, on produit par exemple une

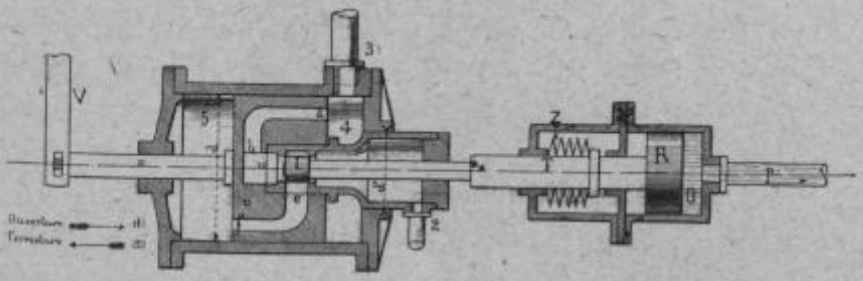


FIG. 571.

brusque diminution de l'effort résistant, la vitesse augmente ; alors le vannage se ferme progressivement d'une quantité correspondante. Au moment où l'équilibre existe entre l'effort moteur et l'effort résistant, la vitesse cesse de croître, par suite le vannage reste immobile, et l'équilibre subsiste sans oscillations.

Ce régulateur présente les avantages suivants : la pompe fonctionnant constamment avec un même liquide, on se trouve ainsi à l'abri des inconvénients qu'on éprouve lorsque les organes de régulation, reliés directement au tachymètre, sont en contact avec l'eau motrice, celle-ci pouvant tenir en suspension des corps étrangers qui paralysent parfois l'action du régulateur. Il se prête tout particulièrement à la régulation simultanée de moteurs hydrauliques actionnant des alternateurs couplés en parallèle. Dans ce dernier cas chaque moteur est muni d'un cylindre récepteur et d'un jeu de ressorts Z. La pression créée par la pompe P se rend simultanément aux organes de réglage de chacun des moteurs et, si ces moteurs sont exactement semblables et si les ressorts ZZ′ sont convenablement tarés, tous les vannages occuperont la même position pour une même pression du liquide refoulé ; les ouvertures de toutes les turbines étant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exactement les mêmes, les alternateurs seront également chargés. Dans le cas d'une station centrale, un seul tachymètre à force centrifuge règle la vitesse de toute l'usine.

Lorsque le déplacement des organes de vannage exige un effort considérable, le piston R n'a qu'à manœuvrer une soupape I d'un servo-moteur formant relais (*fig.* 571). La disposition de ce dernier est telle que son piston suit exactement et instantanément le déplacement de sa soupape, en développant la force nécessaire ; ce servo-moteur additionnel peut fonctionner avec l'eau motrice si la hauteur de chute est suffisante, sinon par un liquide sous pression provenant d'un accumulateur alimenté par un jeu de pompes.

Avec les régulateurs à servo-moteur, on arrive à limiter à 1 0/0 près le nombre de tours des turbines, quelle que soit leur puissance.

Les régulateurs à servo-moteur hydraulique ne peuvent être utilisés avec des eaux impures ; les régulateurs à servo-moteur à huile conviennent aux turbines à basse chute et à gros volume, qui demandent de grands efforts et de grands mouvements pour actionner les vannages des distributeurs.

169. Régulateurs électriques. — Dans les régulateurs *électro-mécaniques*, une partie de l'énergie électrique fournie par la dynamo, menée par le récepteur hydraulique, sert à provoquer l'embrayage du servo-moteur mécanique dans le sens voulu, en proportionnant l'ouverture du vannage à la demande d'énergie dans le circuit de la génératrice. Le régulateur à boules peut ou ne fermer qu'un des deux circuits électriques dont est composé l'appareil, cette fermeture ayant pour effet de déplacer l'armature d'un solénoïde directement relié au vannage, ou bien commander un embrayage mécanique.

Avec les régulateurs à servo-moteur électrique, l'énergie nécessaire pour le déplacement de la vanne est empruntée à un moteur électrique. Quand l'usine comprend plusieurs turbines, un seul moteur peut suffire, lequel commande alors une transmission munie d'autant d'embrayages qu'il y a de régulateurs à actionner.

L'arbre de la turbine, dans ce cas, opère l'embrayage dans le sens voulu par le moyen d'une courroie ou d'engrenages qui atteignent le régulateur centrifuge.

Pour qu'un régulateur de vitesse puisse ramener le moteur hydraulique à sa vitesse de régime dans le *plus court temps possible*, M. Léauté a indiqué qu'il convenait d'arrêter la vanne un peu après que les boules des régulateurs, ayant cessé de monter ou de descendre, commencent à revenir en sens contraire de leur mouvement primitif.

Se basant sur cette observation, M. Gin a imaginé un régulateur élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trique où le mécanisme de manœuvre de la vanne est actionné par un moteur électrique alimenté par une source d'énergie indépendante ou solidaire de la turbine, la mise en marche et l'arrêt de l'électromoteur ayant lieu d'une façon aussi rapide que le permettent l'inertie et la résistance des mécanismes à mouvoir.

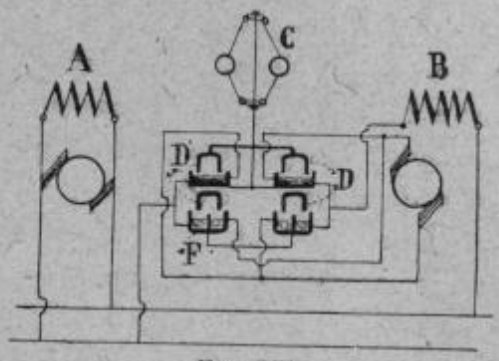


FIG. 572.

La (*fig.* 572) représente schématiquement la disposition générale de cet appareil. A est une génératrice indépendante ou solidaire de la turbine et B un moteur électrique mis en circuit ou hors circuit au moyen de

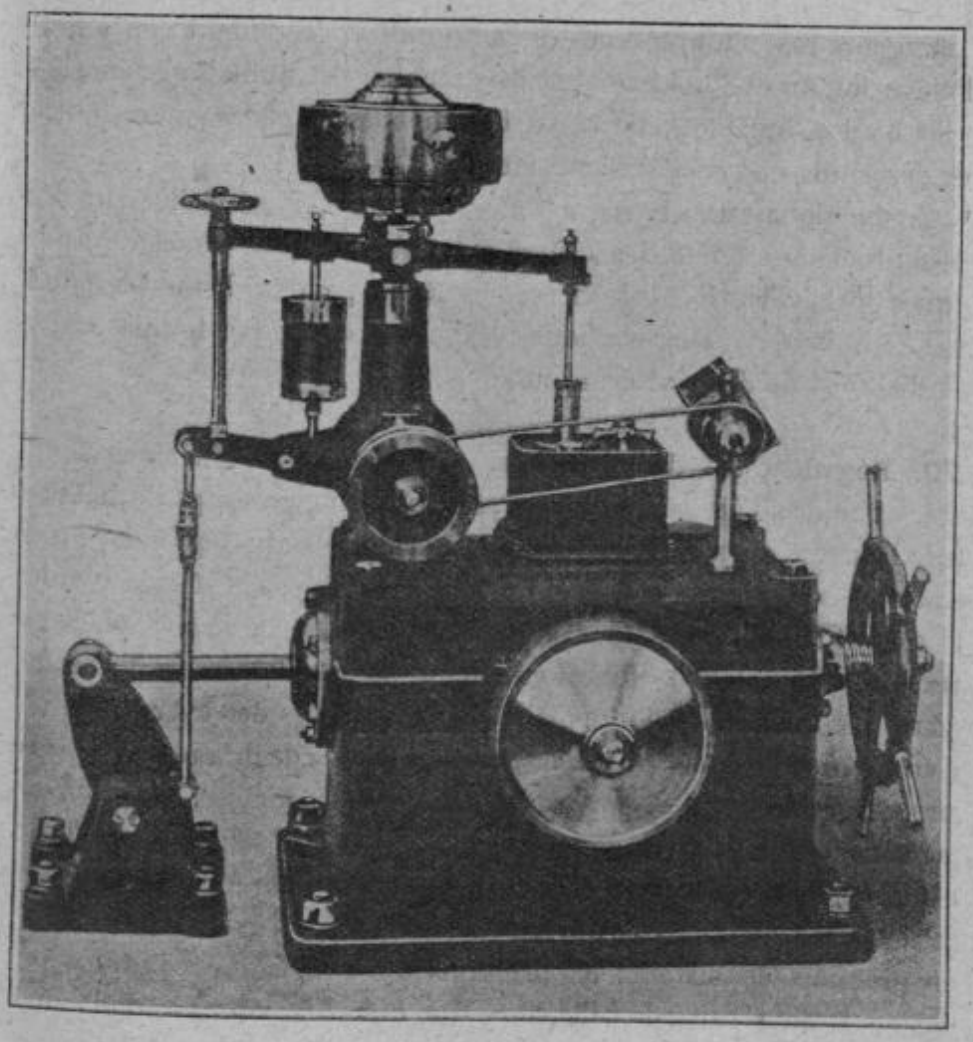


FIG. 573. — Régulateur muni de dispositif électrique (Société alsacienne de constructions mécaniques).

deux couples d'interrupteurs à mercure commandés par le pendule C. La vitesse de la turbine étant normale, les plongeurs D sont à une cer-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

taine distance du niveau du mercure des cuvettes F, et il ne passe aucun courant dans le moteur. Si la vitesse vient à croître ou à diminuer, le manchon du pendule soulève ou abaisse un équipage mobile portant les plongeurs inférieurs et les cuvettes supérieures, de manière à immerger l'un et l'autre couple de plongeurs dans les cuvettes correspondantes. Dans le premier cas (vitesse croissante), le courant fourni par la génératrice A passe dans les inducteurs et l'induit du moteur de façon à produire la marche en avant de ce moteur (fermeture du vannage) ; dans l'autre cas (vitesse décroissante), le courant parcourt l'inducteur dans le même sens, mais il est inversé dans l'induit, ce qui provoque la marche arrière du moteur (ouverture du vannage).

Pour que l'ouverture ou la fermeture de la vanne cesse un peu après le maximum ou le minimum de variation de vitesse, et afin d'éviter les oscillations de la vitesse angulaire, l'appareil est disposé de telle sorte que les plongeurs restent immergés dans les cuvettes pendant toute la durée de l'élévation ou de l'abaissement du manchon, et qu'ils s'en séparent dès que les boules, après avoir monté, commencent à redescendre, ou, après avoir descendu, commencent à remonter.

Nous signalons aussi le régulateur muni du dispositif électrique de la Société alsacienne de constructions mécaniques, qui permet de limiter à quelques 0/0 la variation de la vitesse de régime pendant la marche (*fig.*573).

Il est employé dans les stations centrales pour opérer la mise en parallèle à distance de deux alternateurs.

170. Régulateurs de pression. — Lorsque les turbines sont alimentées par de longues conduites, pour obvier aux coups de bélier (fermeture brusque du vannage), aux surpressions et aux dépressions (ouverture ou fermeture brusques du vannage), qui rendent le rôle du régulateur de vitesse difficile, surtout quand on a plusieurs turbines branchées sur la même conduite (alors le fonctionnement du régulateur de l'une d'elles rend très pénible le fonctionnement des régulateurs des autres), on utilise avec succès des vannes compensatrices appelées « déchargeurs » ou « régulateurs de pression ». Ces appareils sont de deux sortes : ceux qui maintiennent constant le débit de la conduite, quel que soit le degré d'ouverture des vannes des turbines et ceux qui n'ont pour but que d'éviter la production des surpressions ou coups de bélier.

Les premiers consistent, en principe, en une vanne conduite par le régulateur et construite de telle sorte que quand le vannage de la turbine se déplace et en fait varier le débit, elle se déplace aussi et fait varier son propre débit de la même quantité, mais en sens inverse ; le régime de la conduite est donc constant. Si le cours d'eau est à régime variable et si une ou plusieurs turbines de l'usine ne doivent pas fonctionner à plein

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débit, il est très facile de régler leurs déchargeurs pour leur débit maximum.

Ces appareils paraissent les meilleurs et les plus simples, quand l'économie d'eau est envisagée comme une question *sine qua non* (usines alimentées par des lacs ou des réservoirs quelconques). Alors on fait appel aux

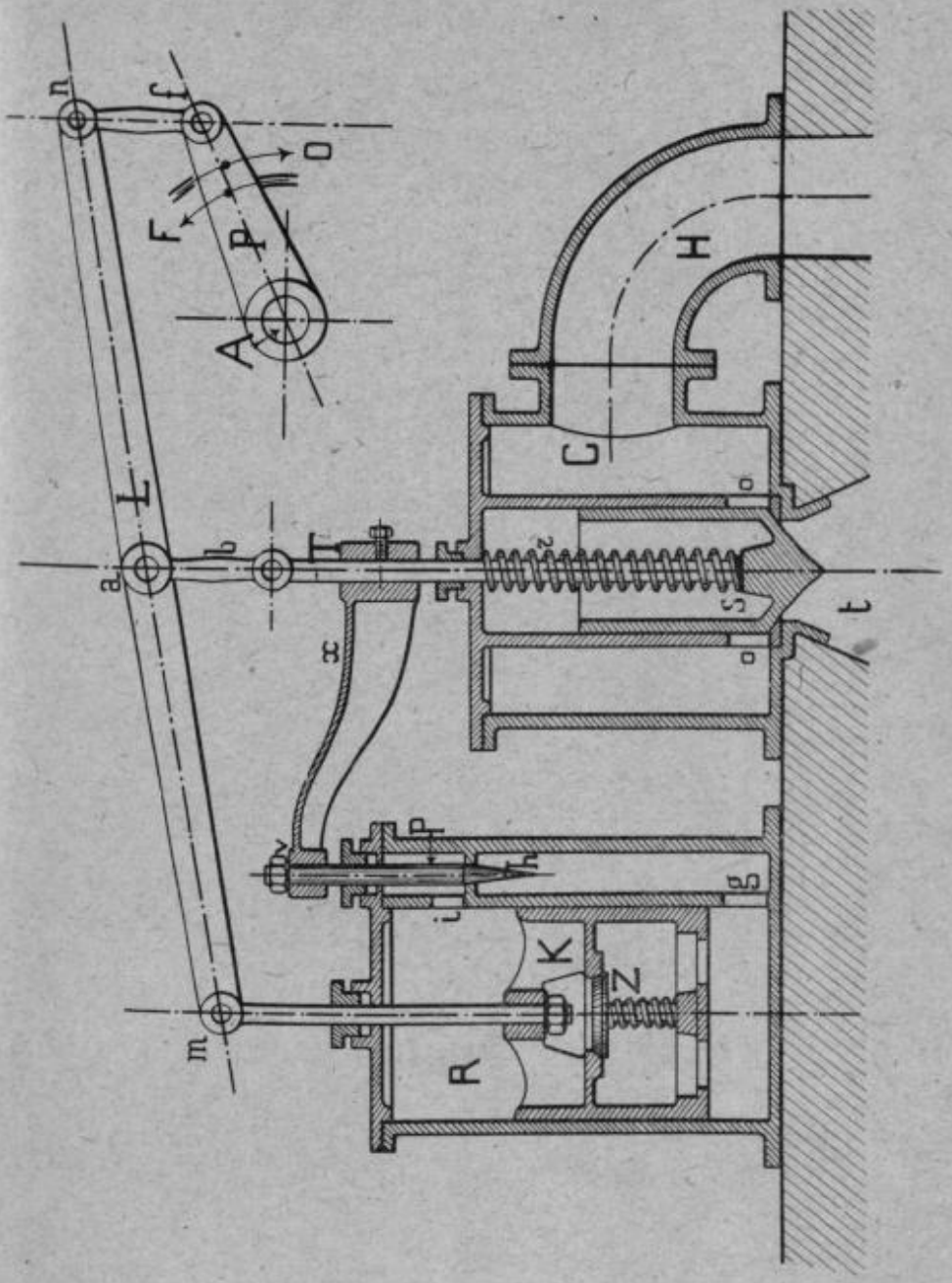


FIG. 574.

déchargeurs de la seconde catégorie qui sont sans action lors de l'ouverture du vannage de la turbine ; ils n'évitent pas les dépressions ou coups de bélier négatifs dans la conduite, mais lorsque le régulateur ferme brusquement le vannage de la turbine, ils ouvrent aussi brusquement la vanne du déchargeur de la même quantité. Cette vanne se referme ensuite très

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lentement, ce qui évite les coups de bélier. Ils protègent la conduite, font l'office de soupapes de sûreté, mais ne permettent pas le réglage d'une turbine sans amener de perturbations dans le réglage des autres turbines de l'usine. Ils sont donc plus compliqués, plus onéreux et moins actifs que les précédents, mais leur emploi s'impose dans certains cas, faute de mieux.

Il existe une autre classe de régulateurs de pression, qui ne sont plus sous la dépendance du régulateur de vitesse, la pression de la conduite agissant pour bander plus ou moins un ressort taré d'avance ; dès qu'une surpression lui fait subir une variation de longueur, la vanne compensatrice qui lui est asservie subit un déplacement proportionnel. C'est, somme toute, une soupape de sûreté à servo-moteur. Pas plus que les déchargeurs du second système celui-ci n'évite les dépressions.

Le régulateur de pression *A. et H. Bouvier* se compose, en principe, d'une soupape équilibrée S (*fig.* 574) qui se meut dans un cylindre percé d'orifices *o* ; la chambre C est en communication avec la conduite d'eau forcée C, H et le tuyau *t* se rendant au bief d'aval. La tige T de la soupape est reliée par l'intermédiaire de la bielle *b* à un levier L ; ce levier porte une articulation à chacune de ses extrémités. La manivelle P calée sur l'arbre A actionne le vannage de la turbine. Le piston K est muni d'une soupape à ressort Z et le cylindre R est rempli d'un liquide, tel que huile ou glycérine, et la partie inférieure du cylindre communique avec la partie supérieure de ce même cylindre par une petite conduite *ghi* présentant en *h* une partie rétrécie pouvant être plus ou moins obturée par le pointeau *p*, ce dernier suivant le mouvement de la tige T, par l'intermédiaire de la pièce rigide *vx*.

Si le vannage vient à se fermer brusquement d'une quantité déterminée correspondant à un certain déplacement angulaire de l'arbre A tournant dans le sens de la flèche F, la soupape Z reste appliquée sur son siège et le piston K, ne pouvant descendre, l'orifice *h* étant fermé par le pointeau *p*, il en résulte que *a* s'élève et la tige T, suivant le mouvement, la soupape *s* démasque les orifices *o* d'une certaine quantité, livrant ainsi passage à un certain volume d'eau sensiblement égal à celui qui vient d'être enlevé au moteur.

Lorsque le vannage est arrivé dans la position qu'il doit occuper, l'arbre A ne tournant plus, *m* reste immobile ; mais alors le poids de *s* et celui du piston K ainsi que la compression du ressort *r* agissent par l'intermédiaire du levier L sur le piston K et celui-ci s'abaisse avec une vitesse qui va en diminuant progressivement au fur et à mesure que le pointeau *p*, en descendant, obstrue davantage la section de l'orifice *h*. Dans sa descente, il entraîne S, l'articulation *n* étant devenue le point fixe du levier L. Il résulte de ce qui précède que la soupape S referme lentement les orifices *o* et avec une vitesse d'autant plus faible qu'on se rapproche davantage de la fermeture complète de ces orifices *o*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'arbre A vient à tourner dans le sens de la flèche O correspondant à l'ouverture du vannage de la turbine, et si la soupape *s* se trouve complètement fermée à ce moment, le levier L, prenant son point d'appui en *a*, soulève K dont le mouvement n'oppose qu'une légère résistance, étant donné que la soupape Z se décolle de son siège et offre ainsi pour le passage du liquide une très grande section.

Si la soupape *s* n'est pas complètement fermée au moment où se produit l'ouverture du vannage, elle se refermera tout d'abord, ce qui a pour avantage d'atténuer, dans la mesure du possible, la production du coup de bélier négatif ; ce n'est qu'une fois la soupape *s* complètement fermée que le levier L oscille autour du point *a* et soulève le piston K. Le régulateur de pression n'oppose donc aucune résistance lorsque se produit l'ouverture du vannage, quelle que soit la position du piston K.

Le régulateur *système Minetti*, construit par la Société alsacienne de constructions mécaniques, se recommande par son extrême simplicité et surtout par l'absence de contrepoids et d'organes de distribution compliqués, avec lesquels il est impossible d'obtenir, ce qui est indispensable, une ouverture immédiate de l'orifice de décharge lorsqu'il y a mouvement de fermeture du vannage de la turbine.

Dans les roues Pelton, on a deux moyens de régler la vitesse, la première en changeant légèrement la direction de l'eau donnant l'impulsion, la seconde en modifiant le débit au moyen d'une aiguille qu'on avance dans le tuyau. Dans le premier cas on diminue beaucoup le rendement de la turbine ; dans le second cas, on ne peut agir que très lentement, car on doit changer toute la masse d'eau contenue dans les tuyaux, comme on le verra plus loin, et on s'expose à des ruptures par les coups de bélier. D'ailleurs on est souvent obligé de placer des soupapes automatiques qui s'ouvrent et laissent échapper une partie de l'eau, ce qui diminue le rendement.

Lorsqu'une turbine est déchargée, pour limiter la vitesse dans les limites tolérées par la partie électrique de l'installation d'une usine hydroélectrique, deux modes d'action se présentent : fermer l'injecteur, dévier le jet hors de la roue.

Le premier moyen entre seul en action lorsque la décharge est lente. Le second intervient dans tous les cas de décharges brusques où l'on ne pourrait fermer rapidement l'injecteur sans produire de coups de bélier dangereux dans la conduite forcée.

Le dispositif à double réglage exploité par la Société Neyret-Beylier-Piccard-Pictet comprend deux servo-moteurs hydrauliques commandés par un régulateur. L'un agit rapidement sur un déflecteur qui dévie le jet en dehors de la roue lors d'une décharge brusque de la turbine, tandis que l'autre actionne directement un pointeau de réglage du débit. Le mouvement de ces organes est basé sur le principe suivant : à chaque charge de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la turbine correspond un diamètre du jet et une position du déflecteur ; ce dernier est tangent au jet. Ainsi en pleine charge le jet a son plein diamètre et le déflecteur est élevé, tandis qu'en marche à vide le jet a un diamètre presque nul et le déflecteur est en partie abaissé de façon à lui être tangent.

L'autre servo-moteur, actionnant le pointeau, est commandé par le premier au moyen d'une came dont la forme est choisie de façon à assurer la tangence du déflecteur au jet en tout temps, sauf lorsque se produisent des variations brusques de charge de la turbine. Il est placé directement sur la tige du pointeau et comporte un piston différentiel. Le cylindre principal est soumis à une pression d'huile constante. Un distributeur d'huile placé directement sur le servo-moteur met, suivant la position de son tiroir, le cylindre principal en communication soit avec l'huile sous pression, soit avec la pression atmosphérique.

Dans sa position d'équilibre le tiroir de distribution clôt le cylindre principal et, par là, immobilise le pointeau.

Un diaphragme calibré dans chaque cas particulier limite le débit d'huile et par là le mouvement du pointeau à une vitesse telle qu'en aucun cas la fermeture ne puisse provoquer dans la conduite forcée un coup de bélier dangereux.

Le temps de fermeture de l'injecteur peut être très grand, suivant la conduite; ainsi pour l'usine hydroélectrique de Fully, la plus haute chute du monde (1.660 mètres), ce temps a été réglé à près de une minute. Il est réglé définitivement au montage.

Réglage du pointeau. — Lors d'une décharge brusque de la turbine, le déflecteur est rapidement baissé par son servo-moteur et dévié le jet hors de la roue. Dès lors, quel que soit le temps de fermeture de la tuyère, tant que la vitesse de la turbine restera au-dessus de la vitesse de marche à vide, le déflecteur restera abaissé et maintiendra le jet hors de la roue et aucun emballement ne pourra se produire.

Au moyen d'un levier le régulateur pousse en même temps (voir *fig.* 456) une came qui pivote autour du point *a* temporairement. Cette came pousse le tiroir de distribution permettant ainsi l'entrée de l'huile sous pression dans le cylindre principal du servo-moteur.

La pression montant dans ce cylindre, l'équilibre est rompu et le pointeau se meut vers sa position de fermeture. Dans cette position le pointeau entraîne un levier d'asservissement qui pivote autour du point *b* et ramène la came en arrière. Le tiroir sous l'effet d'un ressort revient à sa position d'équilibre et le pointeau de nouveau immobilisé. En cas de décharge le déflecteur suit le jet sans le toucher. Lors d'une charge, les mouvements du déflecteur, de la came, du tiroir de distribution et du pointeau s'effectuent en sens inverse, l'huile du cylindre principal

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'écoule et le pointeau poussé par le piston à pression constante ouvre la

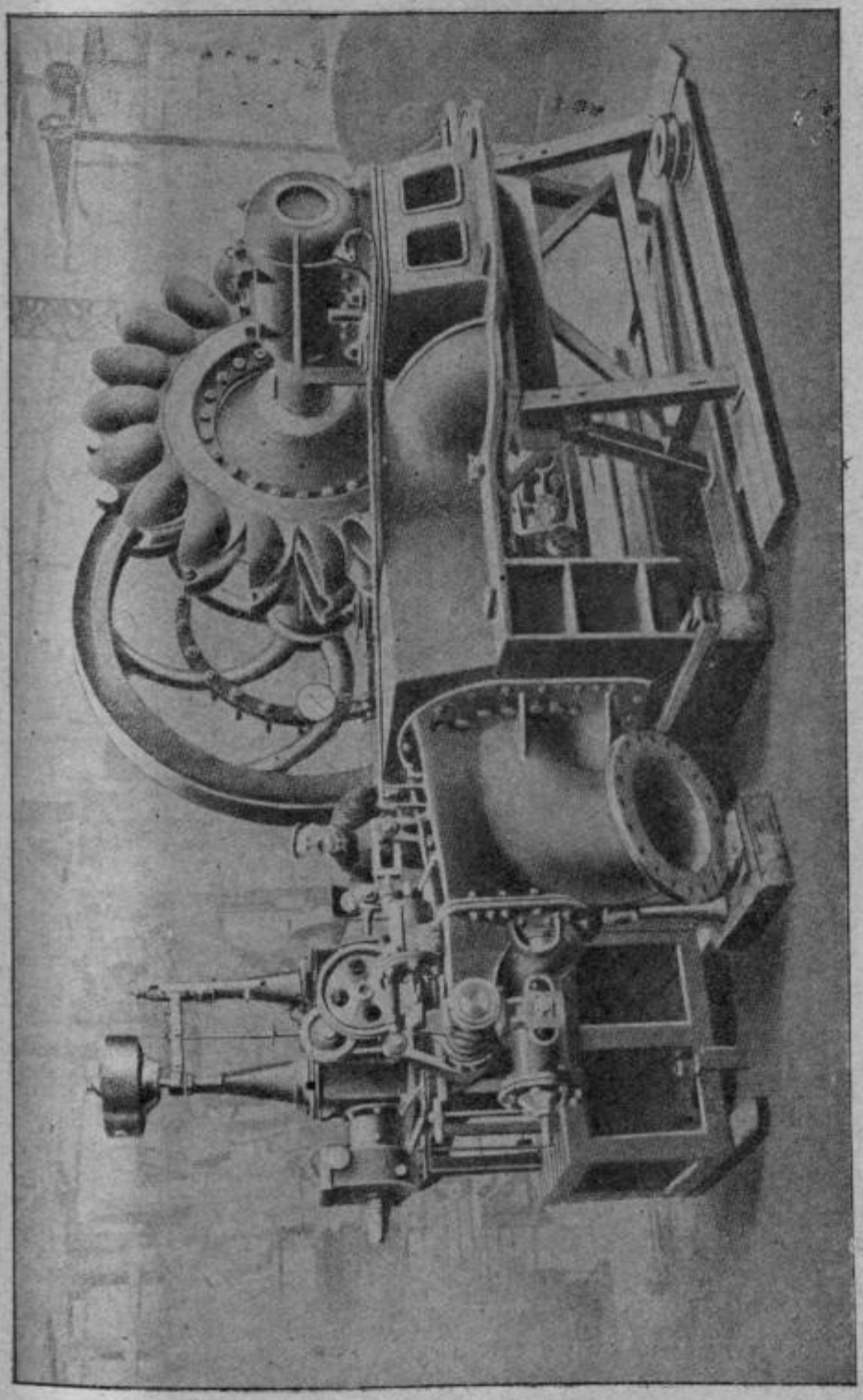


Fig. 575. — Turbine Pelton de 6.000 HP sous 350 mètres de chute. Usine hydroélectrique du Vernay-d'Allemont (Isère)

tuyère jusqu'à ce que l'asservissement du servo-moteur immobilise le pointeau dans une nouvelle position.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

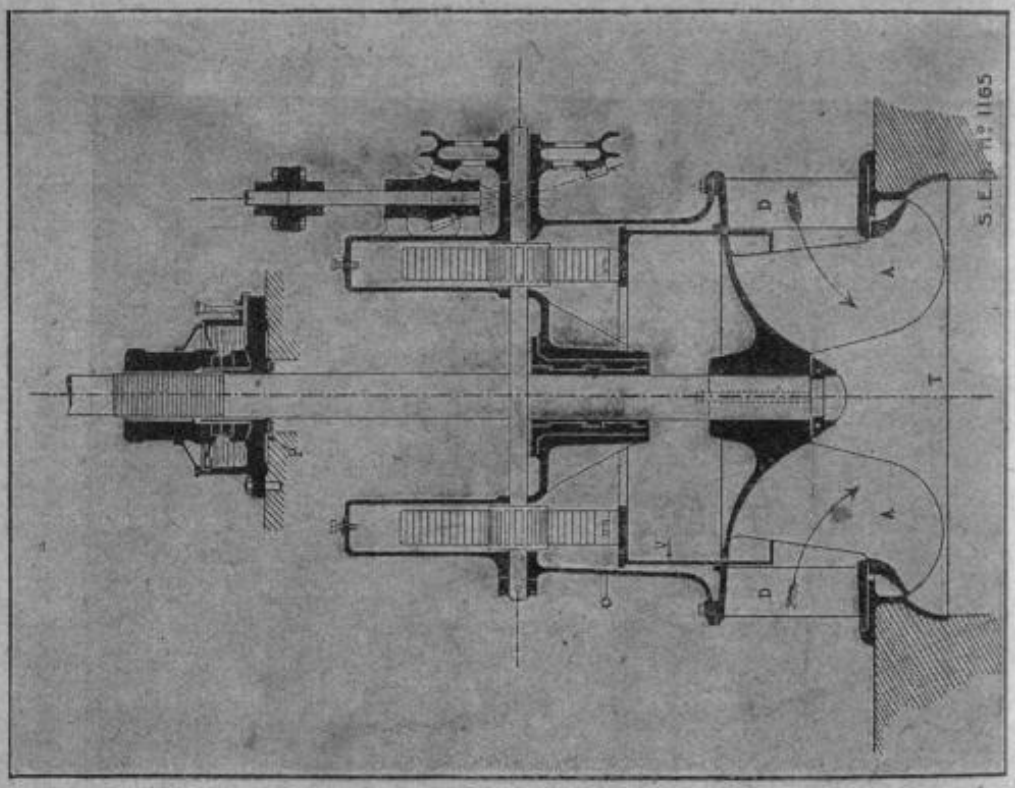


Fig. 576 *bis*. — Turbine mixte à vanne cylindrique Singrün.

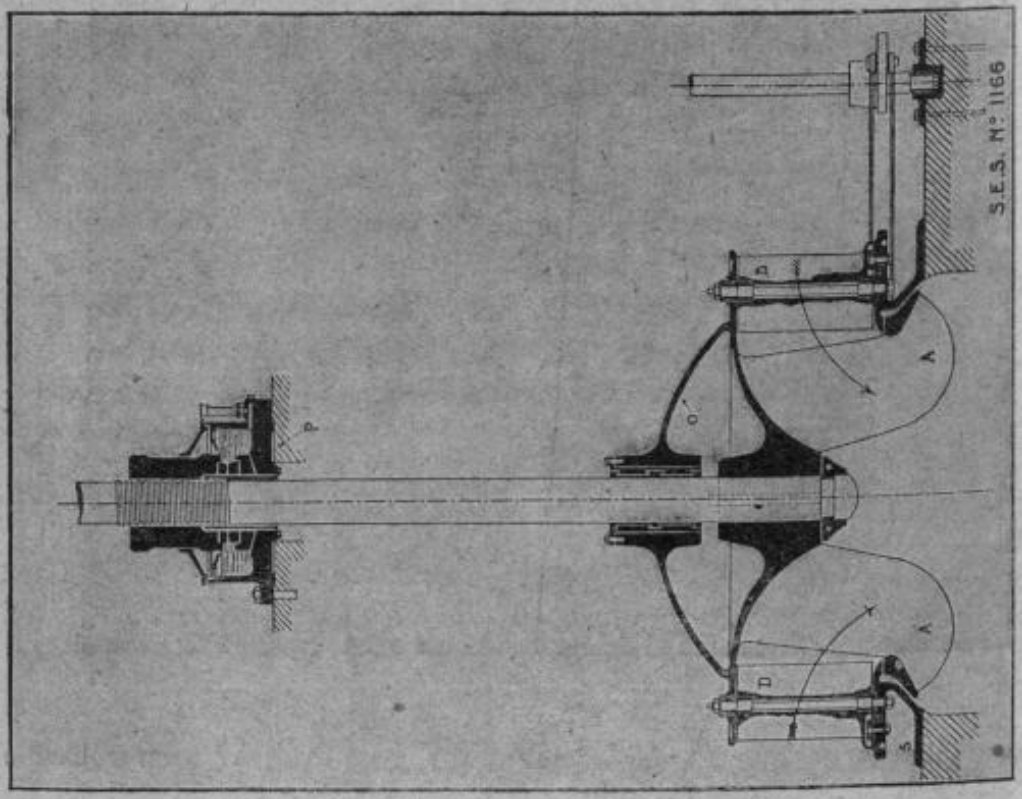


Fig. 576. — Turbine verticale à directrices mobiles Singrün.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La turbine Pelton à laquelle ce dispositif est appliqué peut avoir plusieurs tuyères au lieu d'une seule et par suite plusieurs déflecteurs et pointeaux. Dans ce cas un seul servo-moteur suffit à actionner tous les déflecteurs, et les pointeaux ont un servo-moteur commun ou particulier.

Le fait d'actionner directement le pointeau par un servo-moteur propre, présente sur le système à action indirecte par un servo-moteur placé au régulateur, l'avantage de supprimer les retards dus aux jeux et aux flexions des organes de transmission. Le déflecteur, étant toujours tangent au jet, suit avec précision et avec une grande sensibilité les mouvements du régulateur; en cas de décharge de la turbine il dévie donc le jet sans aucun retard, quel que soit le diamètre de ce dernier. Les constructeurs ont obtenu avec ce système de réglage des résultats remarquables, tant au point de vue de la limitation de la vitesse en cas de décharge, qu'à celui

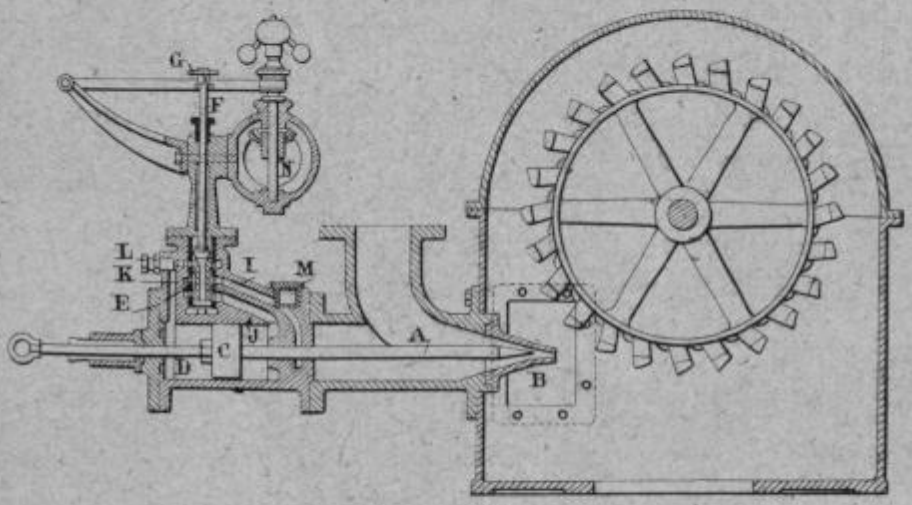


FIG. 548.

de la limitation de la surpression dans les conduites forcées.

Pour un même poids de volant les conditions de régularité de la vitesse sont d'autant meilleures que la vitesse de fermeture est plus grande. Mais par contre plus cette vitesse est rapide plus les coups de bélier sont forts dans les conduites d'amenée des turbines.

L'inertie d'une machine est exprimée par l'expression PD^2, P étant le poids de la partie tournante et D le diamètre de giration ; on exprime cette quantité en kilogrammes carrés. Les induits des dynamos ont en général une inertie relativement faible ; par contre, celle des rotors d'alternateurs est le plus souvent très notable.

Avec les hautes pressions de 9 à 90 kilogrammes par centimètre carré, les turbines et roues type Pelton sont efficacement commandées par le régulateur du type *Gilbert Gilkes* (*fig.* 577).

L'orifice d'amenée B est pourvu d'un régulateur à pointe mobile A

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont l'avancement ou le recul règle l'entrée de l'eau sur les palettes de la roue. Ce mouvement en avant ou en arrière, c'est-à-dire de fermeture ou d'ouverture de l'orifice, est obtenu à l'aide d'un piston C claveté sur le prolongement de la tige A et qui se meut dans la chambre D, suivant que l'eau, à la même pression, lui est envoyée sur une face ou sur une autre.

Pour cela, sur le collier du régulateur centrifuge N, est monté un arbre F qui actionne la soupape E, l'abaisse ou la soulève et laisse, par suite, passer l'eau, soit par l'ouverture K, soit par l'ouverture J. Des vis de réglage L pour la soupape et G pour la tige du centrifuge servent à limiter ou à étendre le jeu de ce relais hydraulique. Ce régulateur est très analogue, on le voit, au mouvement de réglage des moteurs à vapeur, où le centrifuge agit sur le tiroir de distribution. Cependant, en dépit de cette simplicité de mécanisme, la commande et le réglage des roues Pelton, avec de longues canalisations, présentent des difficultés très grandes ; en effet, on a remarqué que la diminution du jet, au lieu de réduire l'énergie transmise à la roue peut, au contraire, l'augmenter dans de certaines limites et *vice versa*, et ce phénomène se produit principalement avec de longues canalisations de tuyaux.

M. le professeur Goodman en donne la raison suivante. Si l'on suppose les frottements dans ces tuyaux directement proportionnels au carré de la rapidité du flux d'eau et inversement proportionnels au diamètre de ces tuyaux, un accroissement de la superficie du jet devra, en augmentant la rapidité, accroître aussi la perte d'énergie cinétique par frottement, de telle sorte que l'énergie cinétique disponible du jet en sera finalement diminuée. Il en résulte des variations toutes spéciales dans la vitesse de la turbine et l'action du régulateur vient alors augmenter ces troubles alors qu'il est chargé de les prévenir. Le remède consisterait à changer quelques-unes des constantes de l'installation de manière à en modifier les relations. Dans certains cas les tuyaux ne sont pas assez larges et la rapidité du flux est trop grande.

Dès que ces compensations sont effectuées, on peut obtenir alors une très grande précision de réglage par ces sortes de régulateurs hydrauliques. Des essais effectués sur une turbine Pelton de 2.500 chevaux, munie d'un régulateur hydraulique système Bell et Kriens, ont montré la rapidité avec laquelle on peut régler les vitesses après avoir diminué la charge de 25 0/0, 50 0/0 et même de 80 0/0 ; les oscillations de variation s'éteignent presque immédiatement, et la vitesse devient aussitôt de nouveau régulière.

171. Régulateurs à frein. — Avec ces appareils on peut arriver à une précision assez grande et à une action assez prompte (3 0/0). Mais ils ont le défaut de laisser travailler le récepteur à sa puissance maximum en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débitant toujours le volume d'eau correspondant à la marche en plein. On n'applique ce système de réglage que lorsque l'eau est en grande abondance, et suffisante pour alimenter toute l'année la turbine marchant à pleine admission.

L'emploi de ce système de régulateur est basé sur ce fait que, dès que la résistance normale de l'usine diminue, la vitesse augmente d'une quantité d'autant plus grande que le mouvement du vannage est plus lent. Pour limiter cet accroissement de vitesse, on introduit sur la transmission de l'usine une résistance, c'est-à-dire un frein qui absorbe l'excédent du travail du récepteur.

Ces freins sont soit mécaniques, soit hydrauliques, soit électriques. Les freins mécaniques (freins à sabots ou autres) et les freins à liquide présentent de graves inconvénients ; ils s'échauffent beaucoup, et leurs dispositions mécaniques sont compliquées, délicates et sujettes à usure rapide. Les freins électriques donnent de meilleurs résultats.

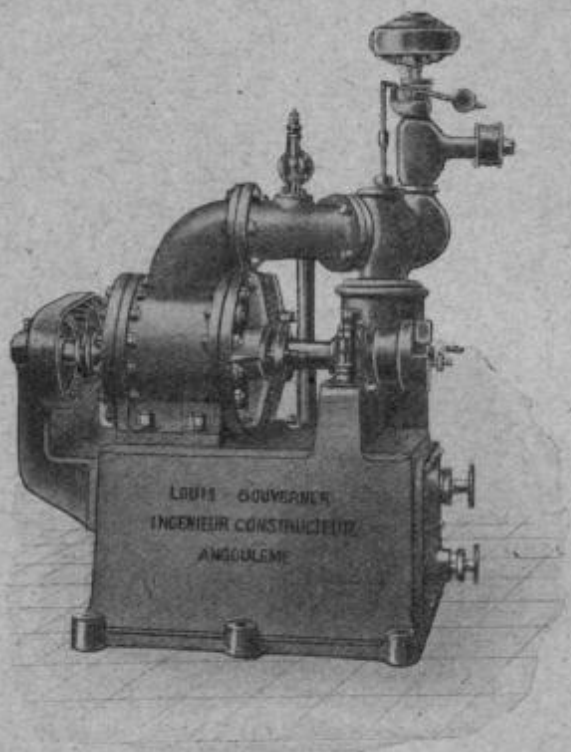


FIG. 578. — Régulateur frein à circulation de liquide agissant par absorption de puissance.

172. Régulateurs absorbeurs à frein hydraulique. — En dehors des régulateurs proprement dits, proportionnant constamment le couple moteur au couple résistant, on peut imaginer des appareils servant à maintenir constante la vitesse d'un moteur, en rétablissant à chaque instant le couple résistant à une valeur fixe ; lorsque la résistance utile diminue, ce genre de régulateur oppose à la turbine une résistance passive qu'il fait varier de la même quantité, mais en sens inverse de la variation de résistance utile. On appelle ces appareils des régulateurs absorbeurs. Ils sont d'une très grande sensibilité et s'emploient dans les cas où des changements brusques du travail résistant sont à craindre.

La maison Neyret et Brenier les construit très simplement de la façon suivante. La turbine actionne une pompe à circulation qui puise l'eau dans une bâche et la rend au même réservoir en lui faisant traverser un orifice réglé par un tachymètre ; c'est donc le débit ou refoulement qui varie, et,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par suite, la charge de la turbine augmente ou diminue en même temps que la vitesse, qu'on arrive ainsi à maintenir dans des limites très resserrées.

La maison A. et H. Bouvier garantit que, à l'aide des appareils de sa construction, pour des décharges instantanées de la totalité de la force de l'appareil, la variation de vitesse ne dépasse pas 5 à 6 0/0.

Régulateur de hauteur d'eau J. Voith. — Un régulateur de hauteur d'eau

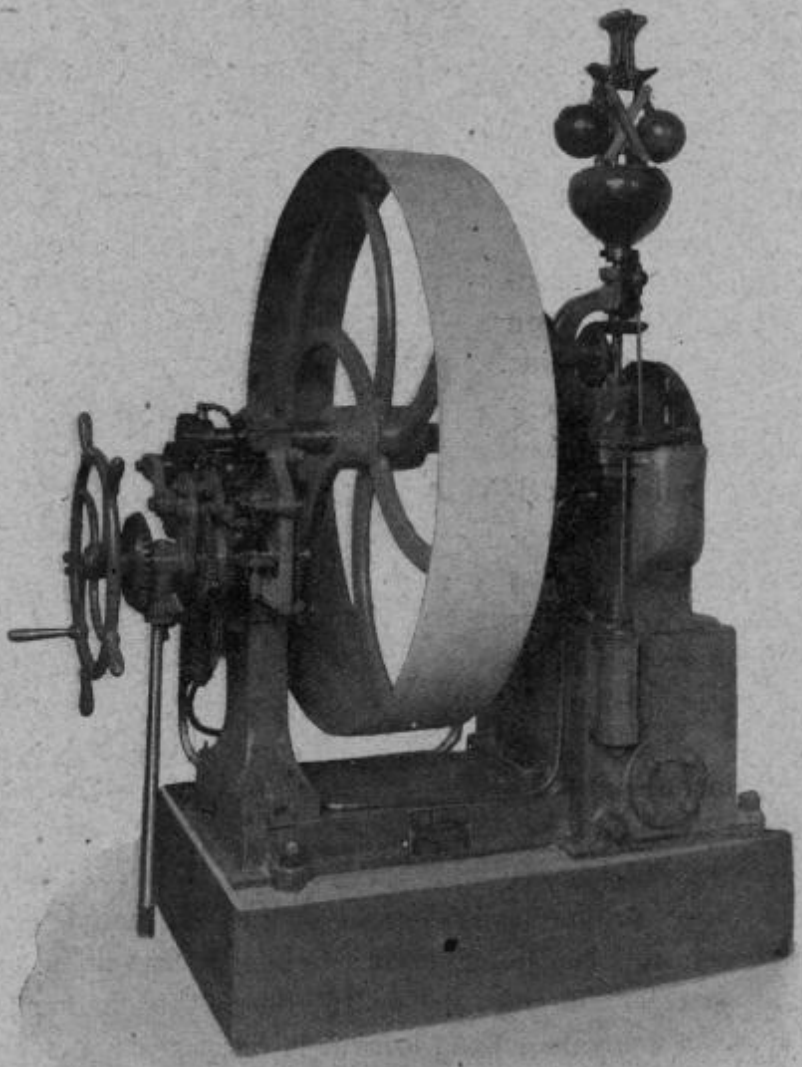


Fig. 579. — Régulateur absorbeur avec encliquetage, système A. et H. Bouvier.

est de grande utilité dans les installations où le niveau de la retenue n'est pas constant, soit d'une façon permanente, soit d'une manière discontinue. Si la turbine est munie d'un régulateur de vitesse, celui-ci agit lorsqu'il y a excès de vitesse et le régulateur de niveau, quand il y a manque d'eau.

L'arbre de travail du régulateur de niveau J. Voith porte deux excen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

triques ainsi que deux leviers oscillants. Ces derniers reçoivent leur mouvement de va-et-vient de deux manivelles calées à 180° sur l'arbre moteur. Les leviers portent des verrous de fermeture aux deux extrémités, qui s'encastrent dans les excentriques. Dans la position intermédiaire, aucun de ces deux verrous n'est en contact ; mais si le levier-guide est mû dans

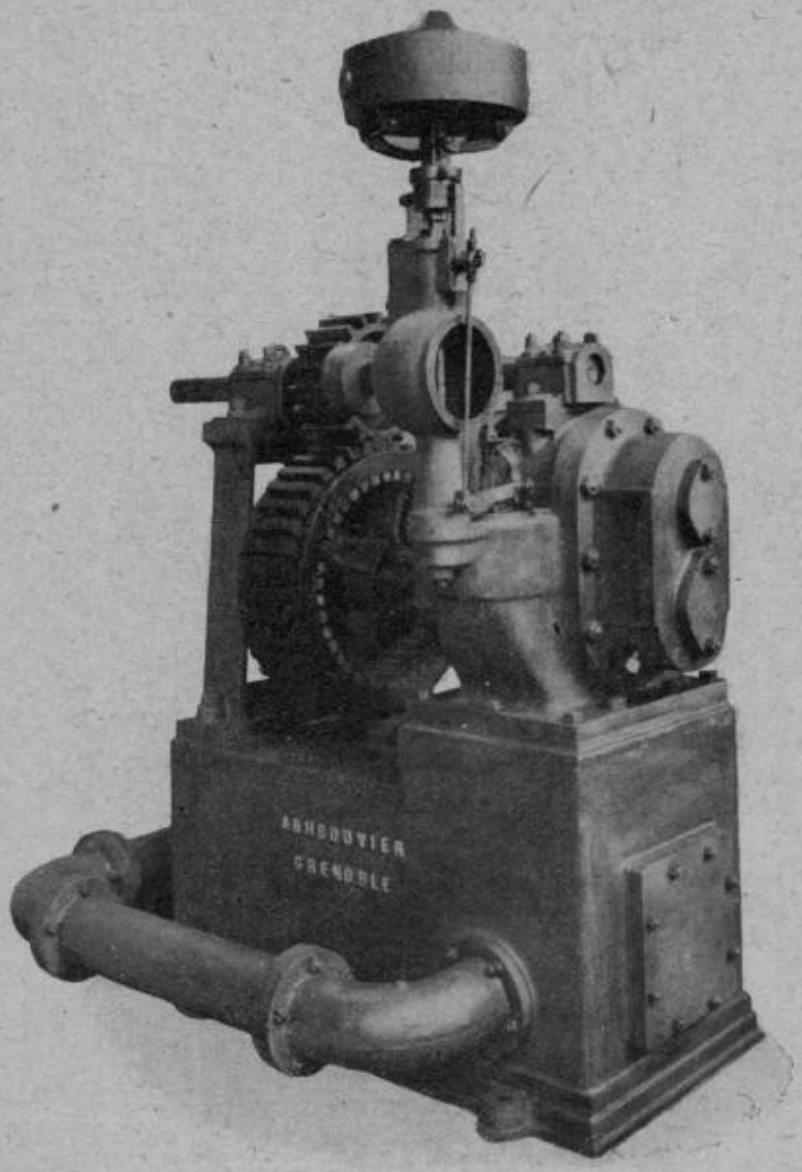


Fig. 580. — Régulateur absorbeur à frein hydraulique, système A. et H. Bouvier.

un sens ou dans l'autre, les verrous correspondants viennent en prise et l'arbre moteur agit dans le sens correspondant.

Le guide est actionné par un flotteur qui suit le niveau de l'eau et celui-ci est transmis par une tige et une articulation à un arbre spécial. Entre celui-ci et le levier-guide, un dispositif spécial empêche le mouve-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment régulateur de prendre trop d'amplitude et de dépasser son but. Le mouvement de l'arbre moteur est imprimé aux turbines et il est réglé de telle sorte que l'ouverture d'admission croît quand le niveau de l'eau monte et que le régulateur des turbines est à pleine ouverture, quand l'eau affleure la crête du barrage. Le régulateur est fermé dès que l'eau baisse de quelques centimètres au-dessous de ce niveau.

Le flotteur doit être placé de telle façon que les tiges soient les plus légères et les plus simples possible pour éviter des frottements nuisibles et rendre le réglage plus aisé. Il faut aussi, le plus possible, que l'arbre moteur du régulateur reçoive directement son mouvement de la turbine.

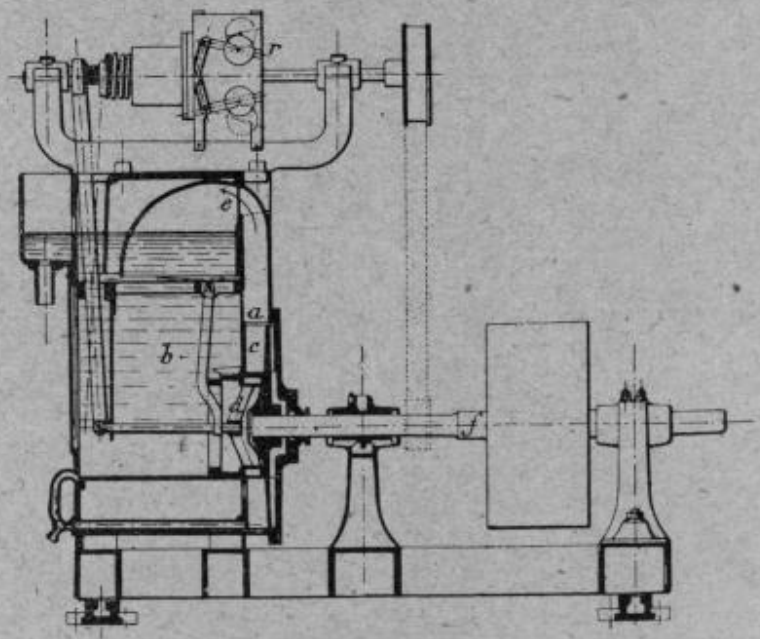


Fig. 581. — Régulateur absorbeur Rüsh (Singrün, Épinal).

Le flotteur est applicable dans tous les cas, qu'il s'agisse de turbines ouvertes ou de turbines fermées.

173. Hydrotachymètres. — Nous avons vu que les régulateurs de vitesse sont placés sous la dépendance d'un tachymètre centrifuge qui commande les organes de régulation proprement dits, vannes ou freins, par l'intermédiaire d'un servo-moteur capable de développer les efforts mécaniques nécessaires à leurs fonctions.

L'hydrotachymètre imaginé par M. Ribourt permet d'obtenir des conditions de rupture d'équilibre supérieures à celles du tachymètre centrifuge.

Un circuit liquide fermé, huile ou eau pure, est mis en mouvement par un petit compteur Z entraîné par la turbine (*fig.* 582). Le liquide refoulé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le compteur passe dans un ajutage *f* muni d'un organe mobile qui en modifie automatiquement la section libre, de manière à transformer les variations de vitesse du compteur en variations de pression interne, dans des conditions très favorables pour une rupture brusque de l'équilibre au voisinage de la vitesse dite de régime pour laquelle l'appareil a été réglé.

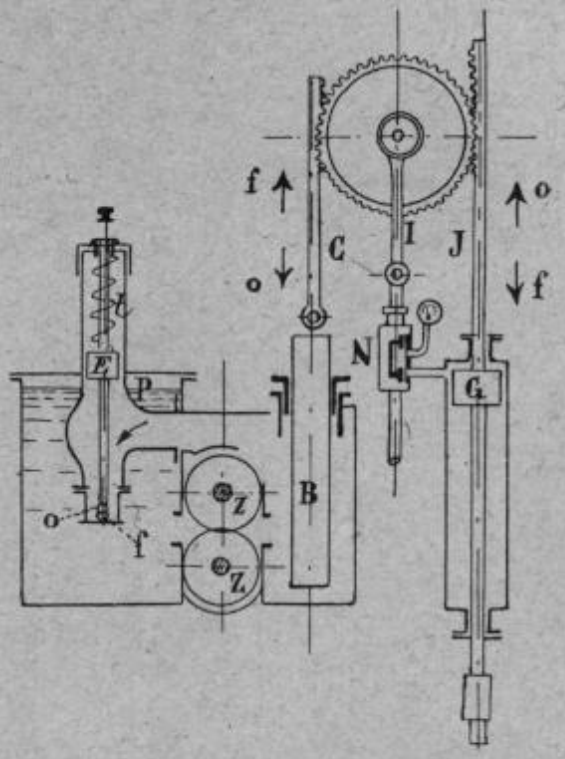


FIG. 582.

Pour utiliser ce phénomène au réglage de la turbine, un piston flotteur lesté B est immergé dans le liquide en circuit refoulé par le compteur et commande le tiroir de distribution N du relais G à piston hydraulique actionnant le vannage, par un dispositif d'asservissement pour le rappel à zéro, constitué par les deux crémaillères C et J engrenant avec le piston suspendu I attelé au tiroir N.

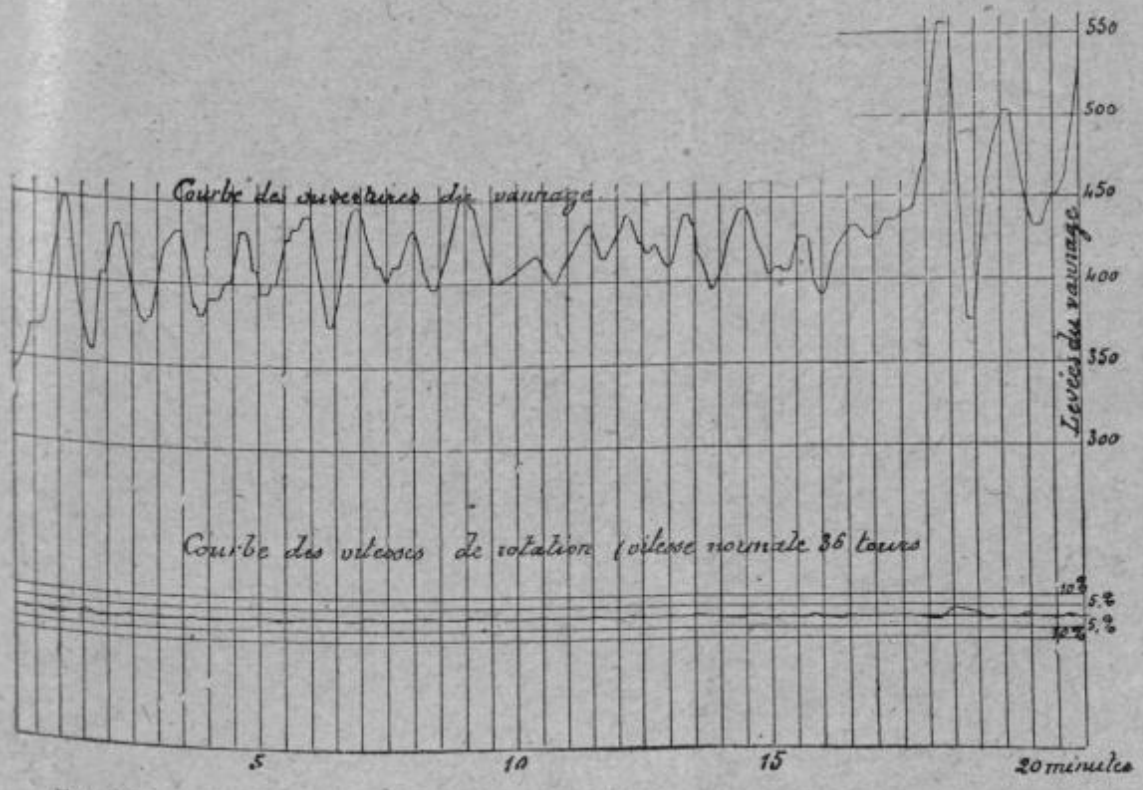


FIG. 583. — Courbes des vitesses de rotation d'une turbine Teisset, Chapron et Brault munie d'un régulateur Ribourt.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les variations de pression importantes produites dans le circuit du compteur se répercutent sur le piston flotteur actionnant le servo-moteur du vannage et commandent opportunément les mouvements de celui-ci avec le même degré de sensibilité, suivant les tendances de la turbine à s'accélérer ou à se ralentir.

La grande sensibilité de cet appareil provient d'une disposition rendant l'orifice de débit automatiquement variable, en sens inverse des valeurs de la pression intérieure du circuit. Dans les usines qui comportent plusieurs turbines, un seul hydrotachymètre peut être employé pour actionner toutes les pompes motrices des vannages; une même vitesse est ainsi assurée à chacune des turbines et, dans les usines électriques, la mise en parallèle des génératrices est rendue plus facile. L'hydrotachymètre est, dans ce cas, actionné par l'une des turbines ou par un petit moteur électrique spécial.

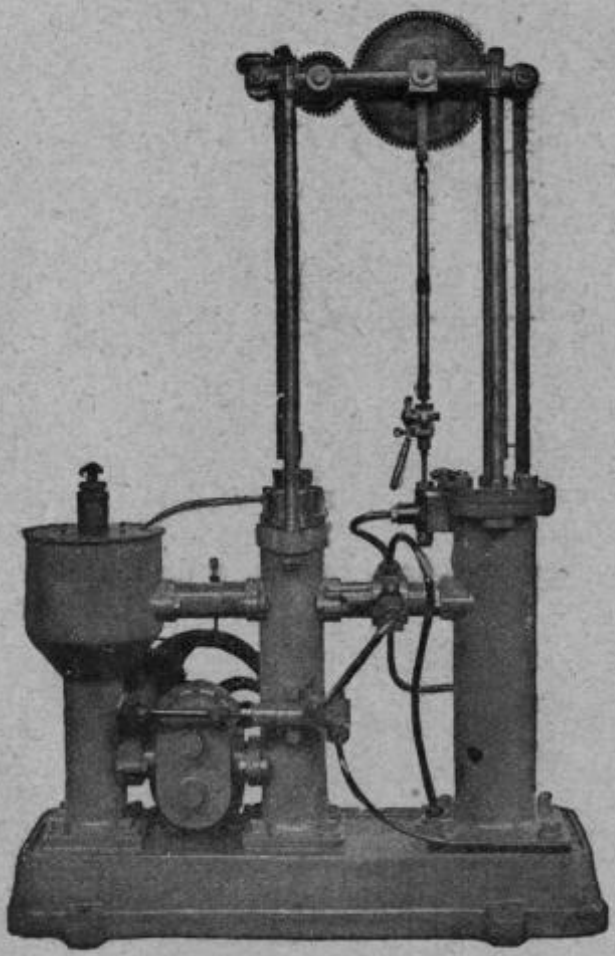


FIG. 584. — Régulateur de vitesse Ribourt (face arrière).

Le régulateur automatique de vitesse *Singrün* est à servo-moteur par pression d'huile avec distributeur à quadruple siège, dont l'équilibre est assuré automatiquement par une petite pompe secondaire et un ressort de rappel. La pression est obtenue par une pompe principale qui agit sur deux pistons pour obtenir un mouvement rectiligne, dans un sens ou dans l'autre, suivant la position du pendule. Une soupape de sûreté et de décharge évite les surpressions et permet la manœuvre à la main pour la mise en route ou l'arrêt de la turbine.

Un dispositif spécial de sûreté agit sur la fermeture de la turbine en cas de chute d'une courroie ou d'accident et en arrête le fonctionnement.

La disposition spéciale de la soupape de distribution de l'huile maintient la pression constante, toujours prête à agir, ce qui donne à l'appareil une vitesse d'action très rapide et une grande sensibilité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'emploi des régulateurs est de première nécessité dans les usines de production d'énergie pour l'éclairage et la distribution de force. Il n'en est pas de même pour les usines destinées à l'électro-chimie, où les bains électrolytiques constituent par eux-mêmes d'excellents régulateurs. Dans les industries comportant des fours électriques, il n'y a pas lieu non plus de maintenir absolument constante la vitesse de régime de la turbine et, par suite, la tension du courant.

Dans quelques stations centrales hydroélectriques, on préfère recourir aux accumulateurs servant de régulateurs ; dans d'autres, on a adopté une double régulation, une indépendante pour chaque turbine (régulateur à servo-moteur) et une autre simultanée pour toutes les turbines. Cette dernière s'obtient au moyen de petits moteurs électriques agissant chacun sur le ressort du régulateur à boules commandant la distribution ou bien l'encliquetage du servo-moteur dont chacune des turbines est munie (stations centrales de Paderno et de Vizzola en Italie).

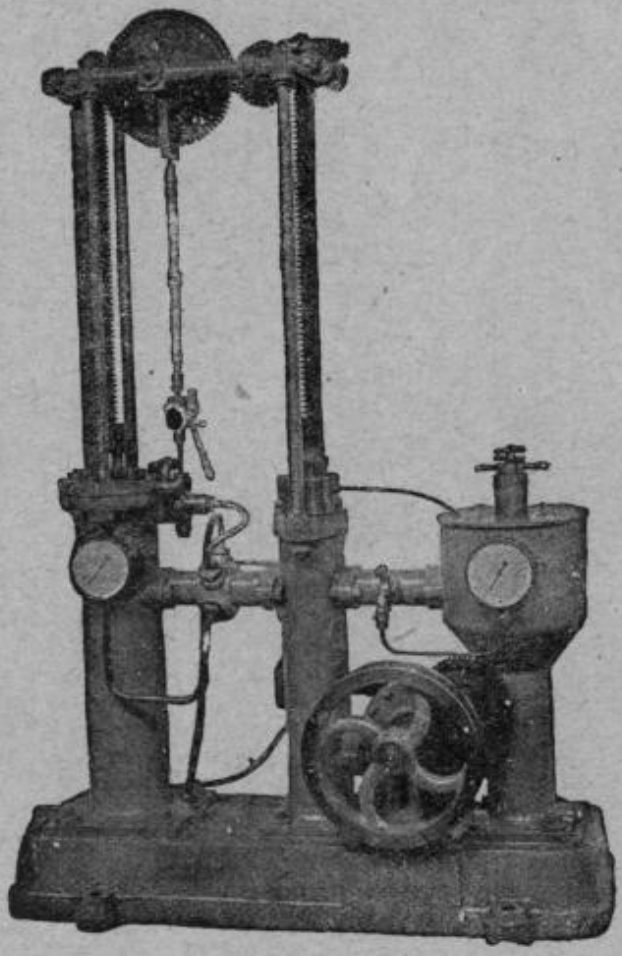


FIG. 585. — Régulateur de vitesse Ribourt (face avant). Teisset, Chapron et Brault frères, constructeurs.

A l'usine de Subiaco (Italie), les eaux étant impropres pour l'actionnement des régulateurs, la distribution de l'huile est assurée par deux turbines Pelton, deux pompes et un accumulateur, ce dernier faisant entrer en action ou excluant les pompes automatiquement en agissant sur un système de leviers qui, suivant les dispositions du piston, ouvrent et ferment la valve d'admission aux Pelton.

Volants. — Nous avons vu que le temps de réglage de la vitesse varie avec l'importance des masses tournantes et avec l'importance de la variation de la charge. D'autre part, dans les turbines alimentées par des conduites forcées, la fermeture du vannage est accompagnée de coups de béliers. Il y a donc intérêt à faire la fermeture pendant un temps aussi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

long que possible, mais compatible avec la masse et avec la vitesse de l'eau en mouvement.

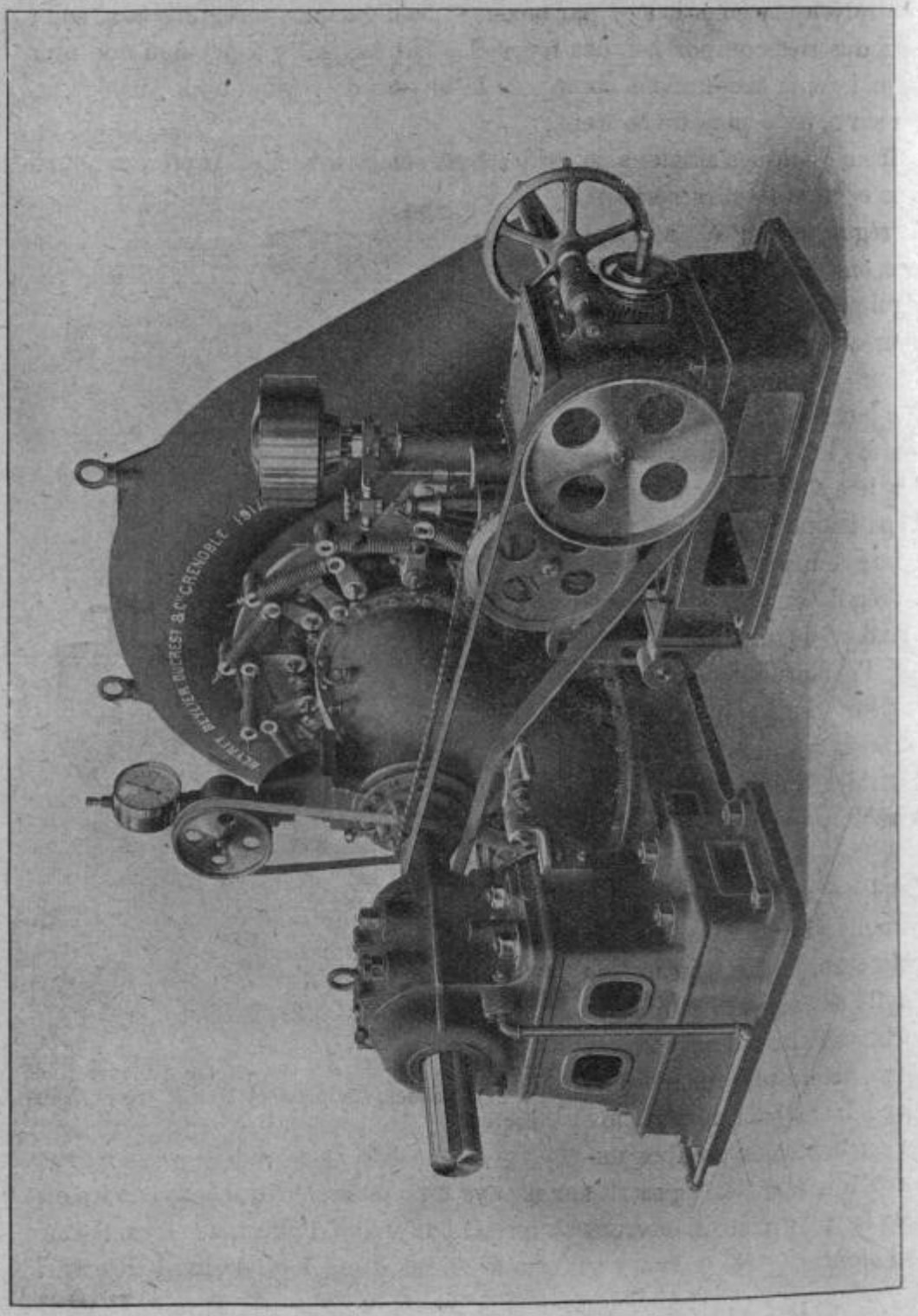


Fig. 587. — Régulateur à huile sur turbine centripète à axe horizontal de 1.000 HP (Usine de la Picadère, Haute-Garonne).

Si on appelle P la puissance maxima de la turbine à pleine ouverture du vannage, T la durée du temps pour arriver à la fermeture complète, pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

laquelle la puissance est nulle, E la demi-puissance vive des masses en mouvement $\left(\frac{1}{2}\Sigma V_0^2, V_0 \text{ vitesse initiale de la couronne mobile}\right)$ lors de la marche en pleine charge, et en admettant, pour des turbines à dynamo, que la valeur du rapport du décrement du tachymètre avec la vitesse moyenne au décrement relatif soit de 0,05, on peut poser la relation :

$$\frac{PT}{2E} = 0{,}1.$$

Cette valeur donne une idée de l'importance que doivent avoir les masses, dans le cas de tachymètres directs. Mais, pour les régulateurs asservis on peut prendre l'expression :

$$\frac{PT}{2E} = 1 \text{ à } 2.$$

Si les masses métalliques en mouvement ne satisfont pas à cette condition, on y supplée à l'aide de volants installés sur les axes des turbines, y jouant ainsi un rôle tout différent de celui que remplissent les volants des moteurs à mouvement alternatif.

Choix d'un régulateur. — On doit envisager en vue du choix d'un régulateur à appliquer à une turbine, le type lui-même et la durée de fermeture.

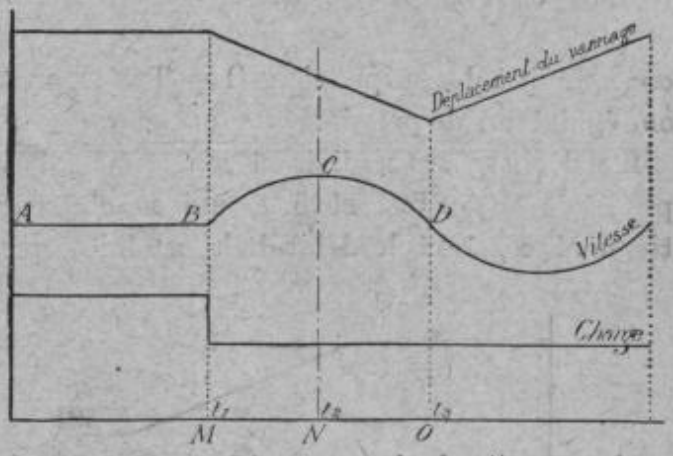


FIG. 588. — Diagramme de fonctionnement d'un régulateur à action indirecte.

Les régulateurs à servo-moteur hydraulique sont d'une façon générale plus précis que les régulateurs à servo-moteur mécanique. Ils permettent en outre d'obtenir des durées de fermeture extrêmement rapides, ce qui est souvent fort avantageux.

Pour un même poids de volant les conditions de régularité sont, en effet, d'autant meilleures que la vitesse de fermeture est plus grande. Mais par contre plus cette vitesse est rapide, plus les coups de bélier sont importants dans les conduites forcées. En général il convient d'adopter des fermetures très courtes pour les turbines fonctionnant sous basses chutes à chambre ouverte ou avec des conduites de faibles longueurs ; au contraire, pour les hautes chutes et les longues conduites, on choisit des vitesses de fermeture plus lentes que l'on détermine en tenant compte des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

surpressions tolérées. Dans la pratique on prend comme durées de fermeture un espace de temps variant entre deux et quinze secondes.

Si ayant admis une vitesse déterminée qu'on ne veut pas diminuer, on

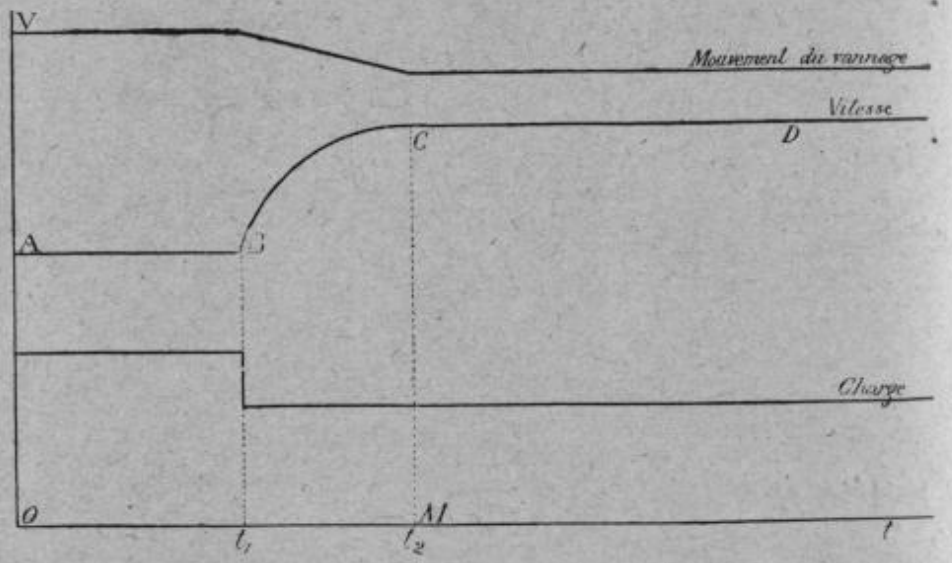


Fig. 589. — Diagramme de fonctionnement d'un régulateur à action directe.

est conduit à des surpressions trop élevées, on fait appel aux déchargeurs ou régulateurs de pression.

Les déchargeurs se divisent comme nous l'avons dit en : vannes compensatrices (*fig.* 593 et 594) qui se classent en appareils qui maintiennent constant le débit de la conduite, quel que soit le degré d'ou-

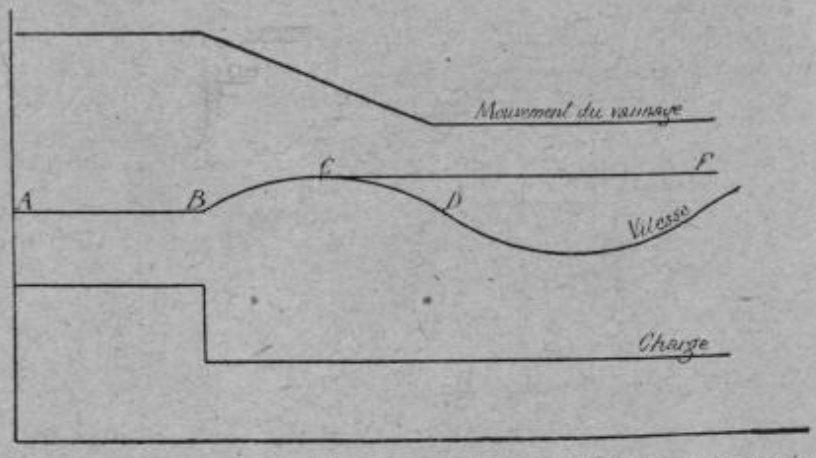


Fig. 590. — Diagramme de fonctionnement d'un régulateur avec asservissement.

verture des vannages des turbines ; en appareils qui, au moment d'une diminution de charge, maintiennent constant le débit de la conduite, mais se referment ensuite lentement jusqu'à ce que l'eau passant dans la conduite soit à nouveau complètement absorbée par la turbine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les vannes compensatrices ont l'inconvénient de ne pas économiser l'eau.

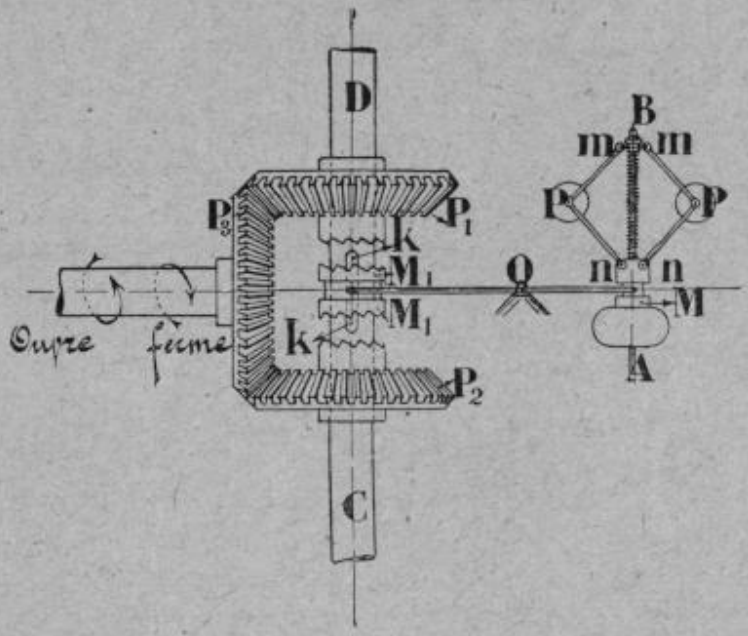


Fig. 591. — Figure schématique d'un régulateur à action directe (montrant qu'un tel régulateur ne pourrait fonctionner).

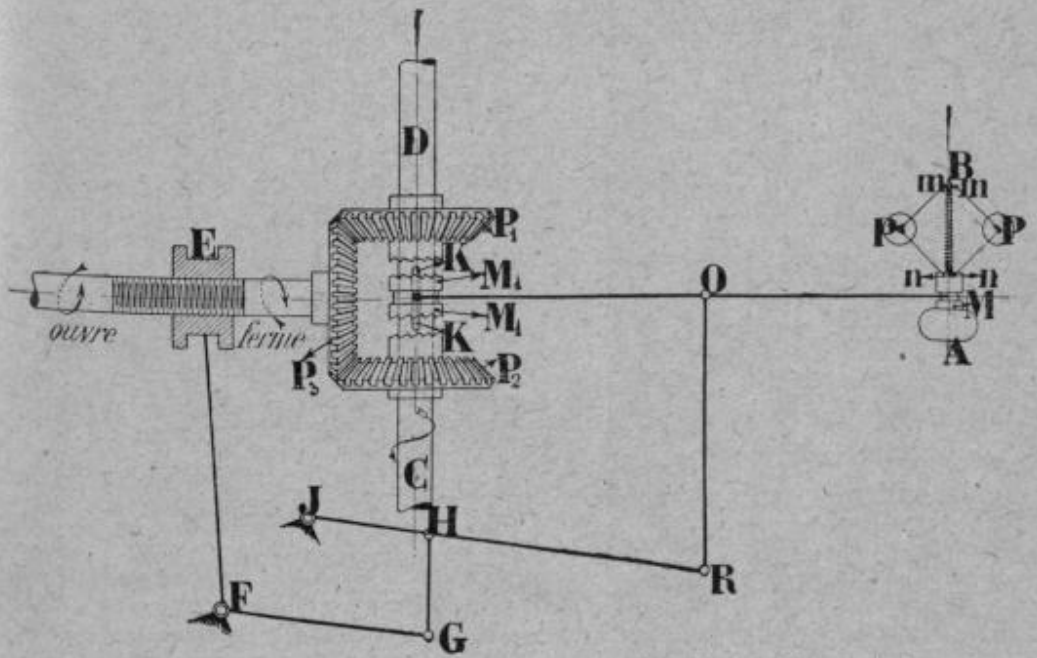


Fig. 592. — Figure schématique montrant l'application de l'asservissement au relais-moteur.

Les appareils ou déchargeurs de la seconde catégorie sont sans action lors de l'ouverture du vannage de la turbine. Ils n'évitent donc pas les dépressions consécutives aux ouvertures rapides mais agissent seulement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en cas de fermeture du vannage. Dans ce cas le déchargeur s'ouvre au fur et à mesure que le vannage se ferme, puis il se referme lui-même très lentement de façon à ne produire qu'une faible surpression dans la conduite.

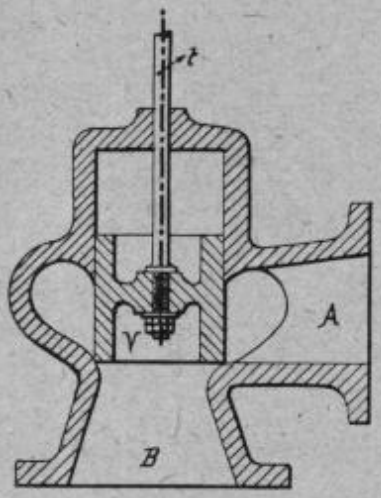


FIG. 593. — Vanne compensatrice. — A, *tubulure reliée à la conduite*; B, *tubulure d'évacuation*; V, *vanne cylindrique*; t, *tige reliée au régulateur*.

Limiteurs de vitesse. — On sait que dans l'électrochimie et l'électrométallurgie, les variations de vitesse des turbines ont souvent relativement peu d'importance. Un simple réglage à main suffit en général pour parer aux variations de charge et maintenir les vitesses dans les limites convenables. Toutefois, en cas de déclenchement total, les machines s'emballent, inconvénient que l'on peut éviter en employant des limiteurs de vitesse, qui suppriment l'arrivée de l'eau à la turbine dès que la vitesse a dépassé la vitesse normale d'une certaine quantité fixée à l'avance. En fait on n'évite pas de cette façon l'emballement mais sa durée, ce qui permet d'éviter les échauffements des paliers et les effets néfastes des vibrations prolongées. Si les machines sont calculées, comme cela doit l'être, pour l'emballement total, le fonctionnement de l'appareil donne complète sécurité.

On se trouve dans le même cas que les industries électrochimiques et électrométallurgiques, pour les usines marchant en parallèle avec d'autres sur de grands réseaux. Dans ce cas, en effet, il n'y a qu'une usine faisant le réglage, les autres donnant le maximum que leur permet l'état des eaux. Toutes les turbines de ces dernières peuvent fonctionner sans régulateur. Toutefois, en cas de déclenchement, il faut que les turbines se ferment et d'autre part, toutes les usines pouvant être appelées successivement à faire le réglage, les unités doivent nécessairement pouvoir marcher également avec régulateurs. Dans ce cas, les constructeurs agencent leurs régulateurs de telle façon qu'ils puissent fonctionner à volonté soit en régulateurs proprement dits, soit en limiteurs de vitesse.

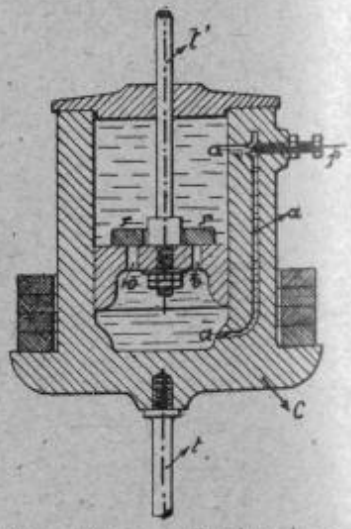


FIG. 594. — Dash-pot. — t, *tige actionnant la vanne compensatrice*; c, *cylindre à huile*; a, *canal*; p, *pointeau*; o, *ouvertures pratiquées dans le piston*; r, *rondelle-clapet*; t', *tige reliée au régulateur*.

Il peut arriver, en certaines circonstances où l'on veut une sécurité aussi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grande que possible, que l'on munisse à la fois un groupe d'un régulateur et d'un limiteur de vitesse, ce dernier appareil agissant en cas de non-fonctionnement accidentel du premier.

Dans ces différents cas le limiteur de vitesse peut agir soit sur le vannage de la turbine, soit sur la vanne d'arrêt, robinet-vanne ou papillon de la machine. La commande peut se faire par l'intermédiaire soit d'un servo-moteur mécanique, soit d'un servo-moteur hydraulique. Dans tous les cas les durées de fermeture sont calculées de façon à éviter les surpressions dangereuses.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X

CRÉATION DES CHUTES. — TRAVAUX DE DÉRIVATION ET D'AMÉNAGEMENT

174. Examen et étude du cours d'eau au point de vue de l'emplacement de l'usine. — Les moyens d'aménagement des chutes d'eau importantes varient selon que l'on est en présence de chutes faibles et à grands débits, de chutes moyennes utilisant des débits plus ou moins grands et enfin de hautes chutes avec de faibles débits, mais dans tous les cas fournissant des forces motrices considérables, dépassant parfois 50.000 chevaux (1).

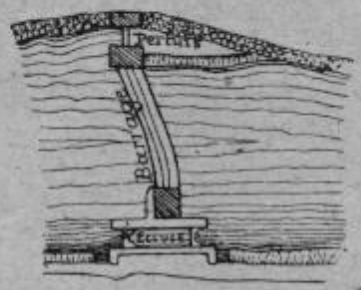


FIG. 595.

Pour créer une chute, ou bien on construit un barrage d'une certaine hauteur, ou bien on établit un canal latéral ou de dérivation à pente plus faible que le cours d'eau, ou le plus souvent on utilise ces deux modes à la fois ; dans ce dernier cas, le barrage sert alors, d'une part, à relever le plan d'eau et, d'autre part, à détourner à l'étiage l'eau du cours dans le canal d'amenée. La technique actuelle fait intervenir presque partout, et toujours avec succès, les conduites forcées en tôle qui, posées sur les pentes sans dispositifs compliqués, se plient aux profils les plus accidentés.

Pour les rivières navigables, la prise d'eau consiste, dans ses grandes lignes, à établir (*fig.* 595) un barrage, une écluse et un pertuis. Du côté de l'écluse se trouve le chemin de halage.

Lorsqu'on a à établir une usine sur un cours d'eau non navigable ou non flottable, le cas le plus simple qui se présente est celui qui est indiqué par la (*fig.* 596). On pratique, en travers de la rivière, un déversoir et une vanne de décharge V tels que le plan d'eau en amont ne puisse s'élever

(1) Il existe déjà des usines de 150.000 HP. La Great Northern Power C° utilise une chute de 126 mètres pour un transport de force à Duluth : l'installation, quand elle sera complète, pourra fournir 200.000 HP, à l'aide de turbines Escher Wyss verticales de 13.000 HP, à 375 tours.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

accidentellement de plus de $0^m,10$, au-dessus du point d'eau fixé par l'Administration. On sait que cette opération a pour but d'empêcher que la hauteur de retenue des eaux en amont ne puisse gêner les usines existantes ou porter préjudice aux riverains.

On peut avoir à déterminer la hauteur de chute suivant que l'usine existe ou que la chute est à créer.

Si la chute existe et est légalement autorisée, l'acte administratif fait connaître les droits du propriétaire de la chute et les obligations qui lui incombent, ainsi que s'il jouit d'une certaine tolérance dans la position du niveau d'amont.

On commence par procéder à un nivellement entre l'usine dont on a à s'occuper et la première usine placée en aval.

Nous avons d'abord à nous rendre compte si cette dernière est ou non autorisée. Si elle l'est, l'eau doit être maintenue en amont à la hauteur de la crête du barrage B (*fig.* 597). Les cotes relevées pour les crêtes A et B donneront, par différence, la hauteur de chute disponible h' pour l'usine

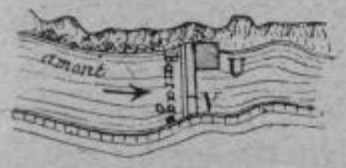


FIG. 596.

FIG. 597.

qui nous occupe. Cette opération du nivellement devra être répétée plusieurs fois au cours de l'année, à cause de la variation du niveau *ab* résultant de la variation de débit ; de même il sera avantageux de draguer le fond du lit entre A et B, pour éliminer les bosses de terrain et les herbes qui peuvent s'y trouver, car ces accidents ont pour effet de diminuer la hauteur de chute disponible.

Si l'usine en aval n'a pas été autorisée (alors la chute existait et les dimensions de ses ouvrages régulateurs n'ont pas été fixées par l'Administration), il faut s'assurer que la retenue de l'eau établie en *b* ne produit aucun remous en aval de la turbine de l'usine A. Dans la saison des eaux moyennes, l'usine B ne doit pas produire de surélévation en aval de A.

A cet effet, il faut s'assurer que cette dernière, en marche régulière, maintient son niveau d'amont à la hauteur voulue, c'est-à-dire qu'elle débite bien l'eau qui lui arrive. Pour cela on marque la position qu'occupe le niveau de l'eau en aval du barrage B, puis on lève complètement la vanne de décharge ménagée dans ce dernier, de façon à annuler l'effet du déversoir B. Au bout d'un certain temps, le régime permanent s'établit et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on s'assure que la première usine fondée en aval de B est en marche normale et régulière.

Si le niveau de l'eau est resté le même au point *a*, on est certain que le barrage B retenant l'eau à la hauteur du point *b* ne produit aucun remous à l'usine A, et par suite on peut maintenir le point *b* pour la position d'amont de l'usine B et, pendant le fonctionnement de cette usine, on aura le profil d'eau *ab*.

Quand les usines sont établies dans le thalweg de la rivière, il y a lieu de se rendre compte que le niveau *ab* est bien de 15 à 20 centimètres en contre-bas des prairies environnantes, circonstance dont on n'aurait pas à s'occuper si les deux usines étaient réunies par un canal creusé de main d'homme.

Si, après l'effet de l'annulation du barrage B, le niveau de l'eau en aval de A est descendu en *a* d'une certaine quantité *x*, on en conclut qu'en retenant l'eau à la hauteur de *b* on produit un remous sous la turbine A. Alors l'abaissement de niveau déterminé, qui correspond à une augmentation de la chute, peut profiter à l'usine A, et l'usine B ne peut s'y opposer. Dans ce cas, il y a lieu d'abaisser le point *b*, c'est-à-dire d'araser le barrage B et chercher un point qui ne produise pas de surélévation de l'eau, point que l'on détermine expérimentalement en fermant successivement les vannes de décharge de l'usine B. Mais, si l'usine A n'utilise pas cet avantage, le propriétaire de l'usine B a le droit de faire relever le niveau d'eau de la quantité *x* mentionnée ci-dessus.

Nous allons maintenant examiner le cas où la chute serait à créer. Sur la partie du cours d'eau que l'on veut utiliser, on relève le profil en long du fond du lit ainsi que ceux de la surface du courant pour les hautes eaux, les eaux moyennes et l'étiage.

On divise en un nombre pair de parties égales la longueur de la rivière dont on se propose l'aménagement, et en chacun des points de division on relève les profils en travers donnant les sections transversales du cours d'eau.

Après choix de l'emplacement du barrage, il faut déterminer le profil en long pour la surface du courant et pour les trois états principaux de la rivière ne devant produire aucune surélévation dans la section choisie, car il pourrait, en effet, exister en amont de cette section une usine pour laquelle on n'ait pas le droit de modifier le niveau d'aval. La section que l'on a adoptée pour l'établissement du barrage doit être sensiblement rectiligne, avec une pente et une section ne présentant pas de variations brusques autant que possible.

Pour déterminer le nouveau profil en long, on suppose que, dans la section considérée, il ne se produit aucun remous. Cette condition est fixée soit par une usine située en amont, soit par un refus de propriétaire riverain, soit à cause d'une submersion possible des rives du cours d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut aussi, ainsi que l'a proposé M. Saugey, disposer l'usine au-dessus du barrage lui-même, dans lequel les chambres des turbines alternent avec des vannes de fond.

De cette façon les tuyaux de fuite débouchent dans les endroits où les courants provenant des vannes déterminent des dénivellations, et la hauteur de chute vraiment utilisable se trouve augmentée de presque toute la hauteur de cette dénivellation ; en outre, l'appel d'eau fait par les vannes a pour effet d'empêcher les corps flottants de s'y fixer et de les obstruer.

Pour le calcul du débit de la rivière, s'il existe déjà une usine sur son cours, soit en amont, soit en aval, on pourra être renseigné sur sa valeur, ou même, en consultant les statistiques des Ponts et Chaussées, on sera à même d'avoir les indications nécessaires. A défaut, on usera des moyens que nous avons indiqués au (chapitre IV).

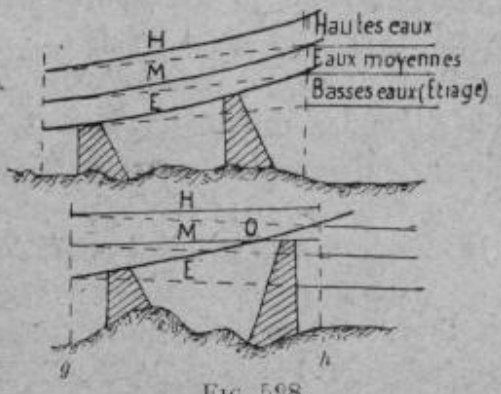


FIG. 598.

Dans le cas où on sera obligé de recourir au calcul pour la détermination des débits pour les trois états de rivière, on établira les profils correspondant à la position du barrage à l'endroit choisi, soit, pour fixer les idées, dans la section *gh* (*fig.* 598). Si les nouveaux profils ne se rencontrent pas, c'est la position de l'étiage (E) qui réglera la hauteur du barrage.

Si les nouveaux profils se coupent entre *g* et *h*, c'est le profil des eaux moyennes (M) qui règle la hauteur du barrage quand celui-ci est fixé entre *o* et *h*, et, s'il est établi entre *o* et *g*, c'est le profil de l'étiage (E) qui détermine sa hauteur, c'est-à-dire que c'est toujours le profil le plus bas qui fixe la crête du barrage.

I. — ÉTABLISSEMENT DES PROFILS

175. Profils en long. — La chute opérée par un cours d'eau a pour valeur la distance verticale entre le niveau de l'eau dans le bief d'amont et le niveau dans le bief d'aval.

Lorsque le barrage est établi, un nivellement permet de se rendre compte de cette valeur et quand des vannes de décharge existent près de l'usine, la vérification en est des plus faciles si l'eau d'aval vient les baigner.

Pour pouvoir établir le profil en long d'un cours d'eau, il faut connaître,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

non seulement les dénivellations des points saillants successifs de ce profil, mais encore les distances des points à l'origine des longueurs, prise ici à l'embouchure du cours d'eau.

Des altitudes inscrites, on déduit exactement les hauteurs de chute du cours d'eau entre les nombreux points, tels que confluents, débouchés de ravins, ponts, passerelles, rochers portant des repères de nivellement, etc., figurés sur les profils.

Les distances des divers points nivelés d'un cours d'eau, comptés à partir du confluent et relevées, sur la carte, en vue de l'établissement du profil en long, sont, en principe, mesurés suivant l'axe du lit, autant que cela est possible. Ainsi pour les rivières à fond mobile et de grande largeur on est obligé de rapporter les profils à l'axe du champ de gravier dans lequel serpentent les dites rivières.

Pour un tronçon donné d'un cours d'eau, la pente est égale à la hauteur de chute, déduite du nivellement, et relativement exacte, divisée par la longueur horizontale correspondante, beaucoup moins bien déterminée du tronçon considéré ; c'est-à-dire que l'erreur relative de la hauteur de chute est souvent négligeable à côté de l'erreur relative de la longueur du tronçon.

Il est très important de connaître la chute qui sera réellement utilisée ; aussi lorsque le moteur hydraulique existé, il est bon de mesurer la différence des niveaux amont et aval, d'abord pendant la marche, puis après l'arrêt du moteur.

A défaut de moteur existant on peut, au moyen d'une vanne, laisser écouler l'eau du bief d'amont ou bief d'aval, de la quantité d'eau que l'on désire.

Si la chute est entièrement à créer, un nivellement permet seul de mesurer la hauteur de la chute et on calcule la vitesse théorique correspondant à une hauteur de chute donnée h par la formule connue : $V = \sqrt{2gh}$.

L'on sait que la plupart des cours d'eau torrentiels sont composés d'une succession de rapides séparés par des parties en palier ou à peu près. Les moyens à employer, pour relever la différence des niveaux entre la prise d'eau et l'emplacement de l'usine, qui constitue la hauteur de la chute, dépendent, d'une part, de la précision que l'on veut apporter à cette opération et, d'autre part, du relief du sol à niveler.

Pour les terrains peu accidentés, les niveaux d'eau et les niveaux à lunette sont indiqués; le premier instrument, qui permet une appréciation à $\frac{1}{100}$ sur la dénivelée de deux points distants entre eux de 30 mètres environ, donne une précision bien inférieure à celle que l'on obtient à l'aide du second instrument, qui permet de compter sur une approxima-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion de $\frac{1}{50.000}$ à $\frac{1}{60.000}$ pour la dénivelée entre deux points séparés de 200 mètres.

Les *baromètres altimétriques* du colonel Goulier compensés, construits par la maison J. Richard, permettent de mesurer des hauteurs variant de 2.000 à 6.000 mètres avec une appréciation de 1 mètre.

Le *niveau à eau et à mercure Bergès*, — qui consiste en un petit réservoir contenant de l'eau et facilement transportable, relié à un tuyau en caoutchouc de 25 à 150 mètres de longueur, dont l'autre bout est en communication avec un tube plein de mercure jusqu'à mi-hauteur, lequel tube est porté par un trépied, — est très propre à effectuer des opérations de nivellement en montagne ; on peut monter ou descendre de 500 mètres en cinq heures, en relevant 100 à 120 cotes.

Le nivellement par les pentes convient au genre d'opérations qui nous occupent ; les instruments de cette catégorie sont nombreux et le choix auquel on s'arrêtera dépend de l'approximation que l'on a pour objectif. Avec un théodolite on pourra en même temps faire une triangulation de surface ; la boussole à éclimètre et le tachéomètre permettront de contenir l'erreur relative entre $\frac{1}{6.000}$ et $\frac{1}{10.000}$. La règle à éclimètre et l'alidade nivelatrice du colonel Goulier justifient une appréciation de $\frac{1}{6.000}$ pour le premier de ces instruments et de $\frac{1}{2.500}$ pour le second ; ces deux appareils

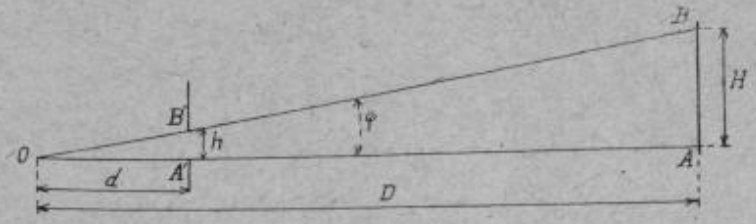


FIG. 599.

doivent être employés sur la planchette déclinée. Il convient d'ajouter que ces approximations ne sont acquises que si l'on combine l'emploi de ces instruments avec celui des stadias ou qu'on exécute les chaînages avec le ruban d'acier en s'entourant des précautions convenables.

Le procédé de la stadia basé sur des observations optiques permet de mesurer les distances directement. Il s'appuie sur le principe suivant :

Soit (*fig.* 599) une ouverture h dans un écran A'B' permettant à l'œil placé en O d'apercevoir sur AB parallèle à A'B' une longueur H.

La similitude des triangles donne :

$$\frac{D}{H} = \frac{d}{h} \text{ ou } D = \frac{dH}{h}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si donc, les dimensions d, h et H sont connues, elles permettront de calculer D.

Si dans une lunette on intercale un réticule formé de deux fils horizon-

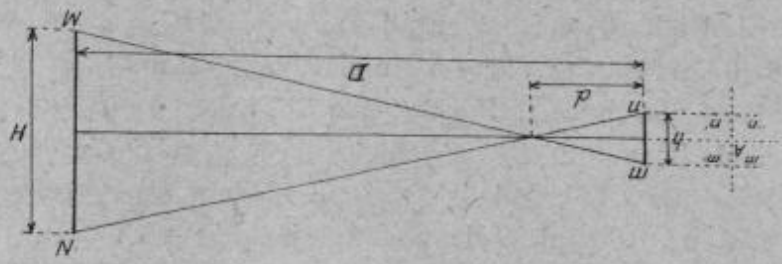


Fig. 600.

taux mm' et nn' (*fig.* 600) et qu'on mette au point l'image d'un objet de façon qu'elle se forme dans le plan du réticule, on aura deux constantes :

h déterminée par l'angle diastimométrique ω et d réglée une fois pour toutes par le constructeur.

On en déduit donc D par la seule mesure de H que l'on obtient d'ailleurs par une simple lecture sur la mire parlante.

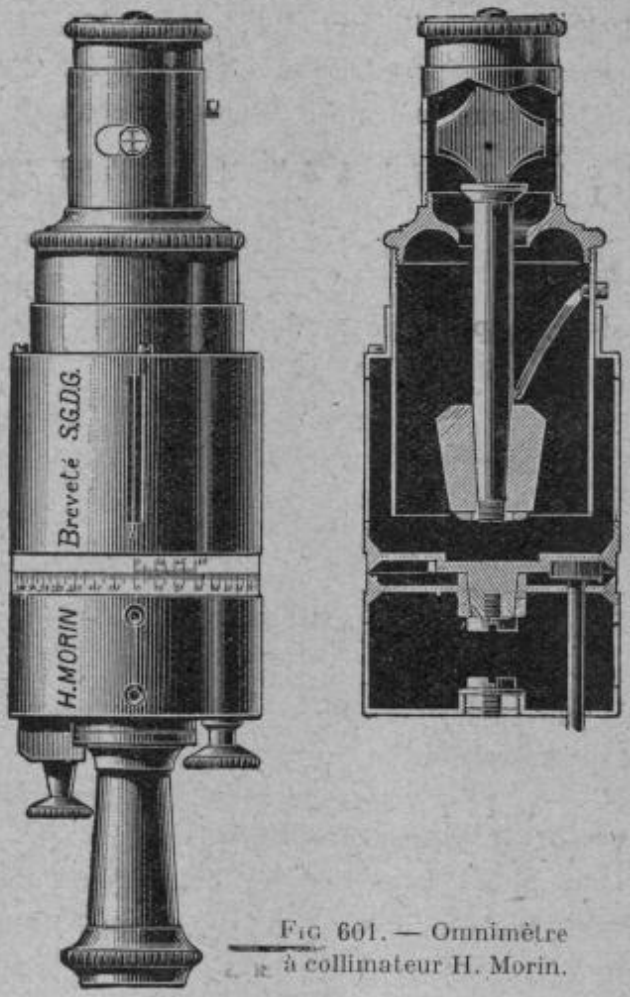


Fig. 601. — Omnimètre à collimateur H. Morin.

L'omnimètre à collimateur H. Morin (*fig.* 601) réunit, en un seul instrument très portatif, le niveau, l'éclimètre et le pantomètre à rappel. L'avantage le plus remarquable que présente cet instrument consiste en ce que le niveau à échelle de pentes et le pantomètre sont complètement indépendants ; ils conservent par suite toute leur précision respective et le pendule, entièrement soulevé, ne gêne aucunement les opérations de mesures d'angles horizontaux. La mise en station de l'omnimètre collimateur est pour ainsi dire instantanée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour des études préalables, à grands traits, on peut faire usage d'instruments moins précis, tels que le carton à bretelles, le double pas et la boussole breloque, qui, d'après M. le commandant Audebrand, permettent de conclure la position relative de deux points, distants de 2 kilomètres et reliés entre eux par 20 stations de 100 mètres de portée chacune, à moins de 50 mètres en plan et à moins de 16 mètres en relief.

Quel que soit le système adopté, il est utile de répéter les opérations afin de réduire l'importance des erreurs accidentelles inévitables. De cette façon la précision du nivellement de la chute sera, en pratique, plus grande que celle du jaugeage. L'erreur permise sur la hauteur devra en tous cas être d'autant moindre que celle qu'on aura commise sur le jaugeage aura été plus grande.

Les erreurs instrumentales des appareils de géodésie et de topographie peuvent être éliminées par un artifice opératoire approprié à chaque phase particulière du travail sur le terrain.

Ainsi, avec le niveau d'Egault, la correction de l'imperfection du réglage de la bulle et du centrage du réticule s'obtient par couples de lectures ; celle du non-parallélisme de l'axe de rotation de la lunette et du plan de la bulle, par l'addition des deux lectures ; celle de l'inégalité de diamètre ou de hauteur des collets ou prismes de la lunette, en stationnant l'instrument entre les piquets avant et arrière à des distances rigoureusement égales ; celle du défaut de centrage de l'objectif, en opérant de la même façon ; celle du non-parallélisme du plan de la bulle et des directrices des collets de la lunette, en plaçant les niveaux d'eau sur les collets dans une position moyenne toujours la même.

Pour les erreurs provenant de causes extérieures, telles que la perturbation causée par la raréfaction de l'air, l'influence de la double courbure de la surface terrestre et des surfaces de niveau, on y remédie en faisant les distances entre observations aussi égales que possible et la durée de l'opération aussi réduite que possible, que l'emploi de mires identiquement semblables facilitera tout particulièrement.

Pour ce qui concerne les instruments destinés à la mesure des angles, les règles suivantes, formulées par M. Naudin, sont très utiles à connaître. Pour les boussoles tant directes qu'indirectes, il convient d'adopter le procédé de cheminement par mesures de directions, plutôt que celui par mesures d'angles. Dans l'observation des azimuts, on opère par retournement de la boussole, afin d'éliminer les différentes erreurs d'excentricité et, pour chacun des côtés, la mesure se pratique deux fois.

Avec les théodolites et dans le cas de mesures d'angles horizontaux, la compensation des imperfections de réglage, telle que celle provenant de la plongée de la lunette, se fait par la moyenne des visées et, pour le centrage du réticule, par retournement pour chaque observation de direction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quant aux imperfections de construction, tels le défaut de centrage de cercle, la position incorrecte des verniers, les compensations d'erreurs, s'obtiennent respectivement par l'inversion de la lunette et par des couples de lectures.

Pour la mesure des angles verticaux, les différentes erreurs s'éliminent aussi par inversion de la lunette et par le calcul des moyennes des lectures faites aux différents verniers. L'auteur de cet ouvrage s'est toujours bien trouvé dans ses travaux de triangulation et de nivellement tachéométriques en procédant par observations réciproques, l'erreur de collimation s'éliminant d'elle-même.

Le service du Nivellement des Grandes Forces hydrauliques emploie actuellement pour ses opérations deux genres d'instruments appelés *éclistadimètre* et *clisistadimètre*.

L'éclistadimètre est un éclimètre à lunette stadimétrique et à miscrocopes, dérive du cercle azimutal réitérateur Lallemand à microscopes. L'appareil est disposé soit pour le nivellement éclimétrique, soit pour le nivellement géométrique. Pour le premier appareil, le calage du pivot s'opère à l'aide de trois vis calantes et d'une nivelle cylindrique fixe, celle ci munie d'une vis de réglage. Le disque horizontal est divisé en quintuples grades et la lunette est mobile autour d'un axe horizontal. Un microscope à réticule permet de lire l'inclinaison des visées sur un secteur vertical divisé en décigrades. Une vis de réglage donne le moyen de disposer le réticule du microscope de manière que, l'axe optique de la lunette étant horizontal, la rayure sur le secteur vertical divisé soit sur zéro.

Pour le second de ces appareils, la nivelle est indépendante et est disposée au-dessus de la lunette ; elle est munie d'une pince, d'une vis de rappel, d'une vis de réglage et d'un goujon d'accrochage. Des prismes réflecteurs renvoient à l'œilleton les images des extrémités de la bulle de la nivelle; d'autres permettent à l'opérateur, placé devant l'oculaire de la lunette, d'observer la nivelle en élevant l'œil à la hauteur de ces prismes et enfin un prisme à réflexion totale renvoie au microscope l'image du secteur vertical divisé et un miroir sert, concurremment avec une plaquette spéciale, en ivoire, à éclairer ce secteur en face du prisme.

Le clisistadimètre dérive du tachéomètre auto-réducteur Sanguet.

Cet instrument ne comporte pas de secteur vertical. L'échelle des tangentes est divisée en millièmes et chiffrée en centièmes de 0 à 50 pour les visées plongeantes et de 100 à 50 pour les visées ascendantes.

Un microscope facilite l'estimation des dix-millièmes. Quand l'instrument doit être utilisé comme niveau, le clisistadimètre reçoit une nivelle réversible à double face qui se fixe latéralement au moyen de deux vis sur le corps de la lunette. Un miroir amovible permet à l'opérateur d'observer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la bulle de la nivelle sans avoir à se déplacer, l'œil restant près de l'oculaire de la lunette.

La nivelle à double face permet de vérifier et de régler l'instrument sans avoir recours à un nivellement réciproque et même sans le secours d'une mire (1). On se borne à faire subir à la lunette une rotation de 200 grades autour de son axe de figure.

Les précisions réalisables avec l'éclistadimètre sont : 1° dans la mesure de l'inclinaison de la lunette de l'ordre $\pm$ 0,00003 ; dans la mesure des longueurs, *a*) pour l'incertitude des lectures, 7 centimètres pour une distance de 100 mètres, *b*) pour l'incertitude de l'angle stadimétrique, $\pm$ 10 centimètres pour une longueur de 100 mètres ; provenant du défaut de verticalité de la mire, $\pm$ 10^{m},5 centimètres; provenant de l'incertitude de la mesure de l'inclinaison de la lunette, dans les conditions les plus défavorables, $\pm$ 6 millimètres.

L'implantation des ouvrages d'art, qui constituent l'aménagement proprement dit de la chute, donne lieu à des levés de plan et à des opérations de nivellement plus délicates que celles de la chute, telles que les questions de relèvement de plans d'eau, de tracé de souterrains et de canaux à ciel ouvert, d'écoulement des eaux par les déversoirs, les bassins, les puits, les chambres de décantation, les chambres de travail et des machines, les passerelles, les chemins d'accès, etc.

176. Profils en travers. — Lorsqu'on est en présence d'un cours d'eau dont les rives sont accessibles, fleuve ou rivière navigable, on tend un cordeau entre les deux rives après avoir disposé sur ce cordeau une série de nœuds équidistants. Au moyen d'une règle lestée et graduée, on prend la profondeur du cours d'eau au droit de chacun des nœuds, le déplacement le long de la corde s'effectuant à l'aide d'un bateau. On fait la moyenne de toutes les cotes relevées et on multiplie cette moyenne par la largeur du cours d'eau pour avoir la section de la nappe d'eau.

En pays de montagne, les cours d'eau peu larges sont assez facilement accessibles, et la détermination de l'épaisseur de la nappe d'eau peut se faire le plus souvent au moyen du tube hydrostatique du capitaine Boileau, qui permet de faire les lectures au moins au demi-centimètre près, et dans le cas des installations commodes, même au quart de centimètre.

Si le cours d'eau est étroit et d'un accès aisé partout, son profil peut

(1) La mire divisée en centimètres est presque exclusivement utilisée pour le nivellement des repères, que celui-ci soit exécuté par visées horizontales ou par visées inclinées. Mais, pour le relevé même des profils en long des torrents, lequel de distance en distance s'appuie sur des repères, on a généralement recours à une mire divisée en quintuples centimètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'effectuer à l'aide d'une simple règle graduée posée en divers points et en relevant les longueurs qui les séparent.

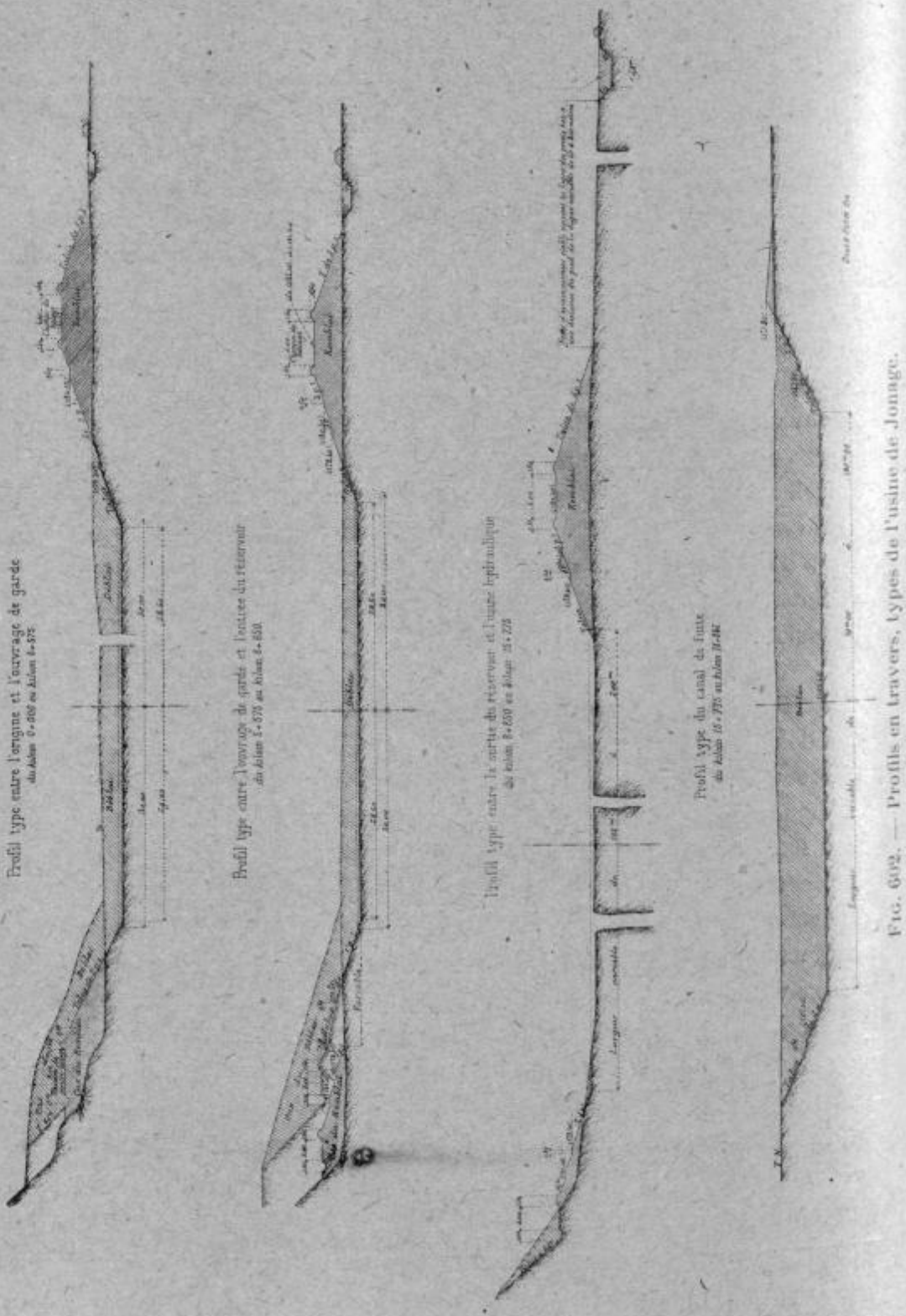


Fig. 602. — Profils en travers, types de l'usine de Jonage.

Dans les cours d'eau à gros débits, des limnimètres industriels convenablement disposés (pour permettre d'éliminer de la mesure l'effet de l'agi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tation superficielle du courant) offrent le moyen, d'après M. le commandant Audebrand, d'obtenir avec une bonne approximation la charge

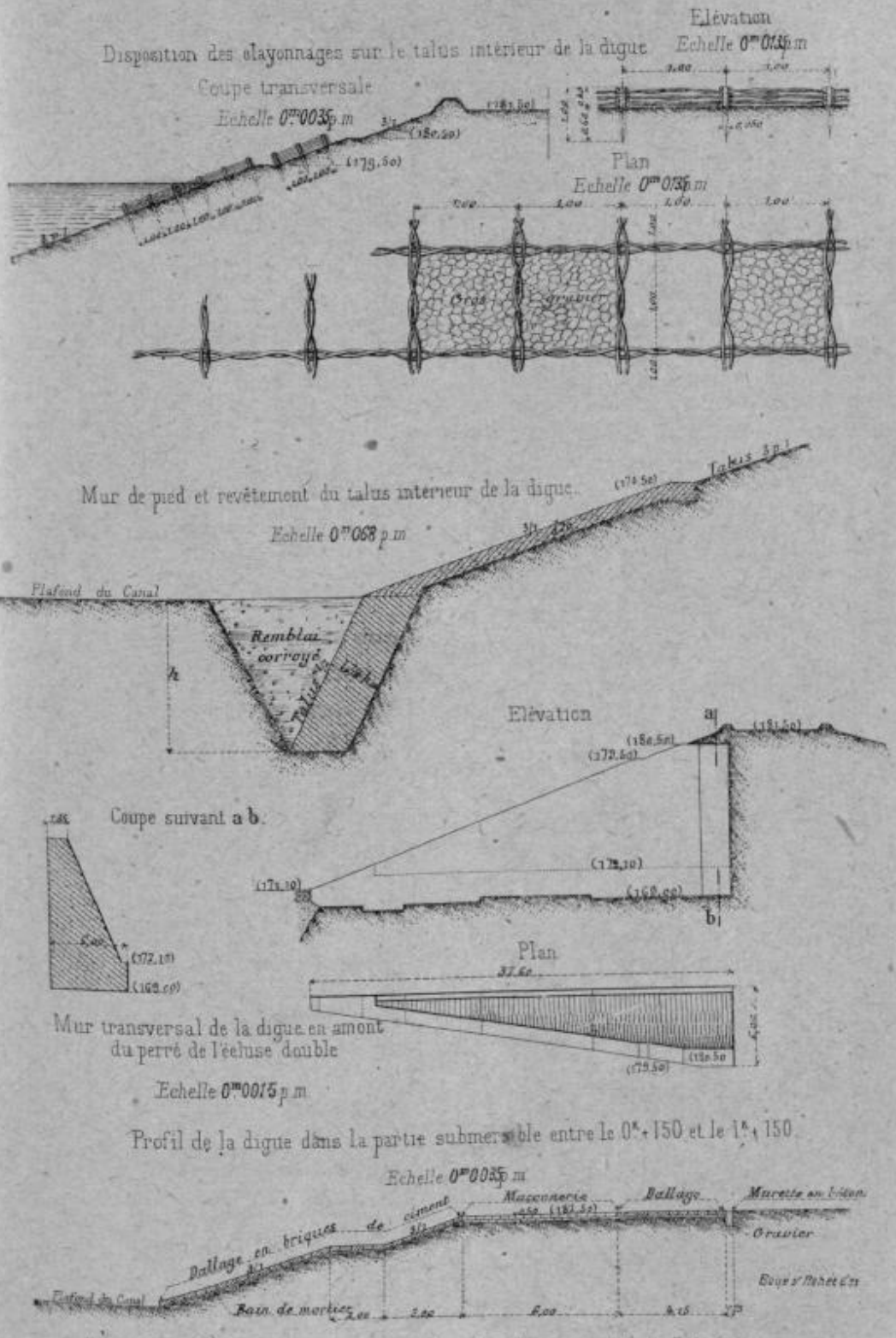


FIG. 603. — Dispositifs d'installation des digues de l'usine de Jonage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'eau. On relève les profils en travers à des distances à peu près égales et de préférence sur les points hauts et bas du profil en long.

177. Nouveaux profils en long. — Pour construire la courbe de remous d'exhaussement produite par le barrage, désignons par A*b* (*fig.* 604) la position du plan d'eau moyen avant la construction du barrage *ad* dont ce dernier point est la crête ; le plan d'eau s'est relevé suivant la courbe *c*A, qu'il faut déterminer et qui est tangente en *c* à l'horizontale *cm* et tangente également à la ligne A*b*, parallèle à la ligne de pente du cours d'eau. Pour fixer la position du point A où le remous cesse, on

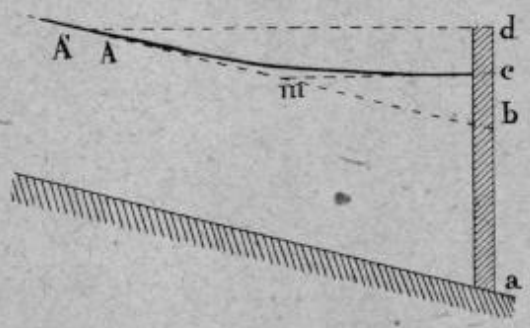


FIG. 604.

fait A*m* = *mc*. Mais les faits indiquent que le remous cesse d'être appréciable au delà du point placé sur la même horizontale partant du point *d*, avec *cd* = *cb*, et on trouve un point A′ qui correspond à l'intersection de l'ancien plan d'eau A′*b* avec l'horizontale *d*A′, et alors : *bd* = 2*bc*. Par suite, on a un arc de parabole tangent aux mêmes lignes *cm* et *m*A aux points *c* et A′ et que l'on peut construire par points à l'aide de la formule :

$$y = Y - is + \frac{i^2 s^2}{4Y}$$

ou au moyen de l'équation simplifiée :

$$i^2 s^2 = 4yY,$$

Y désignant le remous total, *y* le remous en un point quelconque, *s* la distance de ce point à l'axe, et *i* la pente moyenne par mètre du fil de l'eau avant la construction du barrage.

Dans l'hypothèse d'un arc de cercle, on construit directement la courbe du remous à l'aide du compas.

La courbe tracée, on peut ainsi s'assurer si la retenue opérée à l'aide du barrage nuit aux terres riveraines ou à l'usine d'amont lorsque les vannes de décharge sont fermées. Puis on calcule les ouvrages régulateurs, tels qu'ils permettent l'écoulement intégral du débit des eaux de pleines rives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour déterminer la section des eaux de pleines rives, on cherche d'abord le niveau de ces dernières jusqu'à la limite de non-immersion des terres riveraines, dans l'hypothèse que les eaux de pleines rives sont celles qui ne submergent aucun point de la vallée ; par suite, la ligne de ces eaux doit correspondre aux points les plus déprimés des berges, qui sont indiqués par les profils en travers du cours d'eau. On sait que la différence à maintenir entre le niveau de retenue et les points les plus déprimés des terrains qui s'égouttent directement dans le bief doit être de $0^m,16$ au moins. On détermine le profil en long alors par le rattachement successif des niveaux de l'eau dans chacun des profils en travers, correspondant à la position du fil de l'eau par rapport aux points les plus déprimés des berges, dont il vient d'être question.

Suivant les cas, on est amené à prendre, pour la surface des eaux de pleines rives, soit la moyenne des surfaces des profils en travers (quand la section ne pré-

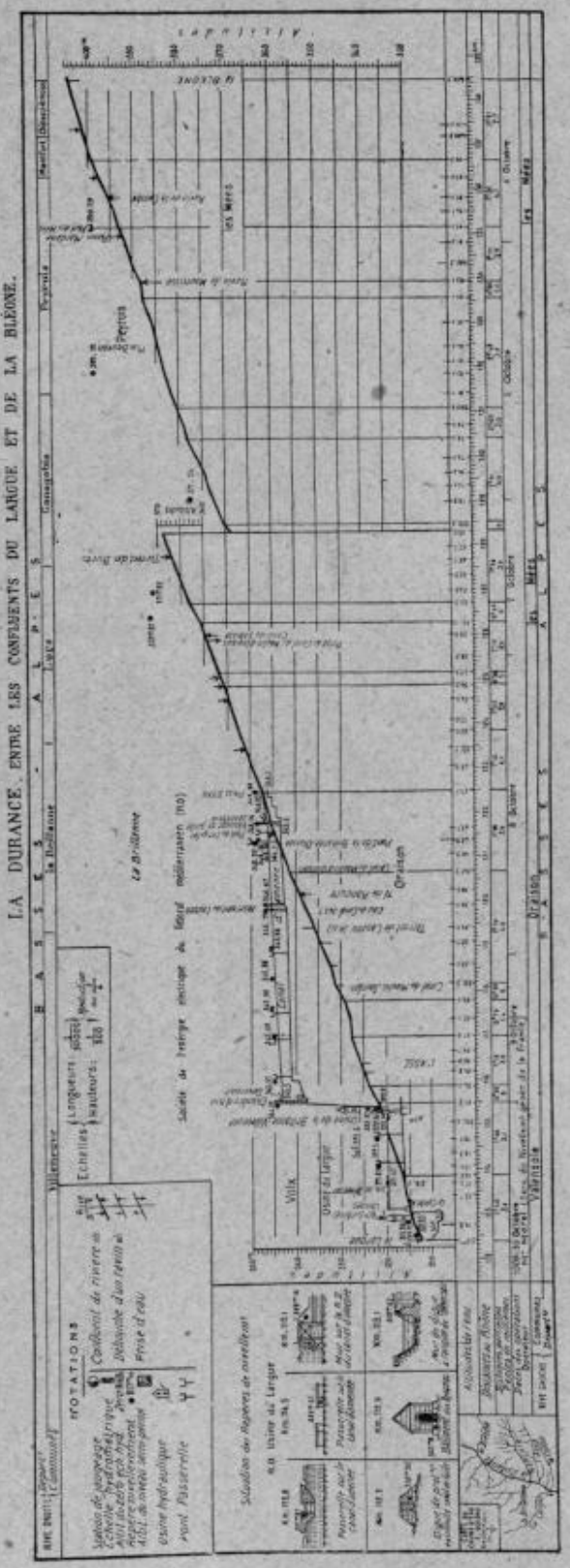


FIG. 605. — Profil en long de la Durance, entre les confluents du Largue et de la Bléone.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sente pas de grandes variations dans la partie considérée), soit le minimum (quand le cours d'eau présente un épanouissement dans la partie en expectative).

Il s'agit maintenant de déterminer le nouveau profil en long, tel qu'il sera après l'établissement du barrage, profil qui ne doit produire aucun

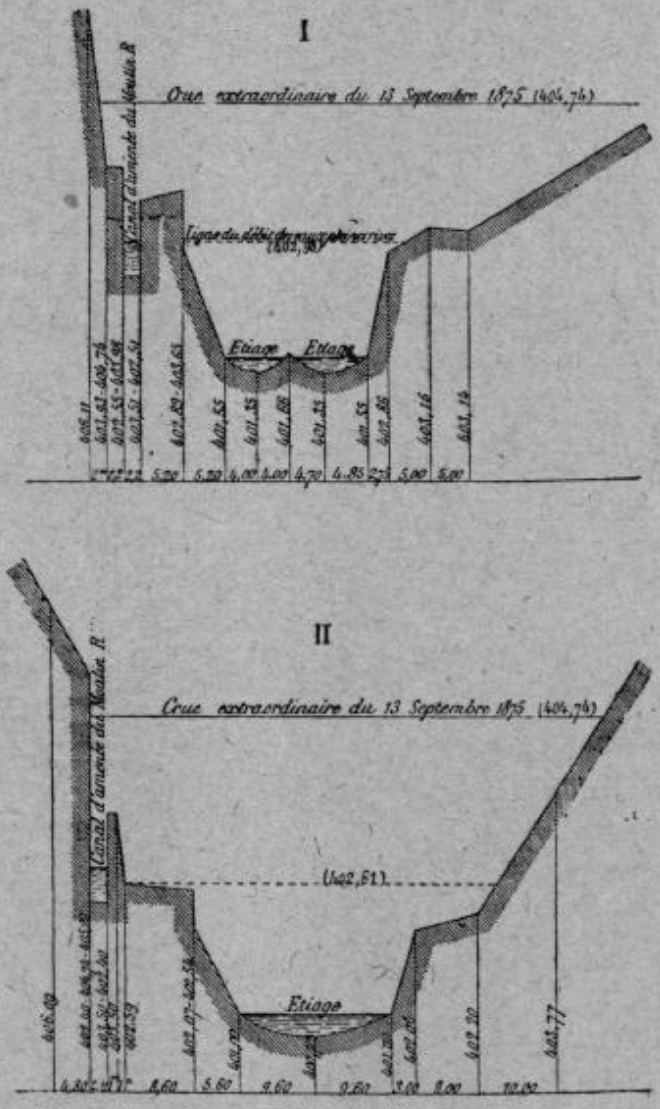


FIG. 606.

remous ni surélévation du niveau de l'eau dans la première section d'amont, c'est-à-dire que la cote du niveau de l'eau dans ce profil sera la même qu'avant la construction du barrage. Par conséquent, on connaît la cote en question, puisqu'elle doit rester la même par hypothèse que celle donnée par le relevé direct. Mais, lorsque le barrage aura été construit, les sections du cours d'eau et les périmètres mouillés seront différents de ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'ils étaient précédemment, puisque le profil en long de la surface de l'eau aura été modifié. Donc il faut déterminer les nouvelles valeurs de γ et de ω dans les divers profils que l'on résoudra par approximations successives au moyen de la relation :

$$\gamma_2 - \gamma_1 = \frac{Q^2}{2g}\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2}\right) + \frac{Q^2 b_1}{2}\left(\frac{\gamma_1}{\omega_1^3} + \frac{\gamma_2}{\omega_2^3}\right) \times l,$$

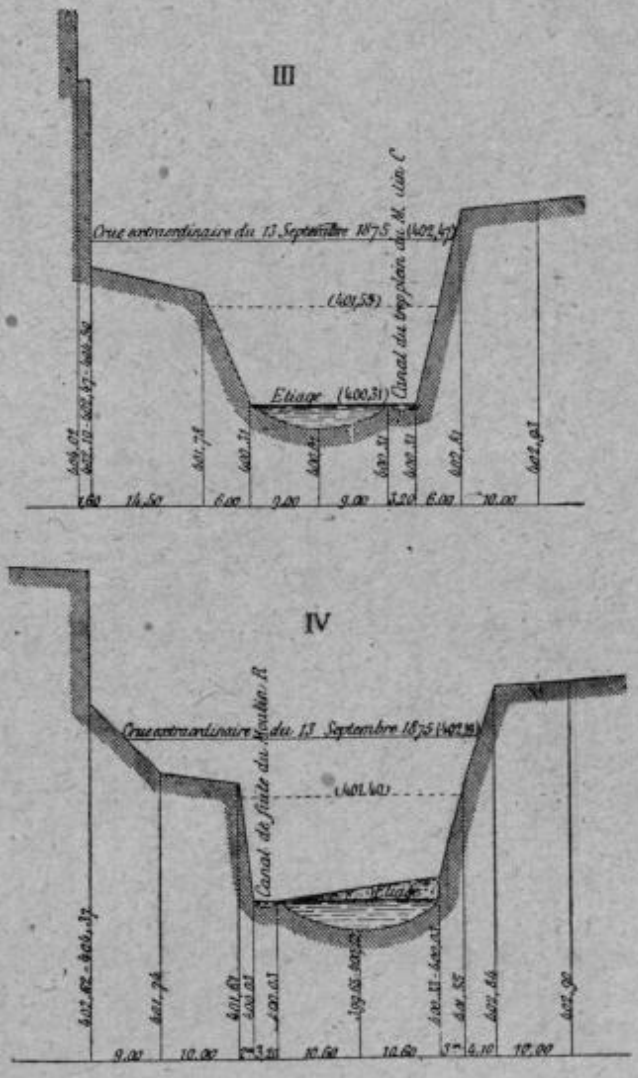


FIG. 607.

dans laquelle γ_1 est la cote qui ne doit pas changer après l'établissement du barrage.

Ayant déterminé γ_2 on procède de même entre les profils n° 2 et n° 3. En continuant ainsi de proche en proche, on arrive à connaître les cotes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des niveaux de l'eau dans chaque profil et, par suite, le profil en long de la rivière.

Le même travail doit être fait pour les crues ordinaires pour avoir le profil des hautes eaux.

La crête d'arasement du barrage sera choisie eu égard à la ligne du

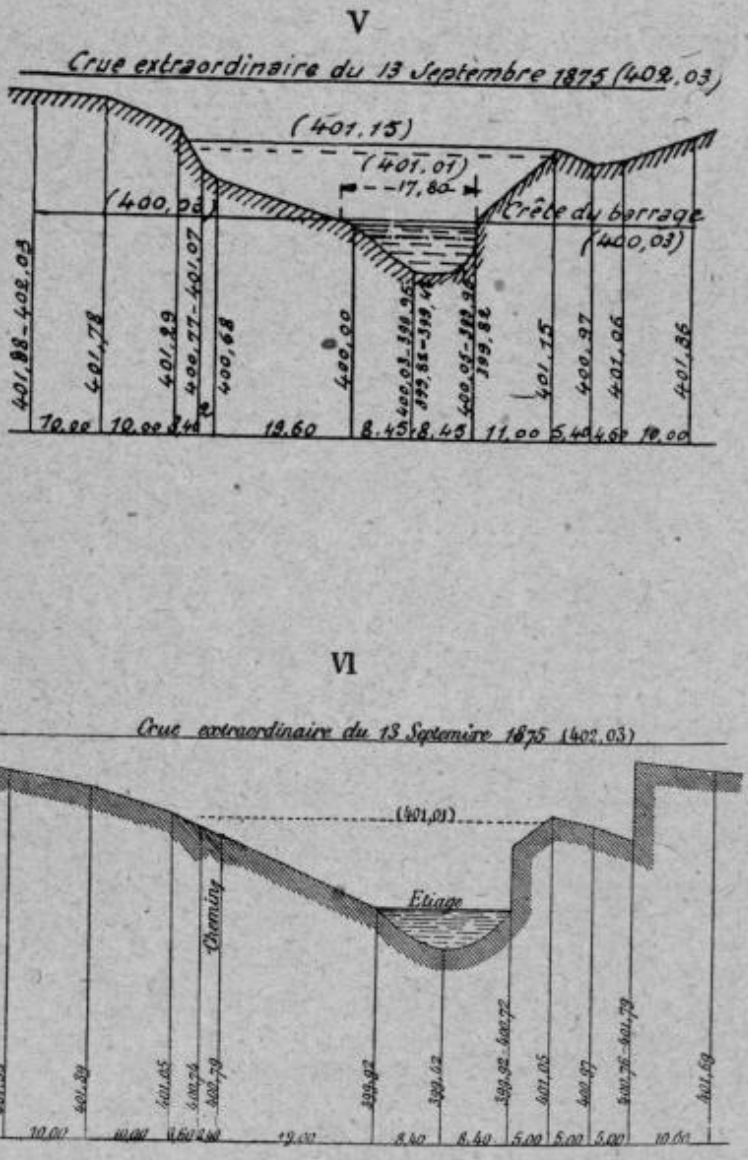
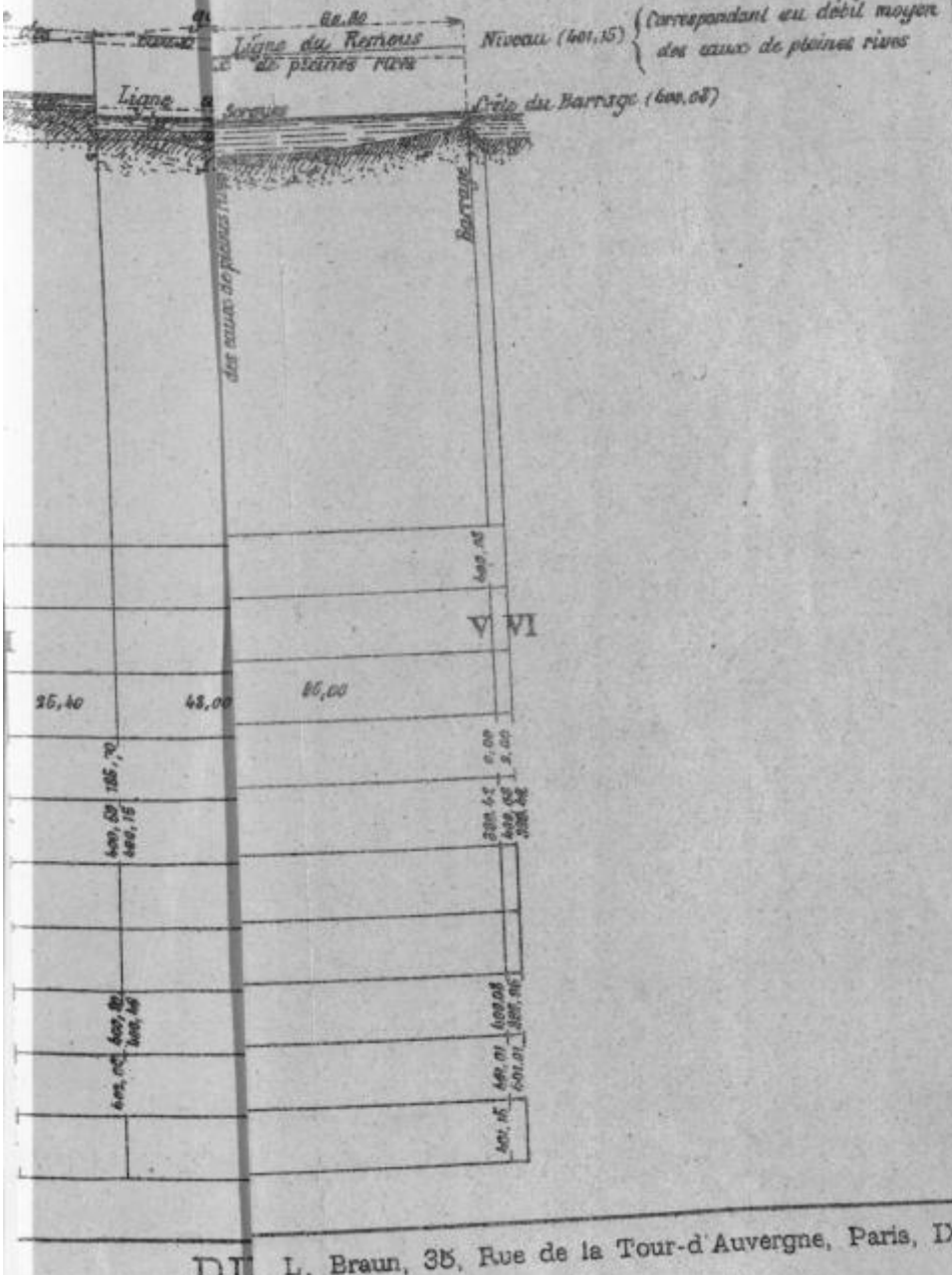


FIG. 608.

profil en long correspondant aux niveaux les plus bas ; si la ligne de l'étiage est inférieure à celle des crues ordinaires, la crête du barrage s'arrêtera, en quelque point qu'on l'établisse, au niveau de cette ligne ; dans les crues ordinaires et les eaux moyennes, il passera par dessus le barrage une lame d'eau dont l'épaisseur sera comprise entre zéro et la différence des deux courbes de niveau au point d'établissement du barrage. Les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 1. n long
suivan ite de l'usine R.



DU L. Braun, 35, Rue de la Tour-d'Auvergne, Paris, IXe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Planche VI.

Fig. 1. Profil en long
suivant l'axe de la Rivière

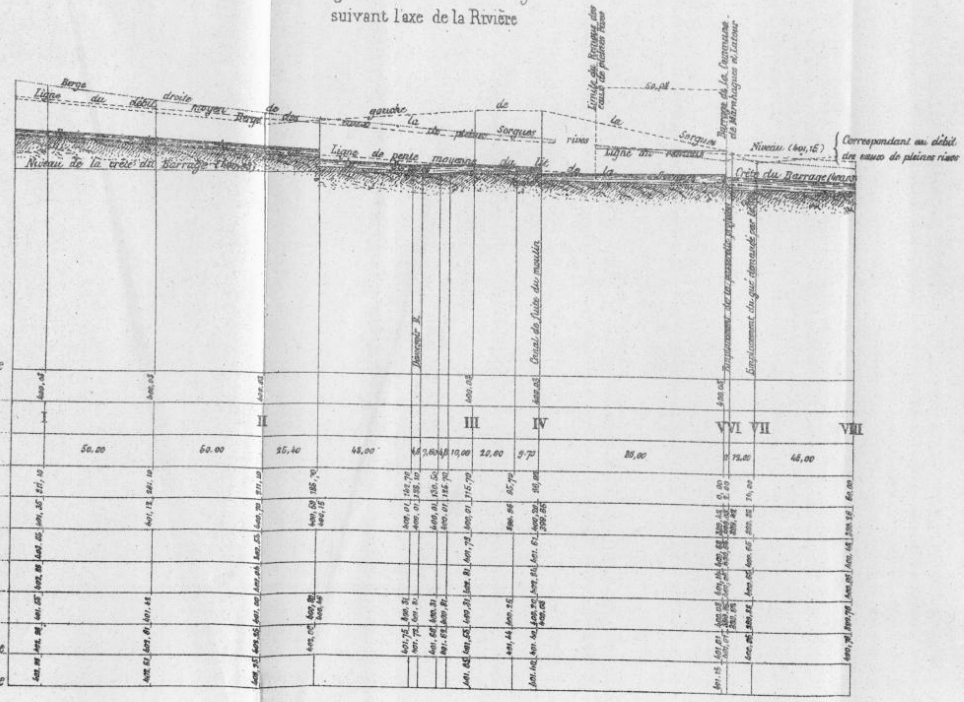
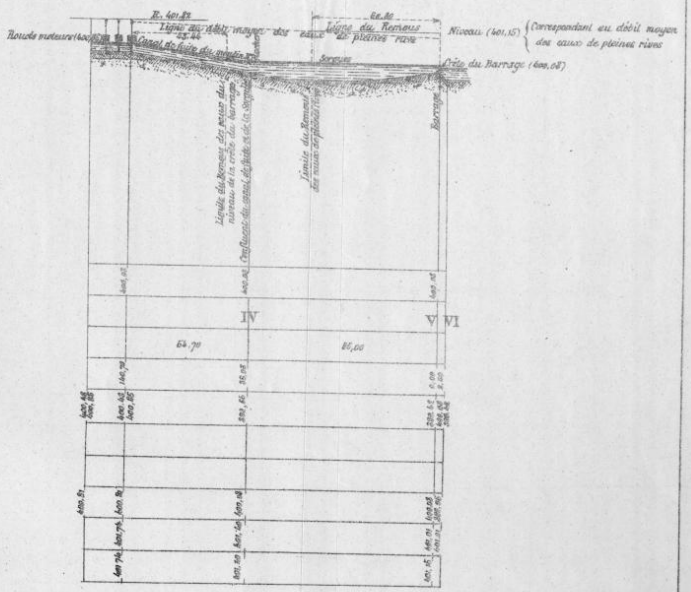


Fig. 2. Profil en long
suivant l'axe du canal de fuite de l'usine R.

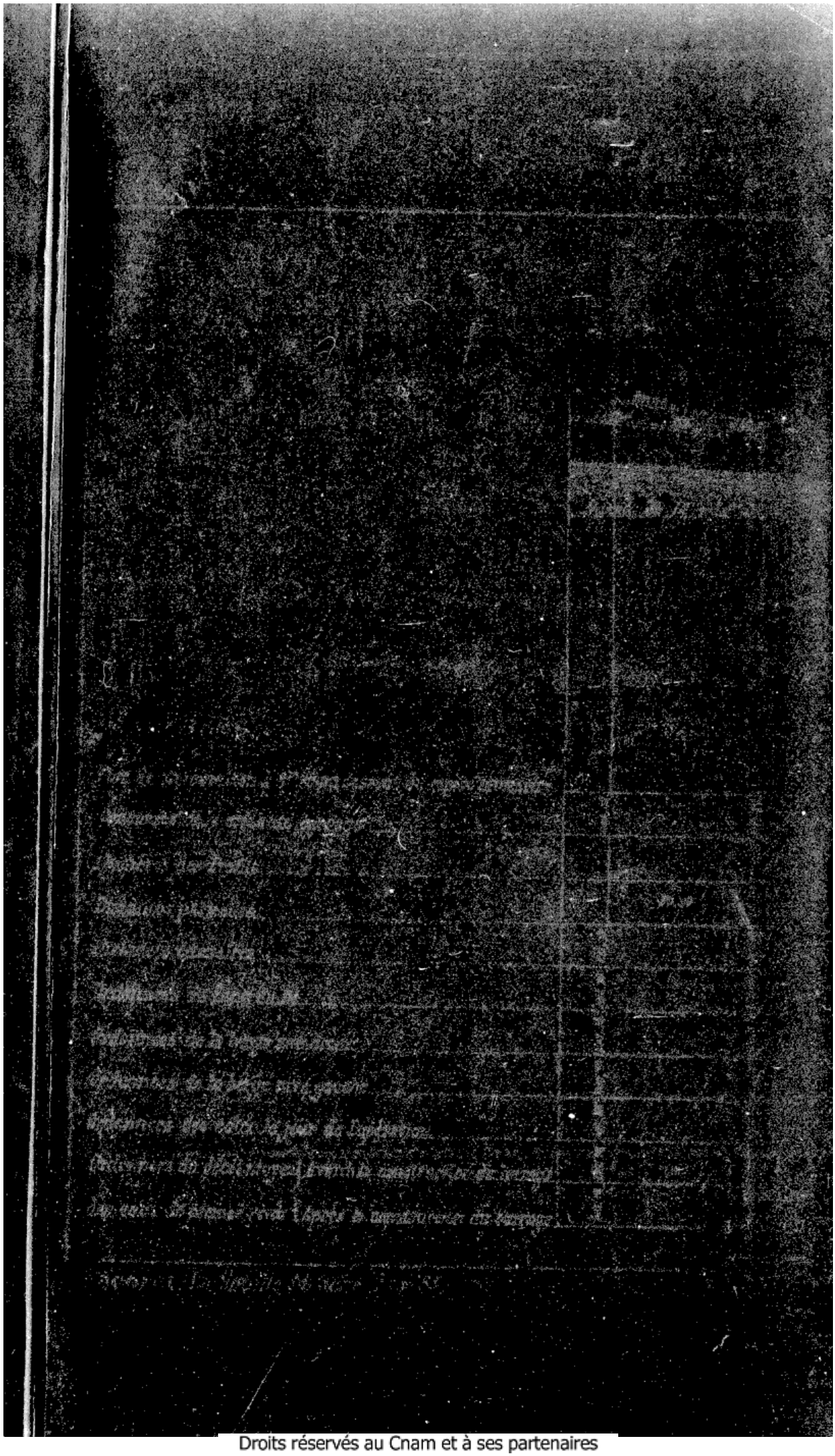


Pacoret. *La Houille blanche*. Page 841.

DUNOD & PINAT, Editeurs, 47 et 49, Quai des Grands-Augustins, Paris.

L. Braun, 35, Rue de la Tour-d'Auvergne, Paris, IXe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(*fig.* 606 à 609) et la planche VI montrent comment doivent être établis les profils en long et les profils en travers en vue de la position finale du barrage (1).

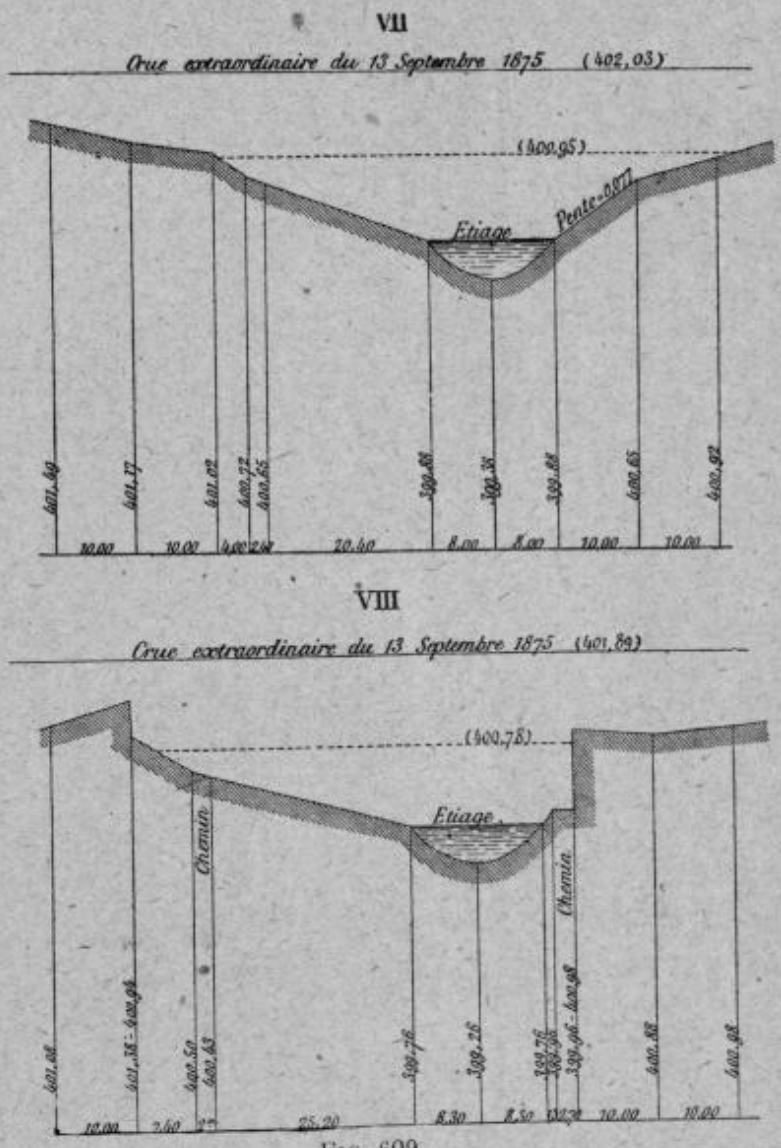


FIG. 609.

II. — BARRAGES ET PRISES D'EAU

178. Emplacement du barrage.— La position du barrage est indiquée, par exemple, par un point où une dénivellation subite donne lieu à une chute brusque et, en général, par les sommets des parties à fortes

(1) Cet exemple est tiré de l'excellent ouvrage de M. Lévy-Salvador : *l'Hydraulique agricole*, faisant partie de la Bibliothèque du conducteur de Travaux publics. Dunod et Pinat, éditeurs, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

contre-pentes, où le lit de la rivière se rétrécit, cas qui permettent de réaliser la construction de l'ouvrage dans des conditions économiques.

Si l'on établit le barrage dans la partie amont du cours d'eau, il ne pourra par lui-même fournir qu'une faible chute ; de là l'établissement d'un canal d'amenée qui peut être très long et fort coûteux.

Si l'on place le barrage vers la partie aval il aura une grande hauteur, sera cher d'établissement, et encore faut-il que sa création ne puisse entraîner une submersion inadmissible des berges en amont.

D'autre part, comme le canal d'amenée n'a pas nécessairement pour origine l'emplacement du barrage, on peut ne pas s'occuper de cet emplacement pour déterminer la prise d'eau du canal. Quant au canal de fuite, on le fait déboucher à la limite aval de la partie du cours d'eau à aménager pour profiter de la plus grande hauteur de la chute créée par le barrage. En résumé, l'emplacement du barrage dépend de diverses exigences qu'il y a lieu de concilier avec le moindre coût du barrage, du canal d'amenée et de celui de fuite.

179. Détermination du débit.— On peut calculer le débit du cours d'eau, étant donné que l'on a procédé à des profils en long et en travers aussi bien pour le débit d'étiage que pour celui des crues ordinaires

A cet effet, on choisit un certain nombre de sections parmi les profils en travers les plus caractéristiques, et on prend la moyenne des résultats obtenus en appliquant la formule du débit à ces diverses fractions.

Soient : y la différence de niveau entre deux sections ; ω_2 et ω_3, les aires des sections données par les profils en travers considérés ; b_1, le coefficient dit de Darcy, soit 0,0004 ; χ_2 et χ_3, les périmètres mouillés des deux sections ; l, la distance entre celles-ci, et Q, le débit du cours d'eau, on aura :

$$(1) \qquad Q^2 = \frac{y}{\frac{1}{2g}\left(\frac{1}{\omega_3^2} - \frac{1}{\omega_2^2}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{\chi_2}{\omega_2^3} + \frac{\chi_3}{\omega_3^3}\right) b_1 l}.$$

On calcule successivement l'expression de Q en prenant d'abord les profils 1 et 3 parmi ceux choisis, la suite de ces profils étant numérotée à partir de l'amont, par exemple. De cette manière on prend pour ω_2 la valeur du profil n° 1 et pour ω_3 la valeur du profil n° 3. La détermination des aires se fait facilement en décomposant en triangles et trapèzes la surface des profils transversaux. Les périmètres mouillés se tirent de ces mêmes profils et on en déduit les rapports : $\frac{\chi_1}{\omega_1}, \frac{\chi_2}{\omega_2}, \frac{\chi_3}{\omega_3}$.

Si, pour plus de précision, on veut calculer, entre les profils relevés, des points intermédiaires de profils imaginaires dont on ne connaît pas les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

valeurs des paramètres, on emploiera les formules d'intégration, telles que celle de Simpson (1).

Désignons par x la longueur entre les profils considérés 1 et 3, et supposons que :

$$\frac{\gamma_1}{\omega_1^3} = a, \qquad \frac{\gamma_2}{\omega_2^3} = b, \qquad \frac{\gamma_3}{\omega_3^3} = c.$$

On aura, d'après la formule Simpson, pour la somme des résistances échelonnées sur le parcours x entre les trois sections considérées :

Somme des quantités :

$$\frac{\gamma}{\omega_3} \times b_1 l = \frac{x + 0{,}0004}{3 \times 2} (a + c + 4b).$$

On effectue ensuite les mêmes calculs pour les intervalles de 2 à 4, de 3 à 5, et ainsi de suite jusqu'au dernier profil. Après avoir dressé le tableau de ces diverses valeurs pour l'étiage, on en dresse un second pour les crues ordinaires, en calculant les surfaces et périmètres mouillés des profils pour ce second cas.

Connaissant la valeur de Q tirée de l'expression (1), on trouvera, en procédant de même pour les autres intervalles, des valeurs qui différeront entre elles d'une façon très notable, alors que le débit doit être évidemment le même dans toutes les sections ; ces différences proviennent tant d'erreurs commises dans les nivellements et les mesures des longueurs que des variations de débit du cours d'eau pendant le laps de temps consacré aux opérations du nivellement. On prendra donc la moyenne des quelques résultats trouvés, parmi ceux qui paraissent les plus concordants.

180. Calcul de l'appareil déversoir de l'usine hydroélectrique de Jonage. — Le déversoir, établi à l'aval de l'ouvrage de prise d'eau, a pour fonction de ramener au Rhône une partie des eaux en excès qui peuvent accidentellement traverser la prise d'eau. Il a été placé au point où le canal de dérivation se rapproche le plus du Rhône. Il présente un développement total très voisin de 160 mètres et il est arasé à 1m,50 au-dessous de la digue. Afin d'augmenter le débit du canal entre la prise d'eau et le déversoir, on a surélevé la digue de 0m,50 à l'ouvrage de garde et cette surélévation est rachetée par une pente uniforme de 0m,175 par kilomètre entre l'ouvrage de prise d'eau et le déversoir.

En supposant que l'eau s'élève à la cote (181,50) à l'origine du déversoir et qu'elle déborde d'un mouvement uniforme avec la pente superfi-

(1) *Précis d'hydraulique*, par P. Busquet. J.-B. Baillières et fils, éditeurs, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cielle de 0m,175 par kilomètre entre l'ouvrage de garde et le déversoir, on trouve que le canal débite en cette partie 694 mètres cubes à la vitesse de 1m,53 à la seconde.

Cherchons la variation de la lame déversante, en appelant H la hauteur de la lame déversante à l'origine du déversoir, h cette même hauteur en une section quelconque, H′ la profondeur du canal au-dessous de l'arasement du déversoir, v_0 la vitesse de l'eau à l'origine, v cette même vitesse dans la section passant par mn, l la distance de la section mn à l'origine du déversoir et Q le débit du déversoir (*fig.* 610).

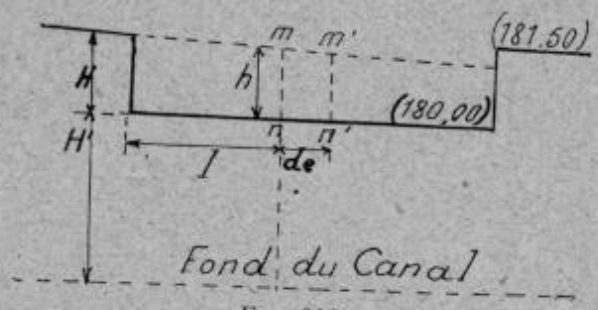


FIG. 610.

La quantité d'eau qui se déverse par seconde pour une longueur infiniment petite dl est égale à :

$$dQ = 1{,}77h\sqrt{h}\,dl.$$

La quantité dQ est égale à la variation du débit dans le canal, entre les deux sections infiniment voisines mn et $m'n'$.

Soit L la largeur du canal dans la section, passant par mn, que nous supposerons rectangulaire. Le débit du canal est égal à :

$$L\,(H' + h)\,v.$$

Négligeant, sur la longueur du déversoir, le travail de la pesanteur dû à la pente du fond du canal et le travail dû aux forces retardatrices de frottement, qui est de sens contraire au précédent, nous avons :

$$\frac{1}{2}(v^2 - v_0^2) = g\left(\frac{H - h}{2}\right) \quad \text{et} \quad v = \sqrt{2g\left(\frac{H - h}{2}\right) + v_0^2};$$

et, pour le débit du canal dans la section transversale passant par mn :

$$L\,(H' + h)\sqrt{g\,(H - h) + v_0^2}.$$

D'où :

$$dQ = L\left[\frac{-g\,(H' + h)}{2\sqrt{g\,(H - h) + v_0^2}} + \sqrt{g\,(H - h) + v_0^2}\right]dh;$$

$$1{,}77h\sqrt{h}\,dl = L\left[\frac{-g\,(H' + h)}{2\sqrt{g\,(H - h) + v_0^2}} + \sqrt{g\,(H - h) + v_0^2}\right]dh;$$

$$dl = \frac{L}{1{,}77h\sqrt{h}}\left[\frac{-g\,(H' + h)}{2\sqrt{g\,(H - h) + v_0^2}} + \sqrt{g\,(H - h) + v_0^2}\right]dh.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On tire de ces équations différentielles les deux relations :

$$l = \int \frac{L}{1{,}77h\sqrt{h}} \left[\frac{-g\,(H+h)}{2\sqrt{g\,(H-h)+v_0^2}} + \sqrt{g\,(H-h)+v_0^2} \right] dh ;$$

$$Q = \int_0^l 1{,}77h\sqrt{h}\; dl.$$

Ces expressions donnant lieu à des difficultés d'intégration, on peut les calculer par la méthode des quadratures.

La courbe :

$$y = \frac{L}{1{,}77h\sqrt{h}} \left[\frac{-g\,(H+h)}{2\sqrt{g\,(H-h)+v_0^2}} + \sqrt{g\,(H-h)+v_0^2} \right], \qquad (2)$$

dans laquelle $L = 95$, $v_0 = 1{,}53$, $H = 1{,}50$, montre que la longueur $l = 160$ correspond à $h = 1^m{,}12$.

La hauteur de la lame déversante variera donc de $1^m{,}50$ à $1^m{,}12$.

La courbe (2) permet de calculer les différentes valeurs de l correspondant aux différentes valeurs de h et de construire la courbe :

$$Z = 1{,}77h\sqrt{h},$$

en prenant l pour abscisse.

La surface représentative de :

$$Q = \int_0^l 1{,}77h\sqrt{h}\; dl$$

donne :

$$Q = 425 \text{ mètres cubes} \quad \text{pour} \quad l = 160.$$

Ainsi, au moment considéré, le déversoir débite 425 mètres cubes à la seconde ; mais l'eau en excès produira une surélévation de la lame déversante qui tendra, à l'extrémité du déversoir, vers la limite de $1^m{,}50$ qu'elle atteint à l'origine.

Pour une lame déversante uniforme de $1^m{,}50$, le déversoir débite :

$$Q = 1{,}77 \times 1{,}50\sqrt{1{,}50} \times 160 = 520 \text{ mètres cubes.}$$

En prenant pour le débit moyen la moyenne des débits extrêmes et en retranchant du débit de la prise le volume déversé, on voit qu'il pénétrera dans le réservoir :

$$694 - 472 = 222 \text{ mètres cubes par seconde,}$$

débit qui n'excède que de 72 mètres cubes le débit normal du canal en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

hautes eaux et qu'il est facile d'écouler par les conduites de l'usine et les vannes de l'écluse double.

181. Barrages sur rivières navigables. — Lorsque le cours est navigable, on ne peut établir directement la prise d'eau dans son lit ; il faut alors dériver une partie des eaux dans un canal d'amenée A, généralement au moyen d'un barrage partiel B (*fig.* 611).

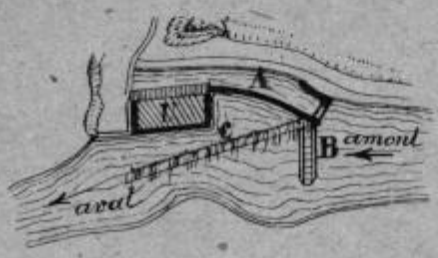


FIG. 611.

L'eau, après avoir passé par les turbines, est rendue à la rivière par un canal de fuite constitué tantôt par un déversoir muni d'une vanne de décharge, tantôt par une digue *c*, ouvrages qui permettent d'évacuer les eaux lorsque le niveau, dans le canal d'amenée, dépasse le point d'eau.

Les turbines, enfermées dans une bâche en tôle, reçoivent l'eau du bief d'amont par un canal en maçonnerie ou par une conduite en métal. Si les turbines ne sont pas établies au niveau du bief d'aval, et que néanmoins on veuille utiliser toute la chute, on prolonge l'orifice d'échappement de la turbine par un tuyau d'aspiration plongeant dans le bief d'aval à un niveau plus bas que celui des basses eaux (étiage). La chute varie ainsi selon les niveaux occupés par les eaux dans les biefs d'amont et d'aval.

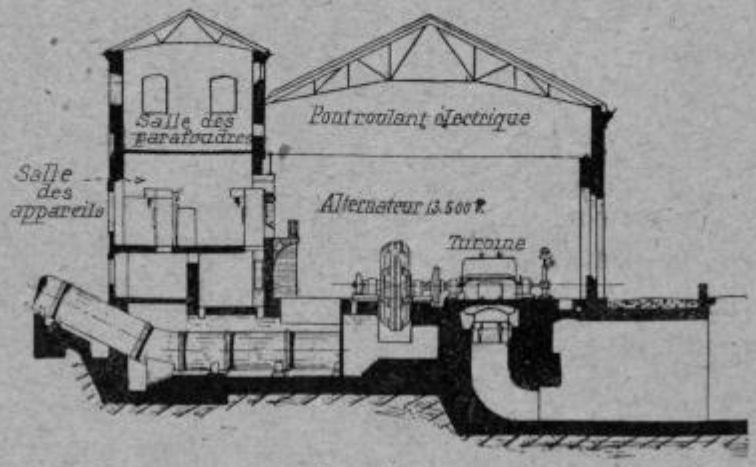


FIG. 612.

La (*fig.* 612) représente une disposition schématique d'usine hydro-électrique avec conduite métallique, et la (*fig.* 613) une usine semblable aménagée au moyen d'un canal en maçonnerie.

Les descriptions d'usines installées étant toujours d'un enseignement excellent, nous avons fait figurer dans le Tome II les plus importantes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usines-types créées à ce jour sur les rivières navigables et sur les cours d'eau torrentiels, ce qui nous dispense de nous étendre plus longuement sur ce sujet.

Le barrage mobile à secteur, très usité en Amérique, a été employé pour l'édification de l'usine hydroélectrique de Brême sur le Weser. Cet ouvrage est basé sur le même principe que le barrage à hausse mobile de Desfontaine. Il y a deux secteurs en tôle d'acier. La pression de l'eau prise dans le bief d'amont suffit pour relever le secteur. La prise de départ se fait au moyen de l'air comprimé. La hauteur de chute est de 5 mètres. L'utilisation d'un aqueduc est réalisée dans l'installation de Los Angelès (Californie). Le long du cours de cet aqueduc on se propose d'établir sept usines. La différence de niveau est de 1.078 mètres et la puissance à créer doit varier de 64.000 à 120.000 chevaux. L'usine de Los Angelés est la première usine installée actuellement.

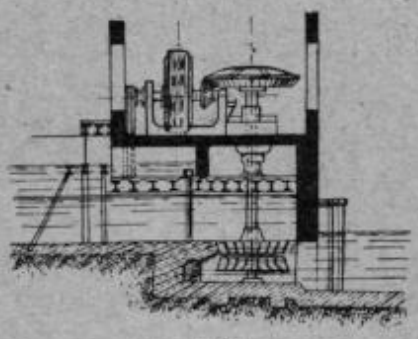


FIG. 613.

Comme importants projets de réservoirs régulateurs nous avons à citer ceux de Serre-Ponchon, de Carejuan et de Fontbelon.

Réservoir de Serre-Ponchon. — Cet ouvrage serait construit sur la Durance à 2 kilomètres en aval de son confluent avec l'Ubaye. La hauteur de retenue est prévue de 85 mètres correspondant à une capacité de 600 millions de mètres cubes. On sacrifie les 40 mètres inférieurs de la retenue (correspondant à 100 millions de mètres cubes). Le débit industriel maximum serait de 80 mètres cubes sensiblement égal au débit moyen de la rivière, lequel serait maintenu en juillet, août et septembre. Le débit maximum de 80 mètres cubes sous la chute de 85 mètres fournit 68.000 chevaux. La puissance moyenne de la chute serait de 50.000 HP.

La Durance à Serre-Ponchon est à la cote 670. En aval de ce point on pourra aménager sur cette rivière de nombreuses usines qui présentent une chute totale de plus de 400 mètres.

Ce réservoir permettra l'alimentation régulière des canaux d'irrigation de la Basse-Provence et l'extension éventuelle de la zone arrosable, l'atténuation des crues et les 400 mètres de chute utilisés dans les usines d'aval donneront lieu à une énergie supplémentaire de 500 à 600 millions de kilowatts-heures par an.

Le barrage doit être appuyé sur la roche à 42 mètres au-dessous du lit de la rivière. Le coût de l'ouvrage est évalué à 65 millions.

Réservoir de Fontbelon. — Ce barrage, dont nous donnons la description aux (§§ 119 et 278), est appelé à jouer un rôle semblable à celui de Serre-Ponchon.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Réservoir de Carejuan sur le Verdon. — Le barrage aura 75 mètres de hauteur et le réservoir pourra emmagasiner 140 millions de mètres cubes au point de vue industriel. La chute, sous le débit de 20 mètres cubes, fournira une puissance de 15.000 HP. L'ouvrage servira aussi pour les besoins agricoles et il rendrait possible l'adduction de la source Fontaine-l'Évêque (3.000 litres à la seconde) pour l'alimentation de Marseille, Toulon et communes voisines. Il sera établi en outre des réservoirs d'appoint, réservoir de la Martre et le réservoir du lac d'Allos, le premier pour 80 millions de mètres cubes et le second pour 40 millions de mètres cubes.

Le débit du Verdon par le fait de la création de ces réservoirs passera de 5 mètres cubes à 10 mètres cubes.

182. Prises d'eau pour force motrice. — La (*fig.* 614) donne la disposition schématique de l'aménagement d'une chute sur un cours d'eau torrentiel.

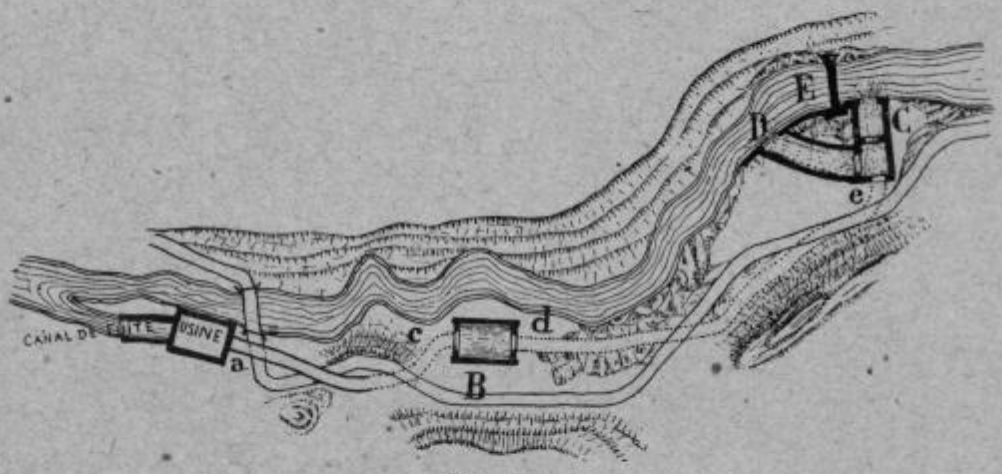


FIG. 614.

Nous supposons choisie la section de la rivière dont on a acquis les droits de riveraineté, ainsi que les terrains nécessaires à l'emplacement de l'usine et de ses annexes.

Celle-ci peut être établie avec ou sans réserve hydraulique. Nous avons dit que la régularisation se fait par un lac ou un réservoir artificiel ; mais le cas où la régularisation d'une force hydraulique par un lac est possible n'est que d'ordre privilégié et plutôt exceptionnel.

Supposons la hauteur de chute déterminée par les moyens que nous avons indiqués au (§ 175), et le débit évalué par les procédés du (§ 179), on cherchera à donner au problème sa solution la plus simple, eu égard aux difficultés des travaux à entreprendre et aux frais d'entretien auxquels ils peuvent donner lieu. Dans le cas le plus général, les moyennes et hautes chutes sont obtenues en dérivant les eaux du torrent au moyen d'un bar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rage E déterminant une certaine retenue d'eau, dont on dispose à l'aide d'un canal d'amenée *ed* à faible inclinaison et aussi court que possible. En raison des matériaux charriés par le cours d'eau, ce canal est précédé

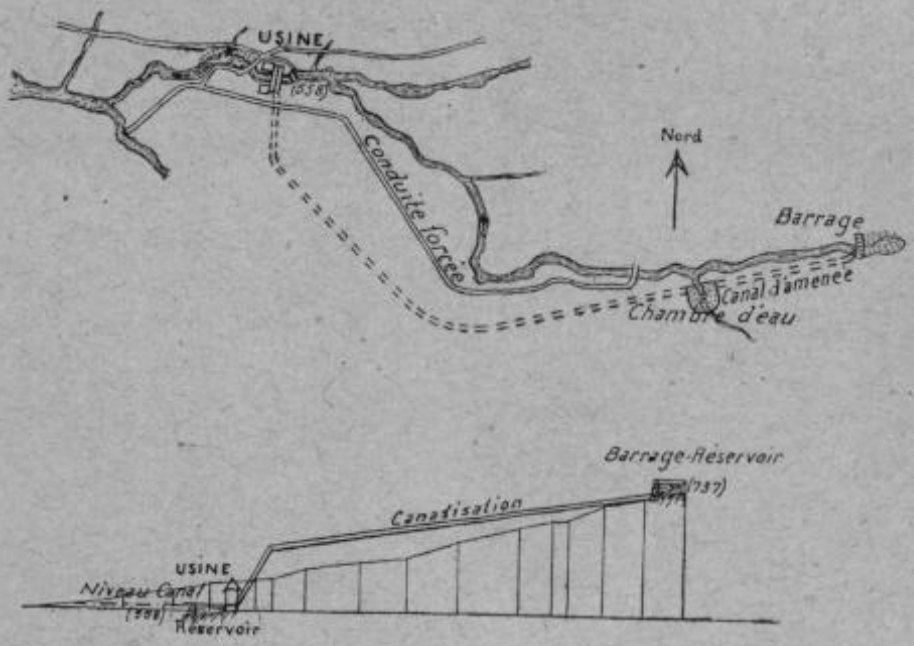


FIG. 615. — Schéma de l'aménagement d'une chute d'eau de hauteur moyenne.

d'une première chambre de décantation C munie de vannes à sa sortie (vanne de chasse) et à son entrée (vanne d'admission), ainsi que d'une grille à son origine. Un déversoir D ménagé à la suite de la chambre de décantation permet d'évacuer directement dans la rivière les corps flottants et les dépôts entraînés par les eaux.

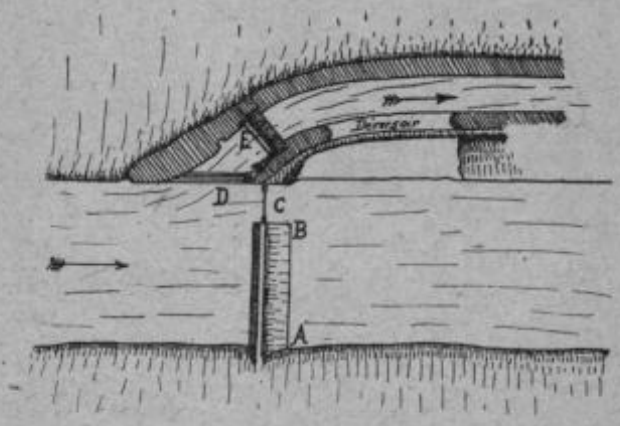


FIG. 616. — Prise d'eau. — AB, *barrage fixe* ; C, *passe à gravier* ; D, *grille de protection* ; E, *grille et passerelle de nettoyage*.

Lorsqu'il n'y a pas possibilité d'établir un déversoir, ou que le débit à évacuer est considérable (eaux des crues), on opère le déversement soit par dessus le barrage, soit par des ouvertures ménagées dans le corps de l'ouvrage, ou enfin au moyen d'évacuateurs souterrains.

Le canal d'amenée *ed*, qui peut être établi à ciel ouvert ou en souterrain, débouche dans une chambre d'eau B, appelée chambre de travail ou de prise en charge. Celle-ci domine généralement l'usine et est le plus souvent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

divisée en deux parties : une chambre de sécurité et de décantation et une chambre de prise en charge, toutes les deux munies de vannes, pouvant les isoler complètement l'une de l'autre.

Parfois on complète la chambre de mise en charge par un déversoir régulateur, pour qu'en cas d'arrêt d'une ou plusieurs turbines de l'usine, le volume d'eau dérivé non utilisé puisse s'écouler par ce déversoir et de là se rendre, par une galerie de vidange, dans la rivière.

Enfin, de la chambre de prise en charge part une conduite forcée *ca* qui débouche dans la hutte de la turbine, ou qui se raccorde à un tuyau collecteur quand l'usine comporte plusieurs turbines. Ces conduites, destinées à garder la pression de l'eau depuis la chambre de travail jusqu'à son entrée dans la turbine, sont constituées tantôt avec le rocher même rendu étanche, tantôt avec des tuyaux en ciment armé et le plus souvent en métal en tôle d'acier.

La (*fig.* 617) montre schématiquement, en tête de l'installation, la

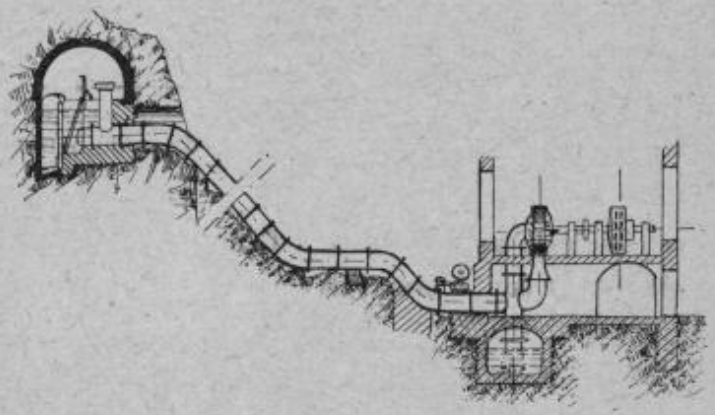


FIG. 617.

chambre de mise en charge et, à la partie inférieure, le bâtiment des récepteurs reliés à la chambre de travail par la conduite sous pression.

Les cours d'eau coulent parfois dans des gorges étroites dont les parois presque verticales atteignent plusieurs centaines de mètres, ce qui complique les travaux d'étude et d'attaque. Ainsi, pour l'aménagement de la Valloirette, on a dû construire au flanc de la paroi une passerelle en bois supportée par des fers plantés dans le rocher sur plus de 700 mètres de longueur, et on a dû creuser le barrage, le canal d'amenée et la chambre d'eau, tout entièrement dans le rocher.

L'aménagement rationnel d'une chute d'eau exige de ne pas perdre d'une manière définitive une fraction intéressante de la puissance hydraulique, par exemple aux points des rivières où leurs principaux affluents leur apportent un supplément de débit relativement important. Les confluents ne peuvent pas toujours être pris comme empla-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cements des prises d'eau et des usines génératrices. On peut alors y remédier par des solutions comme celles d'usines d'installation récente.

Telle est l'usine hydroélectrique d'Allemont (Société hydroélectrique de l'Eau d'Olle), fonctionnant sous une chute de 350 mètres sur l'Olle

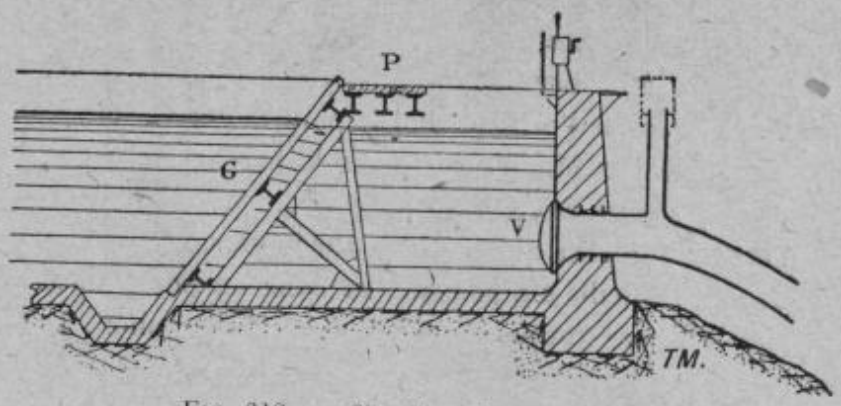


FIG. 618. — Chambre d'eau ordinaire.
G, *grille* ; P, *passerelle* ; V, *vanne de tête de conduite*.

affluent de la droite de la Romanche. Comme cette usine est à 500 mètres d'un affluent de l'Olle, le Flumet, on a capté aussi ce dernier de manière à amener les eaux du Flumet dans la même chambre que celle du torrent principal.

On a ainsi l'exemple d'un confluent ramené artificiellement à l'emplacement de son usine, où les eaux réunies pourront être captées à nouveau lorsque l'utilisation du bassin se poursuivra à l'aval.

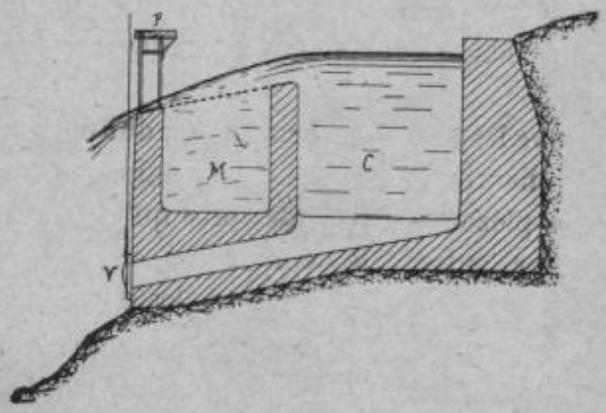


FIG. 619. — Chambre d'eau à grille horizontale. — C, *chambre de décantation* ; V, *vanne de purge* ; M, *chambre d'eau* ; P, *passerelle*.

Nous citerons aussi l'usine hydroélectrique de l'Argentière-la-Bessée sur la Durance (Société Électro-Métallurgique Française) utilisant une chute de 170 mètres. L'usine est située à 1.500 mètres en aval d'un affluent, la Gyronde. Comme ci-avant on a capté la Gyronde et pour ne faire qu'une seule usine génératrice on a dérivé les deux rivières au même niveau et on a amené les eaux de la Gyronde dans le tunnel de dérivation de la Durance par le moyen d'une conduite-siphon en formant pont à une centaine de mètres au-dessus de la rivière. Les deux tunnels de dérivation sont prévus en charge, de manière à récupérer le plus complète-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment possible les pertes de charge en temps de basses eaux et à pousser au maximum les débits utilisables en temps de hautes eaux. Dans cet ordre d'idées nous avons à citer les usines hydroélectriques pour la Cie des chemins de fer du Midi établies à Soulom et à Éget (Hautes-Pyrénées) dont nous donnons les descriptions dans le Tome II.

Un autre procédé consiste encore à faire la prise d'eau à l'aval du confluent par le moyen d'un barrage qui fait refluer les eaux des deux cours d'eau jusqu'au niveau de l'origine choisie pour la dérivation. Telle serait la solution indiquée par M. Wilhem pour le barrage de Serre-Ponchon par l'utilisation des eaux de l'Ubaye.

Parfois, pour les affluents qui tombent sur le versant suivi par le canal de dérivation, on recueille simplement les eaux au point où le canal les traverse et sur le versant opposé par le moyen d'un syphon. Telle l'usine d'Allemont déjà citée, pour plusieurs torrents importants, affluents de la rive droite de l'Eau-d'Olle.

Les installations procédant par canal d'amenée sont généralement constituées par un canal à ciel ouvert à faible pente, ou par un tunnel ou enfin par une conduite à écoulement libre construits avec une pente déterminée pour le débit maximum utilisable; ces ouvrages comportent une perte de charge constante égale à la différence de niveau existant entre les deux extrémités du canal, aussi bien en basses eaux qu'en hautes eaux. L'eau s'écoule dans ces canaux d'une façon régulière, et s'il n'y a pas à la prise d'eau d'accumulation possible, au cas où l'eau n'est pas utilisée sur les turbines, elle se déverse par dérivation dans le canal de fuite.

Dans les installations avec conduite d'amenée en charge, la prise d'eau et la chambre où aboutit la conduite se trouvent reliées à la façon de deux tubes piézométriques, de sorte qu'un certain niveau s'établit dans cette chambre suivant le débit utilisé, en concordance avec la perte de charge correspondante. D'autre part, les pertes de charge étant proportionnelles au carré du débit, deviennent inappréciables en basses eaux ; on a de cette façon une utilisation presque complète de la chute. La conduite ne laissant écouler que l'eau consommée par les turbines, les excédents du débit se trouvent retenus à la prise, où l'accumulation devient possible et parfois intéressante.

Certaines installations de ce genre ont été prévues à l'aide de tunnels en charge, comme à l'usine hydroélectrique d'Arreau, par exemple.

Disons qu'un tunnel souterrain comporte trop souvent des aléas et des imprévus inhérents à sa nature, tels que : venues d'eau, friabilité ou manque de solidité de la roche, grottes, poches de sable ou de boues, etc., enfin coût élevé. On pourra alors avoir intérêt à remplacer le tunnel par une conduite en ciment armé par exemple, car cette dernière moulée sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un terrain que l'on peut connaître d'avance, comporte moins d'incertitude et une sécurité plus grande au point de vue constructif si le terrain d'assise est bon, en employant un tuyau en ciment armé, dont les éléments se prêtent exactement au calcul. Au surplus, les descriptions d'usines aménagées (Tome II), font suffisamment ressortir les dispositions auxquelles on a dû recourir. Les difficultés vaincues dans ces travaux, parfois gigantesques, font le plus grand honneur à la science de nos ingénieurs et de nos constructeurs.

Si nous jetons un coup d'œil sur les installations les plus connues et exécutées dans ces dernières années, on voit, en ce qui touche les chutes basses et moyennes, qu'à l'usine de Chèvres (§ 298) le barrage est constitué par des vannes ainsi qu'à l'usine de la Valteline (§ 333) et aux usines d'Avignonet (§ 324), de Tre Monte (§ 329), de Vizzola (§ 330), de Saint-Maurice (§ 334), etc. A l'usine de Brême (chute 5m) (§ 299) le barrage est du type à secteur mobile employant la puissance fournie par la chute pour faciliter la manœuvre des engins de levage. Aux usines d'Augst et Wilhem (§ 300) (chute 6m), le barrage est commun aux deux usines et celles-ci sont installées parallèlement au lit du Rhin avec un canal de fuite commun. Les deux usines sont installées de part et d'autre du barrage et perpendiculairement à ce dernier. Le barrage de l'usine de Koebuk (chute 11m), qui a 1.305 mètres de longueur donnant naissance à un lac artificiel de 200 kilomètres carrés sur 96 kilomètres de longueur, comporte 119 vannes de décharge pour l'évacuation des crues. Il est accolé à une écluse pour la navigation. Le barrage de l'usine d'Aelfkarbely (§ 313) (chute 16m,50) est disposé pour donner à la fois passage aux glaces, aux bois flottants, aux poissons, etc. C'est par une disposition de barrage à rouleaux, situé au centre de l'ouvrage, que se fait l'évacuation des glaces. A l'usine de Gullspang (chute 20m,50) (§ 321), le barrage comporte 50 vannes disposées par groupes de 5. Elles sont coulissantes. Des dispositions sont prises pour les échelles à saumons et à anguilles ainsi que pour l'évacuation des glaces. A Rheinfelden (§ 297), le barrage forme déversoir à l'effet de relever le plan d'eau et d'assurer la prise du canal de dérivation, cette dernière commandée aussi par de grandes vannes ; une chambre de décantation est située entre le barrage et l'entrée du canal, avec vannes de purge pour opérer la chasse dans le fleuve. A l'usine de la Valteline, la prise d'eau est une galerie à deux orifices continuée par le canal d'amenée, avec déversoirs, l'un agissant comme régulateur, l'autre comme évacuateur, muni de vannes de chasse des dépôts.

A l'usine d'Avignonet, la prise d'eau comporte un barrage, un canal d'amenée, une galerie d'amenée, une chambre de distribution, un canal de purge et un canal de fuite. Le canal d'écoulement est avec pertuis de décharge pour l'eau inutilisée et les apports.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'usine de Sauviat (§ 331) comporte un barrage fixe avec déversoir et l'usine de Trolhatan (§ 335) a été édifiée au moyen d'un barrage à écluses, muni de vannes glissantes pour les décharges d'eau, et de vannes roulantes pour les glaces.

A l'usine d'Eymoutiers (chute 50m) (§ 340), le barrage est fixe avec déversoir de surface et échancrure sur le côté pour le passage des bois flottants. Une galerie de chasse avec vanne de fond sert pour l'évacuation des graviers.

Avec l'usine de Livet (§ 348), nous rentrons dans la classe des installations atteignant ou dépassant 50 mètres. Le barrage de Livet est fixe avec pertuis de chasse. Sur le côté de cet ouvrage sont installées des vannes pour régler la retenue d'eau au niveau du barrage pendant l'hiver. La pente dans le radier du pertuis est de 30 millimètres, provoquant un violent courant de chasse. Dans le canal d'amenée existent de petits barrages à l'effet d'arrêter dans le parcours les sables et les dépôts, pour les évacuer. A la suite, on trouve la chambre d'eau formant décantation à la fois, les eaux s'introduisant dans cette dernière par déversement. Les conduites forcées partent du fond de cette chambre.

L'usine de Jajce (§ 361) comporte un barrage avec deux décharges, dont une pour la décharge de fond (graviers, etc.) et l'autre est la prise d'eau du canal d'amenée. Les conduites de pression ont en tête un réservoir muni d'un déversoir de trop-plein commandé par des vannes.

A l'usine de Ponsonnas (§ 345), le barrage forme réservoir et bassin de décantation ; un canal d'amenée et un canal pour les eaux ordinaires partent du réservoir.

L'évacuation des eaux de crues a lieu au moyen de puits prenant l'eau à la surface et fonctionnant comme siphons.

Les usines de Cellina (§ 347), de Séchilienne (§ 348), de Pomblière (§ 354), de Pescara (§ 370) comportent chacune un barrage muni de vannes métalliques Stoney.

L'usine de Somport (§ 380) a un barrage-réservoir sur le gave principal et des barrages sans retenue sur les affluents d'Espelunguerre et le ruisseau du Coulcq. Le barrage de l'usine de Tivoli (chute 160m) (§ 381) sur la rivière Amiene a été établi pour obtenir une lame déversante de 3 mètres de hauteur correspondant à un débit de 420 mètres cubes à la seconde. Le barrage-réservoir est du type fixe et a 16 mètres de hauteur.

Parmi les usines atteignant 180 à 200 mètres de chute, l'usine de Chedde (§ 387), par exemple, a sa prise d'eau faite directement à l'aide de tunnels servant eux-mêmes de chambres de décantation.

A l'usine d'Ergins (§ 398), on trouve un barrage fixe avec un canal de dérivation, et, en tête des conduites sous pression, un bassin régulateur. Les usines de Heimbach (§ 368), de Calypso (§ 377), de Gampel (§ 391),

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de Caffaro (§ 393), de Tusciano (§ 396), de Rio de Janeiro (§ 403), d'Obermatt (§ 404), de Viége (§ 422) sont avec barrage fixe aussi, déversoirs et vannes de réglage. L'usine de la Rageat (§ 409), qui utilise une chute de 362 mètres, possède un barrage à poutrelles et déversoir.

Les usines d'Amsteg (chute 276m) (§ 397) sur la Reuss et de Rjukamfos (chute 282m) sur la Maäna ont la première un réservoir simplement pour la réserve journalière et la seconde un réservoir d'égalisation avec adjonction d'un château d'eau.

L'usine de la Cassagne (chute 421m) (§ 411) a un barrage-réservoir de 13 mètres de hauteur pouvant constituer une retenue de 5 millions de mètres cubes.

L'usine de Barker (chute 550m) (§ 419) qui a 49 mètres de hauteur est du type fixe formant réservoir.

A l'usine d'Eget (§ 423) spécialement installée pour un service de traction électrique, le barrage de 30m de hauteur retient une tranche d'eau utilisable de 22m,50 d'épaisseur constituant une réserve de 6.500.000 mètres cubes.

A l'usine d'Orlu (chute 940 mètres) (§ 426), la prise d'eau est effectuée par un barrage-tampon à l'exutoire du lac d'Em-Bès et par une chambre tourelle à deux compartiments, avec crible et soupapes de sûreté, système qui a été utilisé aussi à l'usine des Farettes, en Suisse, dont la chute est de 200 mètres.

Pendant la guerre, en raison du prix élevé du charbon, on a établi des usines avec le débit sur lequel on peut compter pendant trois mois au lieu de cent quatre-vingt jours comme avant (débit semi-permanent). Ceci s'entend pour des usines qui peuvent supporter d'importantes variations de charge dans le courant de l'année (électrochimie, électrométallurgie). Pour ces usines où la question du prix de revient de l'énergie domine tout, il n'est pas nécessaire de faire des réserves hydrauliques.

183. Échelles à poissons. — L'obligation de protéger la migration des poissons est inscrite dans nos lois, qui indiquent certaines prescriptions à prendre à cet effet dans la construction des barrages artificiels ; mais le législateur ne formule aucune règle quant à la forme à adopter pour la construction de ce genre d'ouvrages d'art (1).

Parmi les poissons migrateurs, le saumon est sans conteste le plus intéressant et, dans les rivières où on le rencontre, il convient de disposer des échelles à poissons en vue de faciliter au mieux ses diverses migrations. En particulier, pour ce genre de poissons, les marches dans les passages à poissons, pratiquées dans les barrages, ne leur conviennent pas, n'ayant

(1) Loi de 1865 et circulaire ministérielle du 12 août 1865.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas l'habitude de procéder par bonds successifs, et dans toute la longueur du passage il doit circuler une couche d'eau compacte de 0m,30 à 0m,40 pour que le saumon puisse y prendre facilement un bon appui.

Comme condition générale et qui s'applique à toutes sortes de poissons, le passage doit toujours être à ciel ouvert, absolument indépendant et isolé de tout appareil de vanne destiné à donner issue aux eaux en excès lors des crues, ou à abaisser le niveau de la nappe de retenue.

Les raisons d'un tel état de choses sont que le poisson, d'une part, ne s'engage jamais (à l'exception de l'anguille et de la lamproie) dans un conduit formant veine liquide pleine et que, d'autre part, tout doit être disposé pour faciliter la surveillance et, par suite, éviter le braconnage.

M. Canaud, conducteur des Ponts et Chaussées, qui a tout particulièrement étudié le genre d'ouvrage qui nous occupe, a fait paraître dans la revue *les Travaux publics* une série de prescriptions propres à faciliter la construction des échelles à poissons et que nous transcrivons ci-après :

« 1° Pour tous les barrages de moins de 2 mètres de hauteur, une échancrure suffisante sera à aménager au sommet en un point convenable ;

« 2° Pour les chutes supérieures à 2 mètres, la construction d'une échelle à poissons s'impose : elle peut consister en un canal continu à parois lisses. Entre 2 et 8 mètres, l'échelle aurait 0m,50 de largeur uniforme et une profondeur de 0m,50. De 8 à 12 mètres, la largeur serait portée à 0m,75, et, enfin, au-dessus de 12 mètres de chute, cette largeur atteindrait 1 mètre avec toujours la même profondeur de 0m,50 ;

« 3° Lorsqu'une échelle a une forme courbe en certaines parties de son tracé, le rayon moyen ne doit pas être inférieur à 5 mètres et, en ces parties, le côté extérieur de la rigole sera surélevé de 0m,10 ;

« 4° Il est nécessaire que la pente moyenne ne dépasse pas, dans aucun cas, 0m,20 par mètre et que des paliers de 1m,50 de longueur soient aménagés tous les 15 mètres de distance les uns des autres ;

« 5° Le débouché de l'échelle est à établir en un point où la rivière a au moins 1 mètre de profondeur et où un golfe d'attraction pour le poisson existe naturellement. Si cette dernière condition ne se présente pas, il y a lieu d'y remédier artificiellement par un moyen quelconque ;

« 6° Au lieu d'une vanne au sommet facilitant le braconnage, il suffit de disposer une simple planchette glissant entre deux gorges ménagées spécialement. Elle ne doit d'ailleurs être laissée en place que pendant la période de sécheresse, c'est-à-dire du 15 juin au 15 septembre ;

« 7° Un grillage à mailles carrées, de 1 centimètre de côté, doit être posé à demeure à l'entrée du canal d'amenée, et cela du 1er avril au 15 juin, à l'effet de protéger la descente des jeunes saumons vers la mer. »

La (*fig.* 620) montre un type d'échelle à « cascade » adopté pour l'échelle à poissons de l'usine hydroélectrique de Tuilière. L'échelle com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

porte une série de cloisons formées de poutrelles en bois distantes de 2m,10 d'axe en axe et dont la crête est disposée de manière à réaliser des chutes successives de 0m,40, facilement franchissables par tous les poissons.

Dans ces cloisons sont percés des trous, de distance en distance, pour

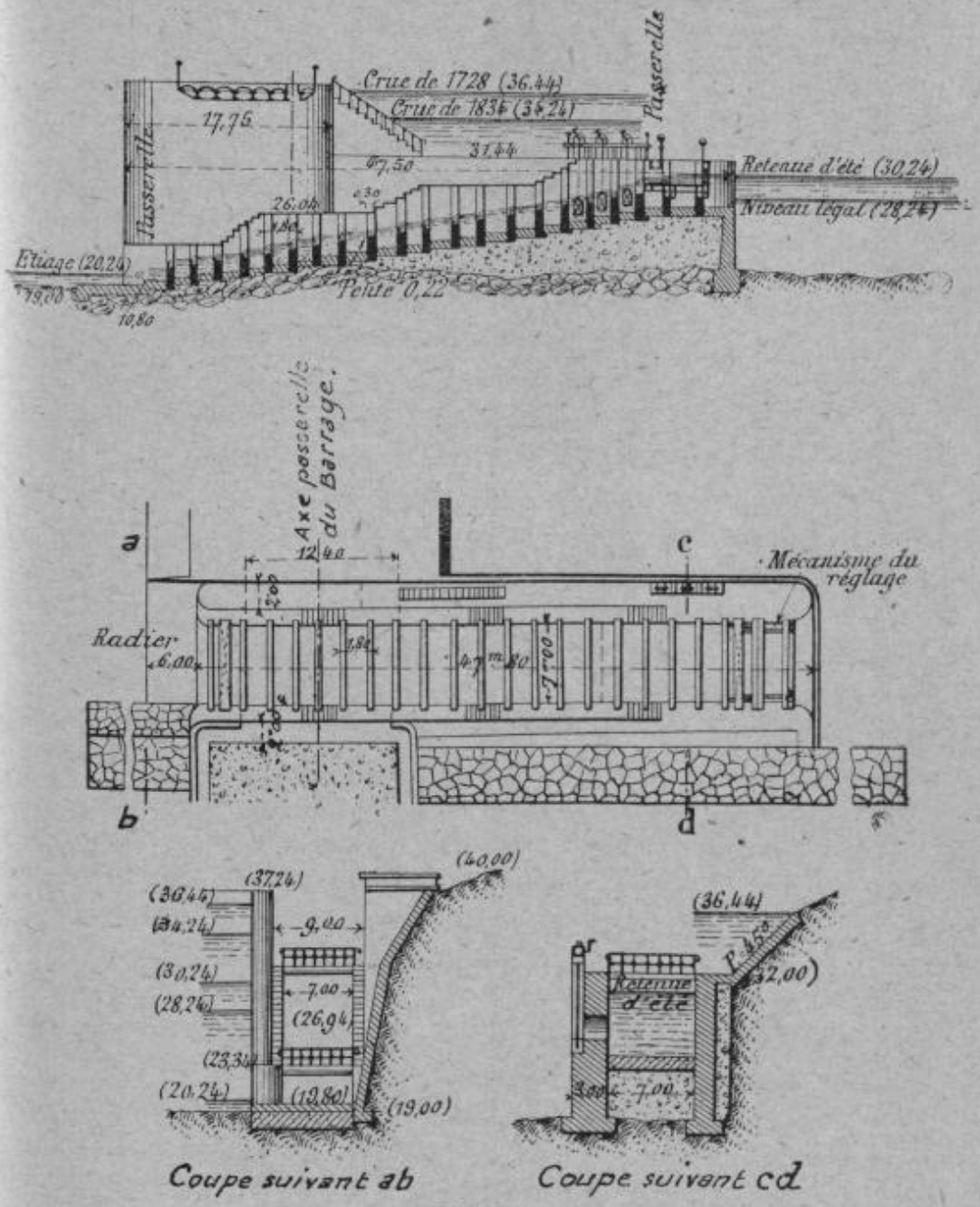


FIG. 620.

permettre aux poissons indigènes, de petites et moyennes espèces, de passer directement d'un compartiment dans l'autre sans recourir aux bonds que les poissons migrateurs emploient de préférence. Un mécanisme spécial permet de régler l'introduction de l'eau dans l'échelle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les deux bajoyers de celle-ci sont mis en communication par deux passerelles métalliques placées aux deux têtes. L'échelle est disposée entièrement à l'amont du barrage (Voir planche VIII), de manière que la dernière cloison, ou entrée à l'aval, soit un peu en arrière du parement des piles du barrage. Cette entrée est reliée, par un chenal suffisamment profond, à l'évacuation naturelle que présente le lit de la rivière près de la rive gauche et que les poissons fréquentent plus particulièrement.

La (*fig.* 620) représente un type d'échelle à « canal » étudié par M. Canaud pour l'usine hydroélectrique de Bonnavaud (§ 173). Le sommet A de l'échelle part d'une échancrure de $0^m,50 \times 0^m,50$ ménagée dans le couron-

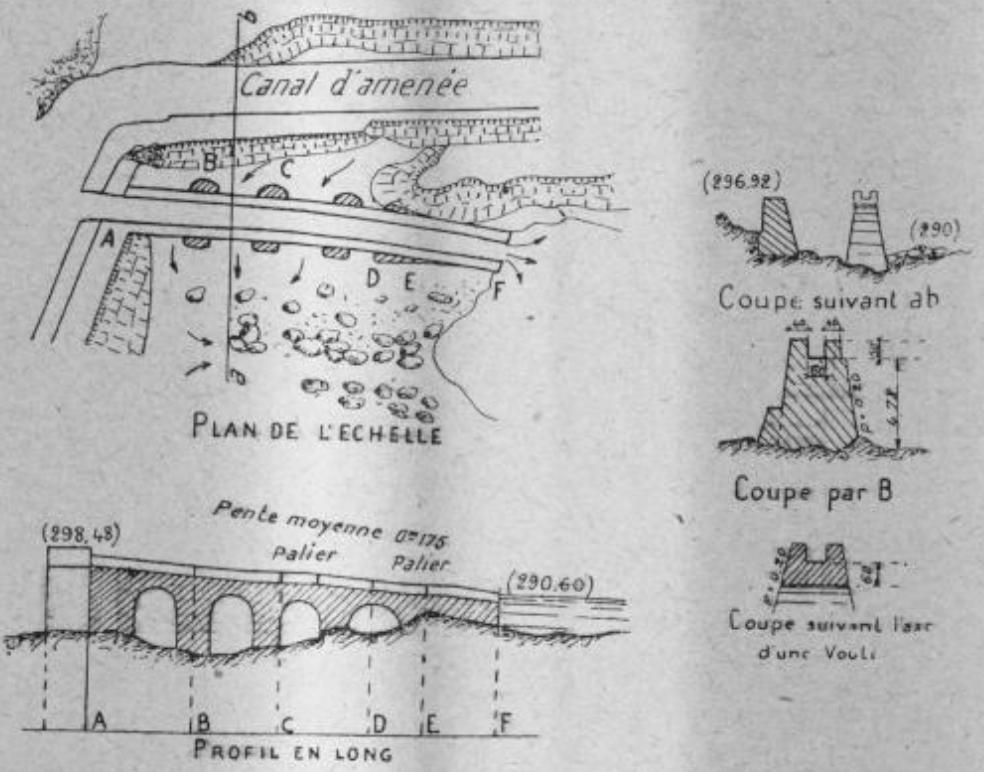


FIG. 621.

nement du barrage, sur la rive gauche et à quelques mètres de l'origine du canal d'amenée. Son pied débouche en un point F où le lit de la rivière est libre et présente un élargissement ou golfe de 15 à 20 mètres de largeur, dans lequel la profondeur de l'eau est au moins de 1 mètre.

L'accès de l'échelle est absolument interdit, du côté gauche par le canal d'amenée, du côté droit par le lit de la rivière, et enfin, du côté aval, par le canal de fuite de l'usine. L'échelle est entièrement construite en maçonnerie et tous les parements faits au ciment de Portland. Les arches ménagées dans la longueur de l'échelle, qui lui servent d'ailleurs de supports, ont pour effet de permettre le passage de l'eau provenant du canal d'amenée qui forme déversoir sur cette partie de sa longueur. Les piles sont pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tégées à l'amont par un avant-bec en maçonnerie ordinaire rejointoyée au ciment.

Les pentes du radier vont en augmentant de $0^m,167$ à l'origine jusqu'à $0^m,180$ en bas ; elles sont séparées par deux paliers de 1 mètre. Comme le

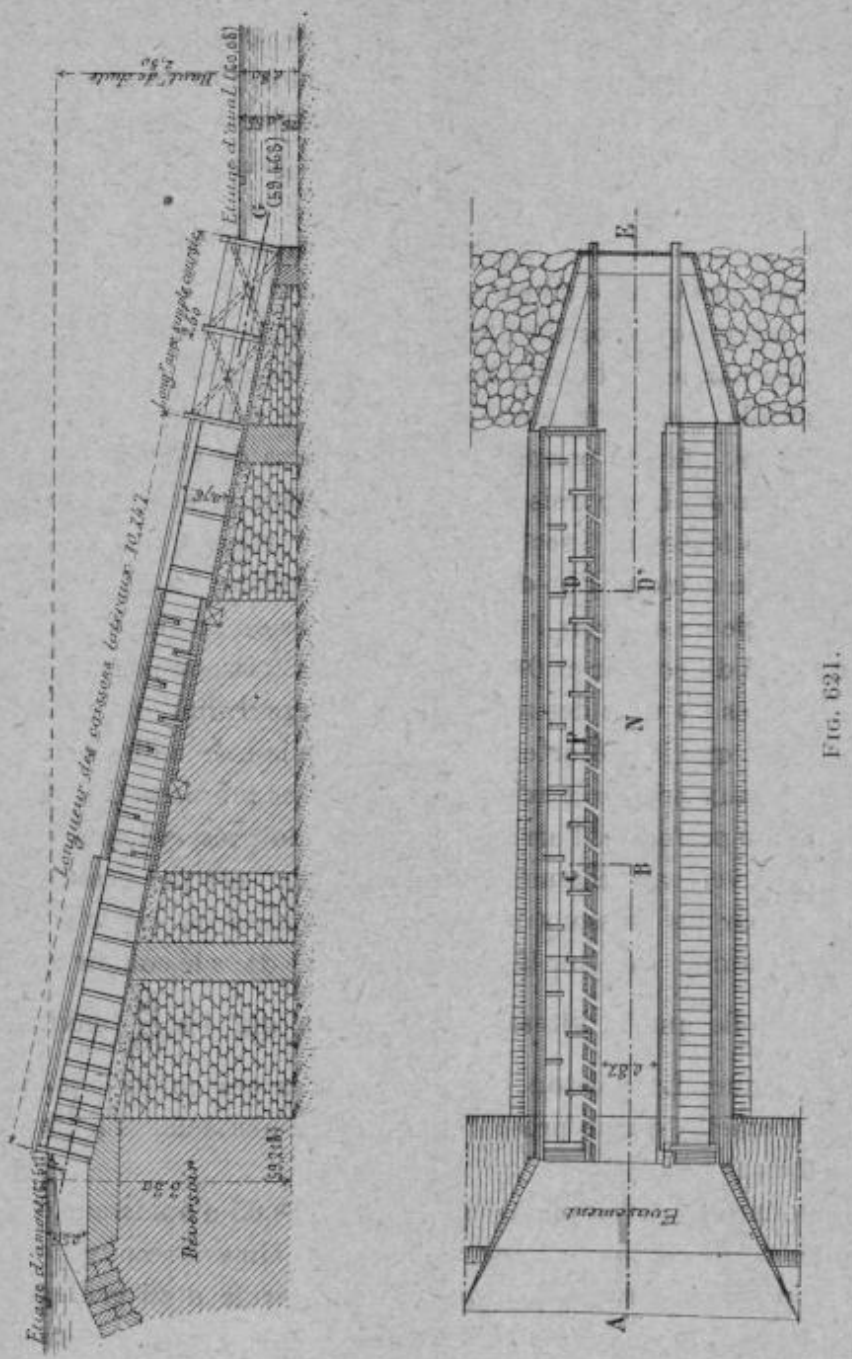


FIG. 621.

barrage forme constamment déversoir et que la saignée supérieure a $0^m,50$ de profondeur, la rigole coule à pleins bords jusqu'au premier palier ; mais, à cause de l'augmentation de vitesse, l'épaisseur de l'eau diminue progressivement ; néanmoins elle n'est en aucun point inférieure à $0^m,35$. Ainsi la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résistance de l'eau diminue à mesure que le poisson se fatigue pour remonter le courant.

Echelle à poissons type Caméré (1). — Ce type d'échelle (*fig.* 621) se compose d'un couloir central N, de 1 mètre de largeur libre, aux parois latérales duquel sont accolés, sur la majeure partie de sa longueur, deux caissons latéraux O, de 0m,70 de largeur et de 0m,60 de hauteur, couverts à leur partie supérieure et à leur partie inférieure, l'extrémité supérieure seule restant ouverte pour assurer dans les caissons, par un remplissage continuel, le maintien de la pression nécessaire pour le fonctionnement de l'échelle.

L'extrémité amont de cet appareil est encastrée de 0m,55 dans le déversoir et on a ménagé dans la maçonnerie de celui-ci un évasement de nature à diminuer, autant que possible, la dépression de la nappe d'eau à l'entrée du couloir. La partie aval de l'échelle, sur une longueur de 2m,50, se compose d'un simple coursier formant le prolongement du couloir central dans le bief inférieur, afin de permettre aux poissons de s'engager librement dans le dit passage. Les parois latérales du couloir présentent de distance en distance des fentes P, à section en forme de trapèze, établies normalement au fond du couloir ; l'un des côtés non parallèles du trapèze est dirigé suivant un angle de 45° vers l'amont. Ces fentes ou rainures ont 0m,05 de largeur du côté du couloir et 0m,07 du côté des caissons ; elles sont inégalement distantes les unes des autres et leur largeur diminue de l'amont à l'aval, pendant que leur écartement croît dans la même direction proportionnellement aux pressions exercées sur les dites rainures. Ces ouvertures ont pour but de permettre l'arrivée, dans le couloir réservé pour le passage du poisson, de veines jaillissantes liquides alimentées par l'eau sous pression fournie par les caissons latéraux ; ces veines ou cloisons liquides, dirigées vers l'amont, ont sur la nappe qui passe dans le couloir une action retardatrice telle que la vitesse n'y est plus que les $\frac{55}{100}$ environ de la vitesse théorique. Le poisson peut alors, dans ces conditions, franchir facilement l'échelle, qui ne présente du reste ni obstacle, ni saillie dangereuse ou gênante.

Les caissons sont entièrement en chêne de 0m,05 d'épaisseur et le fond du couloir central est constitué par la chape en ciment recouvrant le plan incliné. L'ouverture amont des caissons est garnie d'un grillage métallique pour empêcher les corps flottants ou les poissons de s'y introduire, et des coulisseaux sont disposés aux extrémités supérieures du couloir et des compartiments latéraux, pour recevoir des panneaux en chêne per-

(1) Installée sur les barrages verticaux des rivières d'Hères et l'Aulne (canal de Nantes à Brest).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mettant de fermer complètement les trois ouvertures de tête (en cas de réparations urgentes ou de trop faible débit de la rivière pendant la période des eaux basses).

L'échelle est assujettie solidement aux poutrelles du support et la tête amont de chaque caisson est en outre attachée au déversoir. Enfin des encochements Y sont disposés de telle façon que tout en ménageant une partie profonde au droit du pied de l'échelle, le cordon de ces enrochements forme une saillie qui arrête le saumon de part et d'autre de cette partie profonde, sur une ligne perpendiculaire au lit du cours d'eau.

Les prix de revient de ces échelles sont de 2.500 francs sur l'Aulne, pour des hauteurs de chute de $1^m,95$, et de 3.000 francs sur l'Hyères pour des chutes de $2^m,50$ de hauteur.

184. Établissement des prises d'eau. — Une prise d'eau comporte, dans le cas de l'aménagement d'une chute utilisant un torrent, une suite d'ouvrages échelonnés, depuis la tête de la chute jusqu'aux turbines, de la façon suivante : un barrage de retenue d'eau, un pertuis et un radier de chasse, une chambre de prise d'eau, un canal d'amenée reliant la prise à la chambre d'eau d'aval, une chambre d'eau avec chambre isolée de travail ou de mise en charge, une conduite forcée amenant sur les turbines l'eau puisée dans la chambre de mise en charge.

Pour certains barrages la captation de l'eau dans le réservoir se fait au moyen d'une tour de prise d'eau, généralement accolée au parement amont. Des orifices commandés par des vannes sont disposés à diverses hauteurs, ce qui permet de manœuvrer ces vannes sous des pressions relativement faibles. D'autres vannes commandent les conduites qui relient la tour avec l'aval (barrage de la Swectwater).

Souvent l'on se contente de faire déboucher les tuyaux de prise d'eau à diverses hauteurs ; on les réunit dans une même galerie et on règle leur débit au moyen de robinets-vannes installés dans une chambre de manœuvre (barrage de l'Ondenon). Il est bien de disposer à l'entrée des conduites en amont de la chambre de manœuvre une vanne de garde.

En règle générale il est préférable de disposer les conduites de prise d'eau dans un tunnel, percé dans le rocher d'un des flancs de la vallée et contournant le barrage de manière à ne pas affaiblir celui-ci.

Les conditions à observer pour établir une bonne prise d'eau dans une rivière torrentielle sont celles ci-après. Il faut : 1° éviter que les matières charriées par le cours d'eau ou les apports encombrent la prise d'eau, de façon à empêcher toute interruption de service pouvant provenir de ce fait ; les matières entraînées par les eaux torrentielles se divisent : en corps flottants (branchages, débris d'usines, feuilles entraînées à la surface et sables fins, plantes aquatiques, feuilles pourries, glaces dites de fond

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

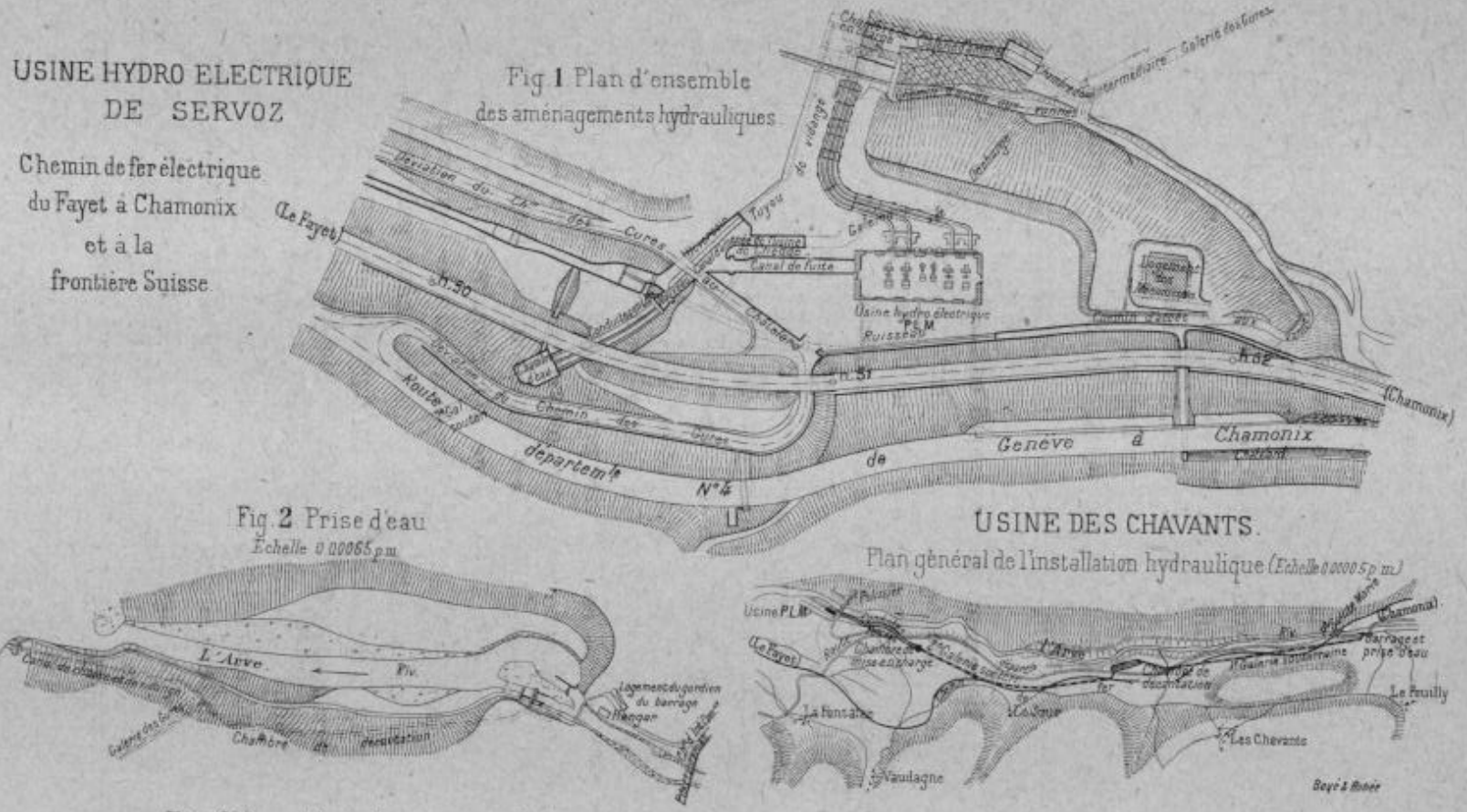


FIG. 622. — Plans des ouvrages hydrauliques des usines de Servoz et des Chavants sur la rivière l'Arve.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

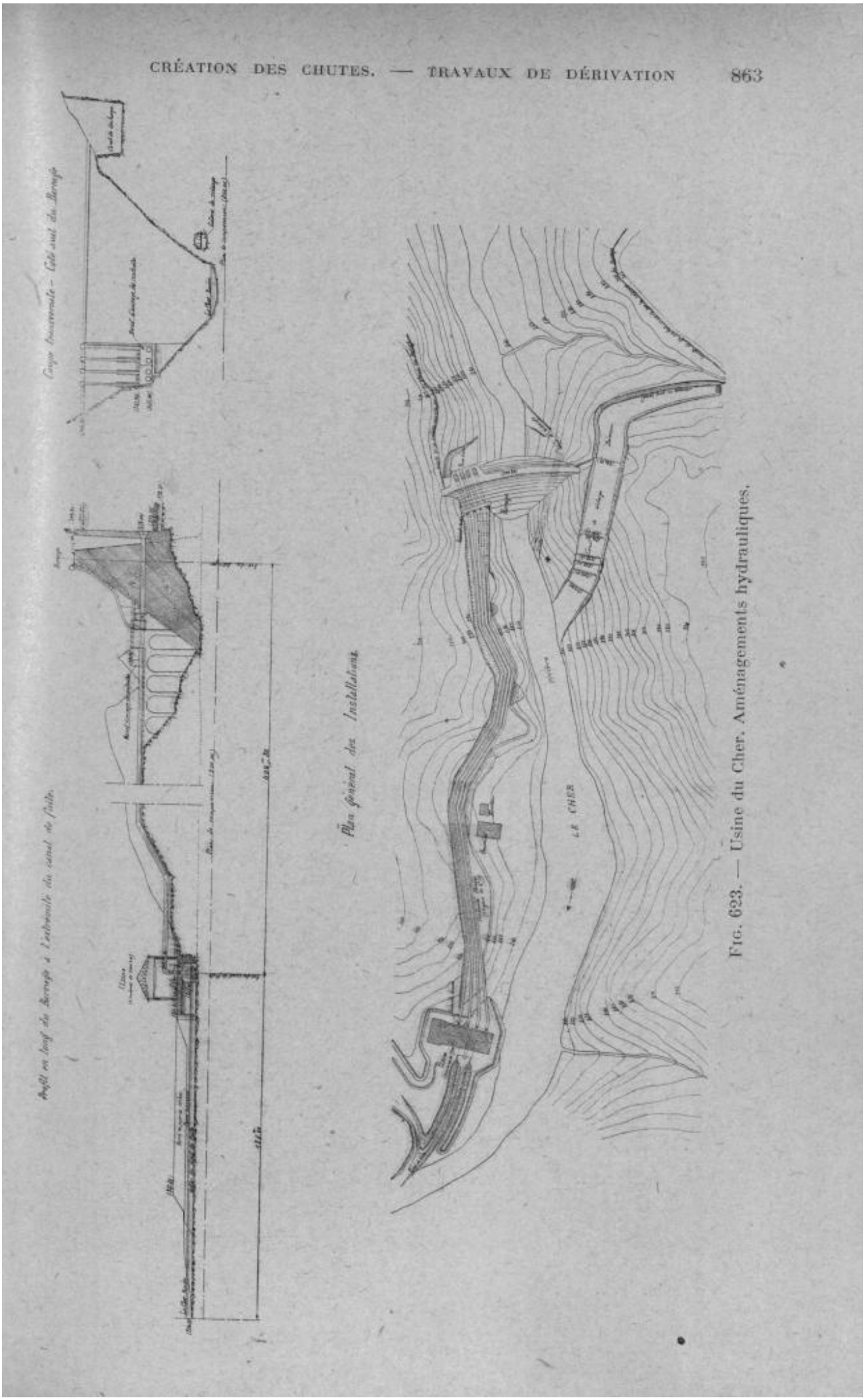


Fig. 623. — Usine du Cher. Aménagements hydrauliques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

flottant entre deux eaux) et en corps roulants ou glissants (pierres, graviers et sables grossiers) ; 2° constituer, par une retenue appropriée, un

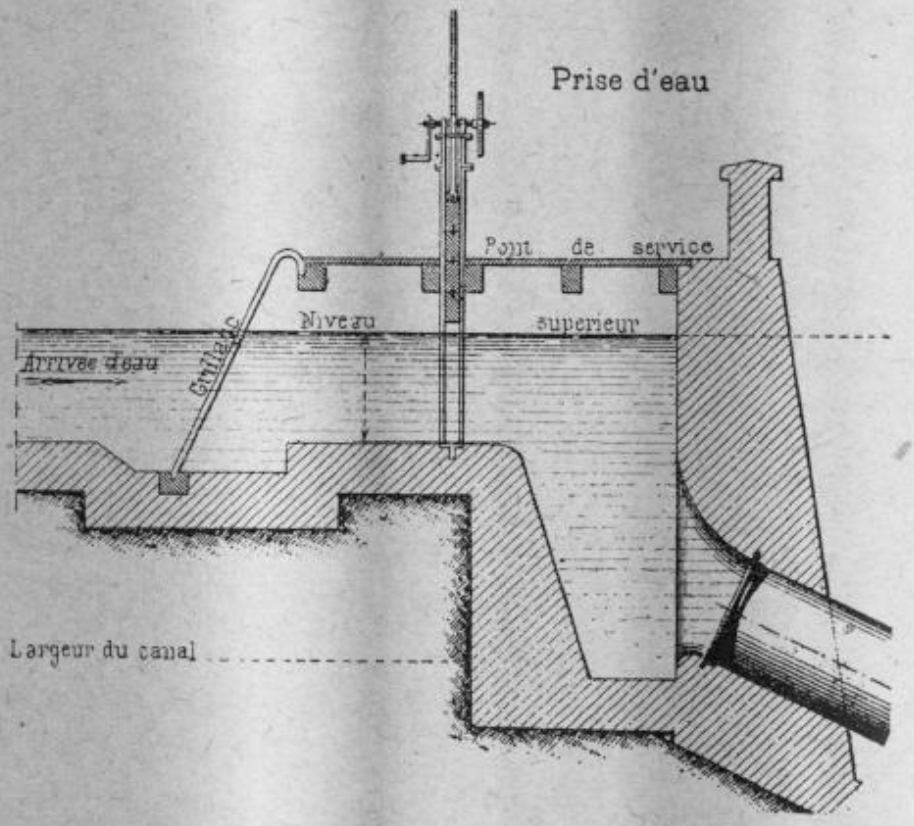


FIG. 624. — Chambre de prise d'eau.

bassin de décantation à l'amont de la prise, permettant d'abaisser suffi-

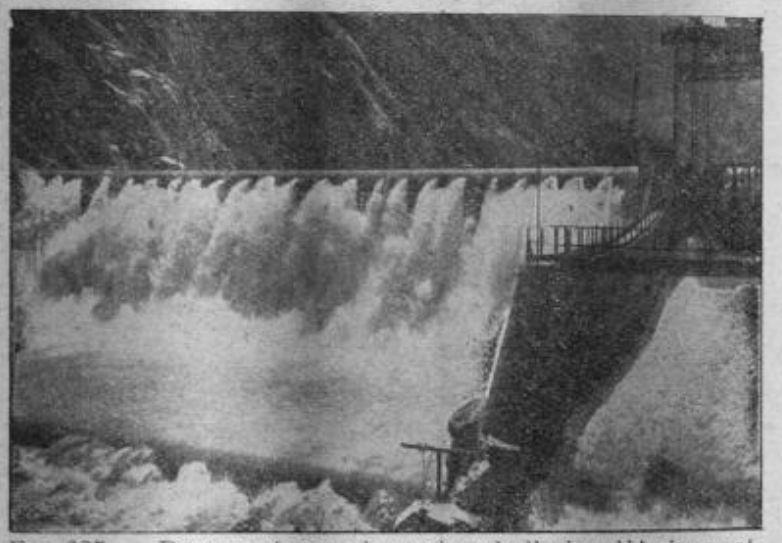


FIG. 625. — Barrage et passe à graviers de l'usine d'Avignonet.

samment la vitesse initiale d'écoulement afin d'obtenir le dépôt des matières en suspension dans l'eau qui, sans cette précaution, détériorerait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rapidement les organes essentiels des turbines ; 3° n'admettre dans les canaux d'amenée que les eaux de surface pour compléter l'effet déjà obtenu par le dispositif précédent ; 4° construire le barrage de retenue de manière à satisfaire aux conditions précédentes et à restreindre les dégâts que pourraient occasionner les crues ; 5° donner au canal d'amenée une pente suffisante pour entraîner les dépôts encore en suspension dans l'eau et le soustraire aux influences atmosphériques, aux avalanches, aux trombes d'eau, aux chutes de rochers, et ménager sur son parcours des chasses multiples pour l'évacuation des troubles, afin que les eaux arrivent suffisamment décantées dans la chambre de travail ;

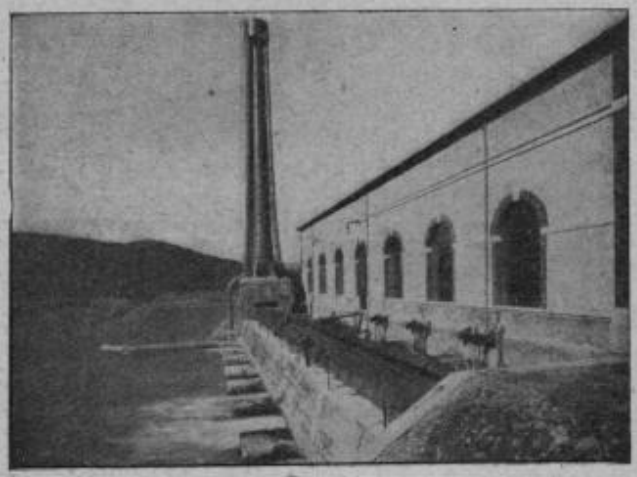


FIG. 626. — Cheminée d'équilibre de l'usine de Champ-sur-le-Drac.

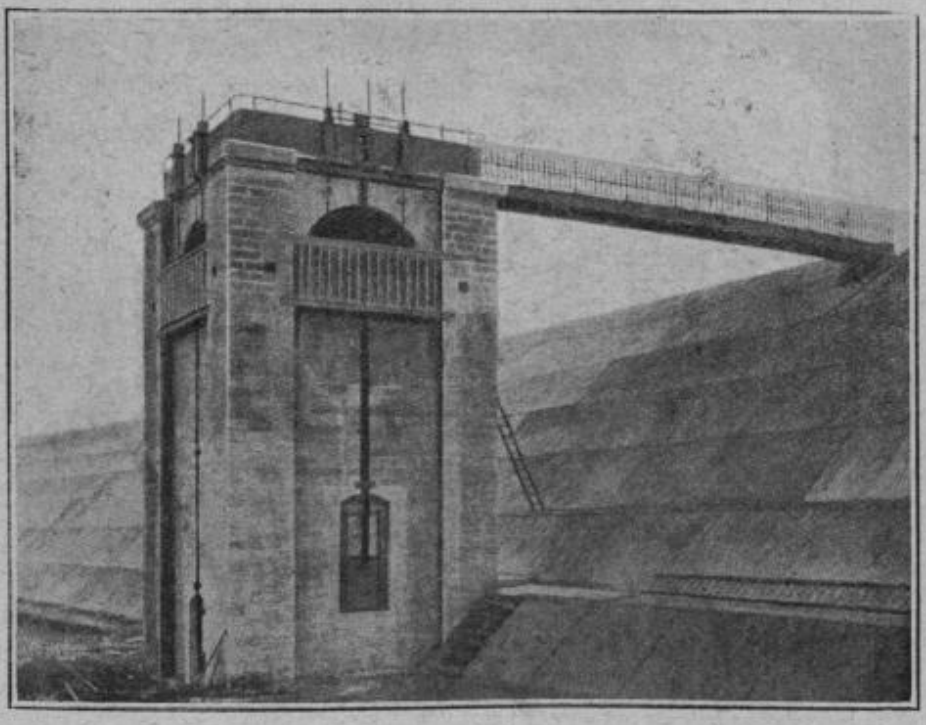


FIG. 627. — Tour de prise d'eau de Villegusien.

6° établir la chambre d'eau d'aval de telle sorte que l'on puisse impunément, — en cas d'accident de l'usine, — supprimer l'admission de l'eau

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur les turbines sans qu'il en résulte de répercussion dangereuse dans la conduite forcée ou la nécessité d'opérer la vidange complète du canal d'amenée, opération parfois très longue ; 7° enfin soustraire la conduite forcée aux effets résultant de la mise en charge ou de la vidange et aux chutes de blocs, qui perforeraient d'autant plus facilement les tuyaux que l'eau est incompressible.

Les eaux des torrents et des rivières ne charrient qu'en temps de crues, c'est-à-dire lorsqu'elles sont très abondantes. On peut donc faire une prise pouvant débiter un volume d'eau plusieurs fois plus grand que celui qu'on se propose d'utiliser ; ce volume, réglé par une vanne de prise, débite ensuite dans un canal de décantation aussi long que possible et de section telle que l'eau y circule avec une vitesse assez faible pour que les

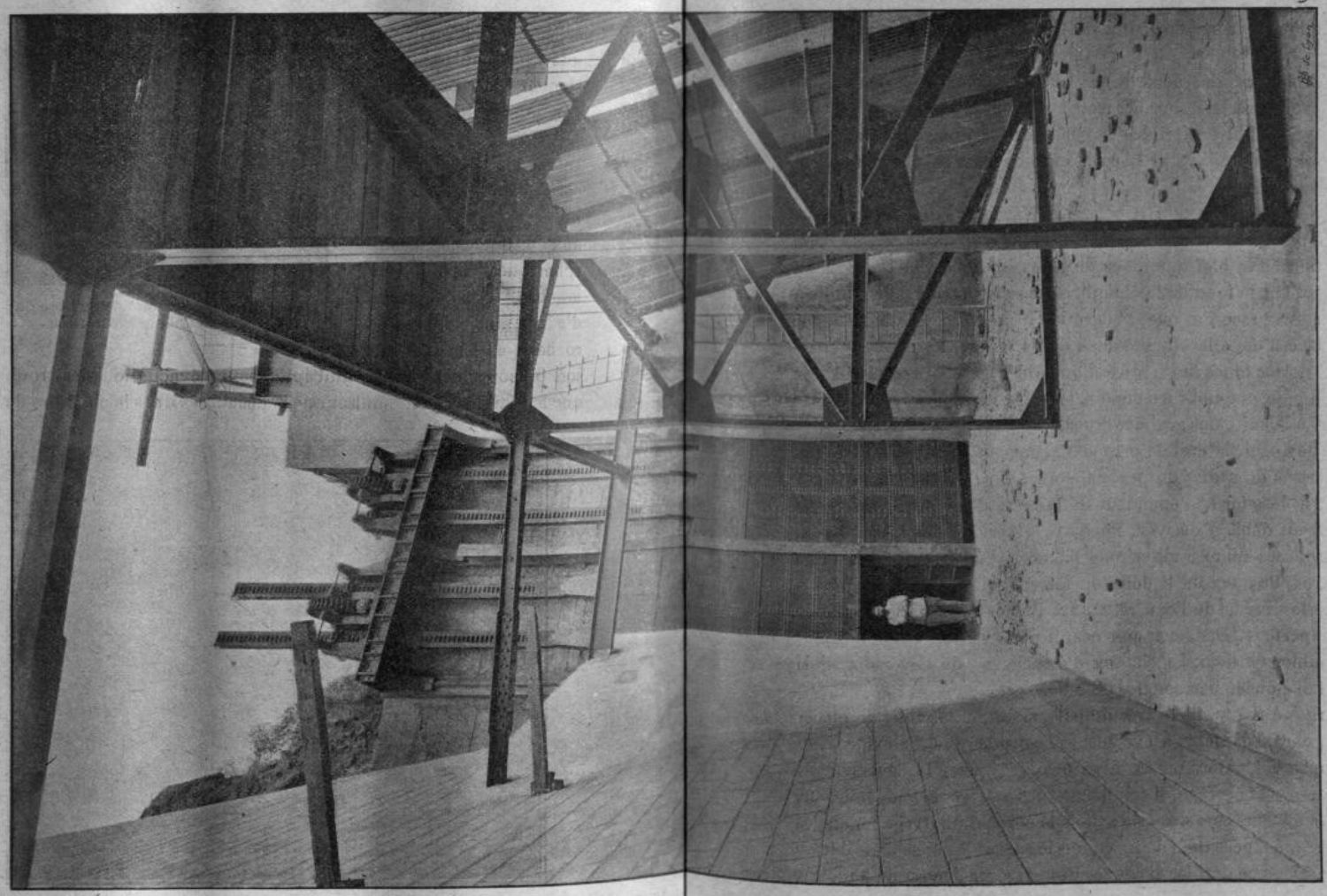


Fig. 628. — Prise d'eau de l'usine d'Avignonet. Grille en rivière et vannes d'entrée du tunnel. (A. et H. Bouvier, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sables grossiers et les graviers tombent au fond, et assez forte pour que ces mêmes corps continuent à se mouvoir, une fois tombés, en glissant sur le fond. Le canal de décantation est précédé d'un long déversoir, qui prend les eaux de surface les plus décantées pour les envoyer au canal d'eau, clarifiées, et, tout à l'aval, on place une vanne de purge pour l'évacuation des eaux de fond, très riches en sables et graviers.

Quand la disposition des lieux le permet, un excellent moyen de se débarrasser à coup sûr de tous les corps étrangers, à l'exception des sables, consiste à établir des cribles en tôle, perforés, placés horizontalement et disposés dans un canal latéral muni de vannes d'admission et d'une vanne de chasse.

A l'usine hydroélectrique de Brême sur le Weser, le lavage des dépôts sablonneux au pied du barrage, est obtenu au moyen d'une canalisation d'eau alimentée par le bief amont et dont les branches débouchent en forme de tuyères sur le fond de la chambre des secteurs (barrage mobile à secteurs). Mais on a reconnu que, malgré la chasse violente obtenue par des pompes placées dans la pile médiane de l'ouvrage, les dépôts persistaient au droit de certaines branches et l'on a dû y amener une tuyauterie d'air comprimé pour ameublir les dépôts. L'opération de lavage s'exécute principalement à la suite des grandes crues.

La crête du déversoir latéral de prise d'eau devra être située à 2 mètres au moins au-dessus du radier du pertuis, pour n'être jamais affleurée par les apports, et la largeur et l'épaisseur de la lame d'eau sur le déversoir correspondront au débit à dériver. Pendant la période des basses eaux, alors que les vannes du pertuis seront baissées, l'épaisseur de la lame d'eau devra être telle que tout le débit du torrent soit écoulé par le déversoir avant que le niveau de l'eau retenue à l'amont soit absorbé par le déversoir de superficie. Dans certains cas, il peut y avoir commodité et intérêt à dédoubler en deux les canaux d'évacuation du déversoir, ainsi que cela a été fait pour le barrage de la Sioule.

Dans les gorges étroites, il est très difficile, sinon impossible, de placer ces déversoirs, car, si le débit à évacuer est considérable, ils exigent un grand développement. Alors on est amené soit à opérer le déversement des crues par-dessus le barrage, si celui-ci n'a pas une très grande hauteur, soit à placer les évacuateurs des crues dans le corps du barrage ; mais les ouvertures ainsi ménagées dans la maçonnerie sont une cause de faiblesse pour l'ouvrage. Dans ce dernier cas, avec des barrages de grande hauteur, on peut être conduit à employer des évacuateurs souterrains (tunnels), où l'eau est amenée par des puits verticaux puisant l'eau à la surface et fonctionnant à l'instar de tuyaux pleins avec toute la charge d'eau, dès que le niveau de l'eau dans le réservoir atteint une certaine hauteur. Ces

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

évacuateurs peuvent fonctionner automatiquement sans le secours d'aucun personnel.

Quand la hauteur de retenue est faible et le débit très considérable, il y a avantage à débiter les crues par une série de vannes de fond dont l'usine de Chèvres, près de Genève, sur le Rhône, est un exemple typique.

Une bonne précaution consiste à disposer la prise d'eau de manière à pouvoir alimenter le canal en temps de crues par les eaux de surface, et à tenir les seuils des vannes de prises d'eau établies à l'aval du bassin de décantation à 1 mètre ou au moins à $0^m,50$ en contre-bas de ce bassin. Si la prise d'eau est faite au moyen d'un barrage, on disposera d'une certaine hauteur, qui permettra de faire le curage du bassin de décantation au moyen de chasses déterminées par la manœuvre des vannes de décharge. Si la prise d'eau se fait sans barrage et s'il s'agit d'une rivière à pente relativement faible, le curage du bassin ne pourra être obtenu qu'à l'aide de dragages.

M. L.-P. Drouhin préconise, à l'effet d'éviter l'affouillement que provoque inévitablement l'ouverture de la vanne de la prise d'eau, qui peut déterminer le soulèvement du radier par sous-pression, l'établissement d'un petit barrage disposé à 10 ou 15 mètres à l'aval de la vanne de prise, produisant ainsi un matelas d'eau de $0^m,50$ à $0^m,60$ de hauteur, qui a pour but d'amortir la vitesse au moment où commence l'ascension de la vanne et de s'opposer aux effets précédents.

Il y a lieu de protéger les ouvrages contre le danger de la prise de glace et contre les inondations. En effet, quoique l'eau à sa surface ne soit pas gelée, elle est constamment sur le point de se congeler et se charge ainsi de fragments de glace très fins en suspension qui s'accolent peu à peu et finissent par former une masse solide autour de laquelle l'eau peut se solidifier profondément. Dans ces conditions, le canal d'amenée se trouve bien vite obstrué ainsi que les abords immédiats des turbines. Le réservoir qui précède le barrage doit donc être assez profond, de façon que l'eau ne puisse porter des cristaux de glaces quand elle quitte le barrage.

On donnera en outre aux ouvrages une solidité telle qu'ils puissent résister aux plus violentes inondations. Si une conduite part du barrage même, il convient de la disposer au-dessus du niveau le plus élevé, sinon la première crue pourrait l'enlever. Dans tous les cas, l'usine sera placée hors d'atteinte des plus hautes eaux.

185. Déglaçage des cours d'eau. — On sait que immédiatement en dessous de zéro degré centigrade a lieu la formation de la glace à la surface de l'eau calme, douce, recouvrant de faibles profondeurs. Si les couches d'air ne sont pas troublées et si le courant est à peu près nul, conditions qui se présentent assez ordinairement dans des biefs abrités

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de faible retenue, une mince couche de glace ne tarde pas à recouvrir toute la surface du plan d'eau, qui s'épaissit de plus en plus sous l'influence du gel.

Les rivières et fleuves de 3 à 8 mètres de profondeur ne se congèlent guère qu'à des températures de — 10 à — 15° environ ; M. l'ingénieur Dibos a noté que la Marne, la Saône, l'Yonne, la Meuse, la Loire, la Seine et la Garonne ne se solidifient guère que vers des températures oscillant entre — 12 et — 14°, mais qu'elles charrient bien avant, soit vers — 4 à — 6°, car antérieurement à la congélation de toute la largeur du cours d'eau, il se forme de multiples blocs de glace, de volumes et de surfaces divers, que le courant charrie et qui flottent en vertu de leur moindre densité.

Plus les glaces se multiplient, plus leurs dimensions et leur volume augmentent de toutes parts par la solidification de nouvelles couches liquides venant s'ajouter au noyau primitif. Comme le lit du cours d'eau se trouve de plus en plus envahi, la marche des glaçons, se heurtant les uns aux autres et aux obstacles naturels ou artificiels existants, est de plus en plus ralentie. A un moment donné une partie des glaçons s'arrête, et l'immense convoi glacé stoppe à son tour. Le froid finit de souder les uns aux autres tout cet amas de glaçons stationnaires et le fleuve ou la rivière se trouve pris. Alors la navigation, qui a été très pénible au fur et à mesure de l'accentuation du charroi des glaces, se trouve, du fait de la prise du cours d'eau, totalement arrêtée.

Pour retarder le moment de l'embâcle, on essaie généralement, dans les rivières ou fleuves canalisés, de faire des mouvements de barrages ou d'écluses en élevant ou abaissant le plan d'eau. Les glaçons ou bousins sont retenus sur le fond et quand ils sont assez épais pour que la poussée du liquide puisse les soulever, ils montent à la surface ; de plus, il existe des amas friables en suspension dans les couches liquides qui se collent et adhèrent aux objets qui se trouvent dans l'eau ou qui y plongent.

Pendant l'hiver, aux périodes de gel succèdent des périodes de dégel complet et momentané ; dans ce cas, les portions congelées des rivières se disloquent, et sous l'action du courant, les blocs de glace disjoints se remettent en marche, s'amoncelant s'ils rencontrent un obstacle qui les arrête ou les maintienne.

La débâcle s'effectue soit lorsque la température s'élève, soit lorsque de fortes pluies ou des neiges augmentent le volume de la rivière.

Dans les opérations de déglaçage ou dislocation des glaces, il y a deux phases distinctes : le cassage de la glace et l'évacuation des glaçons. Dans les rivières canalisées au moyen de barrages mobiles, où la navigation ne peut avoir lieu qu'à la condition que ces barrages soient relevés, et comme ces barrages sont généralement couchés en temps de gelées, les travaux de

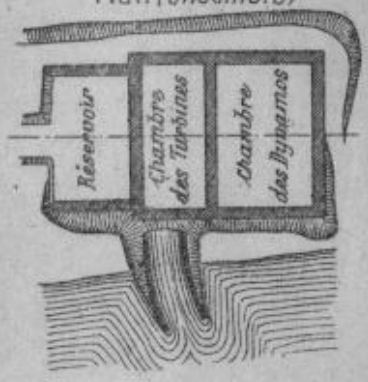
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ement de l'Usine de Bonnavaud (Creuse).

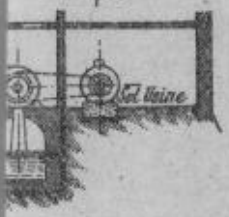
Usine

Elévation

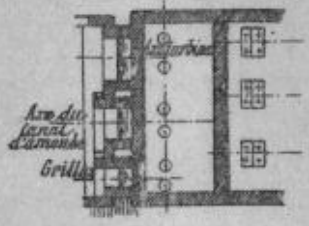
Plan (ensemble)



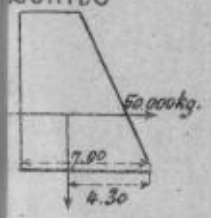
Coupe



Plan (au niveau de l'usine)



pure de
abilité



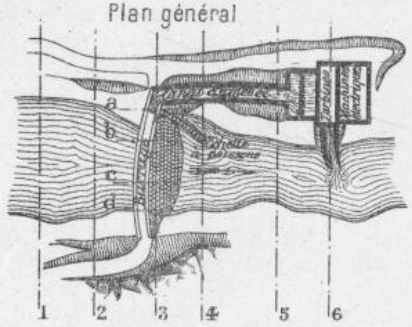
Poids de l'eau 1000 kg
Poids de la maçonnerie 2000 kg
Moment de renversement dû à l'eau :
50.000 × 3,33 = 166.500
Moment des maçonneries :
110.000 × 4 30 = 473.000
Coefficient de stabilité
$\frac{473.000}{166.500} = 2.87$

49, Quai des Grands-Augustins, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

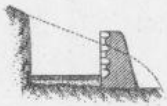
Aménagement de l'Usine de Bonnavaud (Creuse).

Plan général



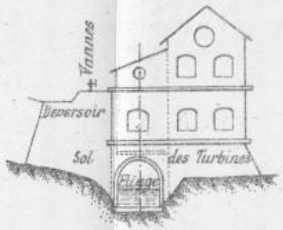
Profil en long

Profil du Canal d'amenée

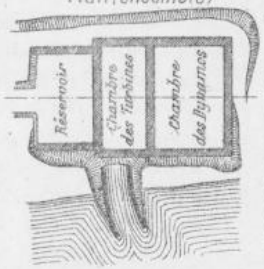


Usine

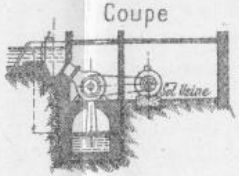
Elévation



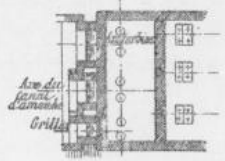
Plan (ensemble)



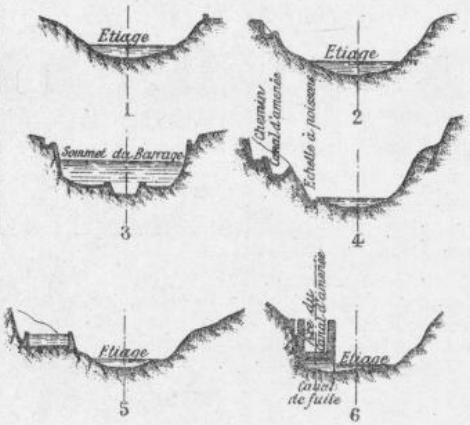
Coupe



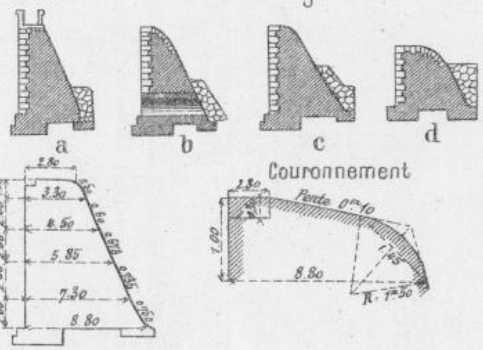
Plan (au niveau de l'usine)



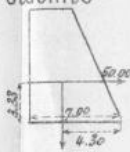
Profil en travers



Profil du barrage



Epure de stabilité

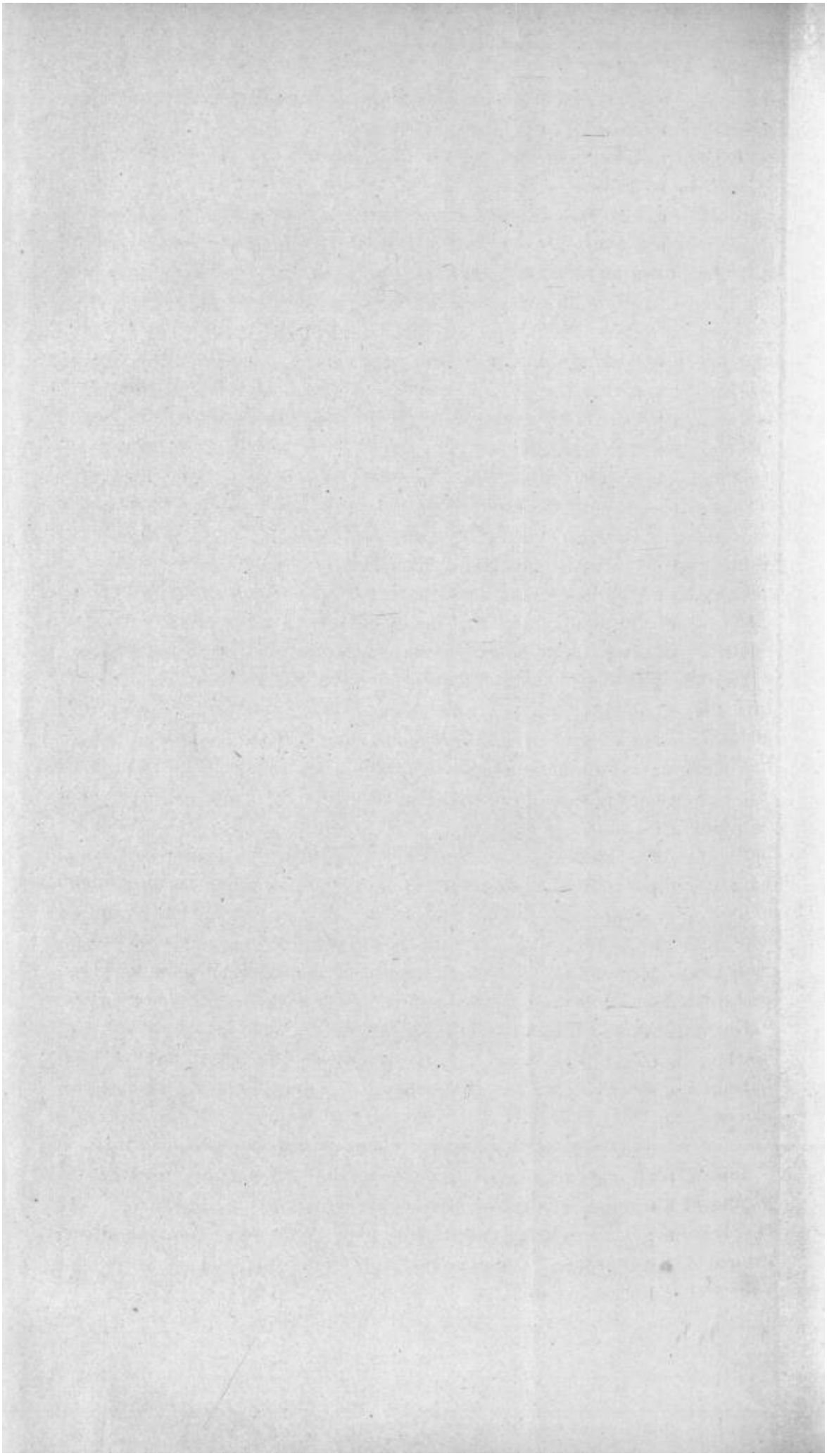


Poids de l'eau 1000 kg
Poids de la maçonnerie 2200 kg
Moment de renversement dû à l'eau :
50.000 x 3,33 = 166.500
Moment des maçonneries :
110 000 x 4.30 = 473 000
Coefficient de stabilité
$\frac{473.000}{166.500} = 2.87$

Pacoret_La Houille blanche_Page 671.

DUNOD & PINAT, Editeurs, 47 et 49, Quai des Grands-Augustins, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déglaçage ne s'imposent guère que pour la préservation des ouvrages d'art et pour préparer la débâcle.

On se trouvera bien d'employer des brise-glaces en commençant le travail avant la prise complète du canal ou dès que les signes de dégel apparaissent. Sur les eaux dormantes, il convient d'abord de dégager les objets enterrés dans le champ de glace. Si celle-ci ne dépasse pas $0^m,12$ d'épaisseur on peut l'attaquer au moyen de haches de charpentier ou de cognées, en l'entaillant par rainures perpendiculaires aux objets enclavés, bateaux ou autres. Pour briser les glaces ayant une tendance à se reformer, on se sert de perches terminées de préférence par l'ajut de paniers d'osier, qu'on agite du bord ou en se tenant sur la glace elle-même. Pour le découpage du champ de glace on utilise avec succès des scies à longue lame épaisse et à large voie.

Pour rompre une embâcle sur les eaux courantes, il faut chercher à établir immédiatement un chenal, que l'on trace de préférence aux endroits où l'on constate que la vitesse du courant atteint son maximum et on se place à l'aval pour commencer le travail de coupure et de façon que les blocs détachés, entraînés par le courant, puissent trouver une facile issue. Au besoin on tire ces blocs sur les rives, en s'aidant de madriers ou planches disposés en rampe douce à partir du plan d'eau.

Pour le déglaçage des rivières importantes on emploie des bateaux brise-glaces ou des charrues brise-glaces, qui permettent de fendre la glace, de la soulever et de la rejeter de chaque côté sur le champ de glace lui-même, déterminant ainsi un chenal pour l'évacuation des glaces. On fait aussi usage parfois d'explosifs, sous formes de charges superficielles ou immergées, mais ces dernières opérations doivent être conduites avec beaucoup de prudence. Enfin M. Dibos a introduit un procédé nouveau pour le coupage de la glace, qui consiste dans l'emploi du chalumeau oxhydrique monté sur un traîneau *ad hoc*. Par le contact calorique on détermine des fissures ou rainures dans le champ de glace, dans lesquelles, pour éviter le regel, on répand du vieux sel rebuté. Puis à l'aide d'anspects, de masses et de poinçons on finit de détacher les glaçons aux rainures.

Une disposition toute nouvelle a été employée dans l'installation d'Aelf Karliby (Suède) où on disposait d'une chute de $16^m,50$ de hauteur. Un barrage mobile à rouleaux est spécialement affecté pour le passage des glaces.

186. Comparaison entre des usines établies sur rivière de plaine et sur rivière torrentielle. — Par l'examen des (planches VII et VIII), on peut se rendre compte des dispositions prises pour l'aménagement de deux usines, l'une située en pays de montagne et l'autre en une vallée secondaire, réalisant chacune une chute de 8 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a) *Usine hydroélectrique de Bonnavaud.* — Dans la région où cette usine (Pl. VII) a été établie, la Creuse coule entre deux berges sauvages rocheuses, où on a pu aménager une chute libre de 8 mètres. Le barrage a été construit de façon à maintenir entre lui et un barrage de moulin, existant en amont, une dénivellation de $0^m,12$. Il affecte en plan la forme d'un grand arc de cercle de 180 mètres de rayon et d'une longueur totale de $62^m,30$; sa largeur en couronne est de $2^m,80$, celle à la base de $8^m,80$, et la hauteur est de 9 mètres.

Le corps du barrage, dans la partie construite dans le lit de la rivière (profil 3), est traversé par trois aqueducs qui sont fermés à l'amont par des vannes mobiles.

Le bâtiment de l'usine est établi sur la rive gauche de la Creuse, en aval du barrage, et la prise d'eau est faite au moyen d'un canal à ciel ouvert creusé dans le rocher, qui conduit les eaux dans un réservoir susceptible d'être mis en communication avec la chambre des turbines. Le canal de fuite, à ciel ouvert, ramène les eaux dans le lit de la rivière.

L'échelle à poissons pour la migration de ces derniers est constituée par une échancrure de $0^m,50$ de largeur et de $0^m,50$ de profondeur, pratiquée dans le côté gauche du barrage, fermée par une petite vanne en temps de basses eaux ; elle aboutit à une petite rigole maçonnée descendant du barrage et creusée avec une pente de $0^m,30$ par mètre. Deux paliers de 1 mètre de longueur sont ménagés dans sa longueur.

Le barrage a ses parements nus, tant à l'amont qu'à l'aval, les pieds droits et les voûtes des aqueducs construits en maçonnerie de moellons têtués par assises réglées, dressés d'équerre dans les lits et joints sur au moins $0^m,15$ avec $0^m,30$ à $0^m,45$ de longueur de queue. Il a été fait de même pour les radiers des aqueducs.

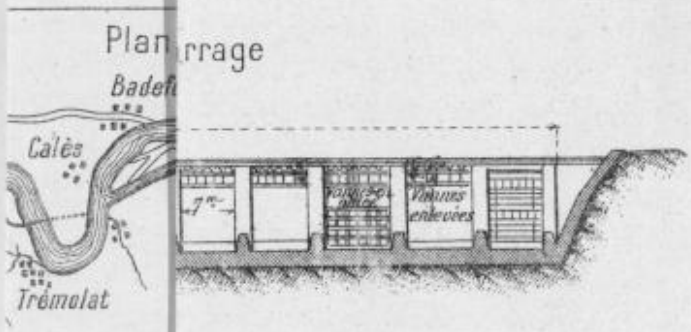
La partie supérieure du couronnement du barrage est composée d'un cordon continu en pierre de taille, disposé en glacis incliné à 1/10 de l'amont vers l'aval et raccordé avec la retombée au moyen d'une courbe. Les bandeaux, les angles des pierres d'avant et d'arrière du radier sont en moellons piqués. Le rejointoiement de toutes les maçonneries a été effectué avec du mortier de ciment au dosage de 500 kilogrammes pour 1 mètre cube de sable tamisé.

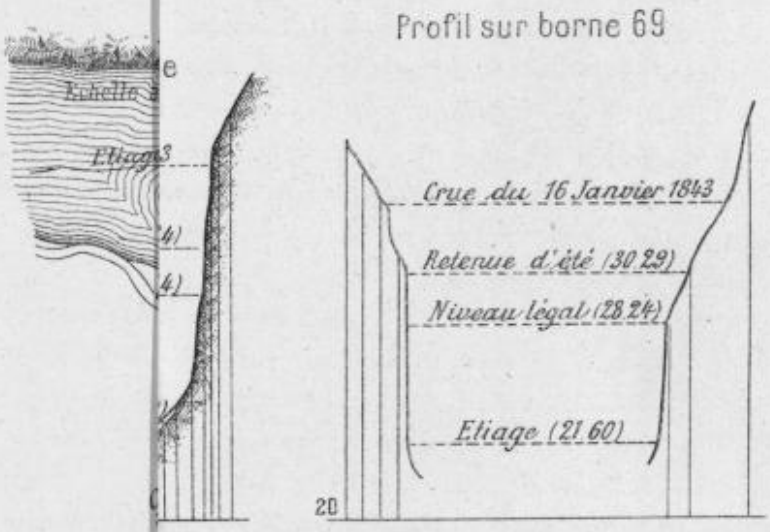
La pierre de taille, le moellon piqué ou têtué ainsi que les moellons bruts ont été demandés à la roche granitique dure du pays, et ont été parfaitement ébousinés et lavés.

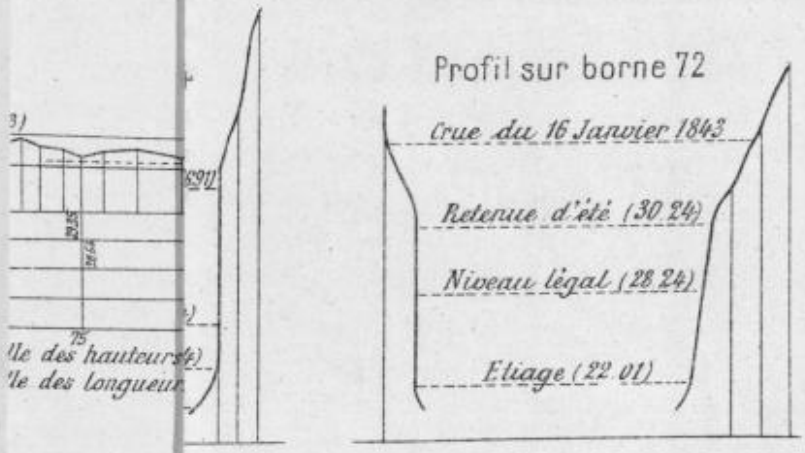
Le canal d'amenée, dans la partie de sa longueur à ciel ouvert, a son côté droit formé par un mur, la paroi de gauche et le plafond étant constitués par la roche en place. Ce mur a été fait en maçonnerie de moellons têtués par assises réglées, rejointoyés au ciment, et le parement extérieur, suivant un fruit de 1/4, en maçonnerie ordinaire spéciale, également

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

agement de l'Usine de Tuilière (Dordogne).





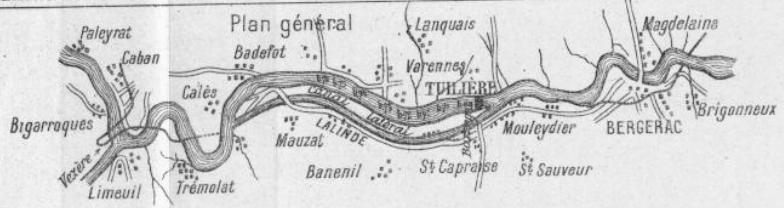


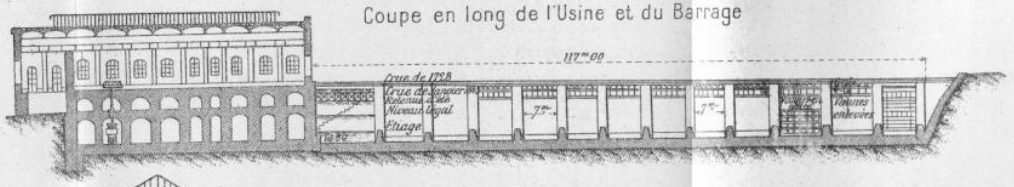
blanche. Page

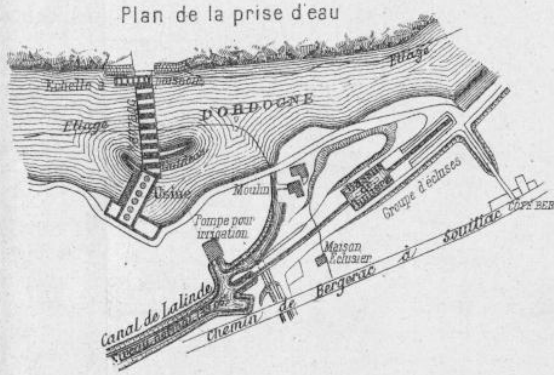
Braun, 38, Rue de la Tour-d'Auvergne, Paris, IXe

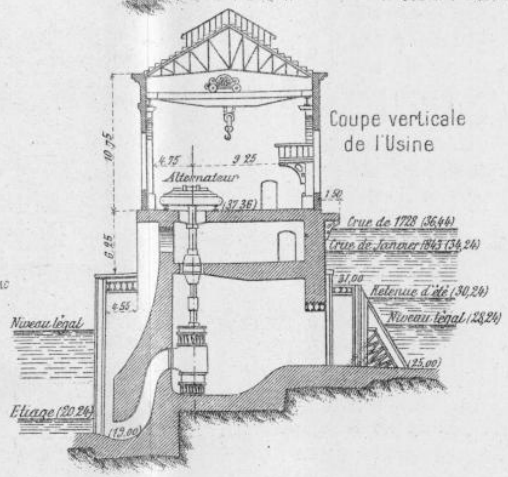
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

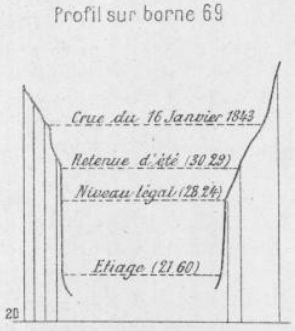
Planche VIII.

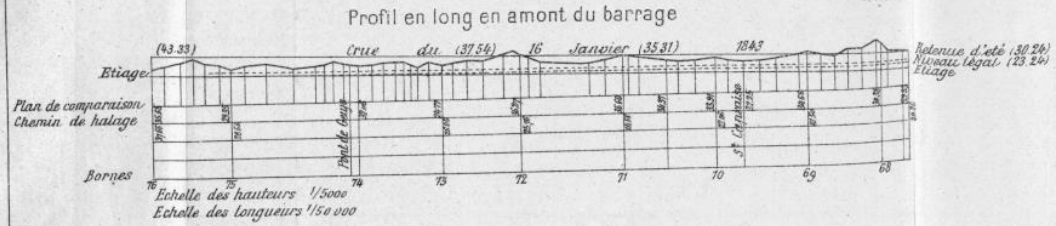


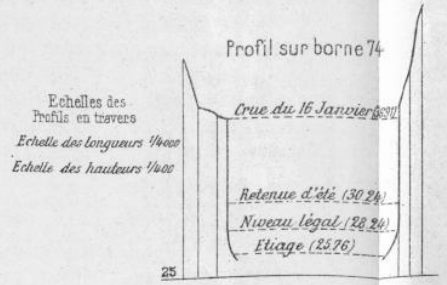


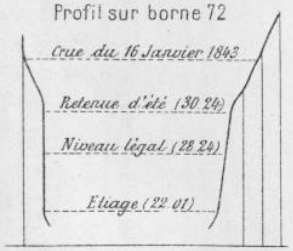












Pacoret. La Houille blanche. Page 873.

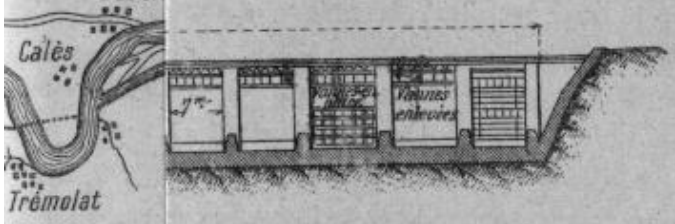
DUNOD & PINAT, Editeurs, 47 et 49, Quai des Grands-Augustins, Paris.

L. Braun, 35, Rue de la Tour-d'Auvergne, Paris, IXe

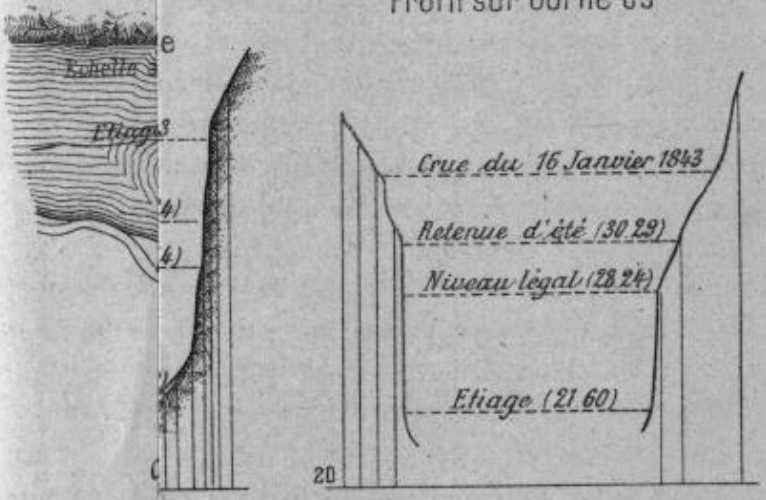
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

agement de l'Usine de Tuilière (Dordogne).

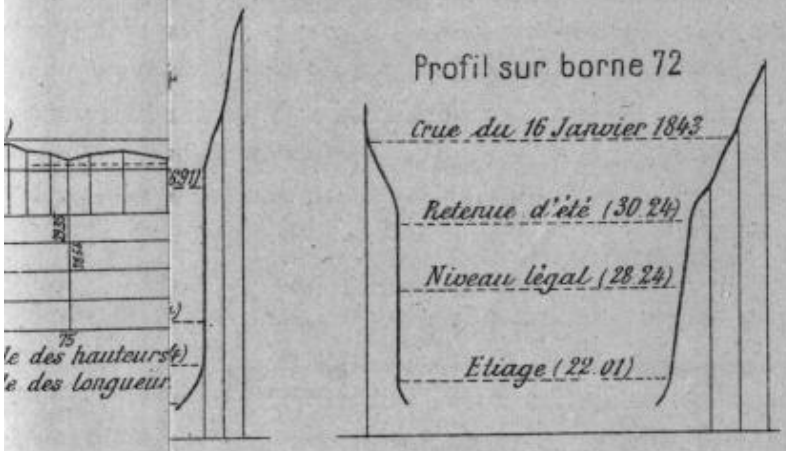
Plan rrage



Profil sur borne 69



Profil sur borne 72



blanche Page

Braun, 35, Rue de la Tour-d'Auvergne, Paris, IXe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rejointoyée au ciment. Ce mur, qui forme déversoir sur toute sa longueur, a son pied protégé par un solide enrochement.

Les parements de la roche ont été aplanis avec un enduit en ciment sur béton pour faire disparaître toutes les aspérités.

b) *Usine hydroélectrique de Tuilière (Dordogne)* (1). — Cette usine utilise les nombreux rapides de la Dordogne situés entre Tuilière et Mauzac (Pl. VIII). Cette partie de la Dordogne est considérée comme rivière navigable et flottable ; mais la navigation, en fait, y est nulle, celle-ci se faisant par le canal latéral de Lalinde.

En raison du grand volume d'eau débité par la Dordogne au moment des hautes eaux et des hauteurs atteintes par les crues, on a été amené à constituer le barrage par un viaduc à tablier métallique placé au-dessus des plus hautes crues ; celle de janvier 1728 s'est élevée, à Tuilière, à 16m,20 au-dessus de l'étiage, et celle de janvier 1845 à 14 mètres. Les crues de la Dordogne sont entièrement formées à Lineuil, où elle reçoit la Vézère, et les durées de propagation des crues importantes atteignent 28 heures d'Argentan à Bergerac et 12 heures au moins de Montignac à Bergerac.

La hauteur de chute à l'étiage est de 12 mètres, et le niveau légal à l'altitude 32m,24. La berge de rive gauche est à peu près à la cote 40,38 ; sur la rive droite, le chemin de halage est à la cote 34,08. Le débit de la Dordogne atteint 200 mètres cubes par seconde en eaux moyennes, et descend à 38 mètres cubes à l'étiage.

Pour l'étude du barrage, on a admis à l'amont une pente approximative égale à celle qui existe à l'amont du barrage de Bergerac (0,000035 par mètre), permettant d'avoir au point le plus bas (Saint-Caprais) une revanche supérieure à 5 mètres.

L'ensemble du barrage repose sur un radier général en béton de ciment de Portland, solidement encastré dans le rocher, que l'on trouve sous la faible couche de gravier constituant le lit de la rivière. Le seuil des vannes est placé au niveau de l'étiage (20,24), c'est-à-dire au zéro de l'échelle de l'écluse aval de Tuilière, plan de comparaison admis dans les nivellements.

---

(1) En Suède, pour augmenter la vitesse angulaire des génératrices dans le cas de faibles chutes, on supprime les engrenages et on recourt à l'accouplement direct par l'adoption de turbines verticales.

A Nygvarin, les turbines comprennent 4 roues avec arbres verticaux. La vitesse, à 4m,10 de chute, est de 150 tours-minute et la puissance de chaque turbine est de 500 chevaux.

A Avesta-Lillfors, on utilise une chute de 3 mètres avec des turbines à deux roues de 680 chevaux.

A Hellefors, on emploie des groupes turbo-générateurs composés de deux roues tournant en sens opposés, l'une tournant à l'intérieur de l'arbre creux de l'autre. Sur ces deux arbres sont montés respectivement l'armature et l'inducteur de la génératrice, qui tournent en sens opposé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'un relevé effectué pendant les cinq dernières années à l'échelle de Mouleydier, la plus voisine du barrage, la hauteur au-dessus du zéro est inférieure à 1 mètre pendant cent soixante-cinq jours par an. Pour compenser la diminution du débit pendant cette période, on s'est décidé à relever

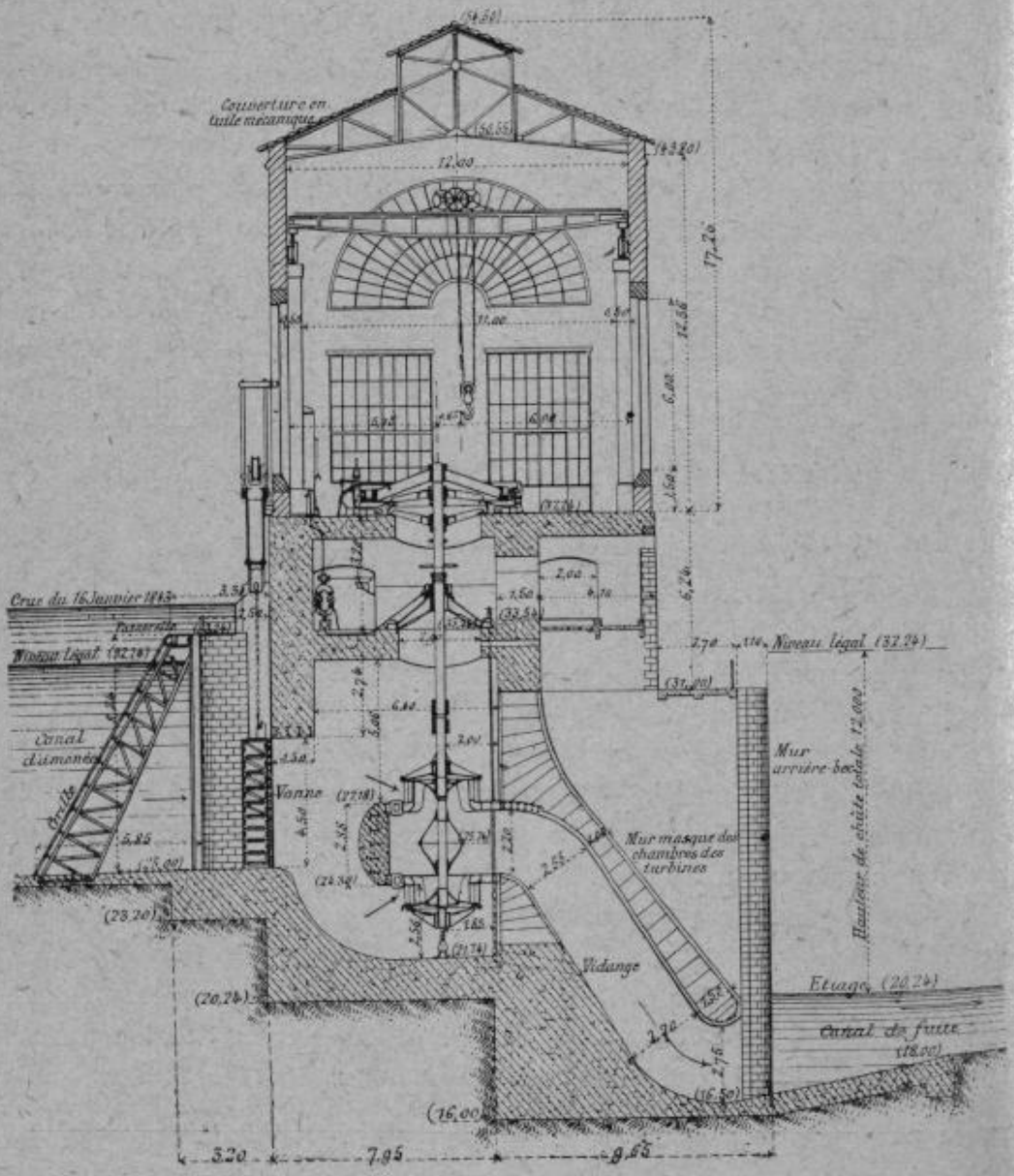


Fig. 629. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Coupe transversale du bâtiment de l'usine hydraulique.

temporairement le niveau de retenue de 2 mètres. Le volume maximum emprunté à la rivière atteint 200 mètres cubes par seconde.

Les profils qui figurent dans la (planche VIII) montrent que le plan d'eau déterminé par le niveau légal laisse une revanche largement suffisante au-dessous de l'ancien chemin de halage, situé lui-même au-dessous de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

crête des berges, et qu'aucune usine réglementée établie sur les rives de la Dordogne, dans l'amplitude du remous, ne peut être gênée. D'autre part, on aura tout le temps nécessaire pour faire disparaître la retenue en temps de crues.

Les piles du viaduc-barrage laissent entre elles huit pertuis présentant un espace de 10 mètres rempli par des vannes métalliques dont la fonction et le mode de construction sont signalés au (§ 191). Ces piles ont des avant-becs et des arrière-becs demi-circulaires ; leur épaisseur est de 3 mètres, leur hauteur de $31^{m},30$ et leur longueur à la base de $16^{m},65$. On les a calculées pour que la maçonnerie ne travaille jamais à l'extension et pour que le travail à la compression ne dépasse pas 6 kilomètres. Les vannes, qui ont 13 mètres de hauteur, reposent sur des seuils en fonte établis à la cote 19,24, soit à 1 mètre en contre-bas du niveau de la cote d'étiage.

Vers l'aval, les eaux sont rendues à la Dordogne par un canal de fuite dont le plafond est creusé à la cote du niveau de l'étiage. Il est limité du côté du large par un guideau de maçonnerie dont le couronnement est arasé à la cote 25 mètres ; du côté opposé, le talus est perreyé sur toute la hauteur. Vers l'amont, le talus de la berge longeant le canal d'amenée est également perreyé. Enfin, le barrage comporte une échelle à poissons décrite au (§ 183).

Le plancher de la salle des machines est à la cote 37,24 admise pour le tablier de la passerelle. Un bâtiment de 61,50 × 15 mètres reçoit les machines hydrauliques et électriques, et l'autre, de 60 × 14 mètres, est réservé aux turbines à vapeur de secours et aux locaux de l'administration. Pour le surplus de cette installation, nous référons au (§ 304), où nous décrivons plus spécialement le matériel hydroélectrique de cette usine.

III. — CANAUX ET BASSINS

187. Canaux d'amenée. — Tunnels. — On ne doit rien négliger pour assurer aux canaux d'amenée et de sortie une section suffisante pour assurer le débit dont on dispose et, quand rien ne s'y oppose, une vitesse moyenne de l'eau de $0^{m},50$ à $0^{m},60$ est celle dont il convient de se rapprocher.

Dans les régions montagneuses, le canal d'amenée est assez souvent de peu de largeur ; il sert la plupart du temps à conduire l'eau dans un bassin ou chambre de mise en charge, d'où elle est utilisée selon les besoins.

C'est de ce bassin que part la conduite forcée ayant l'inclinaison voulue pour produire la hauteur de chute demandée et actionner la turbine.

Pour obtenir une chute régulière sans grands frais, il faut choisir les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

endroits qui permettent de fournir une chute rapide au moyen d'un canal d'amenée de courte distance, lequel canal sert à augmenter la chute dans une notable proportion.

Le canal, suivant la disposition et la nature des lieux, est établi à ciel ouvert, en souterrain ou au moyen d'une conduite de section et de pente suffisantes.

Pour les canaux à ciel ouvert, on a adopté pratiquement les sections trapézoïdale ou rectangulaire pour le périmètre mouillé, la forme de la partie complémentaire de la section, s'il y a lieu, dépendant de la nature des terrains traversés, car un canal à ciel ouvert peut devenir un tunnel, par exemple, en un ou plusieurs points de son parcours.

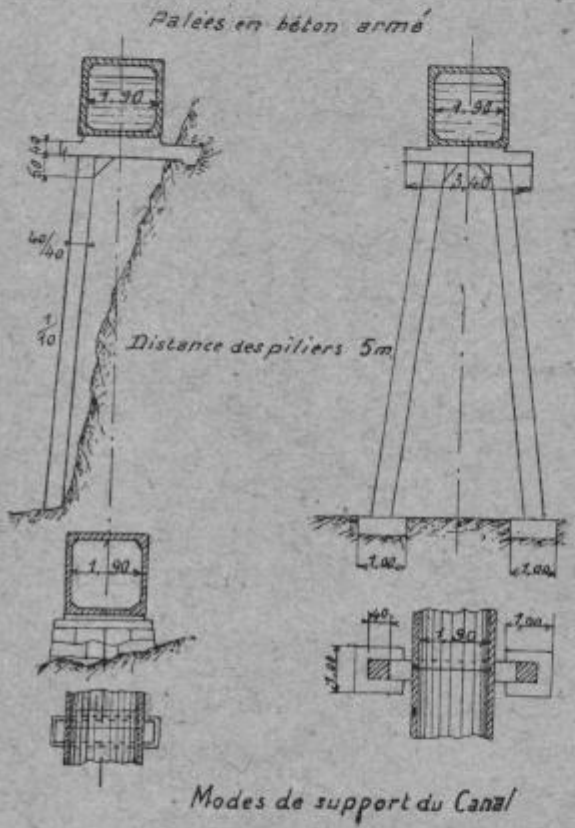


FIG. 630. — Canal d'amenée de l'usine hydro-électrique de Brigue.

Les formes circulaires ou ovoïdes s'emploient pour les canaux souterrains ou tunnels.

Plus la section se rapproche du cercle, moins est cher le coût du mètre cube de déblais et, sous cette forme, le mètre carré de parement donne le maximum de section libre.

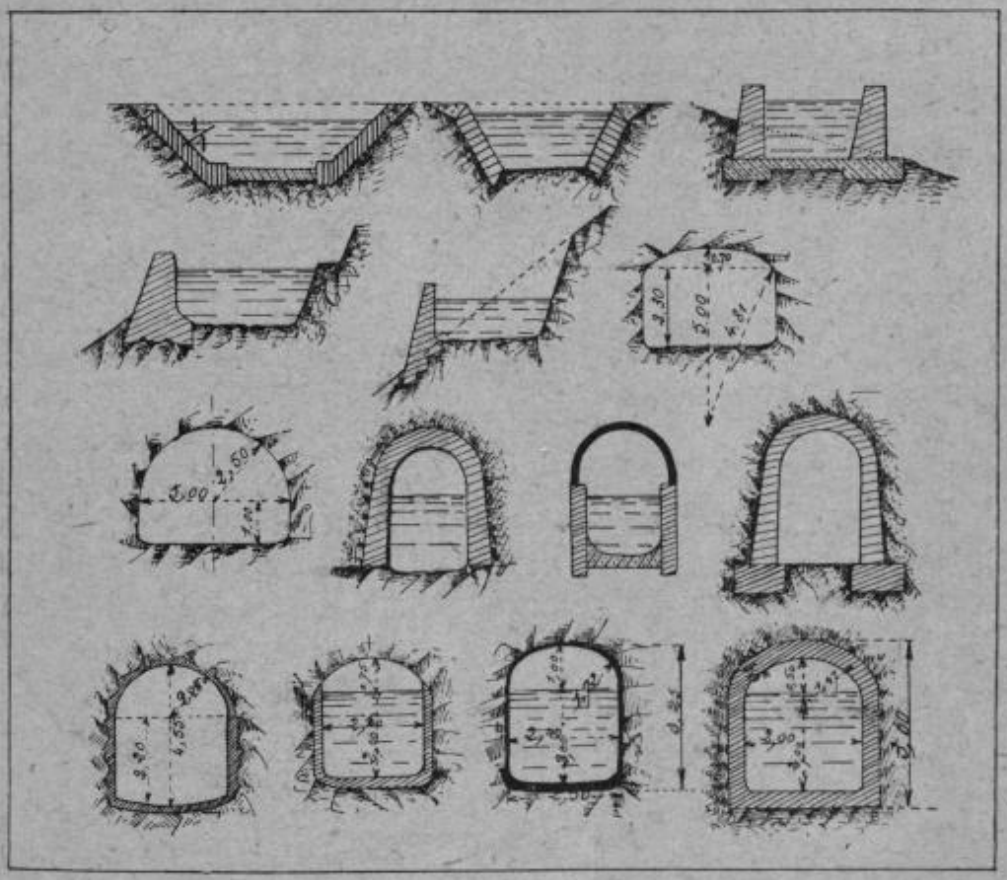
Quand le canal est creusé à même la roche, il convient de revêtir d'un léger béton ou d'un enduit, même le rocher compact, afin de masquer les fissures ou failles et d'empêcher l'attaque par l'eau des roches solubles en raison des effets désastreux que celles-ci pourraient provoquer.

Le tracé du canal est non seulement subordonné à la pente, aux conditions économiques de son installation, mais encore à sa solidité par rapport aux mouvements du sol et à sa protection contre les effets des avalanches, des gelées, des orages, etc., qui obligent à enfoncer parfois le canal assez avant dans le flanc de la montagne. La (planche IX) montre quelques types de canaux dont l'armature dépend de la nature des terrains traversés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PLANCHE IX

Types de canaux d'amenée



L'emplacement de l'extrémité amont du canal est déterminé par celui des prises d'eau, et celui de l'extrémité aval par des considérations économiques, qui sont que la somme des prix du canal, des conduites en charge et de la canalisation du trop-plein doit être un minimum. Sur le parcours du canal d'amenée, on complète la décantation au moyen de chambres de chasse d'un niveau un peu inférieur à celui du canal, ou de petits barrages aboutissant à des bondes de fond.

M. Negrotti, dans le *Monitore Technico*(1), présente quelques formules ayant trait au débit d'un déversoir pratiqué dans la paroi d'un canal à courant d'eau de vitesse uniforme. Il les applique à la résolution de certains cas particuliers, dont les principaux sont les suivants : 1° le canal a une section rectangulaire au droit du déversoir et sur une longueur suffisante en amont et en aval de cet orifice ; dans ce cas, l'auteur suppose le seuil du déversoir au niveau du fond du canal et il détermine la hauteur de la lame à l'extrémité de l'orifice et la longueur à donner à celui-ci, le

(1) Numéros de septembre et novembre 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débit du déversoir et la hauteur de la lame liquide à l'origine de l'orifice étant connus, ou la longueur de l'orifice et la hauteur de la lame à l'origine étant données ; il calcule la hauteur de la lame à l'extrémité opposée et le débit du déversoir ; 2° le déversoir a une longueur notable et la hauteur maxima de la lame liquide est très petite par rapport à la surélévation du seuil de l'orifice sur le fond du canal. Ces orifices, dits orifices de mesure, sont ceux qu'on emploie sur les canaux domaniaux d'irrigation si répandus dans le Nord de l'Italie, qui servent à vérifier si le débit octroyé surpasse celui qui est accordé pour la concession.

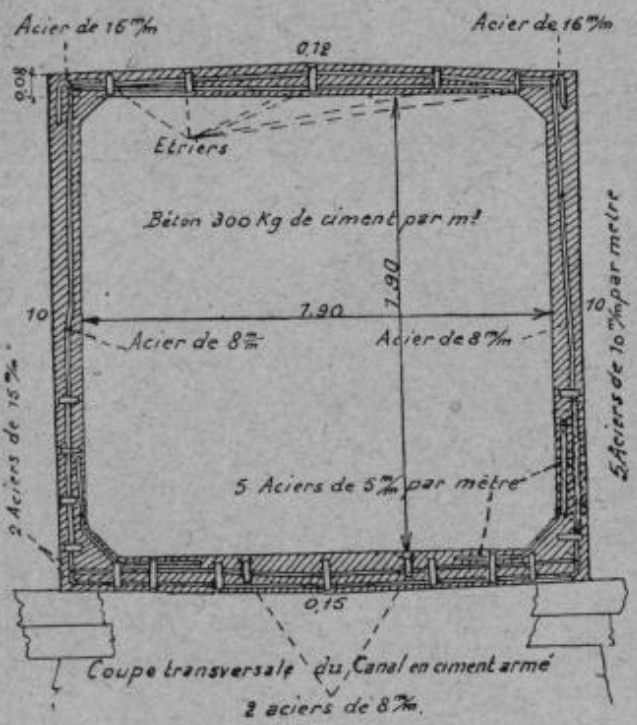


FIG. 631. — Canal d'amenée de l'usine hydro-électrique de Brigue.

Les tunnels en pression se terminent par une chambre de prise en charge (qui peut être une simple prolongation du canal) bordée par un déversoir envoyant les eaux en excès à un canal de trop-plein, qui les restitue à la rivière ; une simple

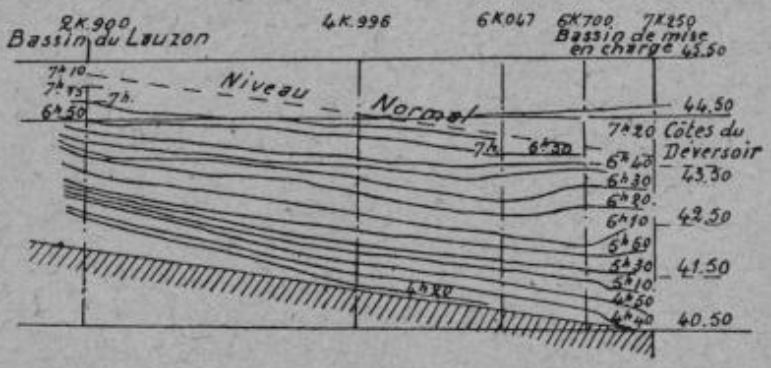


FIG. 632. — Profil en long du canal d'amenée de l'usine de la Brillanne, aux divers moments du remplissage.

tranchée dans le roc peut servir de canal de trop-plein. On ménage en outre à l'aval et tout près de la vanne de prise un puits de visite et d'aspiration, sans cela des accidents au vide pourraient se produire à la suite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une vidange du canal d'amenée, après la fermeture de la vanne de prise d'eau.

Le canal d'amenée parfois constitue lui-même la chambre de décantation par suite de son élargissement au départ du barrage. Le déversoir peut être pratiqué d'un côté et on met des vannes de décharge de chaque côté.

Lorsque le canal est constitué par des tuyaux sous pression en tôle, on enterre ceux-ci sur la moitié au moins de leur section et on dispose, en divers points du parcours de la conduite, des tubes piézométriques formant cheminées, afin de parer aux déformations au moment de la mise en charge, d'une part, et aux coups de bélier provoqués par des variations de résistance ou la fermeture subite d'une vanne de turbine, d'autre part.

Il est de bonne précaution d'établir, de distance en distance, à proximité des ravins transversaux, des cheminées d'aérage et même des déversoirs pour donner à l'air et à l'eau une sortie en cas d'accidents à l'aval.

Il convient d'apporter les plus grands soins dans l'exécution des canaux d'amenée, à l'effet d'éviter les pertes par infiltration et de leur assurer une existence certaine. L'étanchéité des parois s'obtient au moyen de corrois en terre de $0^m,30$ d'épaisseur pilonnés avec soin et légèrement arasés ; mais ce procédé, qui peut convenir pour des rigoles, n'est pas usité dans la confection des canaux de dérivation des usines. Les revêtements en béton donnent plus de satisfaction, à la condition de proscrire impitoyablement, pour leur confection, l'emploi des sables argileux. En outre, le gravier doit être très propre, exempt de toutes matières terreuses, passé à l'anneau de $0^m,06$ de diamètre.

On prend généralement 2 parties de mortier pour 3 de gravier, mesurées avant l'emploi, bien mélangées et corroyées à l'effet d'obtenir une masse très homogène. La couche de béton est de $0^m,15$ environ d'épaisseur, revêtue elle-même d'une couche de ciment de $0^m,02$ à $0^m,03$.

Les revêtements en maçonnerie sont de beaucoup préférables, et ils s'imposent malgré leur prix plus élevé. On les constitue au moyen de perrés en moellons épincés, recouvrant les parois de $0^m,25$ à $0^m,35$ d'épaisseur moyenne ; ces perrés doivent être dressés avec soin, tassés et frappés au marteau. Le rejointoiement s'opère avec un mortier de chaux hydraulique, les joints préalablement refouillés, nettoyés et lissés. Le radier peut être simplement bétonné et cimenté ou constitué par un bon rocaillage hourdé au mortier de ciment et recouvert d'un enduit en ciment.

188. Chambres de prise en charge. — Dans les petites installations, la chambre d'eau varie suivant que la turbine est ouverte ou placée dans une bâche. Lorsque la turbine est ouverte, le canal d'amenée pénètre dans l'usine et l'eau est retenue dans une chambre en maçonnerie, sur le plan-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cher de laquelle repose la turbine (*fig.* 633). On ménage dans le radier deux sablières s et s' qui arrêtent les corps lourds entraînés par les eaux. Pour pouvoir mettre la chambre de la turbine à sec et procéder à des visites ou des réparations, on munit la sablière s' d'une vanne de vidange que l'on ouvre, la vanne d'admission v étant fermée. Une rainure ménagée sur les parois latérales et dans le radier sert à maintenir un barrage provisoire permettant de visiter et de réparer à sec la vanne, la grille et le canal.

Quand la turbine est fermée, le canal d'amenée arrive au-dessus de l'usine (*fig.* 634) et comporte un réservoir de profondeur d'eau variable, au fond duquel débouche une conduite en tôle reliée au récepteur hydraulique. Après le grillage, le canal d'amenée se relève de façon à faire sabler entre le grillage et la vanne. Cette dernière est fixée entre les murs de berge sur un point haut du canal, calculée de façon à ce que la section disponible permette toujours à l'eau de s'écouler avec une vitesse de $0^m,50$ à $0^m,60$, puis le canal va se déprimant de façon à avoir, suivant le débit à

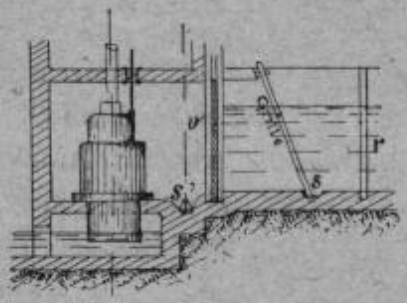


Fig. 633.

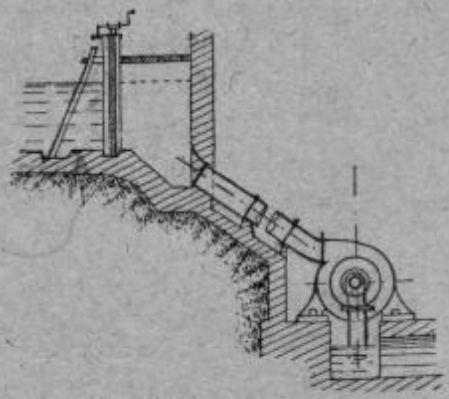


Fig. 634.

utiliser, une profondeur de 2 à 4 mètres au-dessous du niveau d'amont. A $0^m,300$ ou $0^m,400$ au-dessus du fond est fixé le tuyau en tôle ou en fonte qui conduit l'eau à la bâche de la turbine. Le canal aval d'une turbine doit avoir une section suffisante pour permettre l'écoulement de l'eau sous une vitesse égale à celle du canal amont. Le canal se relève ensuite pour rattraper le lit de la rivière. Il est bon de maintenir dans les murs de ce canal deux rainures de $0^m,100$ environ, taillés dans la pierre et espacées de $0^m,500$ à $0^m,600$ afin de permettre sans frais d'y glisser des madriers et d'établir entre eux un batardeau en terre glaise.

Les (*fig.* 635 et 636) donnent la disposition en plan et en élévation de la chambre de mise en charge de l'usine de Cellina (§ 347).

Les (*fig.* 637 et 638) montrent, la première, la chambre de prise d'eau de l'usine d'Entraygues (§ 322), et la seconde celle de l'usine de Jajce (§ 361).

A l'usine hydroélectrique d'Eymoutiers sur la Vienne dont la hauteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de chute est de 50 mètres, la chambre de mise en charge, qui a 50 mètres de longueur sur 9m,25 de large et 6 mètres de profondeur, a l'effet de vidanger la chambre sans mettre à sec le canal de dérivation, on a établi un barrage à poutrelles mobiles construit au débouché du canal d'amenée dans la prise d'eau.

FIG. 635. — Usine de Cellina. Coupe transversale du bassin de mise en charge.

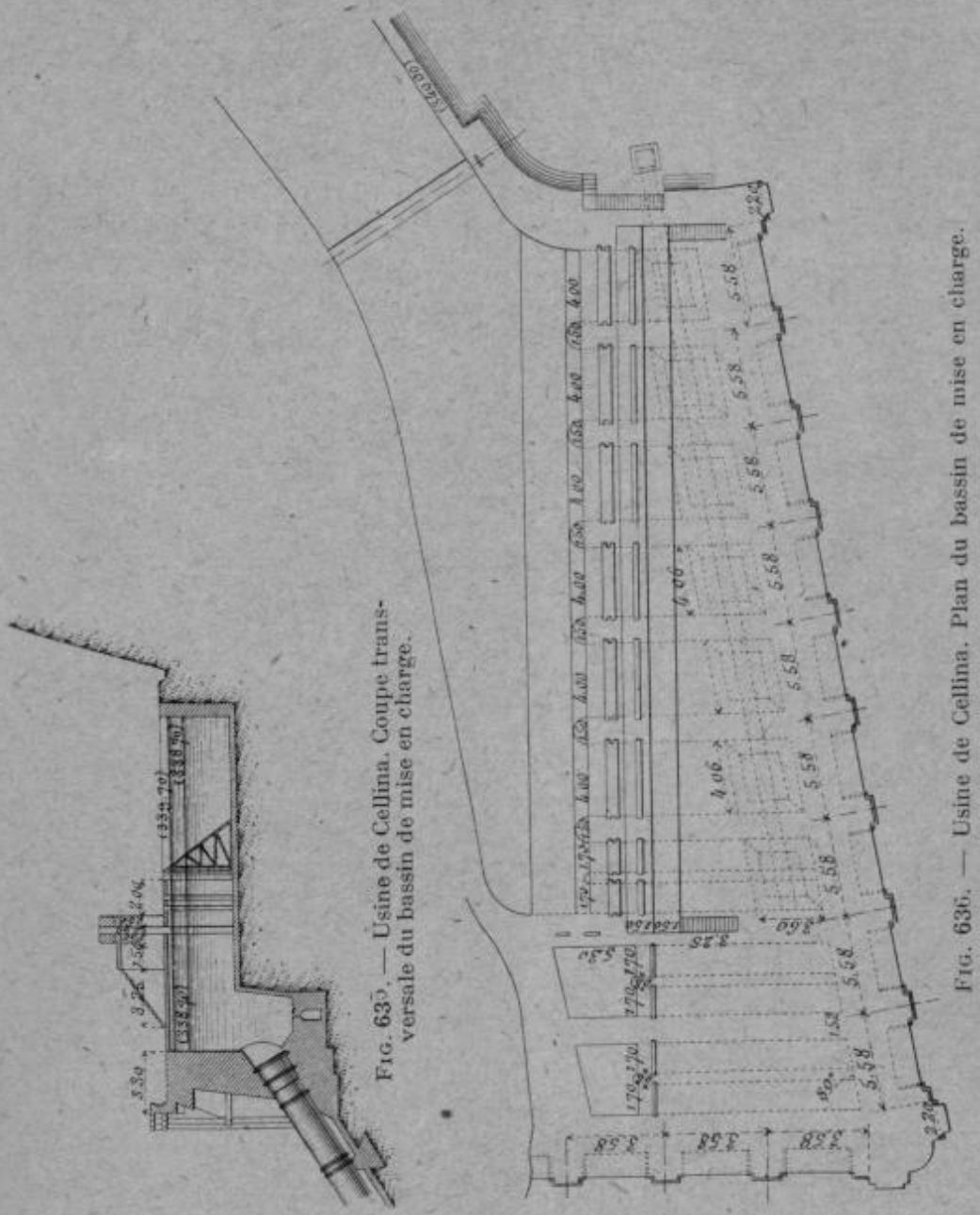


FIG. 636. — Usine de Cellina. Plan du bassin de mise en charge.

Pour éviter le cas d'un arrêt brusque de l'usine sans que les vannes de prise d'eau puissent être fermées immédiatement, l'eau doit s'écouler par un déversoir de 15 mètres de longueur sur 0m,50 de large, établi dans la crête du mur extérieur du réservoir. Des vannes de vidange sont en outre installées aux points bas du réservoir.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 637. — Vue d'ensemble de la chambre de prise d'eau de l'usine d'Entraygues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A l'usine de Subiaco (Italie), on a été amené à donner à la chambre de mise en charge une forme rhomboïdale à l'aide de laquelle on a pu loger tous les ouvrages dans un espace très réservé et on a pu ainsi amortir considérablement la vitesse de l'eau le long de la grille, et la relever à l'entrée des conduites forcées, en évitant les espaces nuisibles et les remous verticaux.

L'eau surabondante dans le bassin de charge déborde par deux murs de pourtour à l'amont de la grille et l'eau pour la force motrice est guidée jusqu'à la chambre de départ des conduites forcées.

Les chambres de prise en charge, pour les hautes chutes, dominent

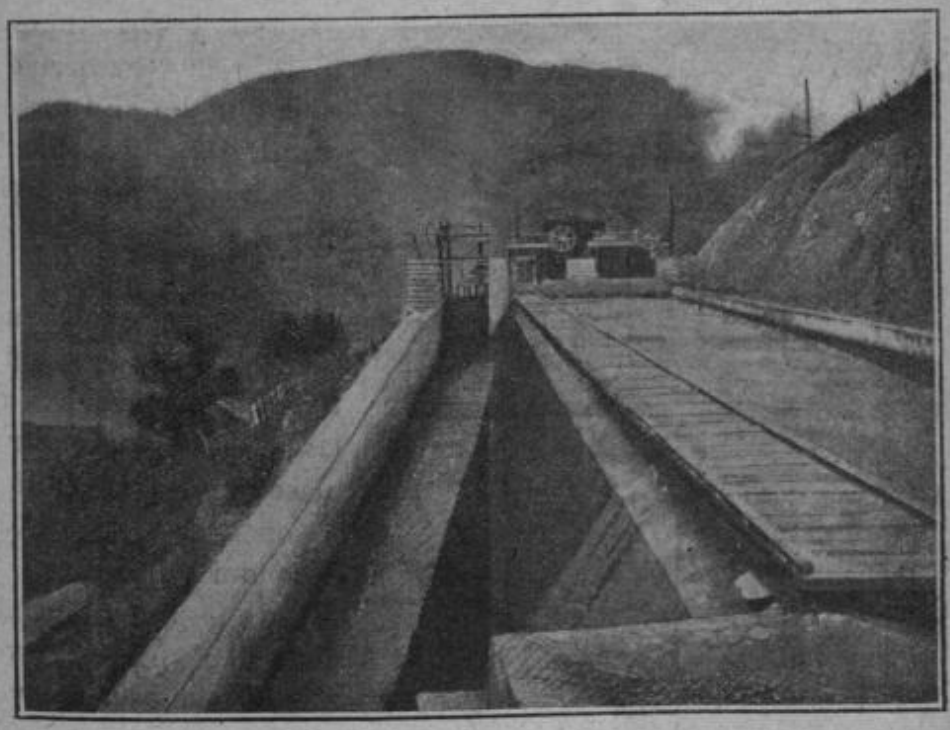


FIG. 638. — Usine de Jajce. Chambre d'eau.

généralement l'usine. Elles doivent être édifiées avec le plus grand soin, car un accident serait fatal aux établissements situés en dessous. Elles sont le plus souvent divisées en deux parties : une chambre de sûreté et de décantation et une chambre de travail ou de mise en charge proprement dite. Parfois la séparation des deux chambres est faite simplement à l'aide d'une cloison maçonnée formant batardeau, surmontée de vannes verticales pouvant isoler complètement les chambres.

A l'aide du batardeau, les dépôts résultant de la décantation sont retenus dans la première chambre et expulsés par les vannes de fond. Les vannes verticales d'admission d'eau dans la chambre de travail ont pour but de laisser toujours la conduite forcée, vide ou pleine, en communica-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion avec l'atmosphère, d'éviter l'emploi des reniflards, presque toujours insuffisants pour empêcher les accidents qu'occasionne le vide dans le cas d'une vidange brusque ou accidentelle de la conduite forcée, et enfin d'atténuer, comme un tube piézométrique, les coups de bélier résultant de l'arrêt des turbines. On n'obtiendrait pas ces avantages si on employait une vanne noyée ou à cloche pour fermer l'orifice de la conduite forcée, qui aboutit à la chambre de travail ; d'autre part, si la vanne à cloche a un défaut d'étanchéité, il est très difficile de procéder aux réparations nécessaires.

Les (*fig.* 639 e 640) représentent un type de chambre de pression que M. A. Boucher a préconisé pour l'aménagement de la chute de 300 mètres de l'usine des Farettes (Suisse), où on a dérivé les eaux d'un lac. Le système consiste en une chambre ou puits, de forme cylindrique, de 6 mètres de diamètre.

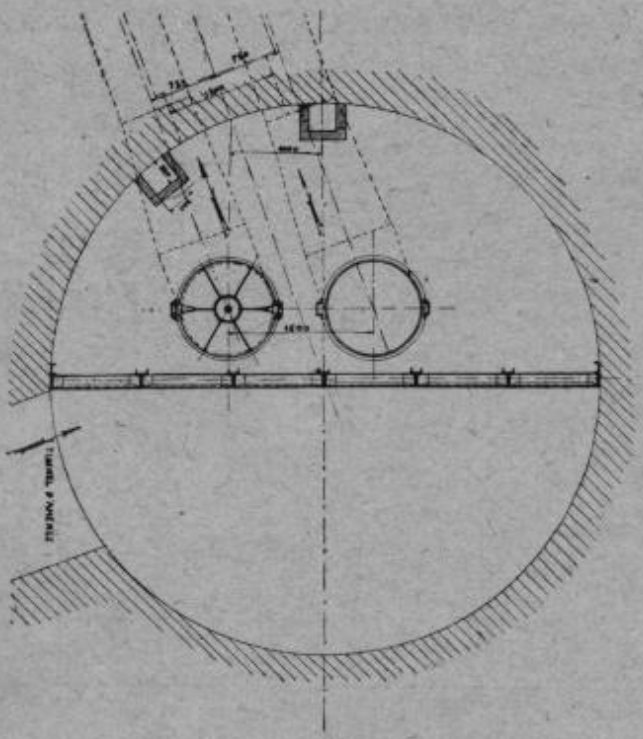


FIG. 439.

Celle-ci est entièrement enclavée dans le roc qui en forme le toit aussi bien que les parois. Le déversoir est placé à environ 1.500 mètres de distance de la tour, sur la conduite d'amenée.

Les parois de la chambre de mise en charge s'élèvent à 2m,80 au-dessus du niveau de l'arête du déversoir, de façon à ménager une hauteur suffisante et facile à calculer pour amortir le coup de bélier qui se produit lorsque la vanne de sûreté placée à l'entrée de la conduite en charge vient à se fermer, ce qu'elle fait toujours brusquement.

La chambre est partagée en deux parties égales par une paroi métallique dont les 4 mètres inférieurs forment grille en tôle perforée, d'une surface totale de 24 mètres carrés. La partie amont de la chambre est de 1 mètre plus profonde que l'autre, constituant ainsi un dépotoir des sables et cailloux que le tunnel d'amenée peut encore rouler, quoiqu'il ait été soigneusement nettoyé après achèvement. Il y a d'ailleurs une autre grille en tôle perforée avec vanne de chasse à la naissance de la conduite de dérivation au barrage de prise d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est préférable que la chambre de travail soit indépendante de la chambre de décantation, car cette solution permet d'isoler brusquement de l'usine le canal d'amenée, si le besoin s'en fait sentir. On pourra, à cet

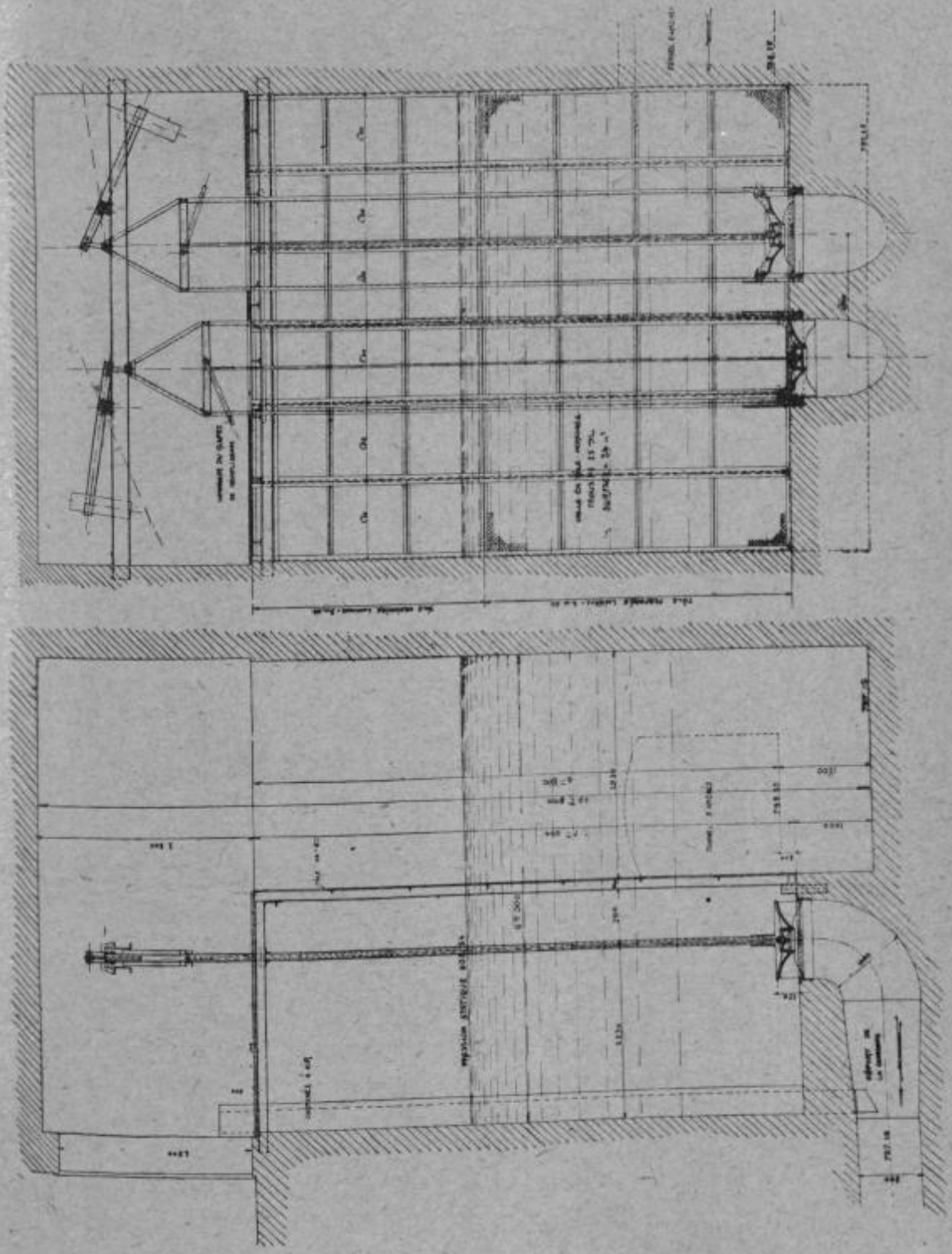


Fig. 640.

effet, adapter une manœuvre électrique aux vannes verticales commandant cette chambre et les actionner directement depuis l'usine.

Pour éviter les remous, la chambre de travail doit faire suite à celle de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

décantation et avoir un volume égal à 15 fois environ le cube à débiter par seconde. La conduite forcée prendra sa naissance au fond plutôt que sur les côtés, si on tient à éviter une vanne de vidange. La chambre de mise en charge sera terminée par un élargissement et un approfondissement, dont les dimensions dépendent de la grandeur et du nombre de conduites en charge. Pour éviter les entraînements d'air dits « virolets », il faut que le plan soit au-dessus de l'axe de la conduite, à une hauteur égale à une fois et demie ou deux fois son diamètre. A l'effet de rendre minima la perte de charge, il faut que le départ de la conduite soit constitué par un ajutage conique, convergent sous un angle au sommet du cône de 12°.

On munit souvent la chambre de mise en charge d'un déversoir régulateur pour que, en cas d'arrêt d'une ou plusieurs turbines de l'usine, le volume d'eau dérivé non utilisé s'écoule par ce déversoir et de là se rende par une galerie de vidange dans la rivière.

En général, la conduite partant de la chambre d'eau se prolonge jusqu'au mur aval du bâtiment des turbines, et dans la partie qui longe ce bâtiment on dispose sur la conduite le nombre de tubulures nécessaires pour alimenter chacun des récepteurs hydrauliques. L'ensemble de ces tubulures constitue le collecteur. Ces tubulures sont cylindriques ou coniques, droites ou courbes et la prise sur le collecteur se fait tantôt dans l'axe, tantôt dessus ou dessous. Parfois le collecteur arrive extérieurement par le côté de l'usine où il passe en dessous et se trouve directement dans le canal de fuite. Enfin, il est disposé quelquefois au-dessus de l'usine, et, dans ce cas, les tubulures sont remplacées par autant de canalisations qu'il y a de turbines.

M. Bouchayer donne la préférence à la disposition du collecteur placé dans le canal de fuite avec la prise par-dessus ; la tubulure conique est surmontée d'un coude au quart qui permet l'assemblage et le démontage faciles de cette partie comprise entre deux points fixes : le collecteur et la turbine.

189. Détermination des oscillations de niveau au bassin de charge des turbines hydrauliques. — On peut utiliser la disposition suivante qui consiste essentiellement en un réservoir dont la surface peut être considérée comme infinie, une conduite (canal ou galerie) de surface F, une conduite de turbine et un bassin de charge de surface F_1 qui doit être beaucoup plus grande que la section de la conduite forcée, de sorte que l'eau y est animée d'une faible vitesse ; on peut, par suite, négliger le travail pour l'accélération du liquide dans ce bassin.

Pour une vitesse u de l'eau dans la conduite ouverte, une différence de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

niveau z entre le réservoir supérieur et le bassin de charge, un poids spécifique γ de l'eau, le travail de l'eau dans cette conduite est égal à :

$$\gamma F u z dt,$$

pendant l'élément de temps dt ; il est utilisé à vaincre le frottement dans la conduite et à l'accélération de la masse de l'eau contenue dans la conduite :

$$\frac{\gamma}{g} F l$$

Le frottement amène une perte de pression :

$$\frac{1}{c^2 R} u^2 \qquad \text{et le travail :} \qquad \gamma F u \frac{u^2 l}{c^2 R} dt$$

(R étant le rayon du profil de la conduite), pendant que l'accélération exige le travail :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\gamma F l}{2g} u_2\right) = \gamma F u \frac{l}{g} \frac{du}{dt} dt,$$

de sorte que l'équation :

$$(1) \qquad z - \frac{u^2 l}{c^2 R} - \frac{l}{g} \frac{du}{dt} = o$$

doit être satisfaite.

Comme la vitesse dans le bassin de charge est égale à $\frac{dz}{dt}$, on a aussi :

$$(2) \qquad u = -\frac{F}{F_1} \frac{dz}{dt} \qquad \text{et :} \qquad \frac{du}{dt} = -\frac{F_1}{F} \frac{d^2 z}{dt}.$$

Cette valeur introduite dans (1) donne :

$$z - \frac{l}{c^2 R} \frac{F_1^2}{F^2} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + \frac{l F_1}{g F} \frac{d^2 z}{dt^2} = o$$

ou :

$$(3) \qquad \frac{d^2 z}{dt^2} - \frac{m}{2} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + u^2 z = o$$

avec :

$$m = \frac{2 g F_1}{c^2 R F} \qquad \text{et} \qquad u^2 = \frac{g F}{l F_1}.$$

La solution générale de cette équation différentielle est :

$$(4) \qquad \frac{dz}{dt} = \pm \sqrt{\frac{2u^2}{m^2}(mz + 1) - C e^{mz}},$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C étant une constante à déterminer.

En admettant que, en marche régulière, la vitesse d'écoulement dans la galerie soit égale à u_0 et que, pour $t = 0$, le débit de la conduite forcée tombe subitement à zéro, l'eau, à cause de son inertie, doit monter dans le bassin de charge avec une vitesse :

$$\frac{F}{F_1} u_0.$$

En même temps, l'eau dans la galerie subit une perte de pression :

$$h = \frac{l}{c^2 R} u_0^2$$

et l'équation (3) devient :

$$-\frac{m}{2}\left(\frac{F}{F_1} u_0\right)^2 + u^2 h = 0;$$

l'équation (4) prend la forme :

$$\frac{F}{F_1} u_0 = \sqrt{\frac{2u^2}{m^2}(mh + 1) - Ce^{mh}}$$

et la constante C a pour valeur :

$$C = \frac{2u^2}{m^2} e^{-mh};$$

on obtient la solution générale :

$$\frac{dz}{dt} = \sqrt{\frac{2u^2}{m^2}\left[mz + 1 - e^{m(z-h)}\right]}; \tag{5}$$

faisant $\frac{dz}{dt} = 0$, on obtient l'amplitude maxima de l'oscillation :

$$0 = mZ + 1 - e^{m(Z-h)}$$

ou :

$$mZ + 1 - \log_e (mZ + 1) = mh + 1. \tag{6}$$

Si, par exemple, la vitesse $u_0 = 3$ m : s, la section de la galerie $b = 12^{m2},57$, la surface du bassin de charge étant $F_1 = 50F$, la longueur de la galerie $l = 4.000$ mètres, la chute de pression dans cette galerie $= \frac{lu^2}{c^2 R} = 0,00019 \times 4000\, u^2$, soit en régime régulier $= 6,86$, on obtient :

$$m = \frac{2gF_1}{c^2 RF} = 0,1869\ m^{-1},$$

$$mh + 1 = 2,282$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et, à l'aide de l'expression :

$$mZ + 1 - \log_e (mZ + 1) = 2{,}282,$$

on obtient le nombre :

$$mZ + 1 = 0{,}1145.$$

Il s'ensuit que l'amplitude maxima de l'oscillation du niveau de l'eau au réservoir de charge sera égale à $-Z = 4^m{,}74$. La formule peut aussi être utilisée pour obtenir la différence de niveau dans le bassin de charge par l'ouverture brusque de la conduite de charge.

190. Bassins de décantation. Réservoirs artificiels. — Nous avons vu qu'il importait avant tout, dans l'établissement d'une prise d'eau sur une rivière torrentielle, d'assurer une décantation suffisante des graviers et surtout des sables, l'introduction de ces derniers dans les turbines provoquant une usure rapide des distributeurs et des roues, surtout avec les grandes chutes. Dans des cas exceptionnels, qui se produisent au moment de la fonte des neiges et des grandes pluies, on a constaté jusqu'à 30 0/0 de sable, mais 4 et 5 0/0 ne sont pas rares.

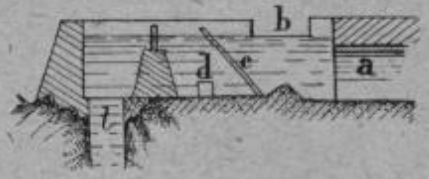


FIG. 641.

La chambre ou bassin de décantation fait l'objet d'un ouvrage spécial ou, le plus souvent, fait partie de la chambre de travail ou de prise en charge, ainsi qu'il a été dit déjà. L'écoulement de l'eau dans ce bassin doit se faire avec une vitesse suffisamment faible ($0^m{,}50$ à $0^m{,}60$ au plus) sur un parcours assez long avant d'arriver aux vannes de prise d'eau et en franchissant un déversoir noyé, pour que les dépôts des sables puissent s'effectuer à peu près complètement.

La chambre de décantation comprend un radier muni de vannes de fond à ses extrémités pour opérer la vidange complète ou provoquer la chasse des dépôts provenant de la décantation. Quant aux feuilles et aux corps flottants recueillis sur le canal d'amenée, ils sont arrêtés par une grille inclinée à 30° environ et à barreaux très serrés. Le type de chambre de décantation réalisé à Livet et représenté schématiquement par la (*fig.* 641) montre en *a* le canal d'amenée, en *b* le déversoir, en *c* la grille, en *d* les vannes, et en *t* le tuyau amenant l'eau aux turbines. L'usine de Livet est décrite au (§ 349).

Si on veut obtenir une décantation réellement efficace, il y a lieu de la combiner à un système de purge continue. M. Bouchet, l'ingénieur hydraulicien suisse, qui a conçu et exécuté les plus hardies installations de houille blanche, conseille à cet effet de purger en long de la chambre et de canaliser en travers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il convient d'araser un des murs du bassin de décantation à un niveau inférieur à celui des autres, variable suivant sa longueur, de façon à constituer un déversoir qui rejette au torrent le trop-plein admis et non consommé et qui doit être capable, éventuellement, de débiter tout le cube d'eau dérivé. De cette façon on évite d'opérer la vidange complète du canal d'amenée en cas d'accident à l'usine, et cela en fermant simplement les vannes verticales de la chambre de travail (quand celle-ci est comprise avec la chambre de décantation).

Au lieu d'être une chambre spéciale, le bassin de décantation est quelquefois constitué par des élargissements du canal d'amenée, exécutés le long de son parcours. Ces élargissements peuvent être de même section,

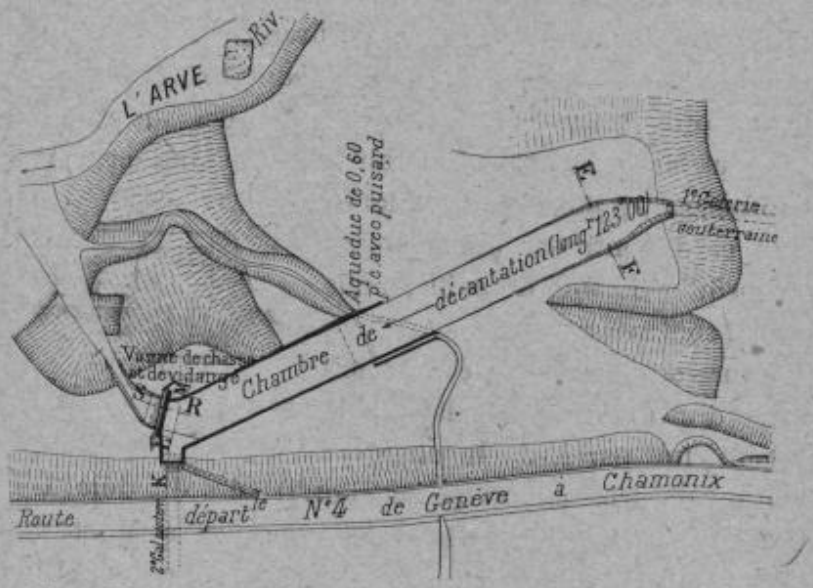


FIG. 642. — Usine des Chavants. Chambre de décantation.

mais plus profonds et avec vannes de nettoyage. A l'usine hydroélectrique des Chavants (*fig.* 642), le radier de la chambre de décantation, qui est un élargissement du souterrain, a une pente longitudinale de $0^m,01$ par mètre de l'amont à l'aval et une pente transversale de $0^m,10$ par mètre, afin de concentrer les dépôts contre l'une des parois de la chambre et de faciliter leur entraînement. Dans la partie du souterrain où se produit la décantation, la vitesse ($0^m,58$ par seconde) est cinq fois plus faible que dans le reste de la galerie, permettant ainsi aux sables en suspension de se déposer avant d'entrer dans la partie de la galerie qui lui fait suite. L'évacuation des dépôts a lieu au moyen de chasses puissantes effectuées pendant les interruptions de service. A cet effet, l'extrémité aval de la chambre de décantation débouche dans un canal de fuite dont l'entrée est fermée par trois vannes de $1^m,20$ de largeur. En les ouvrant, on abaisse rapidement le plan d'eau dans la chambre de décantation, et l'on aug-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mente la vitesse de la tranche d'eau inférieure en contact avec les dépôts qui sont entraînés dans le canal de fuite et de là à la rivière.

Le vaste bassin de décantation de la prise d'eau sur la rivière la Nera qui alimente les puissantes aciéries de Terni (Italie) a 223 mètres de longueur sur 13 mètres de profondeur et une capacité de 13.000 mètres cubes. Il est divisé en deux par un barrage transversal en maçonnerie. Normalement l'eau arrive par la conduite M. L. E. P (*fig.* 643) dans le petit compartiment où s'arrête la plus grande partie des matières en suspension, puis se déversant par dessus le barrage transversal, elle passe dans le grand compartiment où les matières achèvent de se déposer. La conduite d'arrivée de l'eau est construite de façon qu'on puisse à volonté, soit faire parcourir à l'eau le trajet indiqué plus haut, soit la faire arriver dans le grand compartiment par le déversoir Q, soit encore à lui faire éviter complètement le bassin en la conduisant directement, par le parcours M. L. N. O. G. H dans la conduite d'alimentation de l'usine. Pour permettre le nettoyage du bassin de décantation, on ménage une galerie de vidange A, B dont l'extrémité A correspond au point le plus bas du grand compartiment et qui conduit l'eau directement à la cascade « delle Marmore ». En A existe un puits maçonné qui dépasse le niveau normal de l'eau et aboutit à la galerie de décharge ; trois vannes placées à des niveaux différents, sont disposées dans ce puits et peuvent être manœuvrées de la partie supérieure. Un puits identique a été construit en B pour permettre la vidange et le nettoyage du petit compartiment.

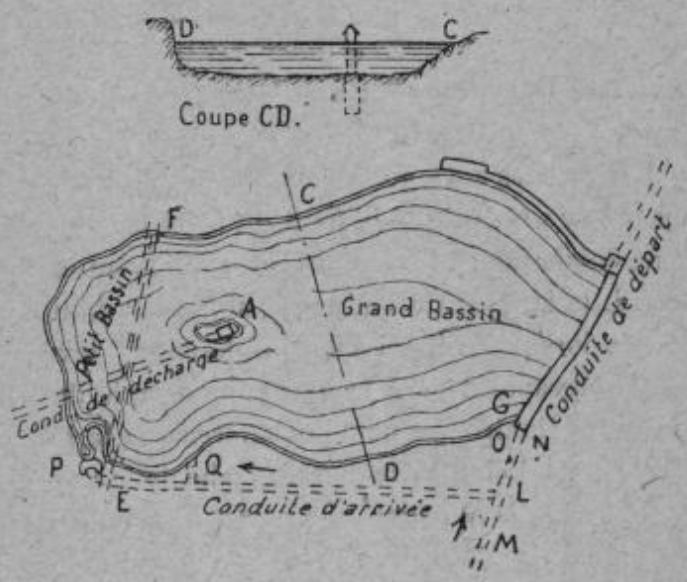


FIG. 643.

Un long déversoir GH reçoit l'eau décantée, qui par un tunnel de 230 mètres arrive dans un bassin muni d'un canal de décharge qui le fait, au besoin, communiquer directement avec la rivière Néra.

A l'usine d'Eymoutiers sur la Vienne, dont la chute est de 50 mètres, la chambre de prise d'eau, foncée dans le roc, sert à la fois de bassin de décantation. Elle a 20 mètres sur $8^{m},70$ et la vitesse de l'eau est amortie avant son entrée. Une galerie de décharge évacue l'eau en excès. Une cuvette et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une galerie annexe avec déversoir régularisent le mouvement des eaux à l'effet d'éviter la mise en charge du souterrain de prise d'eau.

IV. — VANNES ET GRILLES

191. Types divers de vannes. Calculs. — On a vu que les échancrures pratiquées dans les barrages étaient munies de vannes destinées, conjointement avec le barrage, à laisser passer les eaux correspondant aux crues considérables qui se produisent à certains moments de l'année. On doit donc calculer le débouché de ces vannes pour le débit qui s'écoule en une seconde dans ces instants, défalcation faite de la quantité d'eau qui passe par-dessus la crête du barrage. Or nous avons donné au (§ 57) la formule qui permet de calculer l'épaisseur de la lame déversante, et soit q le volume trouvé de ce fait ; si donc on connaît le débit Q de la rivière par les plus fortes crues, on en déduira le volume à débiter par les vannes, qui sera : $q' = (Q - q)$.

Les vannes sont généralement établies de telle sorte que leur seuil soit au même niveau que le fond du lit et que leur bord inférieur, lorsqu'elles sont entièrement levées, atteigne le niveau de la crête du barrage. Appelons L la largeur du vannage ; si h est la hauteur au-dessus du seuil de la vanne lorsque celle-ci est complètement levée et h' la hauteur d'eau en aval correspondant à la hauteur normale de l'eau dans le bief d'aval en temps ordinaire, on peut considérer que la hauteur $h'' = (h - h')$ représente celle de la partie du débouché de la vanne qui s'écoule en déversoir, alors que celle h' a trait à la partie qui coule complètement noyée ; si donc on affecte les deux fractions du débouché de la vanne des coefficients de contraction propres à leur mode d'écoulement, on obtient :

$$L = \frac{q'}{0{,}62h' + 0{,}41h'' \sqrt{2gh''}}.$$

La dimension du débouché total L étant déterminée, on divise cette valeur en plusieurs parties égales, si on est en présence d'une grande ouverture. Ces vannes ont parfois des dimensions considérables, comme les vannes du système Stoney installées aux usines de Chèvres, de Jonage et d'Avignonet.

Nous donnons, d'après M. Lévy Salvador, le calcul suivant d'un vannage dont l'application est susceptible de se présenter assez souvent dans la pratique (1).

Le calcul du débit des eaux de pleines rives offrait ici des difficultés particulières. Le lit de la rivière aux abords du barrage était très irrégulier,

(1) *L'Energie hydroélectrique*, Dunod et Pinat, éditeurs, 1907.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec des contre-pentes nombreuses et accentuées, une notable partie de la lame d'eau n'était animée que d'une faible vitesse, et, en calculant, pour divers profils en travers, le débit au moyen de la vitesse déduite de la pente à la surface, on arrivait à des résultats inadmissibles. De plus, il eût été difficile d'évaluer la vitesse moyenne à ces mêmes profils par des observations directes, car ces observations, longues et laborieuses, n'auraient pu être faites entièrement en eaux de pleins bords, le régime du cours d'eau étant des plus variables. Enfin, des observations faites par des eaux trop hautes ou trop basses auraient conduit à des vitesses inapplicables aux eaux de pleines rives.

On a dû chercher une autre manière d'opérer. Des repères ont été échelonnés le long de la rivière et le plan d'eau de cette dernière a été relevé à diverses reprises, soit en temps de crues, soit lorsque le niveau des eaux se rapprochait de celui des pleins bords. Les nombreuses observations faites ont permis de déterminer expérimentalement le niveau des eaux de pleins bords sur une longueur de près de 5 kilomètres tant à l'amont qu'à l'aval du barrage. Le profil en long (*fig.* 644) montre qu'avec le barrage actuel, les eaux atteignent les pleins bords lorsque l'eau sur la crête est à la cote 752m,97 ; à ce moment, les eaux sont à l'aval du barrage à la cote 752m,61 ; le barrage produit donc un remous de 0m,36. Comme on l'a vu précédemment, le remous cesse de se faire sentir à l'amont au point dont la cote est :

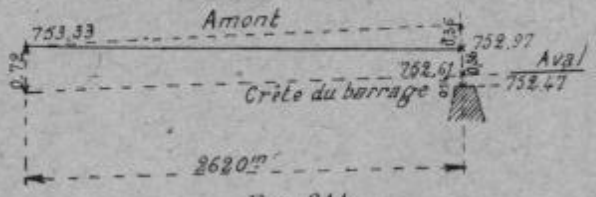


FIG. 644.

$$752{,}61 + 2 \times 0{,}36 = 753^{m},33.$$

Ce point est situé à 2.620 mètres à l'amont du barrage.

Si, maintenant, on suppose que l'ouvrage n'existait pas, le plan d'eau en ce dernier point resterait à la même cote ; à l'aval du barrage, la cote 752,61 serait également la même. On peut, dès lors, admettre sans erreur sensible que, dans toute la partie qui correspond au remous, le plan d'eau aurait une pente unique de $\frac{0{,}72}{2.620} = 0^{m},000275$ par mètre.

Ceci permet de déterminer la hauteur des eaux de pleins bords avant la construction du barrage. Le profil en long montre que, dans l'étendue du remous, le point le plus déprimé des berges qui est situé à 2.220 mètres à l'amont du barrage est à la cote 753,22.

Le débit des eaux de pleines rives peut être calculé au moyen de la formule des déversoirs, en remarquant que lorsque toute l'eau débitée passe sur cet ouvrage dont la longueur est de 47m,80, les niveaux à l'amont et à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

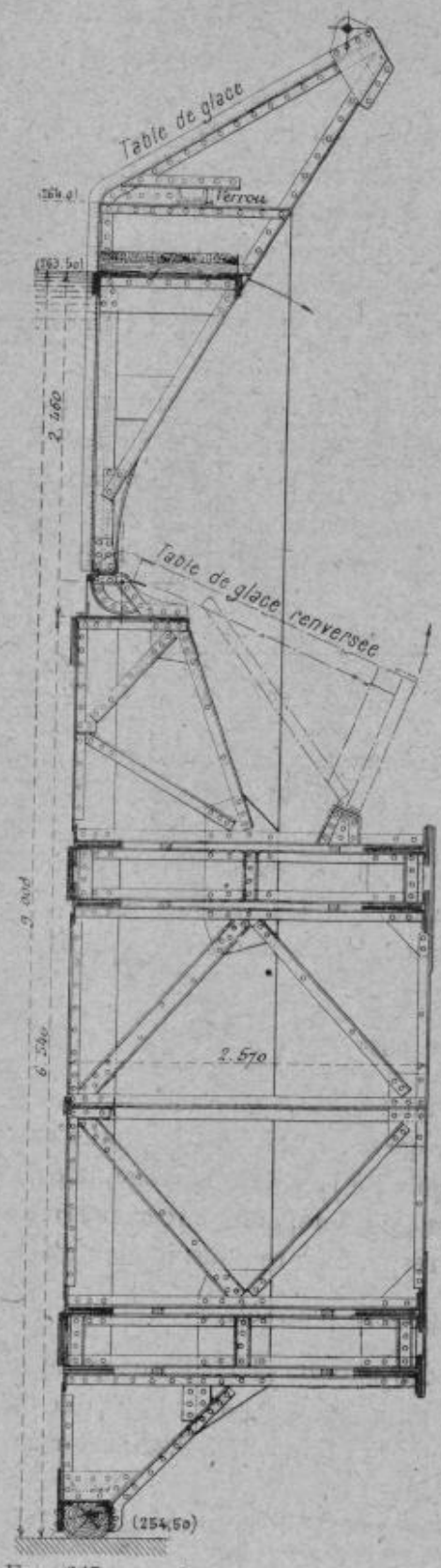


FIG. 645. — Coupe verticale d'une vanne à hausse mobile. Barrage d'Augst-sur-le-Rhin.

l'aval sont ceux qu'indique la (*fig.* 644). Dès lors avec la formule des déversoirs noyés : $q = mh\sqrt{2g\,(h - h')}$ on a :

$$l = 47^{m},80 ; \quad h = 0,50 ;$$
$$h' = 0,36 \quad \text{et} \quad m = 0,48.$$

Par suite : $q = 30$ mètres cubes.

Pour que le plan d'eau surélevé à l'amont du barrage ne noie pas les terres riveraines, il faut qu'il soit tangent au point le plus déprimé, c'est-à-dire celui pour lequel la cote des eaux de pleins bords (barrage enlevé) est de $753^{m},22$.

Dans ce cas, la cote de ces mêmes eaux au pied du barrage sera de :

$$753,22 - (0,000273 \times 2.220) = 752,61.$$

La différence $753,22 - 752,61 = 0^{m},61$ représente, comme on sait, deux fois la valeur du remous tolérable au droit du barrage. Ce dernier sera donc de $\frac{0,61}{2} = 0,305$, soit $0^{m},31$, et le plan d'eau, au moment des crues de pleins bords, sera à la cote $752,61 + 0,31 = 752,92$.

Avec cette lame déversante le débit du barrage, calculé par la formule précédente, en y faisant $h' = 0,31$ au lieu de 0,36 et $h = 0,45$ au lieu de 0,50, donne $q = 28$ mètres cubes.

Le déversoir ne pouvant écouler en pleines eaux qu'un débit inférieur de 2 mètres cubes au débit total, il en résulte que le barrage devra être accompagné d'un vannage de décharge pouvant écouler 2 mètres cubes par seconde. Le seuil de cet ouvrage devant être établi à la cote 752,10 qui est celle du fond de la rivière, la largeur l à lui donner se déduira de la formule :

$$Q = 0,62 \times lH\sqrt{2g\,(H - h')},$$

dans laquelle on fera $Q = 2$; $H = 0,82$ et $h' = 0,51$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

De là, on tire $l = 1{,}20$. De sorte que le vannage pourra comporter à volonté, par exemple, une vanne de $1^m{,}20$ de largeur, ou deux ou plusieurs vannes ayant au total la même largeur.

Appelons P la charge à supporter par une vanne, qui est celle due à une colonne d'eau ayant pour base la surface pressée et pour hauteur la distance du centre de gravité de cette surface au niveau libre, soit H, et si nous nommons l la largeur de la vanne et h sa hauteur, on a :

$$P = 1.000 lh H.$$

Soit p le poids de la vanne, l'effort tangentiel F à développer sur la tige de manœuvre pour déterminer le déplacement ascensionnel de la vanne a pour expression :

$$F = P \times f = p.$$

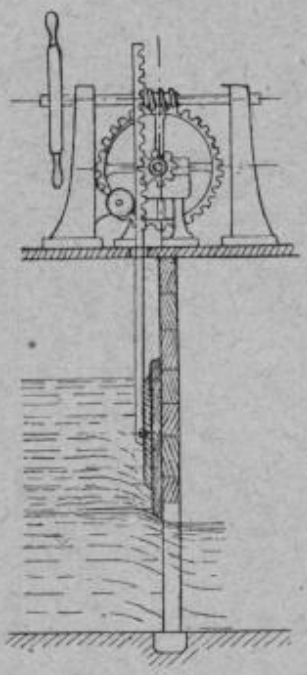


Fig. 646.

Le coefficient de frottement f varie naturellement avec la nature des surfaces frottantes ; pour métal sur métal, on peut prendre $f = 0{,}20$ environ, et pour métal sur bois, 0,60.

Pour tenir compte des résistances passives, on fera :

$$F = (P \times f + p) + \left(\frac{1}{4} P \times f + p\right).$$

Le mécanisme de soulèvement de la vanne sera établi d'après cette dernière donnée, et, si la vanne doit être manœuvrée à main d'homme, l'effort à exercer par celui-ci ne devra pas dépasser 25 kilogrammes.

Ce mécanisme est généralement supporté par deux traverses horizontales disposées en tête de la vanne et qui constituent le chapeau de l'appareil.

Ces pièces ont à résister aux efforts transmis par la manœuvre des vannes, et, comme elles sont encastrées à leurs extrémités, le plus grand moment fléchissant $\left(M = \frac{1}{8} Pl\right)$ se produit au milieu de la longueur l.

Quant au corps de la vanne, il se calcule comme un solide reposant sur deux appuis, et alors $M_1 = \frac{1}{8} Pl^2$.

Le mouvement mécanique qui sert à opérer le levage des vannes est, dans la généralité des cas, constitué par un treuil à vis sans fin conduisant une crémaillère (*fig.* 646) ou par un treuil à double harnais d'engrenages avec frein de sécurité.

La (*fig.* 647) donne les dispositions de la vanne classique. Elle est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constituée par un cadre vertical en charpente, solidement ancré dans le lit et les berges. La traverse inférieure S, au-dessus de laquelle se fait l'écoulement de l'eau, et où repose la vanne, quand celle-ci est fermée, est généralement noyée en partie ou en totalité dans un radier de maçonnerie ; on la dénomme seuil ou sole gravière. Les deux montants verticaux P, entre lesquels coulisse la vanne, sont les poteaux de vanne ou potilles. La traverse supérieure C ou chapeau de vanne supporte le mécanisme de manœuvre. La vanne proprement dite comprend le tablier T et l'épée ou queue de vanne E.

Cette épée est constituée par une tige en fonte méplate dont l'une des

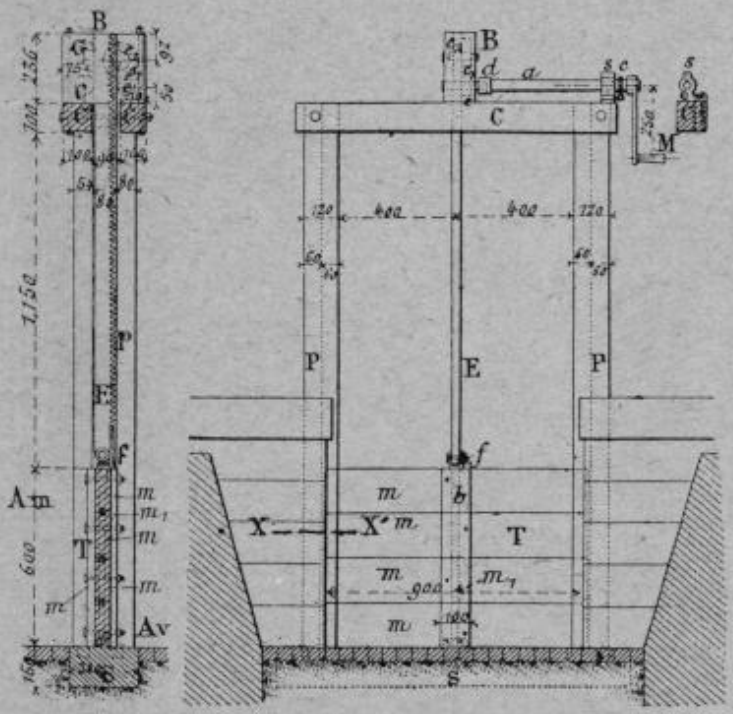


FIG. 647.

faces porte une crémaillère au moyen de laquelle le tablier est monté ou descendu, en agissant sur la manivelle M.

Le tablier est guidé dans deux rainures R ménagées sur la face intérieure de chaque poteau P. La pression de l'eau qui s'exerce à l'amont appuie le tablier par sa force aval contre les poteaux et fait aussi naître, entre les surfaces en contact, un travail de frottement qui s'oppose à l'ascension ou à la descente de la vanne.

La disposition représentée par la (*fig.* 648) permet, en cas de réparation, de retirer le tablier, simplement en retirant le boulon assemblant l'épée à la vanne. Pour diminuer le frottement, les extrémités du tablier qui s'engagent dans les feuillures sont garnies de règles en bronze r et les faces correspondantes des feuillures d'un fer méplat r' régnant sur toute la course du tablier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'on a vu que, pour opérer la vidange des barrages-réservoirs au cas de réparation ou simplement pour faciliter l'écoulement des eaux de grandes crues subites, pour lesquelles le déversoir serait insuffisant, et aussi pour éviter une lame déversante sur la crête du barrage, on dispose des pertuis à la base du mur-réservoir, fermés par des vannes que l'on lève mécaniquement du haut du réservoir. On peut aussi prolonger à l'aval le pertuis par une galerie sur laquelle on installe l'appareil de levage de la vanne, évitant ainsi des tiges de grande longueur, si sujettes à accidents.

Dans les installations importantes, on fait appel à l'eau sous pression, ou à l'air comprimé, ou à l'électricité, pour la manœuvre des vannes. Le système dit « à double vanne » consiste à établir une vanne, ordinairement levée, en arrière de celle fixée contre le parement amont du mur-barrage. L'intervalle existant entre les deux vannes est mis en communication avec un réservoir d'air comprimé, qui permet de réduire l'effort au poids de la vanne et à la résistance des vases de fond ; de plus, le débit des eaux par la galerie évacuatrice se trouve considérablement augmenté.

Le barrage des Cheurfas (Algérie) est muni d'une vanne mobile mue par

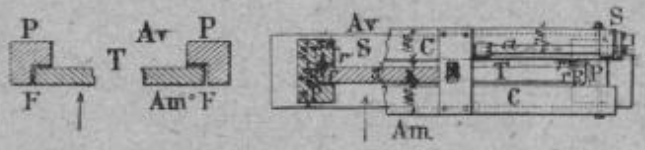


FIG. 648.

l'air comprimé qui permet, suivant qu'elle est plus ou moins levée, de faire varier à volonté le niveau de l'eau dans le réservoir. Cette vanne, dont le seuil est à 28 mètres en contre-bas de la retenue, supporte une pression de 12 tonnes environ, et on estime à 60 tonnes l'effort à vaincre au démarrage pour le levage de la vanne, qui est en fonte.

Le système de manœuvre imaginé par la Compagnie de Fives-Lille, pour la commande de la vanne en question, consiste en une pompe de compression qui envoie de l'air comprimé soit à la partie inférieure d'un piston plongeur creux, mobile à l'intérieur d'un cylindre fixe, ce qui a pour effet de déterminer la levée, soit à la partie supérieure, à l'effet d'abaisser la vanne. L'eau sous pression provenant d'une prise faite à la partie inférieure du barrage actionne trois pompes de compression, qui refoulent le liquide dans une conduite qui aboutit à l'appareil de manœuvre placé sur le couronnement de l'ouvrage.

La vanne est formée d'une plaque de fonte renforcée par des nervures et glissant dans un cadre aussi en fonte.

La tige de manœuvre, à sa partie inférieure, consiste en une tringle ronde pleine assemblée d'un bout avec la vanne et de l'autre bout à un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tube qui se relie à son extrémité supérieure à la presse hydraulique. Le point d'application de l'effort exercé par la tige sur la vanne se trouve à la partie supérieure pendant le mouvement de montée, et à la partie inférieure pendant la descente. Il y a donc deux groupes distincts d'appareils, l'un qui utilise l'eau à la pression de 50 kilogrammes pour la levée, et l'autre qui se sert de l'énergie ainsi créée.

Lorsqu'on veut éviter de faire fonctionner les vannes de décharge, soit que celles-ci soient partrop éloignées, soit simplement que l'on désire en supprimer la manœuvre, on fait usage de vannes régulatrices dont les mouvements d'ouverture et de fermeture se font automatiquement et commandés à distance.

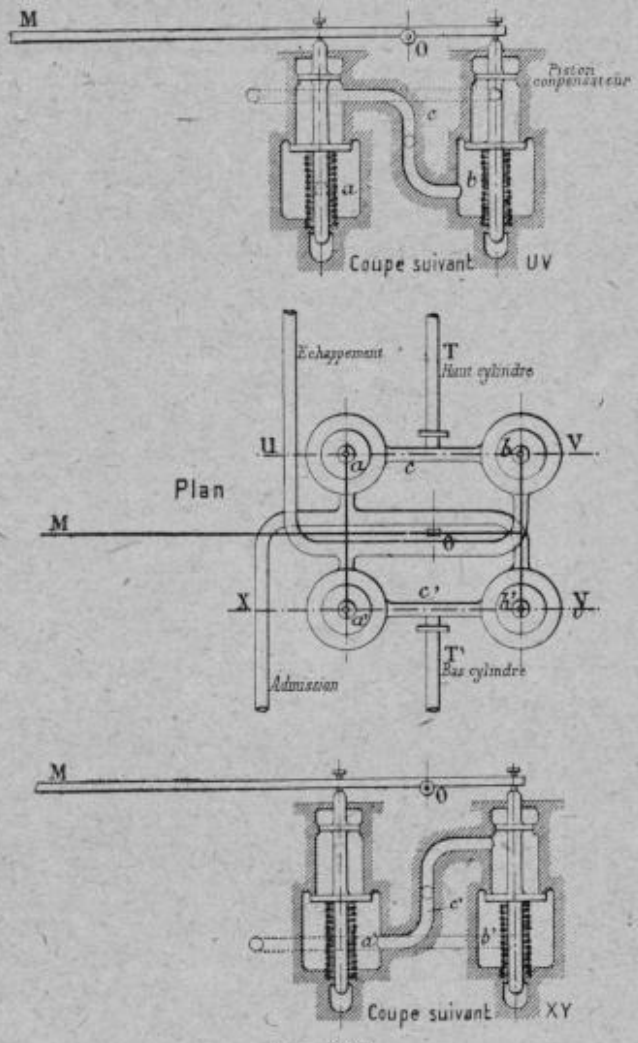


FIG. 649.

On peut concevoir la vanne assujettie à tourner autour d'un axe et dont le mouvement est fonction de la position d'un flotteur placé dans un réservoir alimenté par le niveau du bief-réservoir évacuant une quantité constante d'eau.

L'appareil de manœuvre hydraulique des vannes de l'usine de Jonage consiste en un cylindre de fonte, de 500 millimètres de diamètre d'alésage et $3^{m},25$ de longueur, dans lequel se déplace un piston ordinaire à double effet. Une tige pleine en acier, de 80 millimètres de diamètre relie le piston à la tige de la vanne. Une pompe de compression, mue par une turbine, refoule l'eau d'un réservoir dans une conduite d'amenée mise en communication alternativement avec la partie haute et la partie basse du cylindre, tandis que simultanément, une conduite de refoulement, mise en communication avec la partie basse et la partie haute du cylindre, ramène cette eau au réservoir. Une chaîne fixée à la vanne et équilibrée par un contrepoids se déplace dans des poulies à gorge fixées à la partie supérieure

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du cylindre. Elle entraîne avec elle un index qui indique, le long d'une règle graduée, la hauteur de montée de la vanne.

L'appareil de distribution consiste en une boîte de fonte et quatre soupapes à ressort à boudin en acier, à tige et disque de bronze *aa'bb'* (*fig.* 649). Une conduite *c*, ménagée dans la fonte, réunit la partie supérieure du logement *a*, à la partie inférieure du logement *b*. Une autre conduite *c'* réunit la partie inférieure du logement *a'* à la partie supérieure du logement *b'*. Un tuyau T, branché sur la conduite *c*, la fait communiquer avec le haut du cylindre ; un tuyau T', branché sur la conduite *c'*, la fait communiquer avec le bas du cylindre.

Si l'on agit sur le levier O en relevant l'extrémité M, les deux soupapes *aa'* sont fermées, les deux soupapes *bb'* sont ouvertes. L'admission se produit à la partie inférieure du cylindre par la soupape *b'*, l'échappement se fait de la partie supérieure par la soupape *b*. Si l'on abaisse l'extrémité M du levier, les deux soupapes *aa'* s'ouvrent, les deux soupapes *bb'* se ferment : l'admission se fait à la partie inférieure du cylindre par la soupape *a*, et l'échappement se produit de la partie supérieure du cylindre par la soupape *a'*.

L'eau, pour s'échapper, tend à fermer les soupapes, ce qui empêche la vanne soulevée de descendre elle-même ; pour éviter qu'à l'admission, l'eau, pénétrant brusquement, n'occasionne des coups de bélier, les bras de levier sont munis de vis de réglage qui permettent de donner un peu d'avance à l'admission, de façon à mettre le cylindre en pression avant d'agir sur le levier. Lorsque la vanne est levée et la pression de l'eau motrice supprimée dans la conduite sous pression, la soupape d'admission correspondant à la montée de la vanne serait sollicitée à descendre par son poids, le poids de la vanne et du piston. Pour parer à cet inconvénient, la tige de la soupape est munie d'un piston compensateur de 45 millimètres de diamètre qui équilibre en grande partie la pression de la soupape ; de plus, ce piston, garni de cuir embouti, forme joint étanche autour de la portion de tige qui sort à l'extérieur. Une pompe de refoulement, mise en mouvement par une petite turbine de 5 chevaux, puise l'eau dans un réservoir en tôle ; puisée et refoulée, l'eau revient au réservoir par la conduite d'échappement. L'hiver, l'eau est additionnée de 40 0/0 de glycérine pour former un mélange qui ne se congèle qu'à 15° au-dessous de zéro.

Les vannes de l'usine hydroélectrique d'Augst sur le Rhin sont du type à *hausses mobiles*, ces dernières installées pour pouvoir laisser passer les glaçons et les corps flottants et surtout de permettre facilement la régulation, dans le cas de faibles variations du débit du Rhin; chacune de ces hausses d'une largeur de 15^{m},82 et d'une hauteur de 2^{m},46 peut tourner autour de sept tourillons, dont les paliers sont fixés au haut de la partie de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la vanne qui reste toujours verticale. Quand la hausse est relevée, des verrous la maintiennent fermée, car l'eau tend à la rabattre. La manœuvre de ces verrous est faite à la main.

L'étanchéité de la hausse mobile est obtenue latéralement au moyen de lames minces de bronze, que la pression de l'eau appuie contre la pile et horizontalement au moyen d'une feuille de tôle qui forme ressort et que, lorsque la hausse est redressée, est appuyée par la pression de l'eau contre la partie inférieure cylindrique de celle-ci.

Le corps principal de la vanne est formé de deux poutres de 2m,40 de

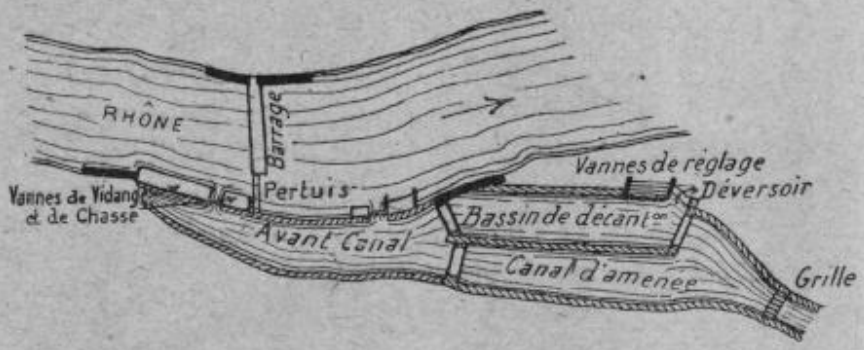


FIG. 650. — Prise d'eau de l'usine hydroélectrique de Brig.

hauteur disposées horizontalement, et reliées par sept poutres verticales. Des entretoises relient ces poutres. L'étanchéité des parties latérales des vannes est obtenue au moyen d'un agencement de fers en U fermant une cavité rectangulaire dans laquelle est placée une poutre de chêne, laquelle est reliée à la vanne par l'intermédiaire de ressorts et peut se déplacer un peu latéralement, de sorte qu'elle est poussée par l'eau contre les ailes des fers en U et assure l'étanchéité. A la partie inférieure, la poutre est pressée par les poids de la vanne, de sorte que l'étanchéité est également obtenue.

Le poids d'une vanne munie de sa hausse mobile est de 93 tonnes.

Dans le cas d'une vanne à hausse mobile, il y a lieu de tenir compte du poids de l'eau qui peut se trouver au-dessus de cette dernière, en dehors des autres conditions de poids et de frottement, lorsqu'on relève la vanne. On est arrivé ainsi pour les efforts, aux valeurs suivantes :

Poids de la vanne	81 tonnes	
— de la hausse mobile	12 »	
— des parties en bois	2,2	
— de l'armature	3,6	
— des chaînes et câbles	12 »	ensemble
— des chariots et galets (1/2)	4,3	225 tonnes
Frottement de roulement	4 »	
— des pièces d'étanchéité	8 »	
Poids de l'eau	65,5	
Résistances accidentelles	32,4	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les treuils, les moteurs électriques les actionnant et les appareils de commande sont disposés sur la passerelle surmontant le barrage.

Chaque vanne est reliée à quatre chaînes Galle et les deux chaînes pla-

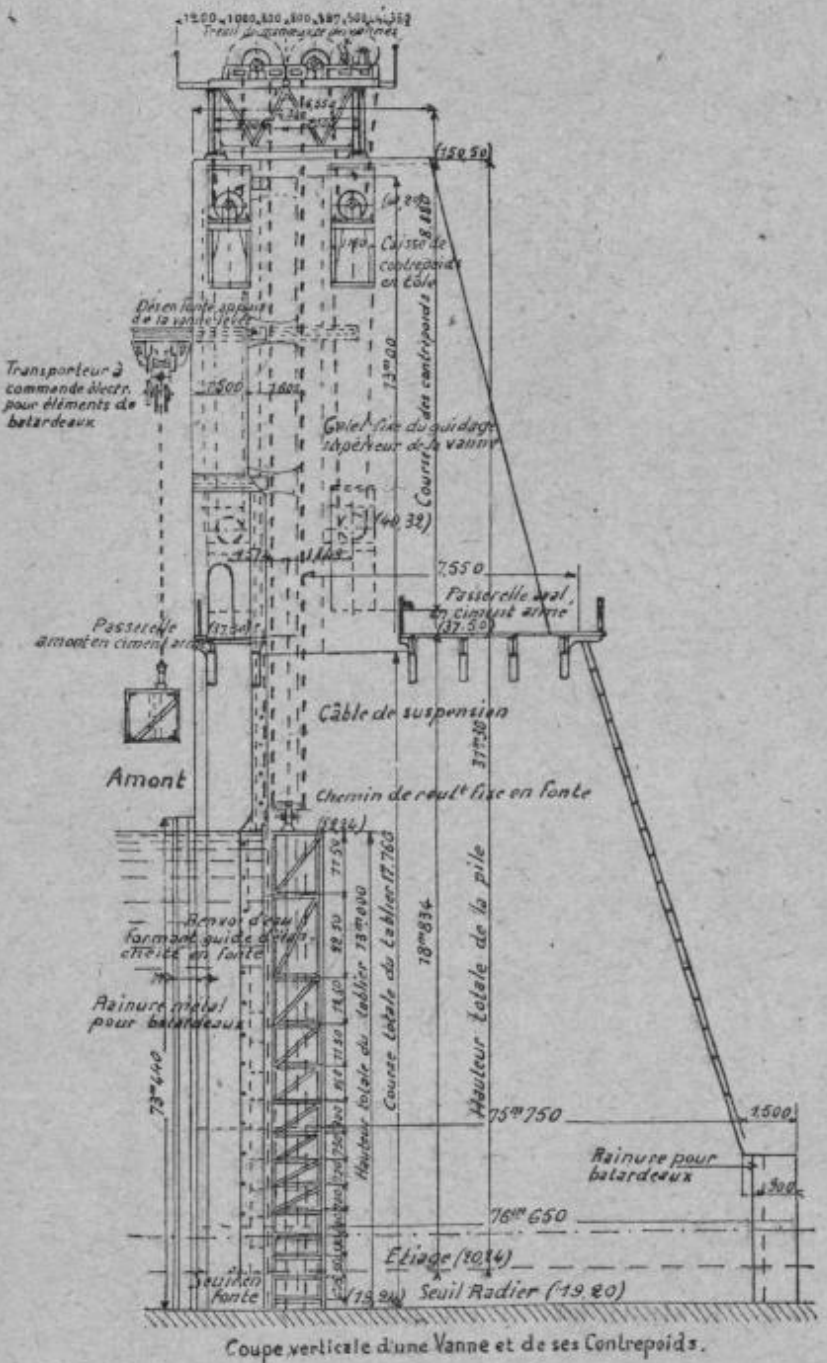


FIG. 651. — Vannes de l'usine hydroélectrique de Tuilière.

cées d'un même côté agissent à l'extrémité d'un levier articulé en son milieu et fixé à la vanne, de sorte que les efforts qu'elles ont à supporter

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont à chaque instant absolument égaux. Chacune des chaînes des vannes a une résistance à la rupture de 225 tonnes (1).

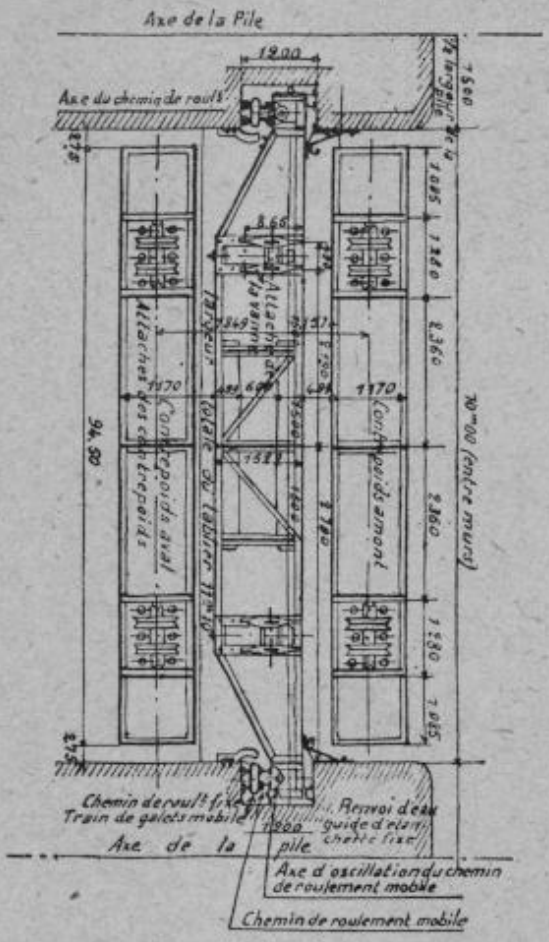


Fig. 652. — Vannes de l'usine hydroélectrique de Tuilière.

La vitesse de levage est de 0m,50 à la minute. Les hausses mobiles sont reliées à chacune de leurs extrémités à un câble d'acier, relié à une chaîne Galle de 120 tonnes de résistance, dont la vitesse est de 0m,36 à la minute.

Des indicateurs placés sur la passerelle permettent de voir à chaque instant quelle est la position occupée par la hausse mobile de la vanne.

Dès que la vanne ou la hausse mobile occupe une de ses positions à fin de course, son moteur est débrayé automatiquement, et dès qu'une vanne n'est pas complètement abaissée, le courant du moteur de la hausse mobile correspondante est coupé.

Les vannes de l'usine de Brigue (Simplon), au nombre de huit, ont été disposées pour éviter l'introduction des graviers, et à cet effet on les a installées en chicane et placées dans le remous du barrage. Un abaissement du seuil de cet ouvrage est fait pour déterminer un courant et pour empêcher le dépôt des graviers devant les vannes de prise (*fig.* 650).

L'usine hydroélectrique de Koebuck (États-Unis) dont la chute est de 11 mètres a été aménagée à l'aide d'un barrage de 1.305 mè-

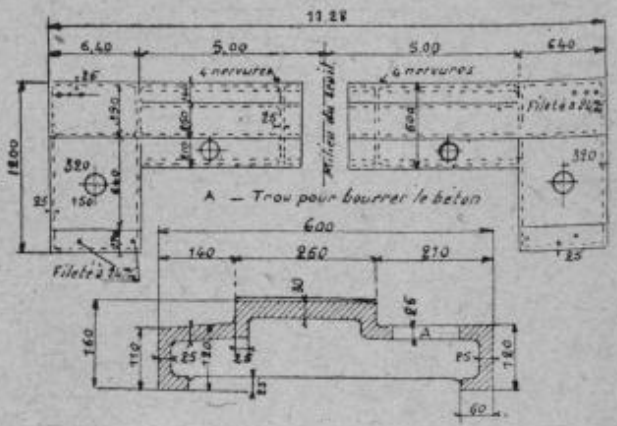
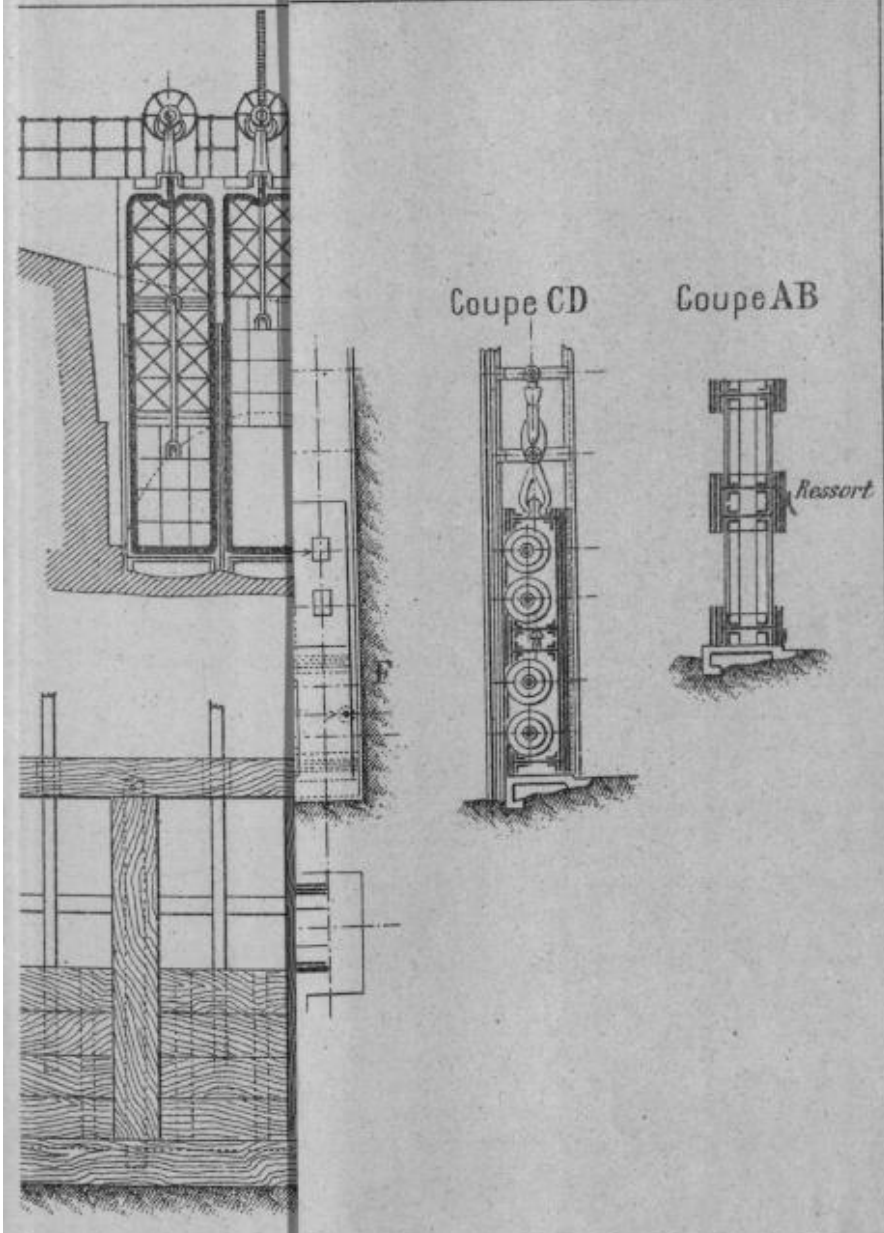


Fig. 653. — Coupe du seuil en fonte des vannes de l'usine hydroélectrique de Tuilière.

1. *Génie Civil*, 3 janvier 1914.

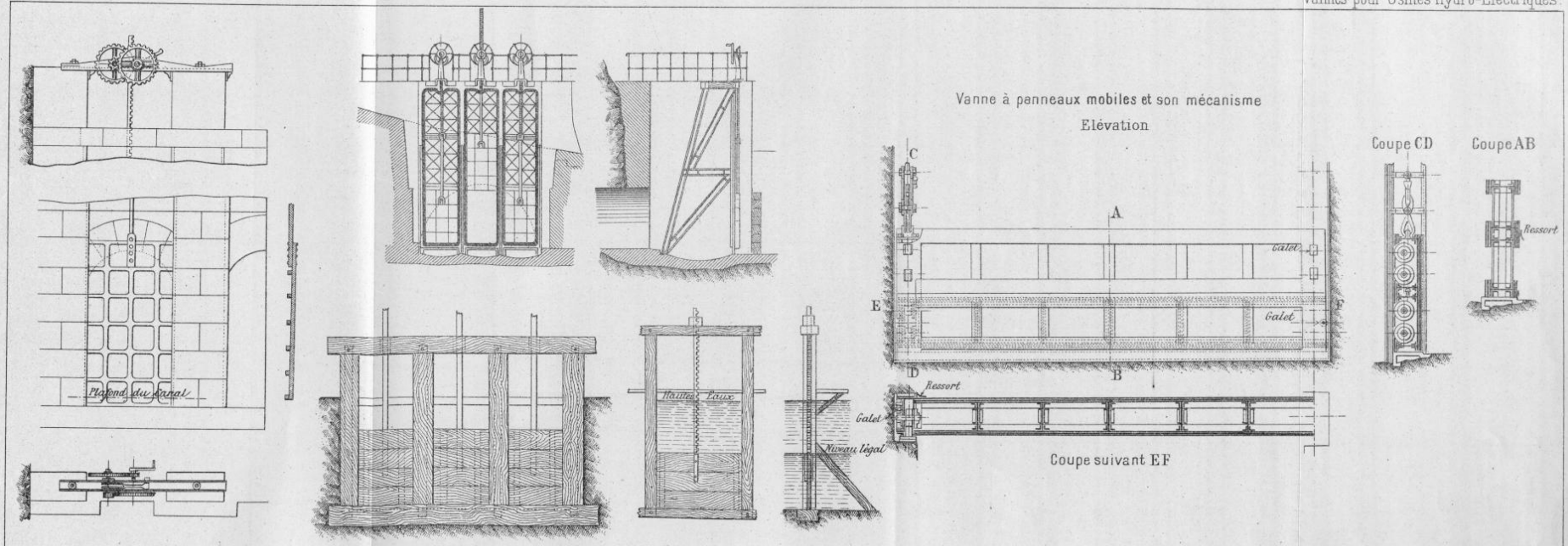
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Vannes pour Usines Hydro-Electriques.



h, 35, Rue de la Tour-d'Auvergne, Paris, IXe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

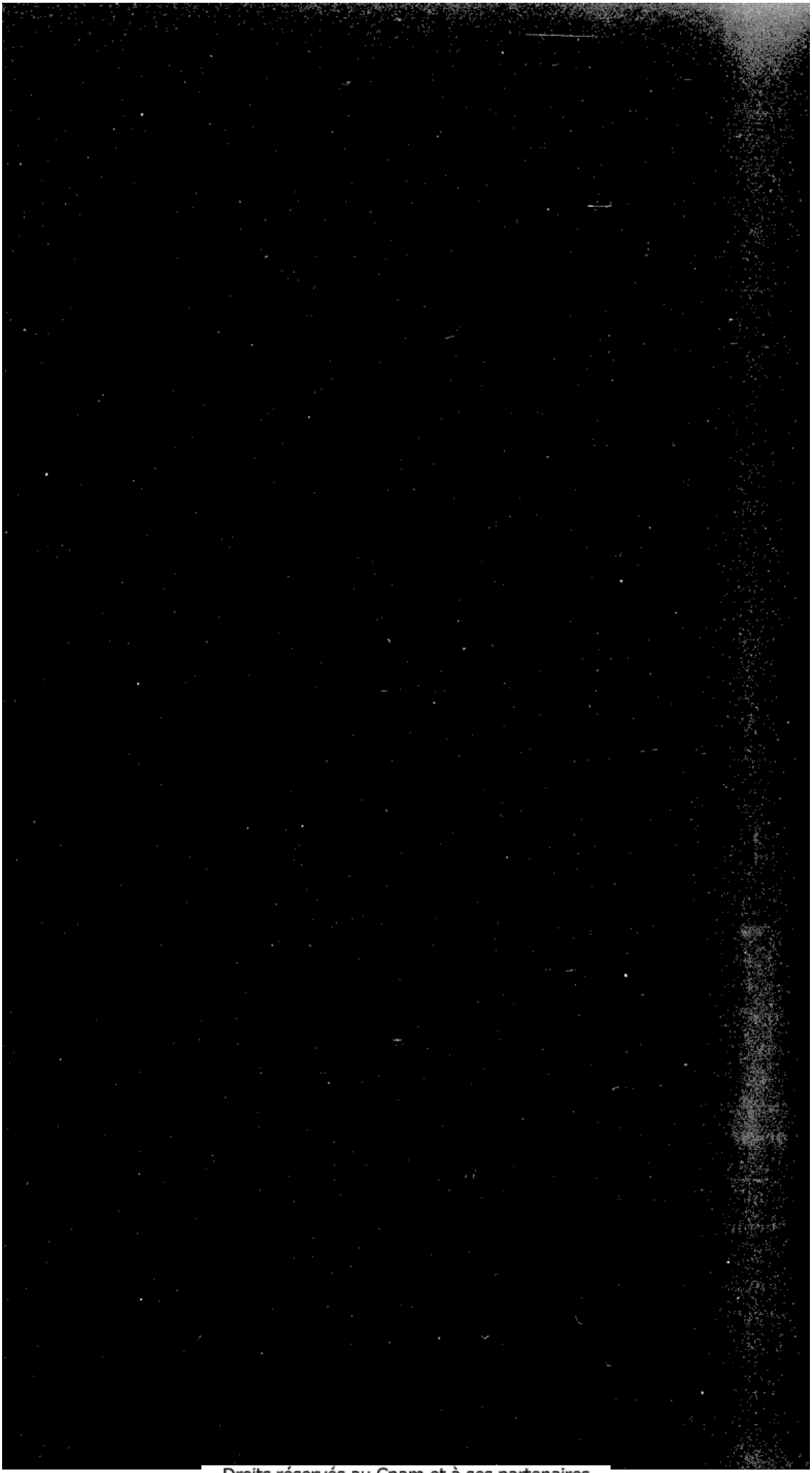


Pacoret_La Houille blanche_Page 903.

DUNOD & PINAT, Editeurs, 47 et 49, Quai des Grands-Augustins, Paris.

L. Braun, 35, Rue de la Tour-d'Auvergne, Paris, IXe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tres de longueur formant un lac de 200 kilomètres carrés sur une longueur de 96 kilomètres.

Pour pouvoir utiliser une surélévation de niveau la crête du barrage est surmontée de 119 vannes de décharge qui sont ouvertes en temps de crues. Elles ont une largeur de 9m,15. Il y a une écluse pour la navigation de 132 mètres de longueur et 33m,55 de largeur pour racheter une différence de niveau de 13 mètres. L'écluse est reliée par un mur qui porte un système de vannes de purge.

A l'usine hydroélectrique de Gullspang (Suède), dont la chute est de

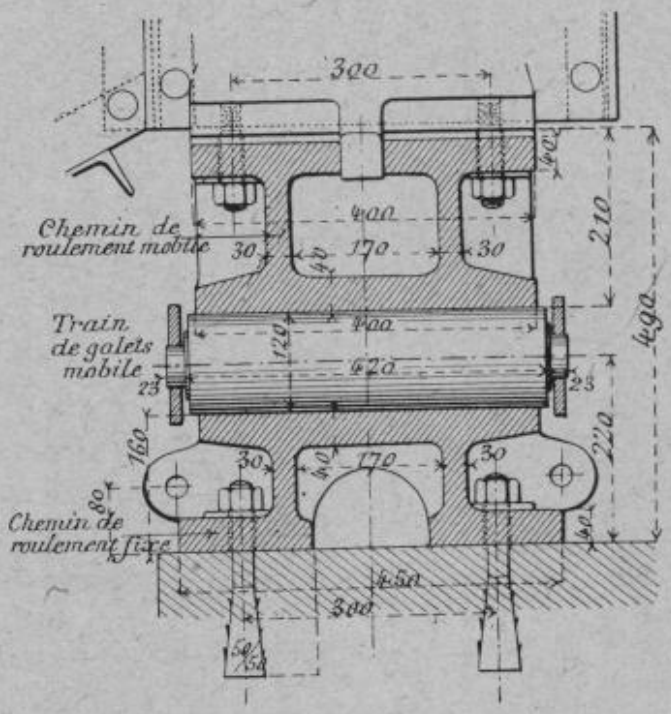


FIG. 654. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Coupe horizontale des chemins de roulement des vannes.

20m,50, le barrage comporte 50 vannes disposées par groupes de cinq en dix ouvertures.

Les vannes de 5m,50 de largeur et 4m,60 de hauteur sont en tôles de fer, courbées suivant la forme cylindrique, étagées horizontalement et munies de surfaces de glissement. Des bypass permettent de diminuer la pression d'eau contre ces vannes, avant la manœuvre qui s'effectue au moyen d'un pont roulant. L'emploi de ballast pour neutraliser la pression de l'eau dans la construction des chambres de mise en charge a été utilisé efficacement.

La (planche X) montre quelques types de vannes ainsi que la disposition des vannes à compartiments mobiles et à contrepoids adoptées pour la construction du barrage de l'usine de Tuilière (§ 186 et 304) (*fig.* 651 à 656). L'intervalle entre chaque pile est rempli par des panneaux superposés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

coulissant chacun dans une rainure spéciale. Ces panneaux sont soulevés successivement par le panneau inférieur, seul équilibré par des contrepoids disposés à l'intérieur des piles et relié à un treuil de manœuvre placé sur une grue électrique à portique, disposée sur la passerelle de service. Chaque pile du barrage porte deux rainures pour les vannes et aussi des rainures pour les bâtardeaux qui pourraient être nécessaires en cas de réparation. Le vannage, dans sa hauteur, comporte un certain

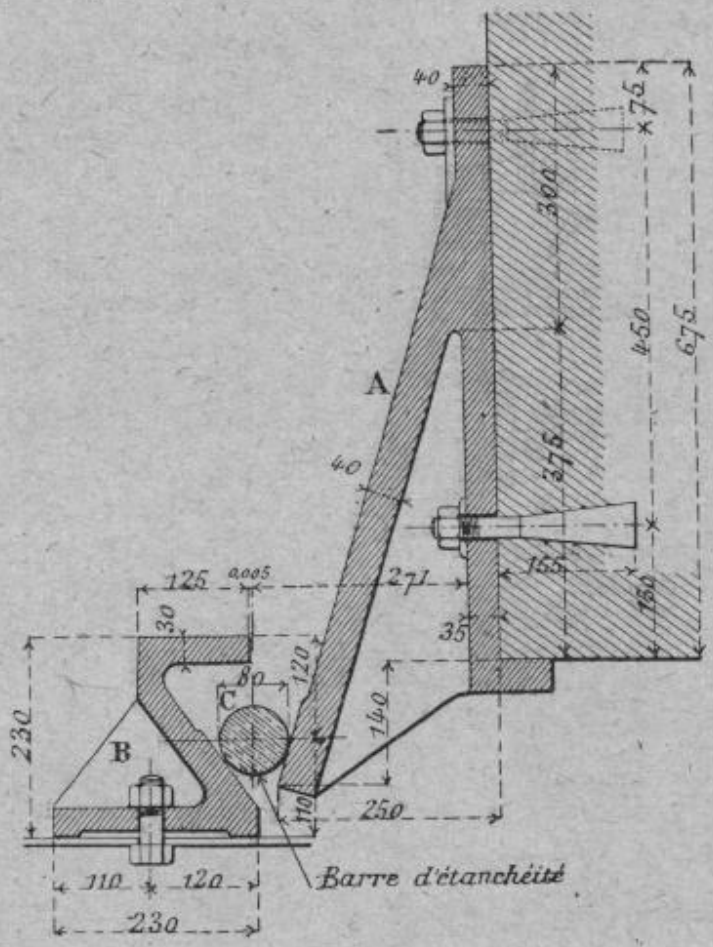


FIG. 655. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Dispositif et barre d'étanchéité des vannes.

nombre d'éléments de 1 mètre de hauteur et qui sont superposés comme les poutrelles des petits barrages ordinaires. Une lame flexible, que la pression de l'eau applique contre les parois des tronçons, assure l'étanchéité des joints de ces derniers. Quant à l'étanchéité entre la face des tronçons et la maçonnerie des rainures, elle est obtenue par l'adjonction de lames métalliques flexibles rivées sur la paroi et s'appuyant, par l'effet de la pression de l'eau, sur une pièce de forme spéciale à l'angle des rainures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'appareil d'accrochage des tronçons se compose d'une armature en forme de I pouvant coulisser, sans aucun déplacement horizontal, dans les rainures des piles. Celle-ci est terminée par deux griffes articulées, disposées pour saisir les saillies d'une pièce spéciale fixée aux poutrelles du barrage. Sur la partie verticale de l'armature coulisse une pièce de fonte disposée en forme de coin et qui peut, selon les cas, agir sur les griffes ou

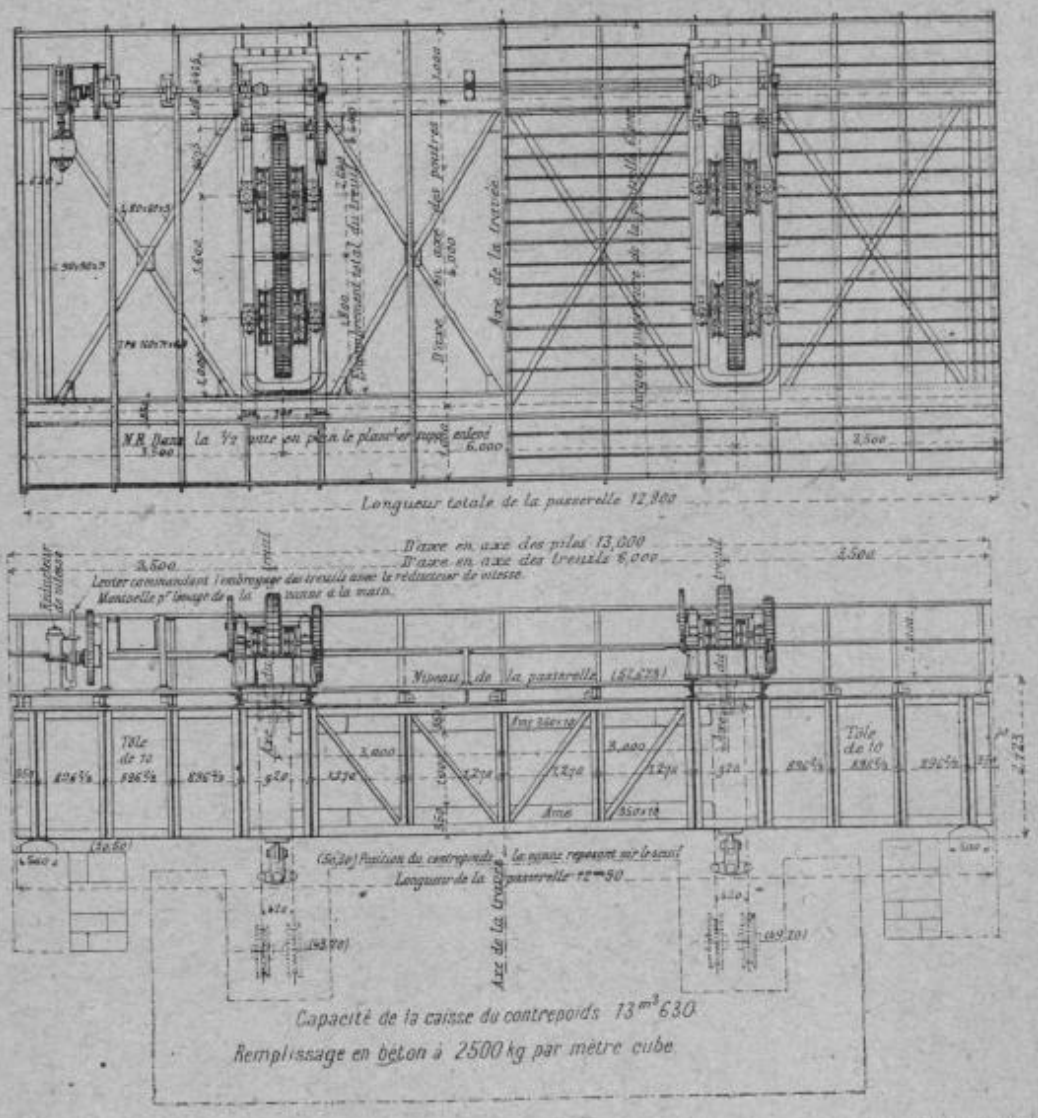


FIG. 656. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Passerelle de manœuvre des treuils.

être mobilisée sur une goupille. En cas de crue, la passerelle de service peut recevoir tous les tronçons formant le vannage.

Chaque travée comporte deux poutres principales renforcées supportant la voie de la grue, six poutres intermédiaires et enfin deux poutres de rive placées sous le garde-corps. Ces poutres sont reliées par des entretoises en treillis, et l'ossature ainsi constituée reçoit les tôles embouties

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

supportant la chaussée. Toutes les pièces ont été calculées pour une surcharge accidentelle de 600 kilogrammes par mètre carré.

Les panneaux des vannes sont munis de galets de roulement aux quatre angles, et on peut facilement lever au-dessus des plus hautes crues les tronçons, chaque fois que cela devient utile pour respecter le niveau légal. Ces dispositions permettent d'exécuter la manœuvre d'une vanne de 110 tonnes avec deux treuils d'une puissance individuelle de 3 HP.

La (*fig.* 657) représente une vanne de décharge ou vanne de fond,

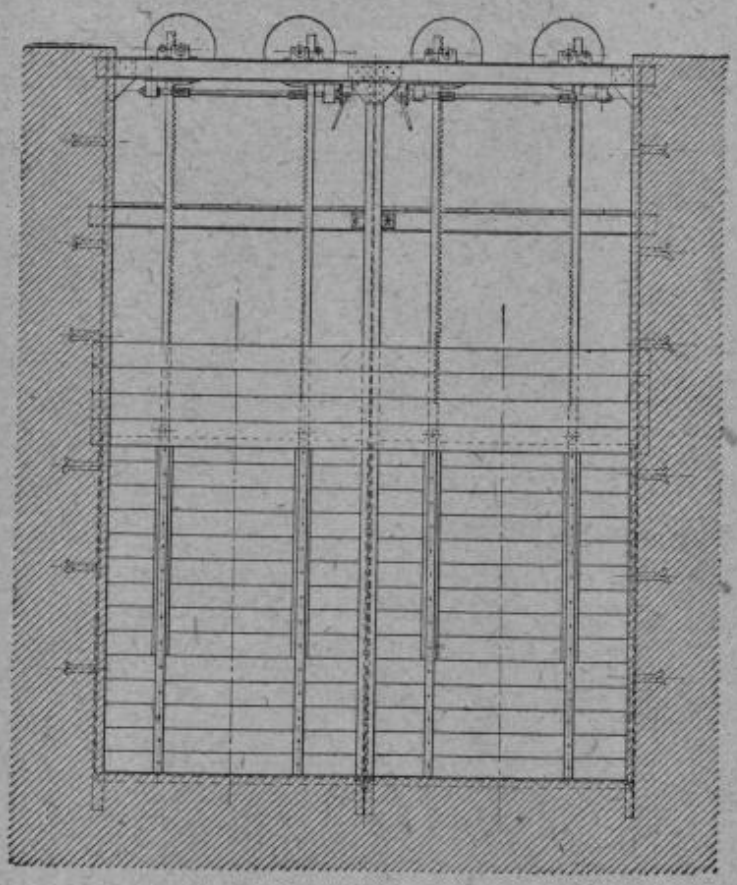


FIG. 657. — Vanne de fond.

soit de barrage, soit de chambre d'eau, toutes deux construites par la maison Neyret et Brenier.

A l'usine de Jonage, les vannes des chambres d'entrée d'eau offrent une large section à l'entrée de l'eau, pour réduire les chocs et les tourbillonnements, et permettent d'étaler la conduite, de visiter et de réparer la turbine.

Ces vannes consistent en un tambour mobile en fonte de $3^m,30$ de diamètre, $1^m,30$ de hauteur, de 25 millimètres d'épaisseur et en un couvercle fixe en fonte, ayant la forme d'une calotte sphérique. Ce couvercle est porté par 12 montants, dont 4 sont munis d'un grillage auxiliaire. Les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

montants s'emboîtent, à la partie supérieure, dans le couvercle et, à la partie inférieure, dans un siège en fonte scellé dans le béton. Le tambour

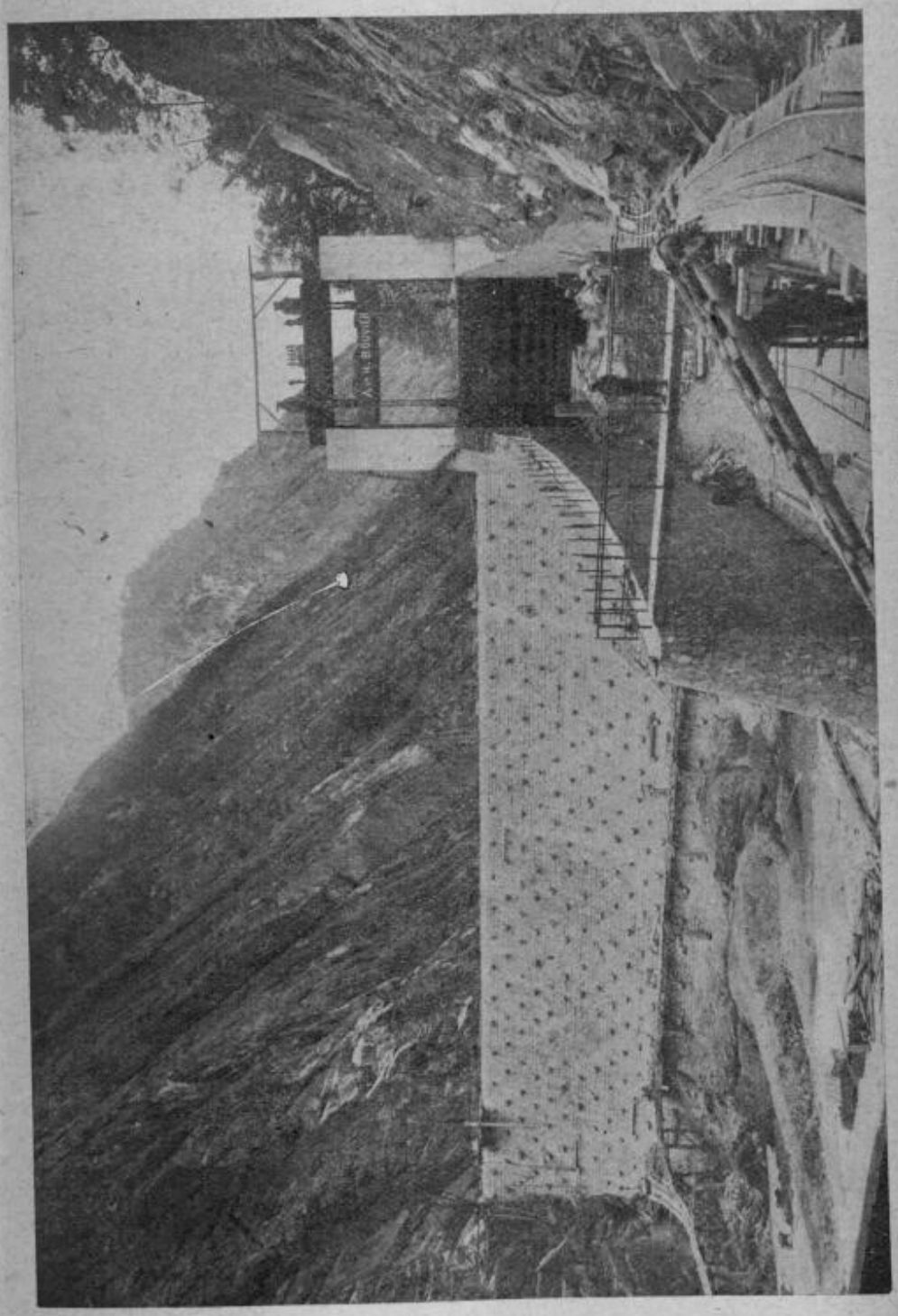


FIG. 658. — Barrage et grande vanne de chasse de l'usine d'Avignonet.

mobile s'appuie, par des boudins en métal tendre (plomb et antimoine), à sa partie inférieure, sur le siège de la vanne. Sous le poids du tambour, la garniture métallique réalise une fermeture étanche.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour parer au danger d'interruption brusque de l'eau et des chocs du tambour contre ses montants, en cas de soulèvement trop rapide, on a muni la partie supérieure du couvercle d'une soupape qui permet de remplir d'eau la chambre de la turbine et la conduite, avant de commencer à soulever le tambour. Les vannes ainsi que la soupape du couvercle se manœuvrent de l'intérieur à l'aide de treuils fixes installés sur la passerelle du mur-barrage. Les tambours des vannes sont munis de deux balanciers articulés, reliés, chacun par une chaîne et trois poulies de retour, à un contrepoids en lame de fonte, qui équilibre la plus grande partie du poids du tambour. Un bâti de fonte fixé par des tiges et des plateaux d'ancrage à la maçonnerie du mur-barrage, porte le treuil de manœuvre. La traction s'exerce par une chaîne à maillons sur le contrepoids. Enfin l'entrée des vannes est protégée contre l'introduction des corps flottants par des grilles, inclinées à 45°, dont les barreaux laissent entre eux des vides de 3 centimètres.

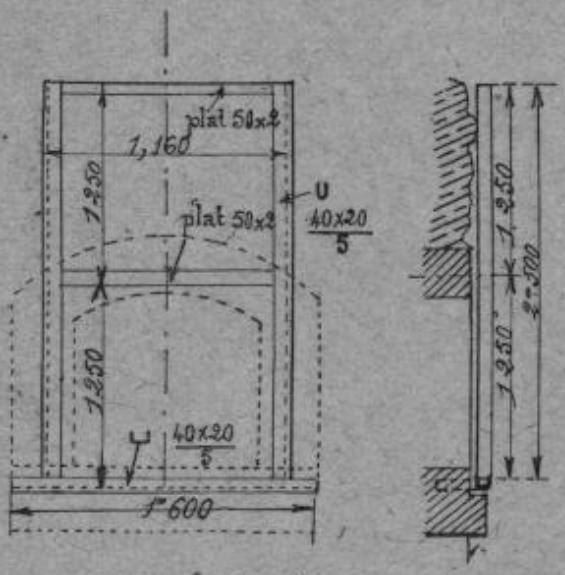


FIG. 659.

Les vannes métalliques de l'usine de Chèvres (§ 298), de 10 mètres d'ouverture, sont manœuvrées à la main au moyen de treuils ; chacune d'elles supporte une pression de 300 tonnes et est équilibrée sur quatre câbles en acier.

La célèbre vanne d'Avignonet (*fig.* 658) est à contrepoids ; son tablier métallique peut résister à un effort de 370 tonnes, et l'étanchéité latérale est obtenue au moyen de deux cylindres en laiton de même longueur que le tablier, disposés sur sa face amont près de chaque montant et appliqués par la pression de l'eau dans des alvéoles en forme de V.

Elle est manœuvrée à l'aide d'un treuil à tambour à trains hélicoïdaux conduit par un moteur électrique.

Le vannage du type Stoney de l'usine de la Pomblière (§ 347) est à contrepoids et à roulement sur trains de galets.

Les vannes se construisent soit en bois, soit en métal. Dans le premier cas, elles sont composées de madriers assemblés à rainures et languettes et réunis entre eux au moyen de ferrures. Les bords des faces aval portent une garniture en bronze qui glisse sur les bandes de fer dont sont revêtus les montants. Les poteaux verticaux qui forment les montants encadrant les vannes sont fixés, à leur partie inférieure, sur une poutre qui forme le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seuil du vannage, et assemblés, à leur partie supérieure, par une couple de moises solidement assemblées et maintenues par des boulons.

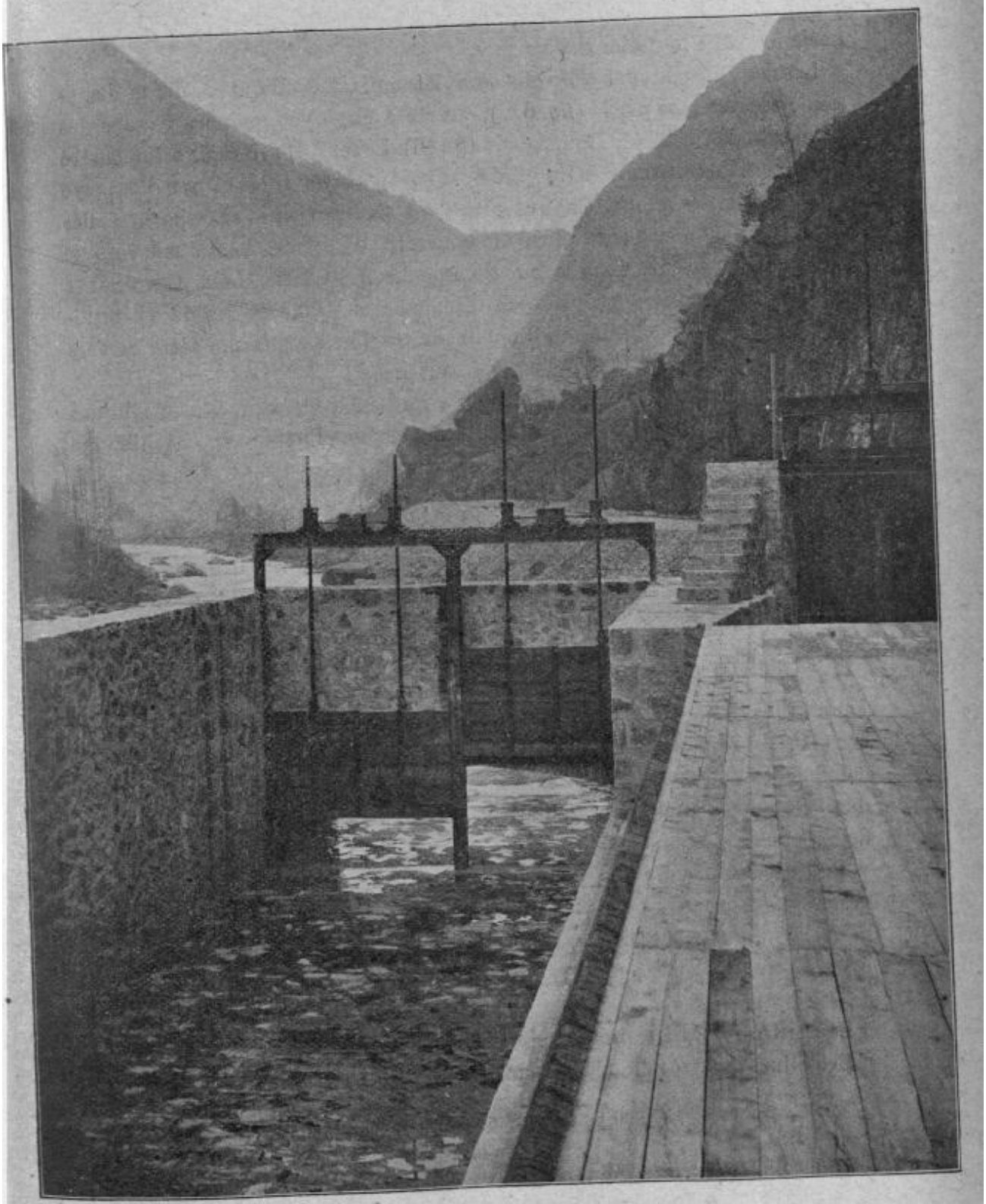


FIG. 660. — Vannes métalliques avec tabliers en bois de l'usine de Séchilienne. (Bouchayer et Viallet, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque le débouché de l'eau comporte plusieurs vannes à la suite l'une de l'autre dans un même plan horizontal, les montants d'extrémité sont noyés dans la maçonnerie, et ceux intermédiaires sont épaulés à l'aide de jambes de force prenant leur appui sur des semelles noyées dans la maçonnerie formant le radier des vannes.

Les vannes peuvent s'établir complètement métalliques, telle la disposition représentée par la (*fig.* 659), qui a été employée pour les vannes des aqueducs de l'usine de Bonnavaud (§ 186). Le fer à U inférieur est encastré à chacune des extrémités du garde-radier au moyen d'un retour d'équerre de $0^m,10$ de longueur. Chaque cadre est fixé par huit crampons scellés dans la maçonnerie ; de plus, un bourrelet en ciment règne sur tout le pourtour extérieur, dans le but d'empêcher les infiltrations. Les vannes proprement dites sont en tôle d'acier de 12 millimètres d'épaisseur, renforcées par une série de fers à T formant armatures.

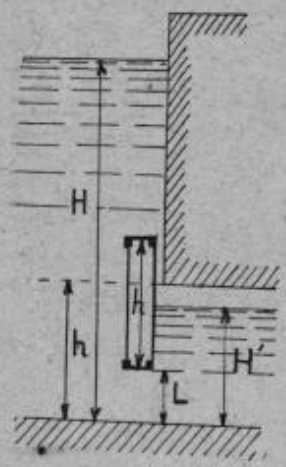


FIG. 661.

La (*fig.* 660) représente les vannes métalliques avec tabliers en bois de l'usine de Séchilienne (§ 441).

Les (*fig.* 663 à 667) montrent des types de vannes, avec détails de construction et dispositifs de commande, construites par la maison J. Joya de Grenoble.

Calcul des vannes de l'usine hydroélectrique de Jonage: — Les vannes du barrage de Jonage, en se mettant dans le cas exceptionnel des plus hautes eaux ($H = 185,50$) (*fig.* 661), à l'amont de l'ouvrage de garde et du canal à sec ($H' = 176,000$), la hauteur d'appui de la vanne h étant de $3^m,25$ et les coefficients de frottement de bronze sur bronze mouillé étant de $0^m,50$ au démarrage et $0^m,20$ après démarrage, on obtient pour les efforts de levée des vannes :

Poussée sur la vanne :

$$Q = \left(185,50 - 176,00 - \frac{3,25}{2}\right) \times 1.000 \times 17,51$$

$$= 137.890 \text{ kilogrammes}$$

Le chiffre $17^{m2},51$ représente la surface d'appui de la vanne
Et l'effort de levée au démarrage égale :

$$137.890 \times 0,50 = 68.945 \text{ kilogrammes}$$

Effort de levée après démarrage :

$$137.890 \times 0,20 = 27.578 \text{ kilogrammes.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le poids de la vanne et des pièces en mouvement étant de 8.500 kilogrammes, on a pour les efforts de traction sur les vis de vérins :

Au démarrage : 77.445 kilogrammes ; après démarrage : 36.078 kilogrammes.

En supposant que la poussée ne s'exerce que sur les deux bandes de bronze verticales, on obtient :

Surface de contact : $2 \times 3{,}475 \times 0{,}145$	1,0077
A déduire : 138 surfaces de têtes de vis de 26 millimètres de diamètre	0,0732
Surface utile	0,9345

Pression maxima par millimètre carré de surface : $\frac{137.890}{934.500} = 0^{kg},15.$

Le diamètre des vis guides au fond du filet étant de 13 millimètres et la section de 132 millimètres carrés, sous l'effort de levée ces vis travaillent à :

$$\frac{68.945}{138 \times 132} = 3^{kg},7.$$

Les vis de vérins ont un diamètre de 90 au noyau et l'écartement de l'écrou au guide est de $2^m,65$; au moment de l'ouverture de la vanne, la vis travaille comme une pièce chargée debout sous un effort maximum de :

$$\frac{68.945 - 8.500}{2} = 30.222 \text{ kilogrammes.}$$

Quant à la charge de rupture elle est donnée par la formule :

$$P = \frac{12EL}{l^2};$$

avec $E = 17{,}000$; $I = 0{,}0491\ d^4$ et $l = 2{,}65$, on a :

$$P = \frac{12 \times 17.000 \times 0{,}0491 \times 90^4}{2.650^2} = 93.581 \text{ kilogrammes.}$$

L'effort maximum est donc inférieur au tiers de la charge de rupture et dans le cas le plus défavorable au fonctionnement des vannes.

La poussée R sur la vanne en fonction de la hauteur de levée de la vanne L est donnée par l'expression ci-après, dans le cas où il existe une contre-pression :

$$R = \left(H - \frac{h + L}{2}\right)(h - L)\ l \times 1.000 - (H' - L)^2 \times \frac{1}{2}\ l \times 1.000.$$

et :

$$R = \left(H - \frac{h + L}{2}\right)(h - L)\ l \times 1.000,$$

alors qu'il n'existe pas de contre-pression.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les efforts de manœuvre, montée ou descente de la vanne, sont :

$$Q = fR \pm \text{poids de la vanne et des pièces en mouvement,}$$

f, coefficients de frottement ayant les mêmes valeurs que celles indiquées plus haut.

Vanne automatique Mirza. — Cette vanne qui a figuré à l'Exposition mécanique de l'Olympia, tenue à Londres en 1906, s'applique aux déversoirs des barrages-réservoirs ou de prise d'eau.

Elle se compose d'un platelage v, en bois ou en tôle, qui est mobile autour d'un axe horizontal, et qui vient s'appuyer, à ses parties supérieures et inférieures, contre deux butoirs d'arrêt.

Lorsque le niveau de l'eau s'élève à une hauteur telle que l'axe se trouve au tiers de cette hauteur, la vanne se trouve en équilibre instable, puis, si le niveau de l'eau continue à s'élever, la vanne est entraînée par la poussée de l'eau et bascule en avant, livrant passage à la crue. Le platelage v (*fig.* 662) vient alors s'appuyer sur des galets g, montés sur des leviers l et pouvant tourner autour d'un axe p. Lorsque l'eau repasse par un niveau déterminé, qu'on peut régler à volonté, le contrepoids c fait remonter la vanne, et le contrepoids k maintient celle-ci appliquée contre ses butoirs d'arrêt.

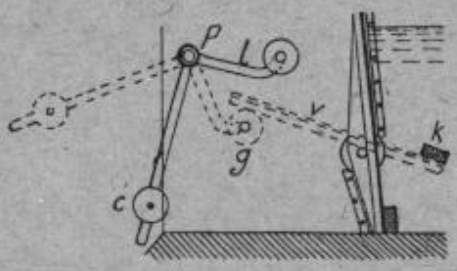


FIG. 662.

Une vanne de ce type, de $2^m,745$ de hauteur, récemment installée aux Indes, s'ouvre automatiquement lorsque l'eau dépasse le haut de la vanne de 95 millimètres. Elle vient alors s'appuyer sur le galet g, et celui-ci l'oblige à se refermer dès que le niveau de l'eau est redescendu à 127 millimètres au-dessous de son sommet. La variation maximum entre l'ouverture et la fermeture n'est donc que de 222 millimètres, soit 8 0/0 seulement de la retenue.

Cette vanne a été appliquée avec succès aux Indes anglaises par le service des irrigations du gouvernement de Bombay. Dans le cas du type précité, elle a permis d'augmenter de 40 0/0 la capacité du réservoir, par rapport à un déversoir fixe.

192. Grilles. — Ces engins qui précèdent les vannes doivent avoir leurs barreaux espacés de telle façon que le treillis qu'ils forment puisse retenir efficacement les corps flottants et que la veine liquide qui passe entre les barreaux défile sans subir de contraction ni de perte de charge sensibles. Les grilles sont, en général, formées de barreaux en fer plat de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

100mm × 5mm et espacés de 50 millimètres d'axe en axe à l'aide de rondelles en acier et en fonte traversées par des tiges filetées qui fixent le tout ; on les incline suivant un angle de 60° environ sur l'horizontale.

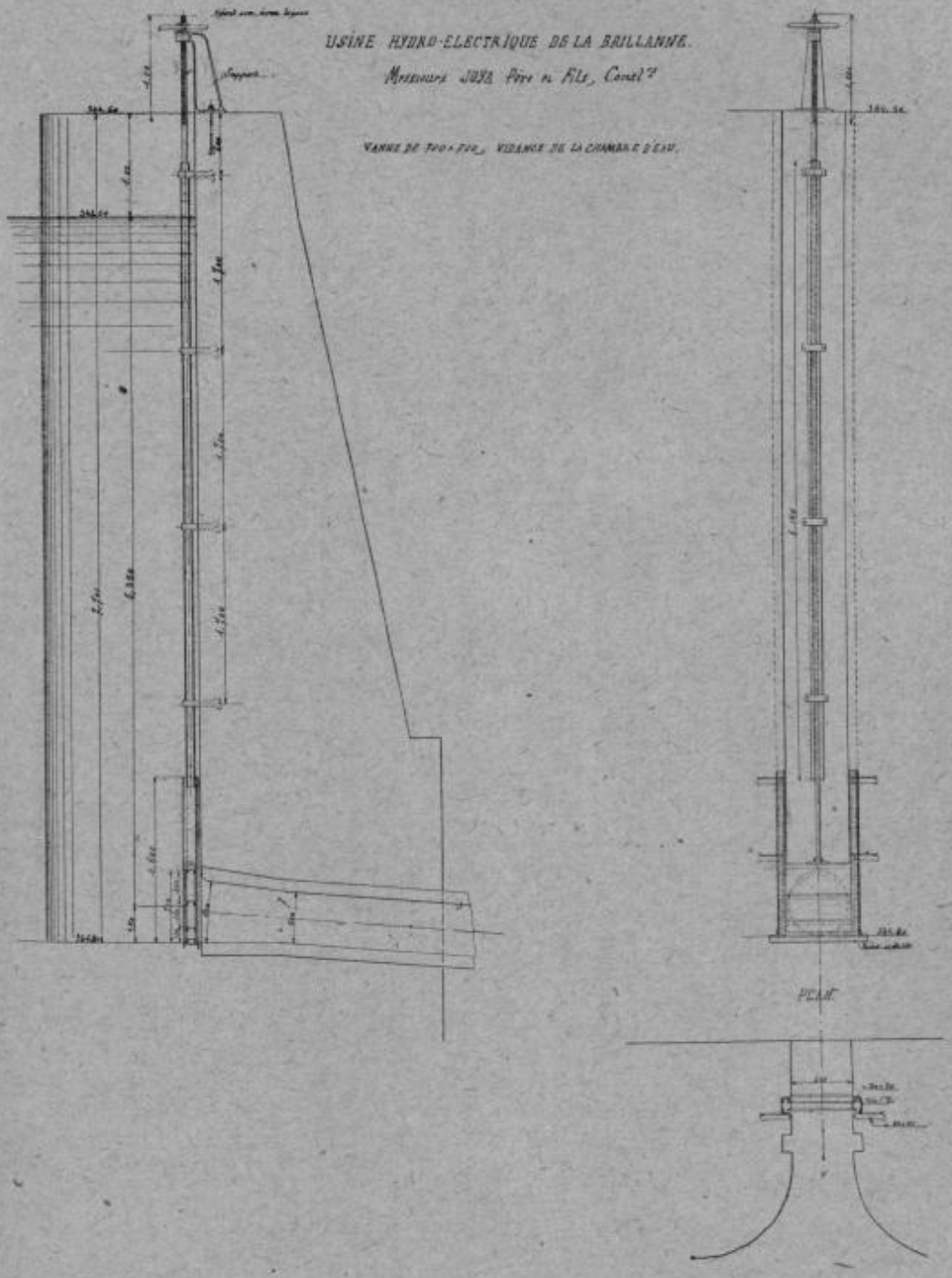


FIG. 663.— Vanne de 700 × 700. Vidange de la chambre d'eau de l'usine de la Brillanne. (J. Joya, père et fils, constructeurs).

D'autres fois ces fers plats sont disposés en forme de lames de persiennes, traversant des rainures pratiquées dans des traverses. Ce procédé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a pour but de pouvoir déplacer chaque barreau séparément, tandis que dans le premier cas, il faut déplacer panneau par panneau.

On emploie également des grilles en tôle perforée que l'on place horizontalement, mais elles doivent être disposées pour un nettoyage facile, car les trous circulaires sont facilement obstrués par les sables et les feuilles entraînés. Comme débit de ces grilles, on compte généralement sur

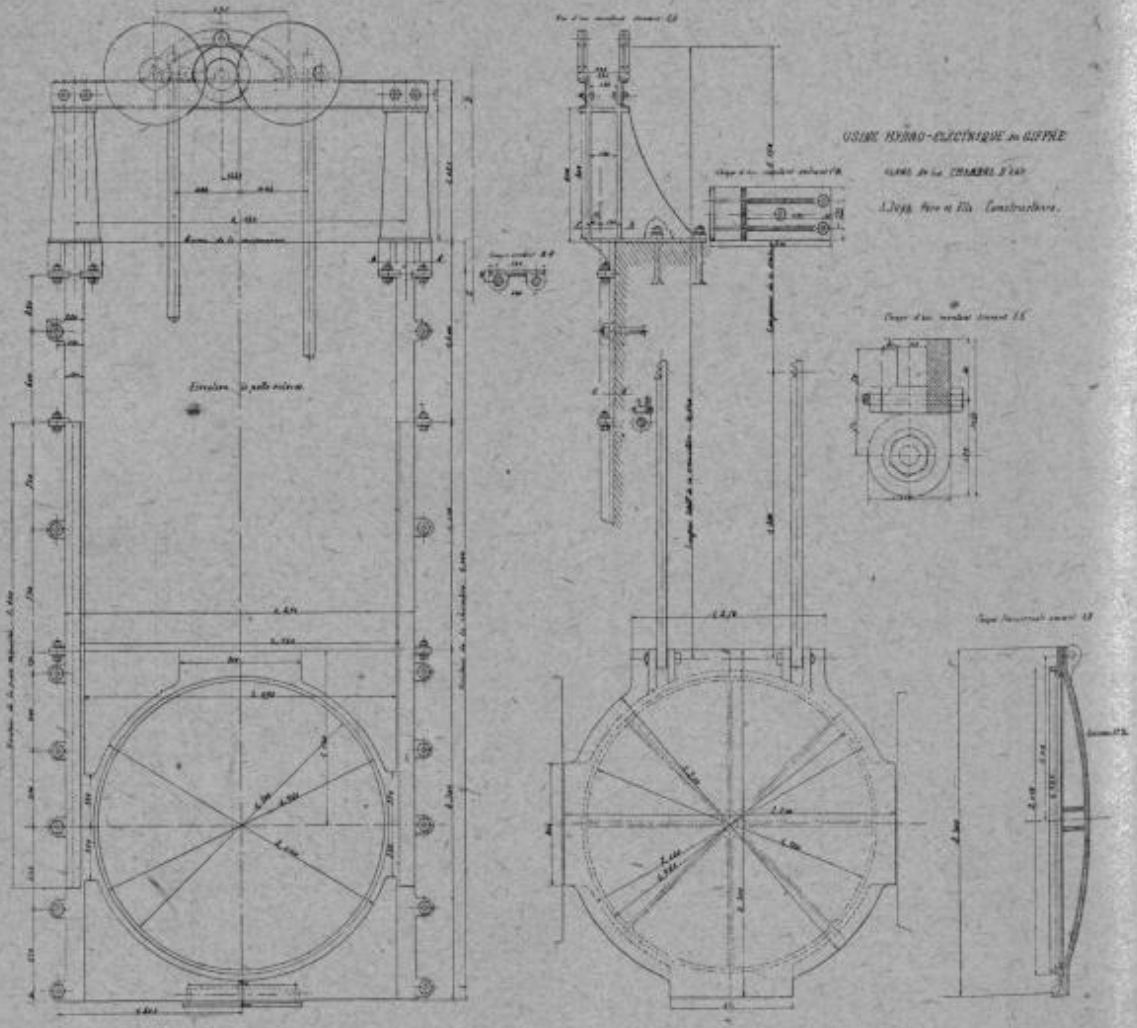


FIG. 664. — Vanne de la chambre d'eau de l'usine de la Brillanne.
(J. Joya, père et fils, constructeurs).

200 litres par mètre carré de tôle perforée, correspondant à une vitesse assez réduite de l'eau au travers des orifices. Pour des vitesses plus grandes, ce coefficient augmente assez rapidement.

On connaît les ennuis provenant de l'obstruction des grilles à certaines périodes de l'année, notamment à la chute des feuilles, ce qui nécessite un personnel spécial comprenant plusieurs équipes occupées exclusivement à ce nettoyage. Souvent la chambre d'eau étant loin de l'usine est mal surveillée ; la plupart du temps la grille est obstruée, le niveau baisse et les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

turbines voient leur rendement s'abaisser. Pour remédier à ces inconvénients, la maison A. et H. Bouvier a fait breveter un dégrilleur permettant

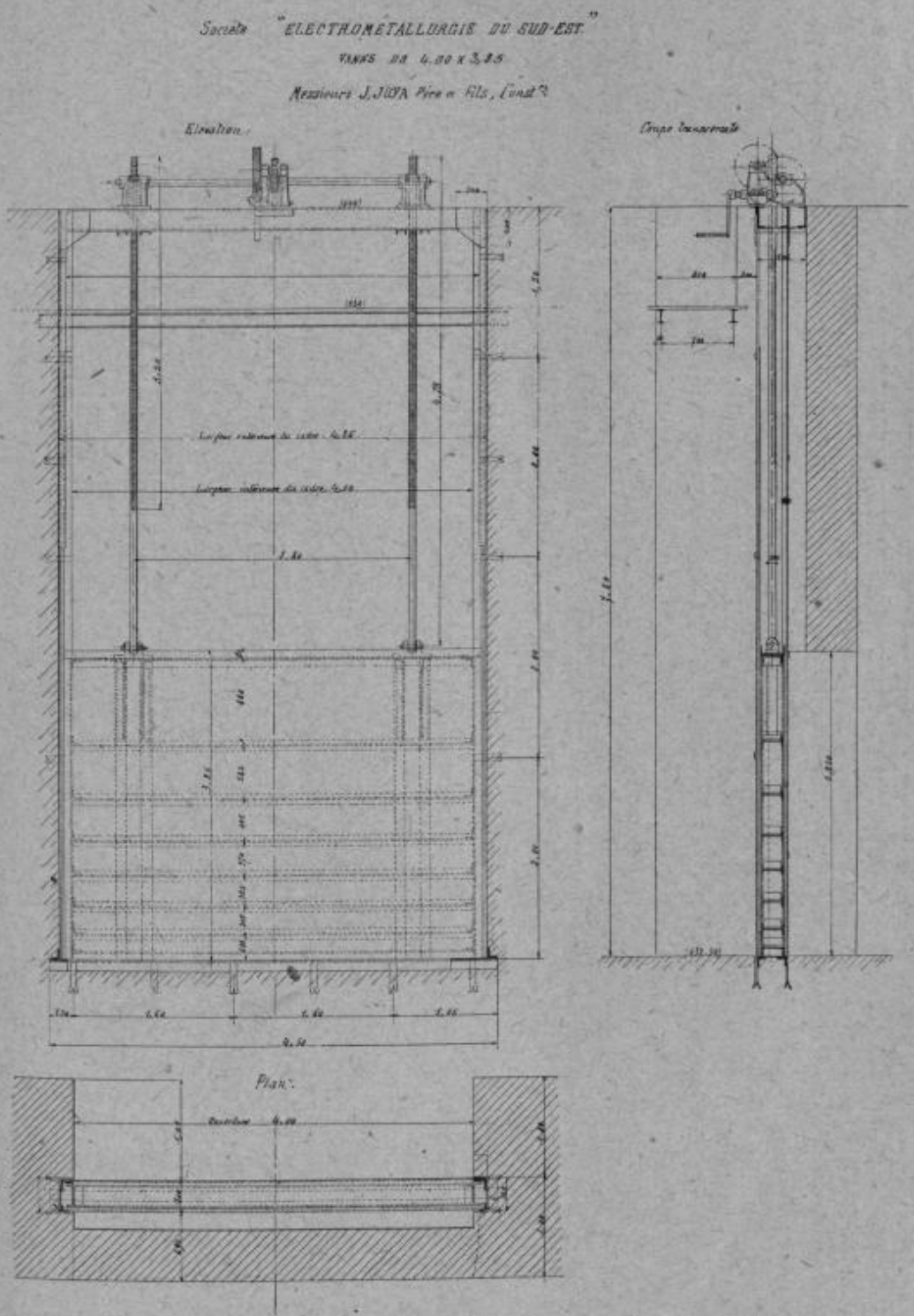


FIG. 665. — Vanne de 4m,00 × 3m,25 (J. Joya père et fils, constructeurs).

d'enlever automatiquement et sûrement les corps étrangers au fur et à mesure de leur arrivée. Cet appareil est représenté par la (*fig.* 669).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut éviter le feutrage des grilles par les feuilles mortes, en disposant en avant des turbines une légère fermeture provisoire, bouchée vers le milieu par un tambour garni de grillage métallique, que la turbine entraîne.

Les grilles placées à l'origine des conduites forcées doivent être assez développées pour réduire la vitesse de l'eau qui les traverse et pour dimi-

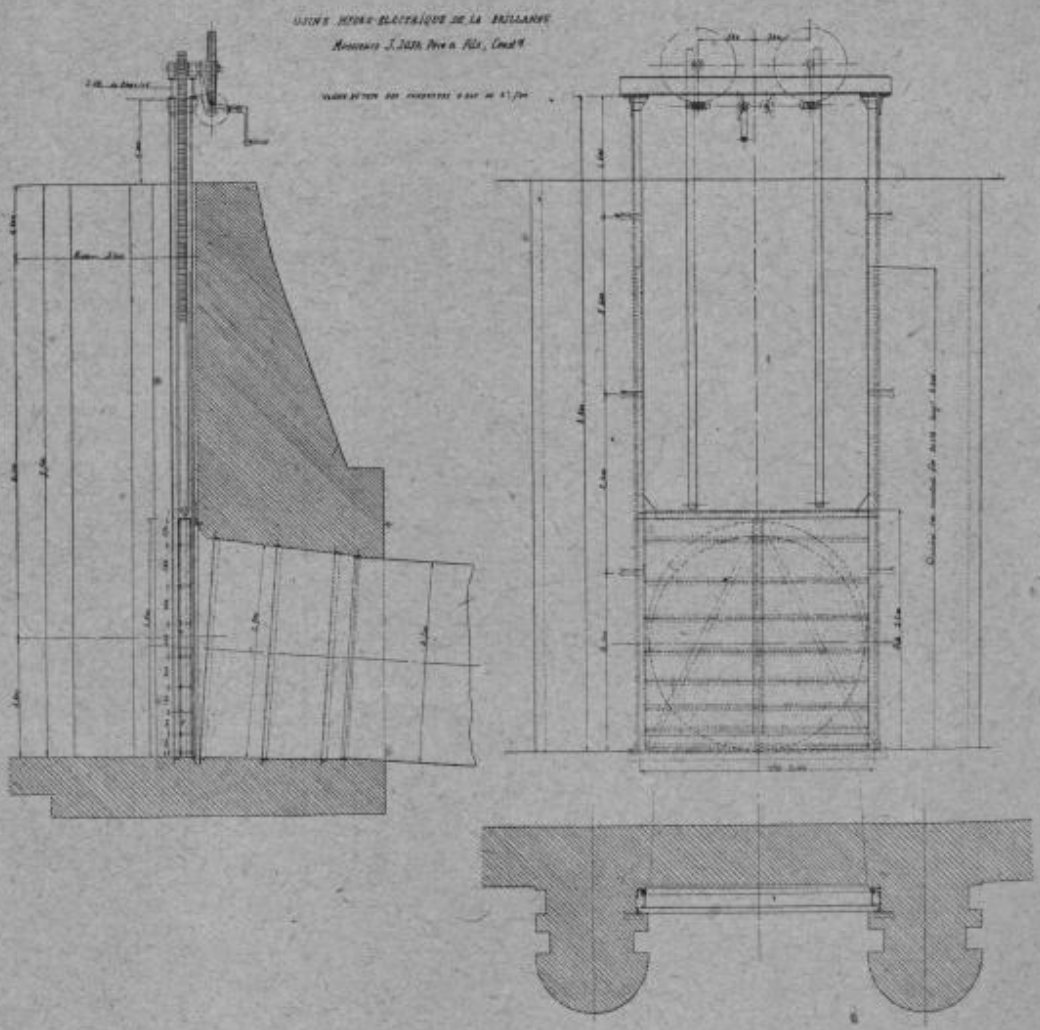


FIG. 666. — Vanne de tête des conduites de 2m,700 de diamètre de l'usine de la Brillanne (J. Joya père et fils, constructeurs).

nuer la perte de charge qu'elles occasionnent toujours. Pour éviter la formation de glaçons auprès des grilles ; à l'usine de l'Ontorio Power, on envoie une circulation de vapeur ; à l'usine d'Aelfkarby (Suède), on a constitué les grilles par des profilés groupés sept par sept et écartés de 20 millimètres entre eux. Ces profilés peuvent être chauffés par un courant électrique à basse tension et cet échauffement est suffisant pour élever au passage la température de l'eau et prévenir sa congélation sur place en hiver

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quand la température est descendue à 0°. C'est au-dessous de ces grilles que sont installées les turbines.

Le nettoyage des grilles à l'usine d'Augst, sur le Rhin, s'opère au moyen des vannes disposées dans les chambres des turbines. Une conduite d'eau, dont l'ouverture, située en dessous de la grille peut être obturée par une vanne, fait communiquer directement la moitié correspondante de la chambre d'eau avec l'aval. Quand on veut nettoyer une des moitiés de la

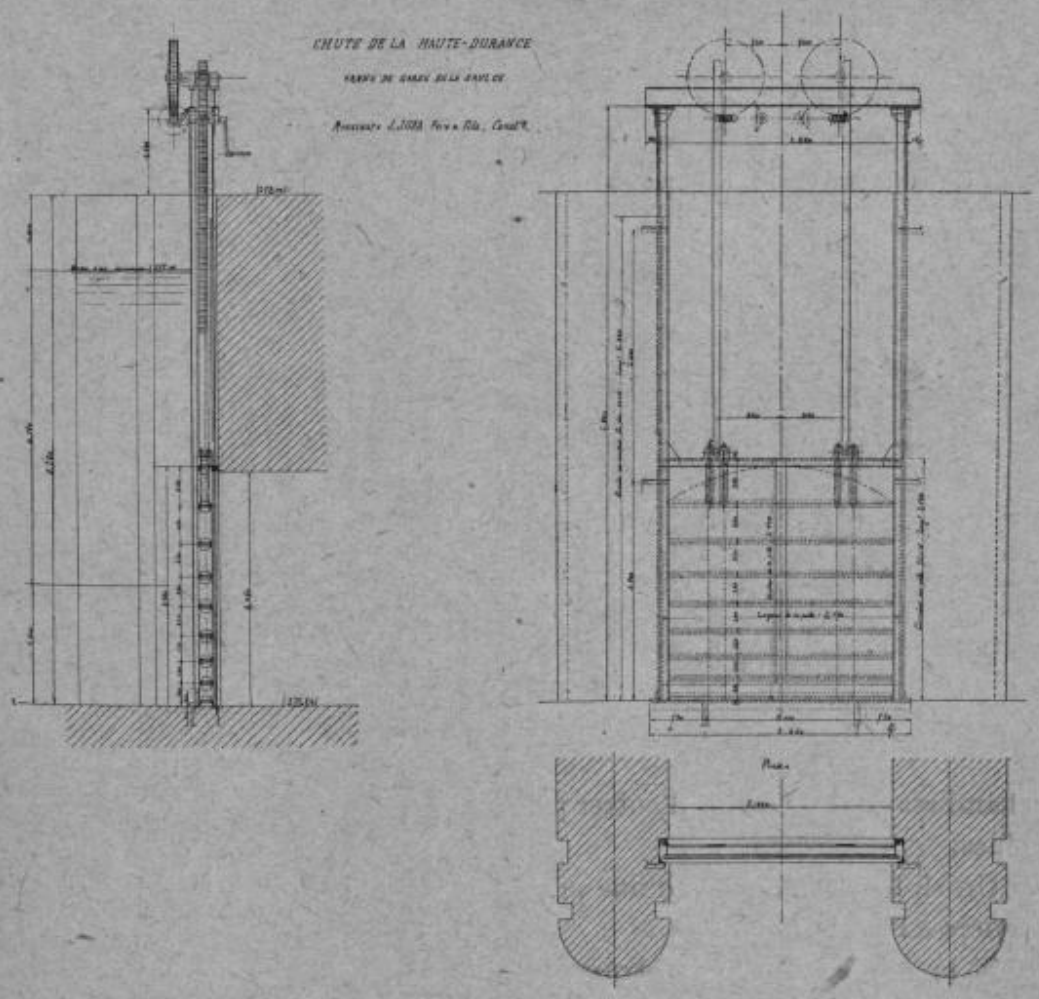


Fig. 667. — Vanne de garde de la Saulce (chute de la Haute-Durance).

grille, on ferme la vanne amont correspondante et on ouvre la vanne de la conduite dont nous avons parlé.

L'eau arrive alors par l'autre moitié de la chambre, traverse la grille d'arrière en avant et entraîne les corps qui avaient été retenus par la grille, directement à l'aval, par la conduite. Ce nettoyage par retour d'eau fonctionne bien quand on actionne les vannes par moteurs électriques, celle d'amont à la vitesse de 1 mètre à la minute, celle de la conduite de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vidange à la vitesse de 0m,50 à la minute. En un quart d'heure, un homme peut nettoyer les deux moitiés d'une grille.

La maison Bouchayer et Viallet a imaginé un appareil pour le nettoyage automatique des grilles représenté schématiquement par la (*fig.* 668).

Quand la grille, ordinairement constituée par des panneaux en tôle perforée disposés horizontalement, se trouve partiellement bouchée par les matières étrangères contenues en suspension dans l'eau, le sens de la circulation de la masse d'eau est renversé, d'où décollement des matières plaquées sur la grille, qui sont rejetées à la rivière par une chasse d'eau énergique.

Ce renversement de courant et cette chasse sont produits par le même appareil ; G est la grille en tôle perforée et le sens normal du courant est celui des flèches en traits pleins ; l'eau venant de la retenue A traverse les

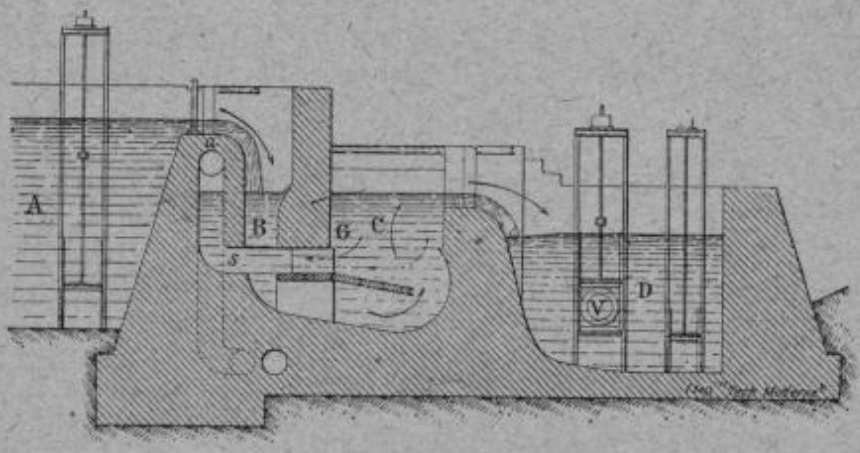


FIG. 668.

chambres B, C, D avant d'entrer par la vanne V dans la conduite des turbines.

Un siphon *s* débouche d'une part sous la grille et d'autre part dans la rivière à l'aval du barrage.

Si la grille vient à s'obstruer, le niveau s'élève dans la chambre B ; quand il atteint le sommet *a* du siphon, celui-ci s'amorce et le mouvement inverse se produit. L'eau suit alors le sens des flèches en pointillé, pénètre dans le siphon et entraîne à la rivière les feuilles et matières étrangères.

L'eau s'abaisse alors dans la chambre C ; arrivant au niveau de la grille G, l'air pénètre dans le siphon, celui-ci se désamorce et l'opération recommence d'elle-même quand une nouvelle chasse devient nécessaire.

A l'usine de Wylhem, disposée sur le même barrage que l'usine d'Augst, la vanne qui permet de mettre à sec la chambre d'une turbine, a 9 mètres de largeur et est divisée en deux panneaux, dont chacun peut être manœuvré indépendamment au moyen d'une crémaillère soit par moteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrique, soit à la main. La chambre peut être vidée par une conduite dite de vidange.

On nettoie les grilles au moyen d'une sorte de rateau mécanique de $2^m,60$ de largeur monté sur un bâti que porte un chariot roulant. Lorsqu'on fait descendre ce rateau, on le maintient à une certaine distance en avant de la grille, en déplaçant latéralement son bâti. Ce système de rateau mécanique a déjà rendu de bons services à l'usine de Rheinfelden.

V. — TRAVAUX ET INSTALLATIONS ACCESSOIRES

193. Travaux de curage. — Le curage des cours d'eau a pour objet d'enlever au lit les vases que charrient les eaux ou les produits des érosions des berges et aussi les dépôts, qui peuvent se former à l'amont d'un barrage. Ce dernier fait se présente surtout quand les ouvrages régulateurs des usines ont des dimensions trop faibles. Les travaux de curage des cours d'eau non navigables ni flottables sont régis par la loi des 12-20 août 1790 et par celle du 14 floréal an XI. Ces travaux intéressent les usiniers par le fait que le relèvement progressif du plan d'eau nuit à la marche régulière des usines ; il rend, en outre, plus fréquents les débordements du cours d'eau. Les intéressés aux travaux de curage sont : les riverains immédiats ou propriétaires des rives, qui sont exposés aux dangers des crues, des érosions de ces rives, ainsi qu'aux infiltrations ; les propriétaires des terrains non riverains, terrains qui s'égouttent dans les cours d'eau, ce qui peut amener un excès d'humidité et des inondations ; enfin, les usiniers et autres propriétaires de barrages.

En ce qui concerne les travaux d'entretien des rivières, les règlements en sont nombreux ; ils ont trait aux modes d'exécution des travaux et de répartition des dépenses.

Lorsque le curage d'une partie d'un cours d'eau a été réclamé par les intéressés, les ingénieurs en dressent l'avant-projet, et le dossier est soumis par les soins du préfet à une enquête de vingt jours dans chacune des communes de la situation des lieux, à la mairie desquels est déposé un registre destiné à recueillir les observations des intéressés.

Si une entente ne peut se faire entre ceux-ci, le préfet, sur la proposition de l'ingénieur en chef, convoque en assemblée générale tous les intéressés aux travaux de curage.

Si l'assemblée générale réunit le nombre des adhésions prévues à l'article 12 de la loi des 21 juin 1865 et 22 décembre 1888, le préfet procède aux formalités prescrites par cette loi, en vue de la réunion des intéressés en association syndicale autorisée. Au cas où l'assemblée générale n'a pu aboutir, les ingénieurs préparent un projet de décret, qui est lui-même

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soumis à une nouvelle enquête de quinze jours dans chacune des communes spécifiées plus haut.

Si enfin les intéressés continuent à s'opposer aux travaux de curage, et si la salubrité n'est pas en jeu, l'Administration décide ou non la réglementation ; dans le cas de l'affirmative, elle provoque l'émission du décret,

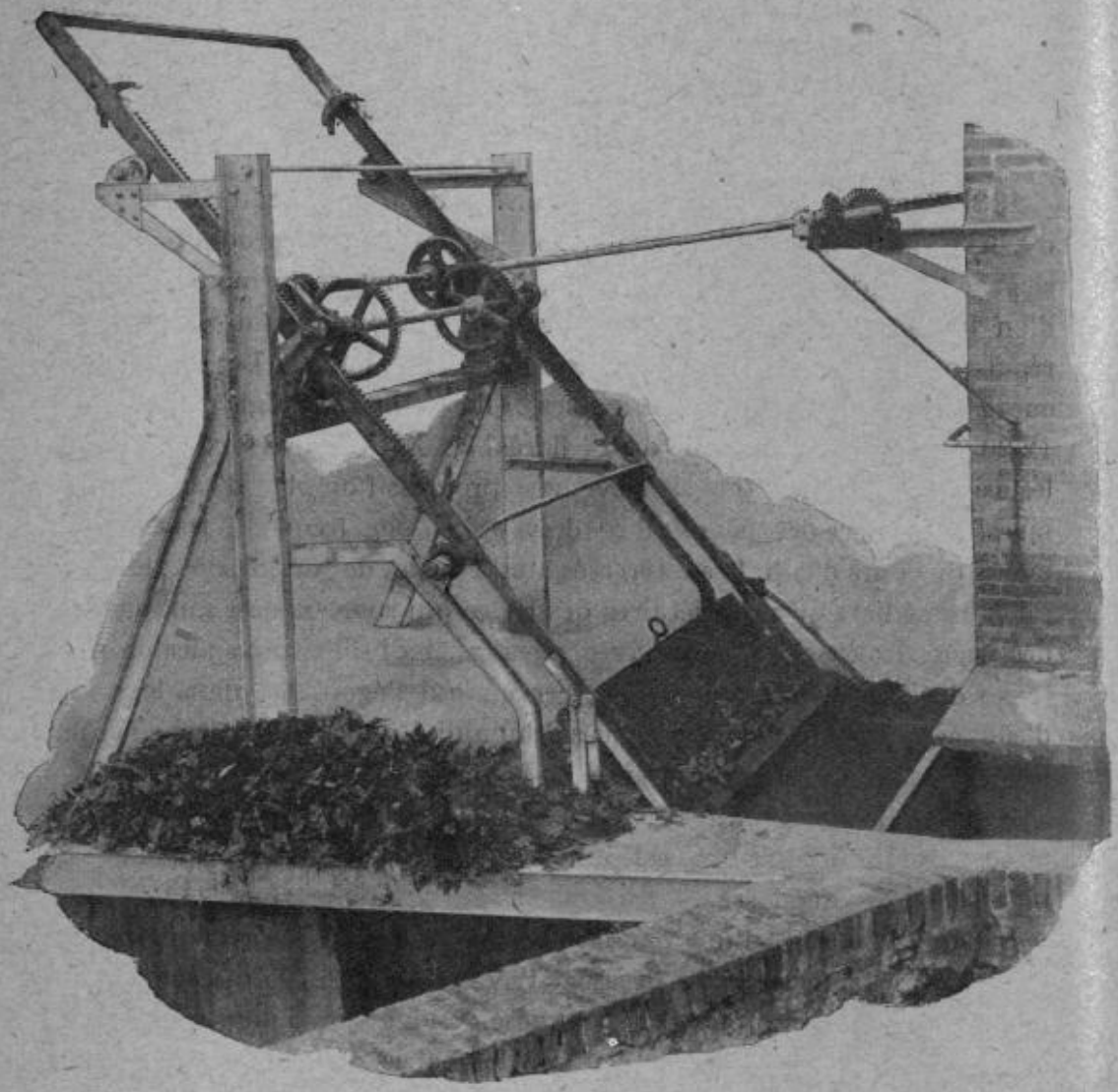


Fig. 669. — Appareil dégrilleur système A. et H. Bouvier.

et les projets définitifs sont dressés par les ingénieurs et exécutés sous leur direction par les soins de la commission exécutive.

Quand l'opération nécessite l'acquisition de terrains par voie d'expropriation publique, les dits travaux sont déclarés d'utilité publique.

194. Endiguements. — Les variations de régime considérables auxquelles les cours d'eau torrentiels sont sujets entraînent à des travaux de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

défense des rives, soit dans la partie supérieure du bassin, dans le but de diminuer le ruissellement des eaux pluviales et de favoriser l'imbibition de celles-ci dans le sol, soit en régularisant l'écoulement des eaux de crues à l'effet de les rendre autant que possible inoffensives.

Dans le premier cas, on a recours à des travaux de reboisement et de gazonnement, principalement dans le haut des bassins de réception ; puis on cherche à s'opposer aux ravinements par la création de petits barrages disposés en gradins.

Dans le goulot (§ 2), on procède au déblaiement des blocs et on les range en digues latérales, et sur le cône de déjection on s'attache à encaisser le cours d'eau entre des digues longitudinales formées à même avec les gros blocs qui se trouvent sur place.

L'endiguement des cours d'eau torrentiels n'est pas d'un effet très utile, au point de vue agricole, si les crues n'exercent pas sur le sol des ravinements conséquents ; au contraire, ces crues déposent un limon très fertilisant. Tel est le cas des crues de printemps des torrents des Alpes. Mais l'endiguement devient impérieux comme obstacle contre les crues d'été. Alors on a recours à des digues insubmersibles ou submersibles ; ces dernières, qui ne sont élevées seulement qu'au-dessus des crues moyennes, sont préférables aux premières à tous égards.

On les dispose soit parallèlement aux rives, dans le cours d'eau ou sur les bords, soit perpendiculairement (elles prennent dans ce cas le nom d'épis), soit en forme de té.

Pour que les digues submersibles constituent une défense efficace, il faut, d'après M. Lévy-Salvador, qu'elles ne créent pas un obstacle à l'épanouissement des eaux de crues et qu'elles ne forment pas une sorte de barrage transversal sur lequel les eaux puissent se déverser et provoquer l'affouillement des terrains situés en arrière.

Quand on cherche à fixer le lit d'un torrent, après s'être préoccupé du tracé, il faut étudier une section transversale qui, tout en permettant l'écoulement facile des eaux de grandes crues, concentre les eaux moyennes dans un emplacement où leur pouvoir entraînant puisse s'exercer complètement.

Les digues transversales ou épis sont destinées soit à éloigner le courant des rives, soit à relier aux coteaux insubmersibles les ouvrages limitant le lit mineur ou d'étiage. Parfois on place des épis sur chacune des rives et disposés vis-à-vis. Les épis en té s'emploient pour la défense soit d'un centre habité, soit d'une faible partie de la vallée particulièrement menacée.

Suivant les ressources locales, on construit les digues submersibles, en terre, clayonnage ou enrochements. On protège les talus en rivière et à leur base par des perrés à pierre sèche. Les épis qu'on emploie pour éloi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gner le courant des rives, qu'il tend à affouiller, sont inclinés à l'amont ; l'angle d'inclinaison de leur axe avec la normale à la rive et au point d'entraînement est ordinairement de 20° environ. Ils sont plongeants, de manière à faire à leur extrémité une saillie aussi faible que possible sur le lit. Comme pour les revêtements des digues, les défenses des rives s'exécutent souvent en maçonnerie, et on fait appel aux perrés maçonnés, aux revêtements en briques, aux perrés à pierres sèches.

Les travaux d'endiguement sur les rivières non navigables ni flottables sont régis par l'article 33 de la loi du 16 septembre 1807 et les lois des 21 juin 1865 et 22 décembre 1888.

195. Rectification des cours d'eau. — On peut avoir à opérer la rectification d'un cours d'eau dans le but d'augmenter la vitesse et par suite le débit, vitesse cependant limitée par la considération que nulle part elle ne doive dépasser celle qui pourrait corroder les berges.

En règle générale, on doit éviter de multiplier les changements de pente, car il y a avantage à augmenter la longueur des sections. Le lit ayant par exemple une forme trapézoïdale, on connaît *a priori* l'inclinaison des talus ; il reste donc à déterminer la largeur du cours d'eau au plafond et la profondeur du lit. Il y a tout d'abord intérêt à augmenter la profondeur aux dépens de la largeur, ce qui facilite en outre l'écoulement des crues de quelque importance ; mais elle ne doit pas être telle qu'elle puisse déterminer l'assèchement des terres riveraines ; en un mot, il faut tenir soigneusement compte de la revanche de la vallée sur le plan d'eau à l'étiage, revanche qui varie avec la perméabilité du sol, la nature des cultures, les conditions climatériques, etc. La meilleure position du plan d'eau étant définie, la cote correspondante pour le plafond est connue et la hauteur de la lame d'eau s'ensuit. Il ne reste plus alors d'inconnue que la largeur au plafond, que l'on calcule par les formules courantes.

196. Chemins d'accès. — Les travaux d'aménagement des chutes de montagne exigent des travaux accessoires qui prennent parfois une réelle importance ; parmi ceux-ci, les plus fréquents sont ceux relatifs à l'établissement de chemins d'accès pour l'approche à pied d'œuvre des matériaux de construction et du matériel d'exploitation, qui présente parfois des difficultés assez grandes dans les passages abrupts et à déclivités considérables ou parmi les éboulis de gros blocs. L'étude doit aboutir à un tracé aussi économique que possible, en évitant les percements à travers les rochers, les mouvements de terre trop considérables, surtout si l'on a en vue un chemin carrossable, qui exige une largeur d'au moins $2^m,50$ dans les parties droites et de 4 mètres dans les tournants, et des rampes ne dépassant pas $0^m,10$. Dans les fortes pentes transversales du terrain, les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

remblais peuvent être soutenus par des murs de soutènement en pierres sèches. Parfois la construction des chemins entraîne celle de ponts, d'aque-

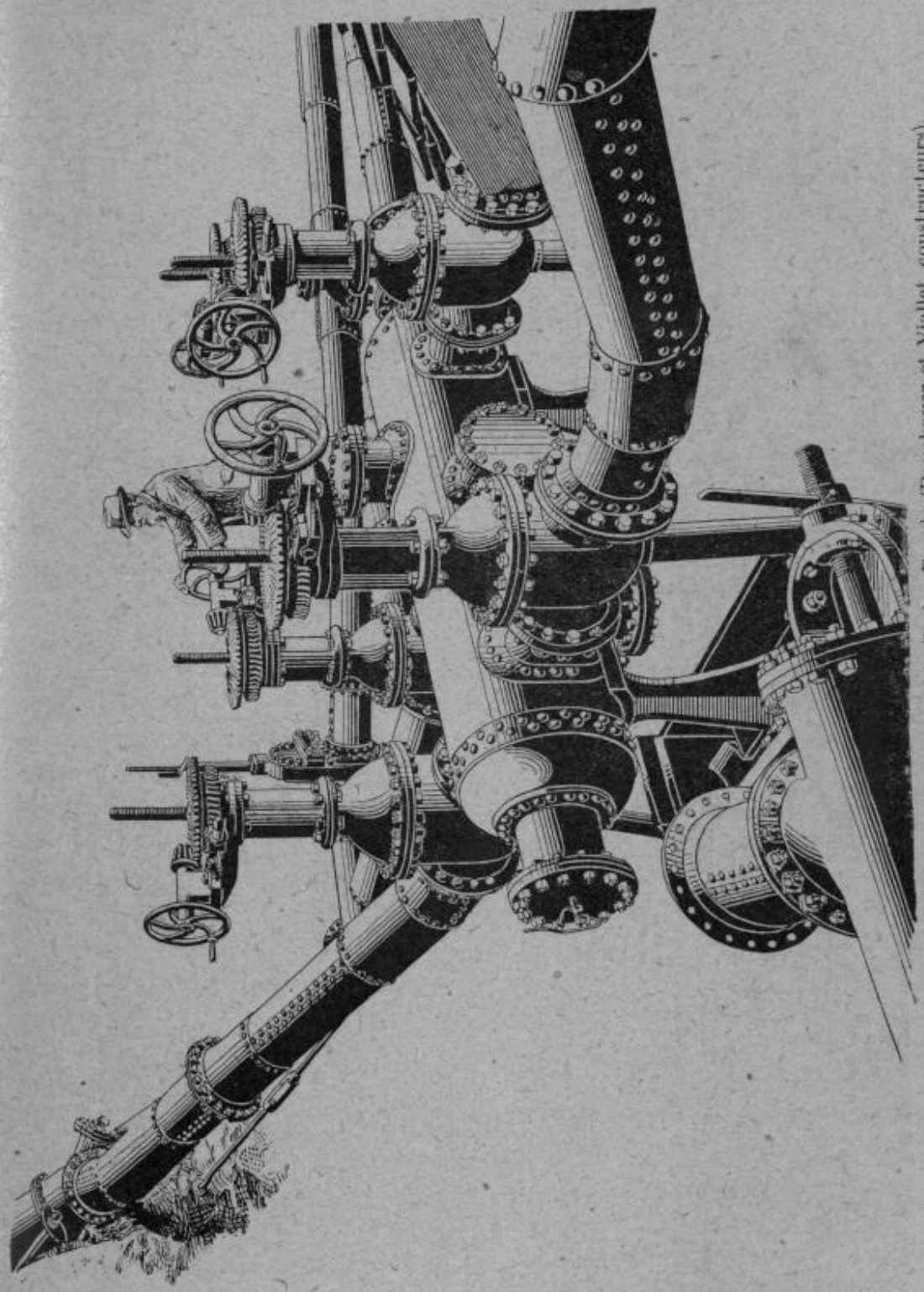


Fig. 670. — Collecteur avec robinet-vannes de l'usine Bergès (Bouchayer et Viallet, constructeurs).

ducs, dont le coût augmente d'une façon notable celui de l'installation générale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A l'usine de Jonage, dont la mise en valeur a nécessité des travaux de captation considérables, on a été obligé de construire sept ponts impor-

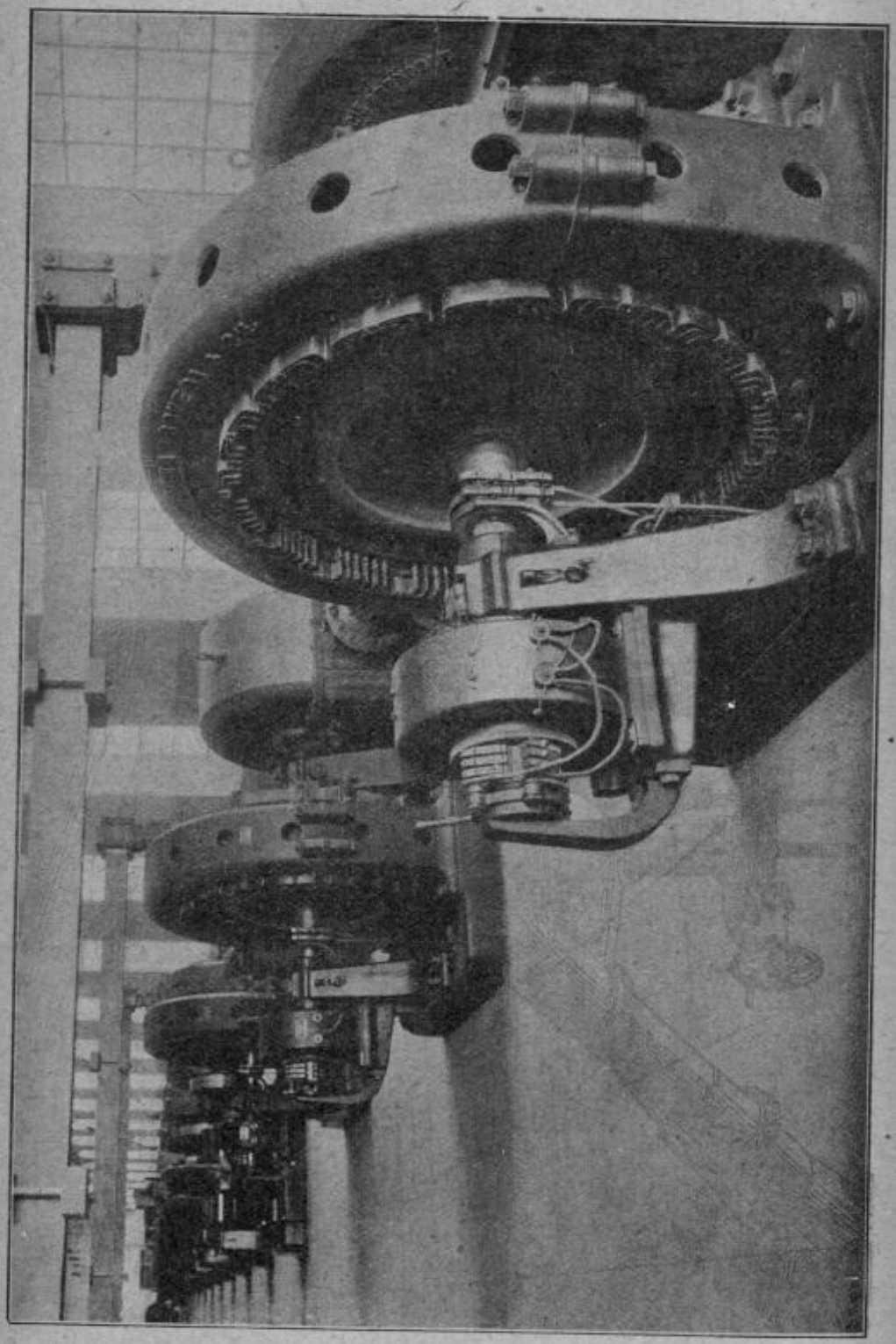


Fig. 671. — Salle des machines de la Société électrométallurgique P. Girod à Ugine (Savoie).

tants pour rétablir les communications interceptées par les emprises du canal d'amenée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

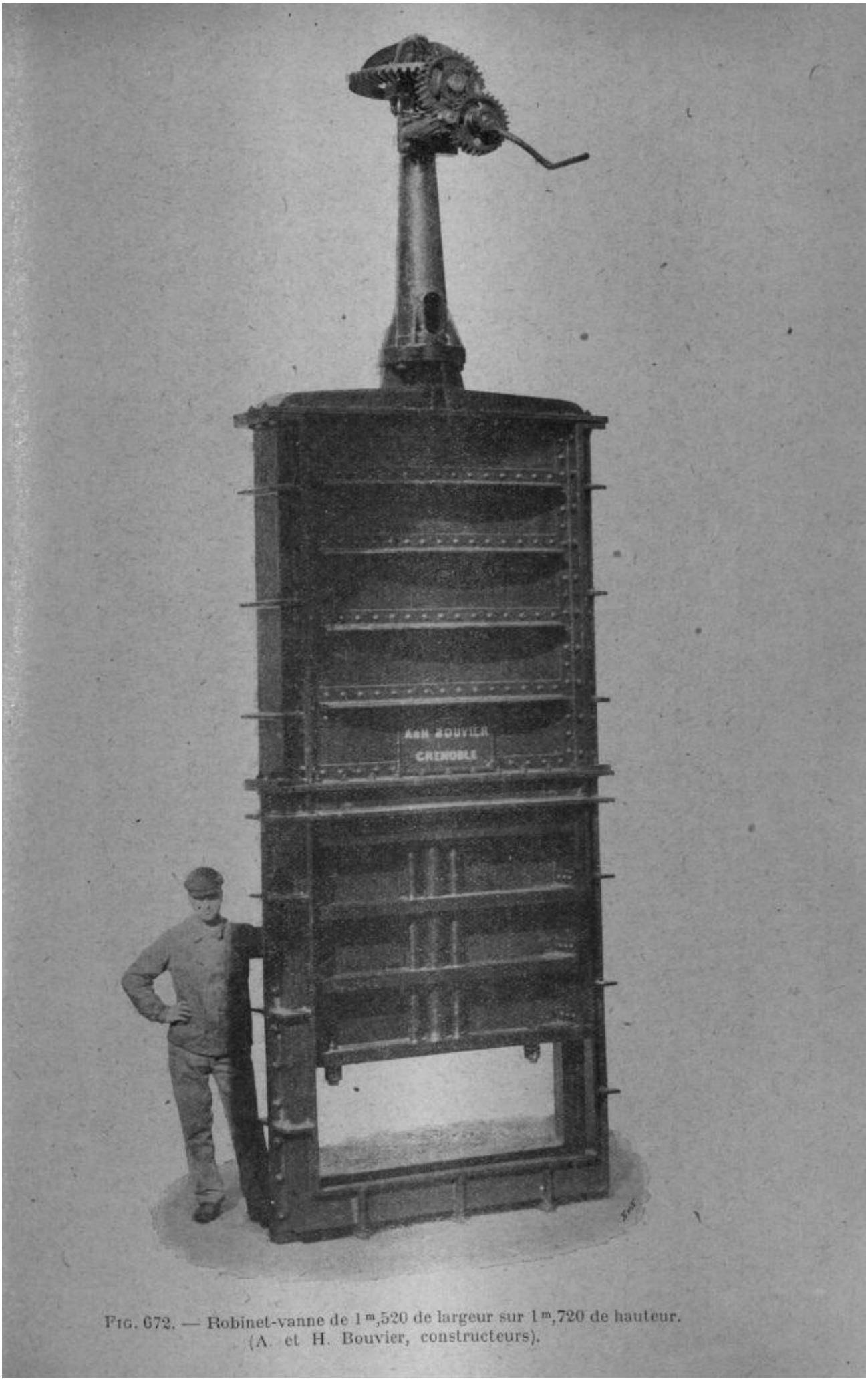


Fig. 672. — Robinet-vanne de 1 m,520 de largeur sur 1 m,720 de hauteur.
(A. et H. Bouvier, constructeurs).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Trois de ces ponts sont à voie charretière avec une largeur de chaussée de $2^m,50$ et des trottoirs de $0^m,75$ chacun, soit une largeur libre de 4 mètres pour la circulation. Les quatre autres sont à double voie et présentent une largeur de 5 mètres et des trottoirs de $0^m,75$, soit une largeur libre de $6^m,50$.

Tous ces ponts sont à piles et culées en maçonnerie et à tablier métallique et les chemins de halage et de contre-halage passent sous les ponts. Une banquette de 4 mètres pour le halage et une banquette de $1^m,50$ pour le contre-halage sont établies devant les culées correspondantes à 1 mètre au-dessus des plus hautes eaux navigables; de plus, les chemins de halage et de contre-halage sont raccordés avec les chaussées des ponts par des rampes ou des déviations latérales, de façon qu'à chaque pont les chevaux puissent passer d'une rive à l'autre du canal.

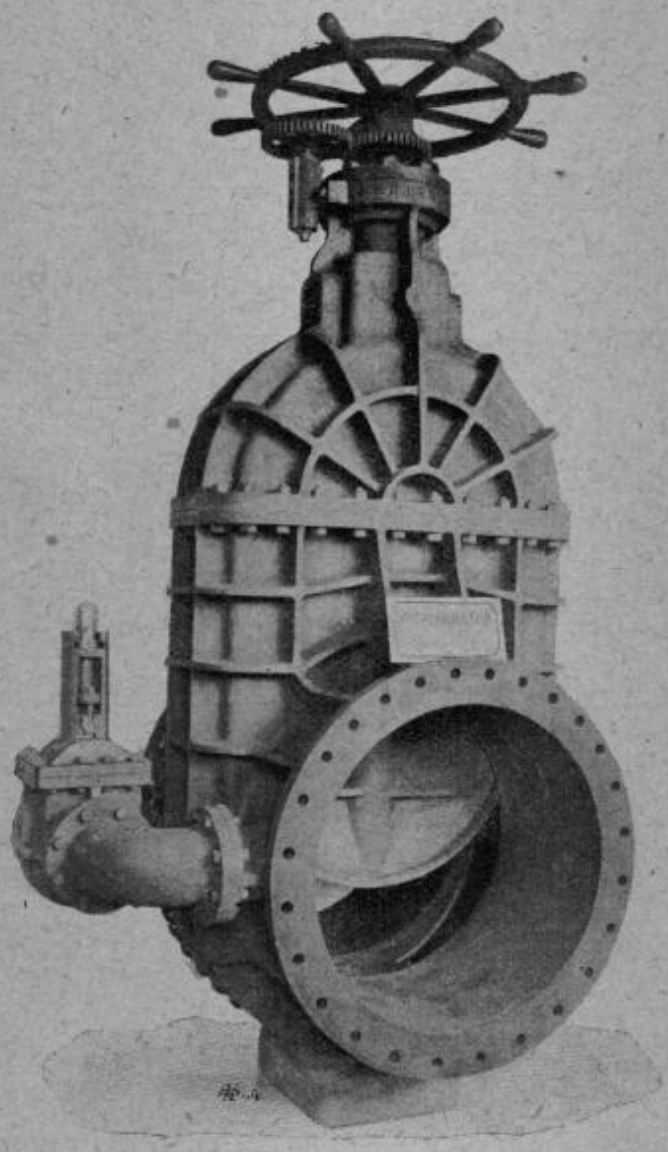


Fig. 673. — Robinet-vanne de 900 millimètres de diamètre avec by-pass, pour chute de 150 mètres (A. et H. Bouvier, constructeurs).

Les tabliers sont des poutres droites à travées solidaires. Leur type ne diffère que par l'absence ou la présence de contreventement supérieur; ceux sans contreventement ont la préférence des habitants, car le contreventement supérieur, à cause de la hauteur minima réglementaire ($4^m,30$), apporte quelque gêne à la circulation des véhicules encombrants (voitures de foin, de paille, de bois), dont le chargement à la campagne n'est pas réglé par un gabarit comme dans une gare de chemin de fer.

Les dépenses pour les travaux exécutés aux altitudes élevées sont en-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

core accrues de ce fait que la campagne annuelle n'a qu'une faible durée, parfois quatre mois au maximum.

On peut avoir aussi à dévier des chemins ou sentiers existants ; ces rectifications demandent à être étudiées avec beaucoup de circonspection, pour concilier le côté économique de l'opération avec les besoins des populations, qui ne supporteraient pas bénévolement des pentes trop rapides, ou des allongements du circuit à parcourir. Les ouvrages destinés à livrer passage aux ruisseaux sous les canaux d'amenée, construits à ciel ouvert, consistent en buses, buses-siphons, aqueducs, ponts-aqueducs, et ceux supérieurs aux cours d'eau, en ponts-aqueducs, pour la traversée des ravins.

197. Évacuateurs. — Après ce que nous avons déjà dit sur ce genre d'ouvrage, nous ajouterons que, pour que la chasse des dépôts puisse s'effectuer convenablement, il faut que l'action de l'évacuation se fasse

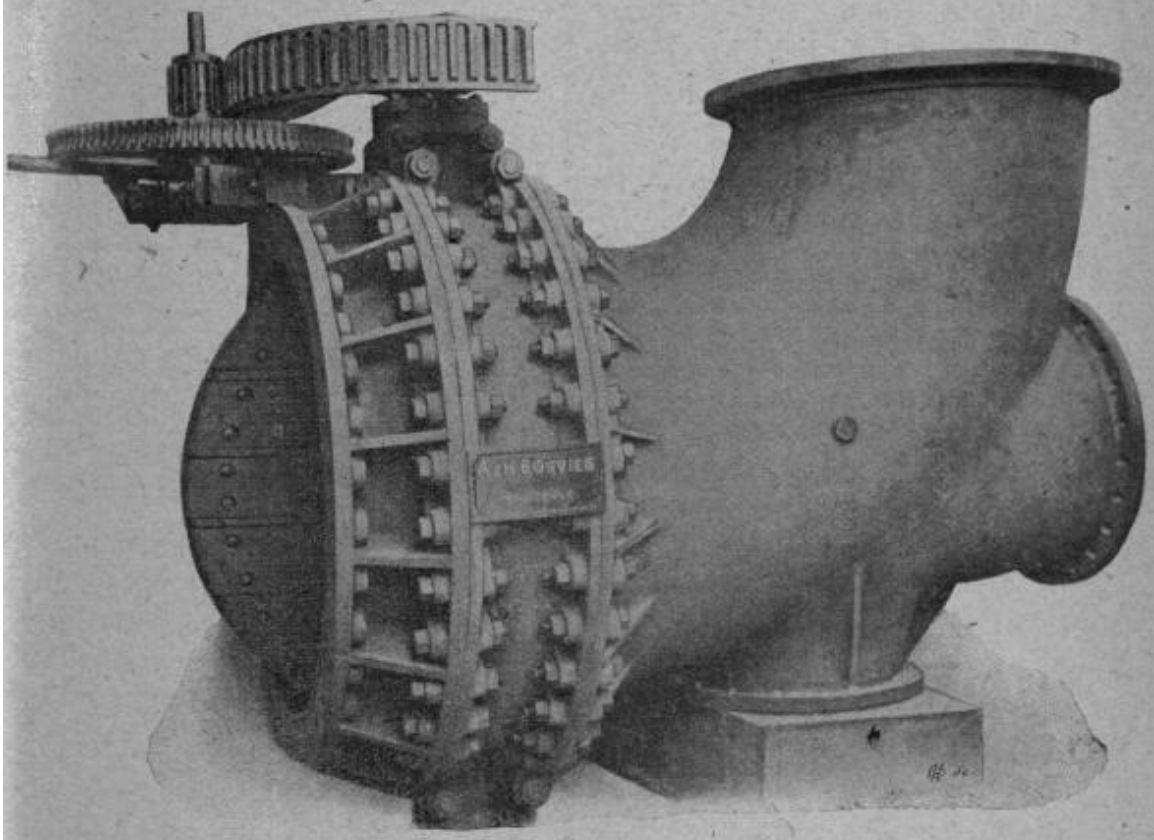


FIG. 674. — Papillon à battues de 1 m,500 de diamètre, pour chute de 60 mètres. (A. et H. Bouvier, constructeurs).

sentir très loin et que le mouvement des dépôts vers le barrage se produise dans des conditions satisfaisantes.

Dans les digues installées sur les cours d'eau pour les services d'irriga-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion, on emploie des systèmes qui ont pour but de diluer préalablement les vases et de les évacuer par siphonnement d'eau très chargée en limon (systèmes Calmels, Delamarre, Jandin, Souleyre, Trémaux, etc.).

Lorsqu'on ne veut recourir à des chasses que dans des périodes assez éloignées, il convient de donner au réservoir une capacité supérieure à celle réellement utile, pour tenir compte de la place prise par les dépôts.

Les galeries évacuatrices peuvent être établies dans le corps même du barrage ou au moyen de tunnels disposés latéralement au barrage, ou en utilisant les deux systèmes à la fois.

Les évacuateurs installés à l'usine hydroélectrique de Ponsonnas (§ 407) offrent un exemple tout particulièrement intéressant de ce genre de travaux.

L'évacuation des apports de crues a été envisagé d'une façon toute nouvelle par les auteurs du barrage de Fontbéton sur la Durance, décrit aux (§§ 119 et 277). (Voir Planche XI).

Le système adopté consiste à faire deux opérations simultanément : dévasement par des robinets-vannes, disposés dans le corps du barrage et dégravement partiel à l'amont sous l'appel de vannes et d'un canal de décharge et enlèvement des graviers par procédé mécanique.

Les robinets-vannes, de $2^{m},50$ de diamètre, sont installés par fraction de 8 à 22 mètres et 31 mètres en contre-bas de la crête. Leur emplacement est prévu du côté opposé à la prise d'eau à l'effet de rejeter les graviers le plus loin possible de cette dernière.

L'emploi des robinets-vannes a été préféré à celui des vannes Stoney par la raison que ces dernières, avec une hauteur de 18 mètres, seraient peu faciles à manœuvrer et présenteraient l'inconvénient de couper le corps de barrage.

Pour éviter l'accès des glaçons dans les chambres des turbines, l'Ontario Power Company [qui a disposé son usine génératrice au pied même de la chute canadienne (Niagara)] a construit un lac artificiel, séparé de la rivière par une jetée en béton, où se fait la prise d'eau, parallèlement à l'axe du courant, et sur une longueur d'environ 200 mètres, et de façon que les glaçons restent à la surface.

L'eau admise dans cette première prise entre dans un second lac intérieur où on a pris les mêmes précautions et où, comme dans le premier lac, l'eau n'est captée qu'à 3 mètres sous son niveau minimum.

De plus, les prises d'eau pour les conduites se rendant à chaque turbine ont lieu à l'intérieur d'un bâtiment chauffé et muni de dispositifs de secours pour faire fondre les glaçons, s'il en passait malgré toutes les précautions prises à l'amont.

Le moyen le plus simple d'évacuation est d'établir en contrebas de la crête du barrage un déversoir pour évacuer les eaux surabon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dantes sans que les eaux ne passent par-dessus la crête du barrage. On dispose le déversoir sur l'un des flancs de la vallée, perpendiculairement à la direction du barrage, en lui donnant tout le développement désirable ; puis un canal de décharge à proximité reçoit les eaux de trop-plein du déversoir et un orifice ménagé dans le barrage accepte les eaux du canal pour les déverser à l'aval. On peut établir deux déversoirs, un à chaque extrémité du barrage. On admet, à défaut de connaissance sur le débit des plus fortes crues, 10 à 20 litres par seconde pour chaque hectare du bassin hydrologique d'alimentation du bassin.

On ne peut admettre de laisser l'eau des crues passer par-dessus le barrage que pour des ouvrages de peu de hauteur, et quand la gorge où ils sont établis ne permet pas la création d'un déversoir de crues. Dans ce cas, on construit des galeries dans le rocher de façon à former des siphons qui s'amorcent automatiquement lorsque l'eau dépasse une certaine hauteur et aboutissant à quelque distance à l'aval du barrage.

On calcule le déversoir par la formule de Bazin :

$$q = alh\sqrt{2gh}.$$

q, quantité d'eau débitée par seconde ; a, coefficient qui varie avec la dimension du déversoir ; h, hauteur maximum que l'eau ne doit pas dépasser au-dessus du seuil du déversoir, et l, longueur du déversoir.

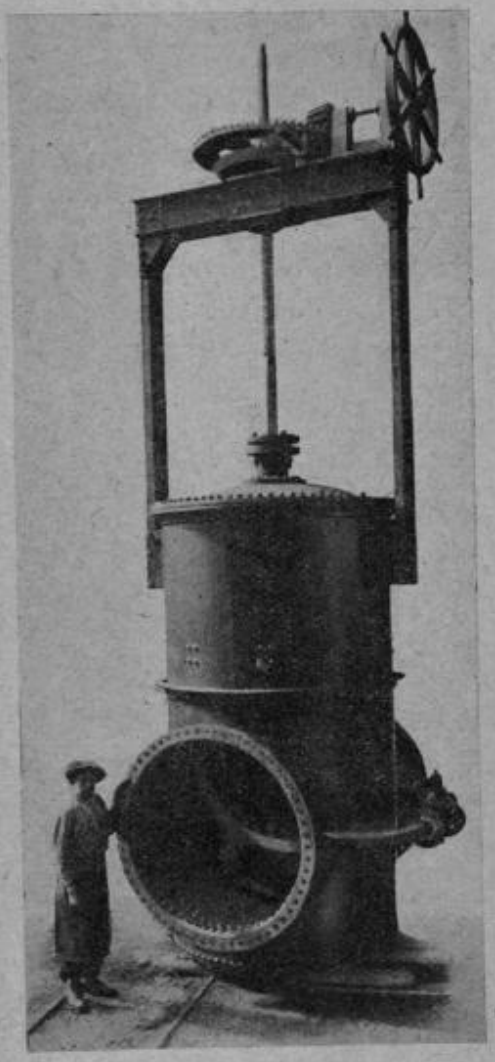


Fig. 675. — Grand robinet-vanne en tôle (usines de la Vis à Madières) (Bouchayer et Viallet, constructeurs).

Si on désigne par H la hauteur du sommet du déversoir au-dessus du sol, mesurée à 1 mètre en avant de son parement amont, la valeur de a est donnée par la relation suivante, pour le cas où le seuil est horizontal :

$$a = \left[1 + 0{,}55\left(\frac{h}{h+H}\right)^2\right]\left(0{,}405 + \frac{0{,}003}{h}\right)\left(0{,}70 + 0{,}185\,\frac{h}{c}\right),$$

où c est la largeur du déversoir.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand $h < 2c$, la dernière parenthèse doit être remplacée par l'unité. La hauteur H est en général déterminée par la condition que le canal d'évacuation puisse débiter toute l'eau qui passe sur le déversoir.

On peut augmenter la capacité d'évacuation du déversoir, en divisant celui-ci en deux parties arasées à des niveaux différents, la partie la plus basse étant munie de vannes qui s'ouvrent automatiquement lorsque l'eau atteint dans le réservoir, sous l'effet d'une forte crue, un niveau déterminé.

Pour l'évacuation des dépôts occasionnés par les galets, les graviers et les gros sables, on établit à l'entrée du réservoir un petit barrage noyé de faible hauteur; quelques dragages opérés de temps à autre empêchent ces dépôts de passer par-dessus le barrage et de venir se déverser dans le réservoir.

198. Appareils accessoires. — Indépendamment des vannes ordinaires qui servent à interrompre tout l'afflux d'eau, et à faire cesser le fonctionnement des turbines, qui ne sont jamais pourvues de régulateurs automatiques, il y a à considérer les vannes, soupapes et autres organes chargés de régler l'amenée de l'eau à la turbine, qui sont de trois espèces principales : 1° les vannes circulaires d'acier interposées entre les conduites et la turbine, et capables de se mouvoir parallèlement à l'axe de cette turbine (ce genre de vanne est employée à la station de Niagara Falls et pèse avec les contrepoids environ 12 tonnes); 2° les vannes pouvant tourner d'un petit angle autour d'un pivot placé près de leur centre géométrique ; 3° les soupapes à pointes ou tubulures mobiles semblables à celles que l'on emploie sur les turbines à impulsion et particulièrement pour les roues tangentielles travaillant sous de hautes chutes.

FIG. 676. — Passerelles de manœuvre et vannes de l'usine de Bréda.

Il y aurait beaucoup à dire sur la forme des soupapes qu'il est préférable d'adopter, mais comme il s'agit, pour la plupart des cas, d'adaptation à des conditions locales particulières, qui varient en outre selon le genre de turbine que l'on emploie, on doit préférer, suivant les installations, l'un quelconque des trois types aux deux autres. Cependant, on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut remarquer que les turbines Francis sont ordinairement munies de soupapes à rotation et que le troisième modèle, c'est-à-dire les soupapes à pointes mobiles, sert principalement à régler la marche des roues Pelton. Pour de très grandes hauteurs de chute, où l'interruption totale ou partielle pourrait présenter quelque danger pour l'état des tuyaux d'amenée, on emploie alors une soupape spéciale qui permet de faire automatiquement varier, augmenter ou diminuer le diamètre de l'orifice.

Selon leur adaptation spéciale les vannes ou soupapes prennent des désignations qui indiquent plus particulièrement les rôles qu'elles jouent dans les installations, tels que déchargeurs, déclancheurs à action automatique, en cas d'accélération de vitesse, etc.

Les (*fig.* 669 à 675) représentent quelques types de robinets-vannes et appareils accessoires dont les légendes qui accompagnent ces figures montreront suffisamment le but et la disposition.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XI

RÉGULARISATION DES USINES HYDRAULIQUES AU MOYEN DES LACS OU RÉSERVOIRS NATURELS

I. — COURS D'EAU RÉGULARISÉS PAR DES LACS

199. Volumes d'eau à emmagasiner. — Avec des forces alimentées par des lacs, même en cas de périodes excessivement sèches, très prolongées, on est prévenu plusieurs mois à l'avance, ce qui permet de parer à toute éventualité.

Connaissant les quantités d'eau maxima et minima qu'un lac reçoit annuellement, on peut calculer quelle hauteur il faudra donner au barrage pour que la retenue d'eau soit telle qu'on ne perde seulement qu'une quantité d'eau déterminée. Cette quantité peut être aussi faible qu'on veut, même nulle, mais dans ce dernier cas on arrive à des dépenses hors de proportion avec le but à atteindre.

Si on dépensait en un seul jour toute l'eau que le lac reçoit en une année, il faudrait que le volume de la réserve fût égal au volume reçu dans l'année. Mais il n'en est pas ainsi : on dépense de l'eau tous les jours et pas la même quantité chaque jour. Pour l'aménagement, on se fixe la dépense probable des différents mois de l'année ; généralement, que la moitié de l'énergie est employée en force motrice et l'autre en éclairage et que la consommation d'énergie pour l'éclairage pendant le mois de décembre est le double de celle pendant le mois de juin et qu'entre ces deux mois la consommation croît et décroît régulièrement. Connaissant le volume d'eau annuel que l'on a à sa disposition, il faut évaluer le volume mensuel que l'on consommera. Comme volume annuel on peut considérer le volume moyen d'une période de plusieurs années ou le volume maximum de l'année la plus sèche. Si on table sur le volume moyen, il faut créer une réserve d'eau considérable, correspondant à un taux très élevé du volume moyen. Mais à mesure que la capacité de la réserve augmente, l'utilisation de l'eau s'améliore très rapidement jusqu'à une certaine limite pour continuer ensuite à croître beaucoup plus lentement. Pour arriver par exemple à trouver que le volume de la réserve ait les 38 0/0 du volume moyen, l'utilisation est les 90 0/0 de ce volume.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi M. P. Boucher, pour l'utilisation des forces du lac d'Oo (Ariège), a trouvé que le volume de la réserve devait être les $\frac{4}{10}$ du volume moyen, pour utiliser les $\frac{9}{10}$ de celui-ci. Pour ce lac d'Oo, dont la surface du bassin qui l'alimente est de 21.543.200 mètres carrés, la moyenne de la hauteur d'eau qui tombe annuellement sur le bassin est de $1^{m},934$, correspondant à un volume de 41.659.056 mètres cubes. A la suite d'observations continuées pendant dix années, on a trouvé que l'année la plus humide a donné 20 0/0 de plus que la moyenne, et l'année la plus sèche les 72,5 0/0 de l'année la plus humide. On a reconnu que ces variations provenaient de ce que les sources du bassin forment un certain volant.

Lorsqu'on dispose d'une ou plusieurs forces régularisables, et en même temps d'une ou plusieurs forces non régularisables, ces dernières ne doivent pas être évaluées d'après le volume de leurs extrêmes basses eaux, comme lorsqu'elles se présentent seules, mais d'après le volume des eaux moyennes.

Même dans le cas de forces régularisables, lorsqu'on ne dispose que d'une usine génératrice et d'une seule ligne de transport, on fait assez souvent intervenir le secours d'une usine thermique, non pas à l'effet de passer les pointes, mais pour parer aux accidents d'usines ou de ligne, pour pouvoir garantir la continuité du plein service en tout temps.

L'aménagement des lacs de montagne a lieu soit par une percée au fond du dit ou par siphonnement. La première méthode est très pénible, car un blindage contre les nappes souterraines doit souvent intervenir et l'eau doit être épuisée au moment de la jonction du tunnel avec le lac. Le procédé par siphonnement particulièrement usité en Suisse consiste à foncer un puits vertical assez rapproché du lac et l'eau est siphonnée entre le lac et le puits auquel on a eu soin préalablement de relier la tête d'eau. L'usine de Brusio est un exemple classique de ce genre d'aménagement.

Pour mesurer l'évaporation d'un lac, M. Maurer indique les prescriptions suivantes. Il faut mesurer quotidiennement :

1° Le débit des ruisseaux qui se déversent dans le lac ;

2° La quantité d'eau qui s'écoule du lac ;

3° Les variations du niveau de la surface ;

4° Éventuellement, la nappe moyenne de pluie, qui fait remonter ce niveau.

Ces données reportées en ordonnées sur un diagramme, dont les abscisses représentent les jours, permettent, par planimétrage du diagramme et établissement d'une moyenne journalière, de calculer le taux quotidien moyen de l'évaporation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avec les réservoirs artificiels on peut corriger dans une certaine mesure le régime variable saisonnier des cours d'eau.

Au point de vue de la capacité à donner à ces réservoirs M. Wilhem la fixe au cinquième du volume débité par la rivière à l'emplacement même du barrage pendant une année moyenne, mais il convient, sauf exceptionnellement, de se tenir en dessous du tiers.

Au point de vue des emplacements les plus favorables à l'établissement du barrage de retenue d'eau, il faut convenir qu'ils sont plutôt rares et le problème consiste plutôt à tirer le meilleur parti des réservoirs qui pourront être édifiés dans les meilleures conditions possibles. Le maximum du débit du réservoir à utiliser étant déterminé, il faut décider le régime pour le fonctionnement du réservoir relativement à celui du cours d'eau à régulariser.

On peut maintenir le débit tiré du réservoir à son maximum autant que possible, ou au contraire ne jamais descendre au-dessous d'un certain minimum de débit imposé à l'avance et, sous cette réserve, obtenir la meilleure utilisation du réservoir.

La première solution donne le moyen d'obtenir du cours d'eau une production d'énergie aussi élevée que possible en utilisant au mieux les hautes eaux, mais n'aurait pas de portée pour l'amélioration des étiages faibles. La seconde solution permet de garantir un débit en tout temps notablement supérieur à celui de l'étiage naturel, soit par exemple doubler ce dernier. Il faut aussi dans l'étude du régime du réservoir tenir compte de celui de la rivière dans les parties les plus éloignées et aussi des autres besoins.

En particulier pour la seconde solution on peut établir parfois à peu de frais des réservoirs à faible alimentation ou réservoirs d'appoint, fonctionnant en période de sécheresse exceptionnelle. Ce qui permet d'utiliser plus largement le réservoir principal.

Dans le cas où il y a lieu de prévoir aux besoins d'irrigation d'une durée de cinq à six mois par an, il faut d'autant assurer le débit y corrélatif.

Au point de vue des dépenses d'établissement un réservoir se présente dans de bonnes conditions si on a une gorge étroite, une vallée allant en s'évasant à l'amont et que la pente de ce côté soit faible et que les terrains et les modifications des voies de communication ne soient pas exagérées.

Il est de règle de faire servir la chute du réservoir à la chute elle-même. On peut par exemple limiter la hauteur de la réserve à la moitié de la hauteur de la retenue, et même davantage.

En ce qui concerne le coût d'installation d'un réservoir, il convient de remarquer que puisqu'il sert à fournir une partie de la chute, son coût proprement dit doit en être défalqué d'autant. D'autre part les industries

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

établies en aval devraient supporter une partie de la dépense, en raison de l'amélioration apportée au régime du cours d'eau.

Pénétré de l'importance du rôle des réservoirs pour l'avenir de l'industrie des forces hydrauliques, M. Wilhem préconise la création d'un service affecté aux réservoirs, à l'instar du service des Grandes Forces hydrauliques. Cela permettrait de faire ressortir en chaque point d'un cours d'eau l'importance et les avantages de la régularisation qui pourrait en résulter.

Les barrages-réservoirs utilisés dans les captations de la houille blanche ont fait l'objet d'études par la Grande Commission de 1910. M. Noailhac-Pioch les a jugées inapplicables sur les voies navigables en raison de leur prix élevé et de leur chance de rupture.

M. Dabat, pour les rivières non navigables, a conclu à la mise en étude de l'utilité de la création d'un certain nombre de barrages à faible relief, dans le lit majeur de quelques vallées inférieures.

Les réservoirs offrent l'inconvénient de s'envaser. Le reboisement diminue le charriage dans les rivières, par suite les frais de dévasement, et il est essentiel que le sol du bassin supérieur soit protégé contre le ruissellement et qu'il ne présente surtout aucune partie ravinée, sinon les matériaux détritiques encombrent bien vite les réservoirs ou les bassins de décantation que l'on peut établir à l'effet de clarifier les eaux. Il faut alors draguer les réservoirs et transporter les débris à des emplacements acquis à grands frais et ces dépôts affouillés eux-mêmes par les pluies peuvent encombrer les biefs inférieurs.

On ne peut recourir au filtrage artificiel pour les eaux de houille blanche, qui entraîne à des dépenses hors de proportion. Le seul filtre est celui naturel, c'est-à-dire le sol des forêts. De sorte que le reboisement du bassin supérieur pour la régularité des eaux l'est aussi et encore pour leur clarté.

200. Régularisation des cours d'eau de Lancey et de Saint-Mury par l'aménagement des lacs Crozet et Blanc (Isère). — A tout seigneur, tout honneur. Nous commencerons donc par les travaux du grand pionnier de la houille blanche, Aristide Bergès.

Le bassin de Lancey, mis en valeur par le « père de la houille blanche », comporte trois usines, les deux supérieures puisant à même dans les lacs qui les alimentent (*fig.* 677 et 678).

L'eau motrice provient des glaciers supérieurs qui nourrissent en même temps le lac Crozet (1.968 mètres d'altitude) et le lac Blanc (2.160 mètres), dont le trop-plein se déverse dans les ruisseaux de Lancey et de Saint-Mury. Le lac Crozet offre une surface de 1.800.000 mètres carrés : il y tombe annuellement $1^{m},65$ d'eau ; le cube résultant (2.970.000 mètres cubes) correspond à un débit de 95 litres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour utiliser en entier les réserves constituées par ces lacs, on a percé, sur une longueur de 400 mètres et à une profondeur de 21 mètres, un tun-

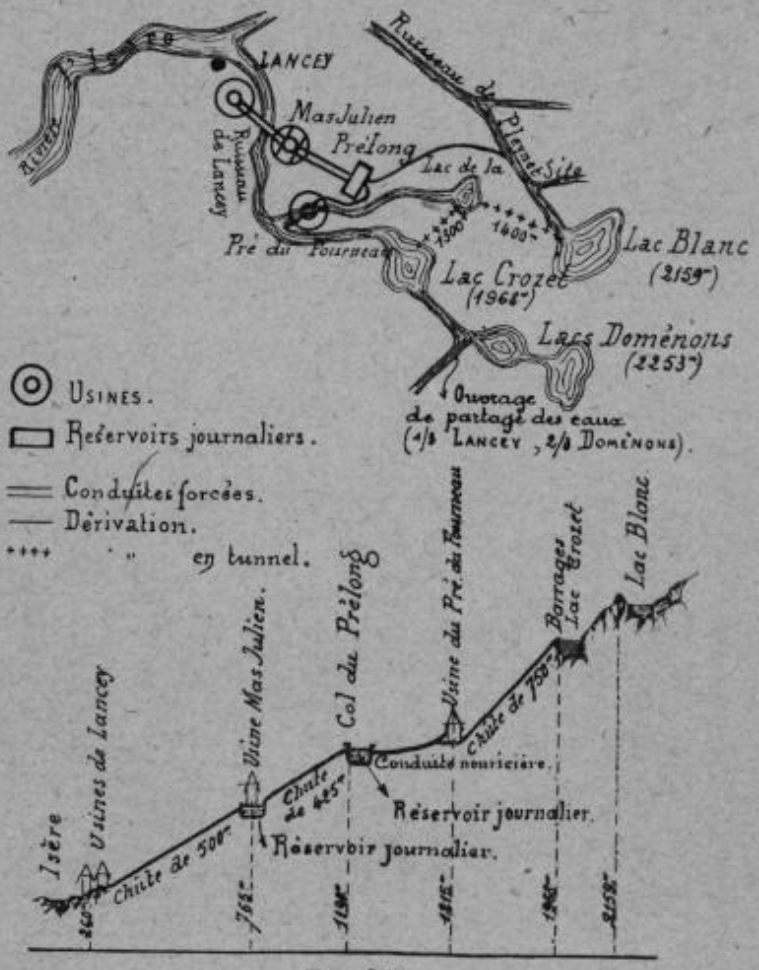


FIG. 677.

nel qui permet de disposer du lac Blanc, dont la capacité atteint 1.100.000 mètres cubes. Un tunnel semblable joue le même rôle pour

FIG. 678.

le lac Crozet et, en outre, un barrage de $3^{m},60$ en a porté la capacité à 1.200.000 mètres cubes.

Pendant la période d'insuffisance, qui dure six mois environ, il manque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au service courant de l'usine un débit moyen de 101 litres, qui exige un cube de $0^{m},101 \times 180 \times 86.400 = 1.570.742$ mètres cubes, lequel peut être fourni par le lac Crozet seul, abstraction faite de la réserve du lac Blanc, qui constitue un excédent de secours.

La première chute a 500 mètres de hauteur ; la deuxième (chute du mas Julien), 425 mètres, et celle qui actionne l'usine de Pré-du-Fourneau, 750 mètres. La tranche d'eau du lac Crozet correspond à une réserve de 1.270.000 mètres cubes, qui peut assurer un débit de 160 litres par seconde pendant trois mois.

Les vannes de la prise sont au nombre de trois et peuvent donner

FIG. 679. — Gorge et usine de Lancey.

ensemble 300 litres. Une porte, dite de sécurité, limite le débit à 4 mètres cubes en cas de rupture de la porte étanche.

201. Régularisation du régime de la rivière la Neste par l'aménagement des lacs de son bassin (Hautes-Pyrénées). — Ce sont près des sommets où se trouvent de nombreux lacs qu'existe la véritable richesse des Pyrénées. La situation est tout autre que dans les Alpes provençales où il n'existe pour ainsi dire pas de lacs et où les emplacements de réservoirs sont rares. Et ainsi les lacs des Pyrénées remplacent avantageusement les glaciers des Alpes. Les émissaires de ces lacs, ou des plateaux élevés susceptibles d'être transformés en lacs, ont en général, dans leur partie médiane, de très fortes pentes qui rendent avantageuse la création d'usines hydrauliques. D'importants travaux ont été exécutés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en vue d'améliorer le régime de la Neste, rivière résultant du confluent de la Neste de Couplan ou d'Aude et de la Neste de Lapès, laquelle coule entre l'Adour et la Garonne. Ces travaux comportent l'aménagement des lacs d'Orédon, de Caillaouas et de Cap-de-Long. Nous allons indiquer les travaux d'aménagement auxquels a donné lieu ce dernier.

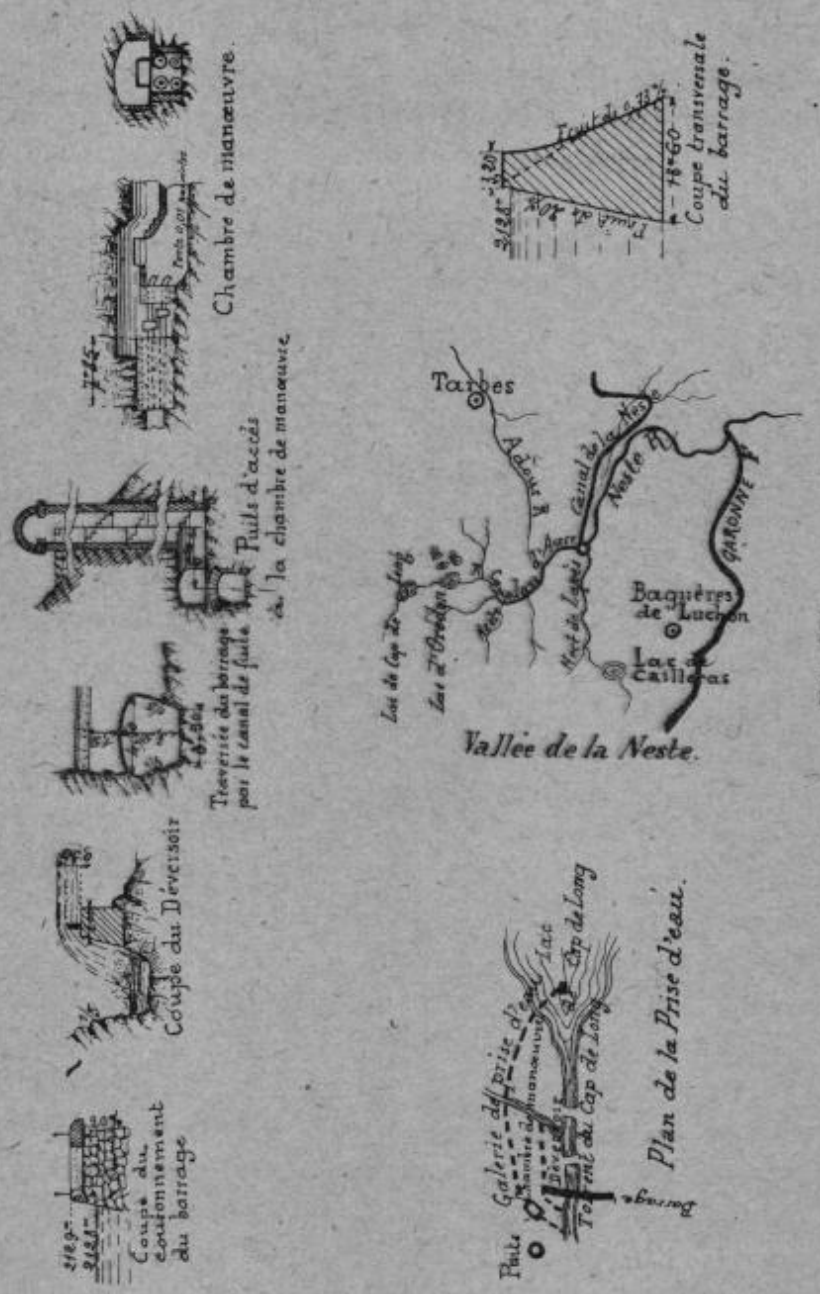


FIG. 680.

Le lac de Cap-de-Long présente une surface de 38 hectares et sa profondeur moyenne est de 58 mètres ; son plan d'eau est à la cote 2.120.

On s'est arrêté, en vue d'utiliser la réserve constituée par ce lac, à l'établissement de deux ouvrages principaux : une prise d'eau installée à la cote 2.110^{m},50, soit à 9^{m},50 au-dessous du plan d'eau naturel, et un bar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rage en travers de la sortie du lac, relevant le plan d'eau naturel à la cote 2.128, fournissant ainsi une tranche d'eau de 17m,50 donnant 7 millions de mètres cubes et portant la superficie du lac à 53 hectares (*fig.* 680).

La galerie de prise d'eau a une longueur de 600 mètres : dans le granit, la galerie est en tunnel ; dans les éboulis, elle est constituée par un aqueduc en maçonnerie, dont les pieds-droits ont 1 mètre d'épaisseur et la voûte 0m,40 à la clef. Un barrage à poutrelles est disposé contre la tête amont de cet aqueduc, en prévision des inspections régulières de la galerie.

Les dimensions de l'aqueduc sont 1m,50 de hauteur sur 2 mètres de largeur, avec voûte elliptique en berceau de 0m,50 ; elles ont été fixées par la condition de pouvoir mettre deux hommes de front à l'abatage et installer une voie Decauville pour le transport des déblais. Il présente une pente de 0m,002 par mètre, sauf dans la partie aval. La galerie a été foncée par le moyen de sept fronts d'attaque ménagés par des travers-bancs.

La prise d'eau est effectuée à 60 mètres en amont, de même qu'au lac de Caillaouas, en amont de la sortie. La galerie est obstruée par un massif en béton de ciment de 7m,85 d'épaisseur, traversé par quatre tuyaux. La manœuvre des robinets-vannes se fait d'une chambre supérieure. Dans cette dernière, la partie inférieure continue le tunnel à l'aval et est destinée au passage de l'eau ; la partie supérieure est un couloir qui est réuni par une petite galerie transversale de 6 mètres, pratiquée au fond d'un puits dans lequel est aménagé un escalier en béton. Une caponnière défend l'entrée du puits contre les envahissements des neiges.

L'emplacement du barrage a été choisi à 500 mètres en aval, sur le torrent du Cap-de-Long. Le mur, dont le tracé est rectiligne, a une hauteur de 20 mètres, y compris les fondations, et une longueur en couronne de 80 mètres.

Il est construit en maçonnerie de blocs de granit et mortier de chaux du Teil. Le garde-corps est à grands vides, afin de ne pas retenir la neige. L'étanchéité du mur est assurée par un parement en amont, à l'aide d'un enduit en mortier de ciment recouvert à son tour d'une couche épaisse de coaltar. La pression à l'aval, d'après les calculs, n'est que de 4kg,49 par centimètre carré.

Pour régulariser le niveau de la retenue, un déversoir est établi perpendiculairement au barrage et sur la rive droite de l'émissaire du lac ; il a 40 mètres de longueur et est formé d'un mur en maçonnerie arasé à la cote 2.128. Ces dimensions permettent d'évacuer toutes les eaux d'une crue de 72 mètres cubes par seconde.

Le canal de fuite, qui fait suite au déversoir, rejoint l'émissaire à 40 mètres du barrage, distance reconnue suffisante pour que ce dernier ne soit pas sujet aux affouillements. Il a à son extrémité amont 1m,60 de largeur au plafond et va en s'élargissant jusqu'à 3m,50 ; sa pente va succes-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sivement de 0m,06 à 0m,07 pour passer à 0m,10, 0m,20, 0m,30 et atteindre 0m,70 à l'extrémité aval.

Le lac d'Orédon, qui est à l'altitude de 1.870 mètres, a un bassin versant de 3.036 hectares ; l'apport de ce dernier est de 40.314.000 litres. Le débit minimum est de 234 litres, soit 7l,7 par kilomètre carré ; le débit moyen, 1.280 litres, soit 42 litres par kilomètre carré, et le débit maximum, 6.164 litres, soit 203 litres par kilomètre carré. La lame d'eau sur le bassin versant égale 1m,32.

Le barrage du lac d'Orédon permet de surélever les eaux à 17 mètres en contre-haut du niveau primitif moyen. Il est constitué par un remblai en terre (*fig.* 681) avec revêtement en béton à l'amont. Le remblai a été purgé de toutes pierrailles et blocs et, pour écarter toute chance d'infiltra-

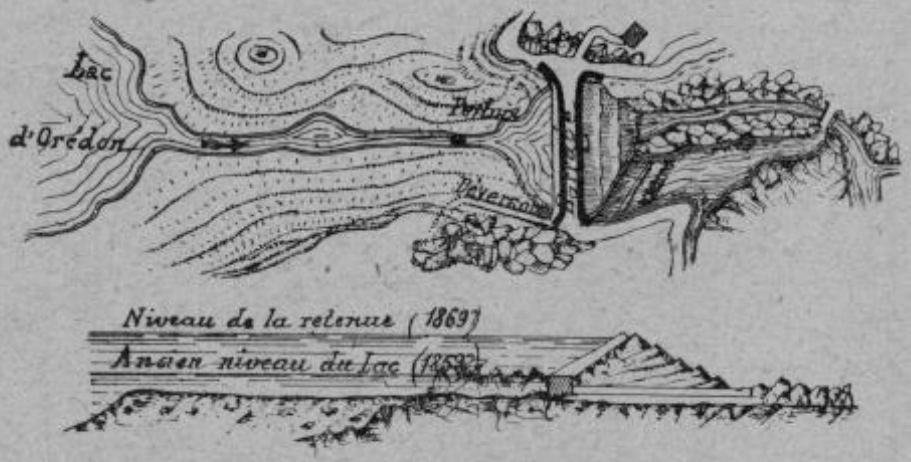


FIG. 681.

tion au travers du remblai, on a ménagé entre le massif des terres et le revêtement en béton un drainage général, obtenu à l'aide d'un perré en pierres sèches communiquant par des barbacanes avec les drains collecteurs ménagés sur les deux rives, qui versent leurs eaux dans l'aqueduc de vidange. Le trop-plein du réservoir s'écoule par un déversoir creusé à droite du barrage.

Le lac de Caillouas, qui est à l'altitude de 2.164 mètres, a un bassin versant de 620 hectares. L'apport de ce dernier est de 16.865.000 litres, soit 2.720 par kilomètre carré. Le débit moyen annuel par seconde du bassin est de 0m3,534, soit 86 litres par kilomètre carré.

Nous citerons, dans la même région, la régularisation du torrent Le Tét par le barrage de la Bouillouse (Pyrénées-Orientales) pour la production dans l'usine de la Cassagne (voir § 402) de l'énergie nécessaire à la traction électrique sur le chemin de fer de Villefranche à Bourg-Madame.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

202. Régularisation du bassin des Sept-Laux (Isère). — Les chutes de grande hauteur, utilisant de faibles débits, n'exigent pas, pour être aménagées, de bien grandes réserves quand on peut trouver dans leur bassin des lacs faciles à crever et à barrer, qui permettent un aménagement peu coûteux. Le bassin des Sept-Laux, — découvert par Bergès, qui en a étudié l'aménagement, — est un exemple frappant de ce genre d'exploitation de houille blanche.

Le bassin des Sept-Laux (*fig.* 682) constitue un plateau à 3.000 mètres d'altitude situé entre les pics de Belle-Étoile et du Rocher-Blanc de la vallée d'Allevard.

Le petit lac Noir a un écoulement propre. Le lac Carré, qui vient ensuite, sert d'écoulement à la presque totalité des eaux du bassin, car il reçoit les eaux du lac Cotepen, où se déversent les lacs de Cos et Blanc.

FIG. 682.

Le lac de la Motte sert d'émissaire au complément des eaux du plateau des Sept-Lacs.

Les déversoirs des lacs Carré et de la Motte donnent naissance à deux ruisseaux qui se soudent à peu de distance de leur origine pour former le ruisseau des Sept-Laux.

Les trois lacs Carré, Cotepen et de la Motte n'ont entre eux que de faibles différences de hauteur ; leurs fonds ont des talus assez doux, de pente très variable.

Des jaugeages effectués à Fort-de-France, limite des pentes douces accessibles aux voitures de la vallée d'Allevard, ont établi que le bassin dont les eaux s'écoulent, soit par le lac Carré, soit par le lac de la Motte, a une superficie de 1.060 hectares. Ce bassin peut fournir un volume annuel, correspondant à $1^{m},60$ de hauteur de pluie, de 16.000.000 de mètres cubes, donnant lieu à un débit très faible en hiver et énorme en été. Leur emploi direct serait ainsi peu industriel.

Mais la surface (51 hectares) et la profondeur (12 à 50 mètres) des lacs permettent de régulariser d'une façon très convenable le débit du bassin

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur toute l'année, en se servant de ceux-ci comme régulateur et réservoir de force horaire.

En disposant du débit d'une manière variable dans la journée, on peut

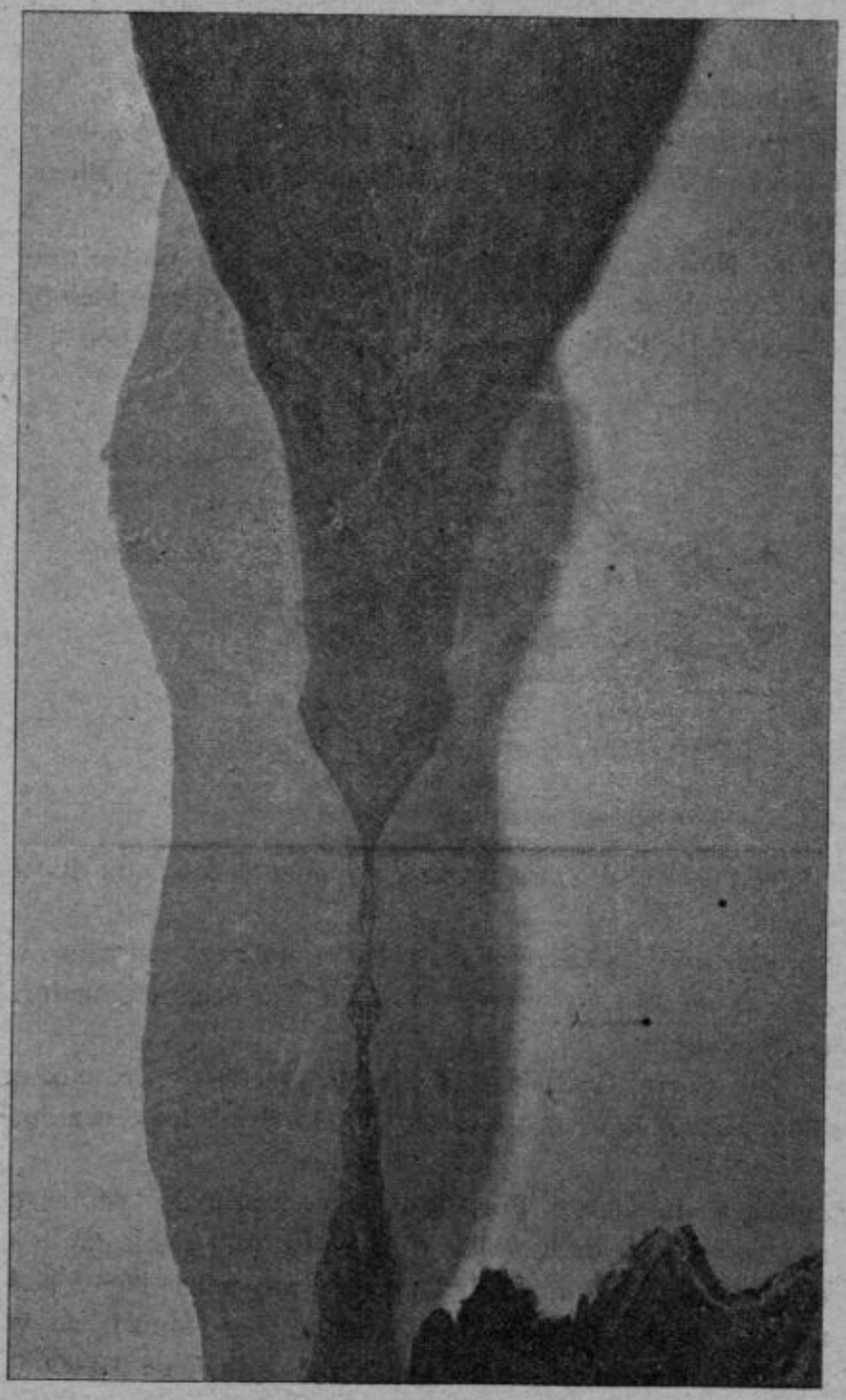


Fig. 683. — Lac de la Girotte.

répondre à une grosse demande de faible durée, à condition d'avoir des diminutions d'emploi à d'autres instants.

Les travaux pour atteindre ce but sont les suivants, étant expliqué que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les profondeurs et les altitudes respectives des lacs Carré, Cotepen et de la Motte sont 40, 50, 12 mètres et 2.121, 2.126 et 2.130 mètres :

1° Un barrage de 9 mètres de hauteur utile, en travers du seuil par lequel s'écoule le lac Carré, pour élever de cette quantité le plan d'eau. Par ce même barrage, le niveau du lac Cotepen se trouve lui-même relevé à la cote 2.130 ;

2° Réunion par une tranchée de 5 à 6 mètres de profondeur du lac de la Mote au lac Cotepen et terminaison de la vidange du premier de ces lacs par un siphon ;

3° Jonction du lac Carré au lac Cotepen par le moyen d'un tunnel à 30 mètres au-dessous de son niveau actuel, soit à la cote 2.100 ;

4° Utilisation de l'eau du lac Carré à l'aide d'un tunnel placé à la même cote.

De cette façon toutes les eaux du bassin des Sept-Laux n'ont plus qu'un endroit par où se fait leur écoulement : le tunnel percé sous le lac Carré. Cet aménagement constitue une réserve totale de 12.000.000 mètres cubes entre la cote du couronnement du barrage (2.130) et celle du niveau du tunnel (2.100), soit sur 30 mètres de profondeur ; ce chiffre de 12 millions est supérieur à la moitié du volume total d'eau dont on dispose dans l'année.

On a donc un débit moyen régulier de 700 litres par seconde qui, utilisés sous les 1.080 mètres de chute, dont on dispose, fournissent une puissance brute de 7.500 HP, soit 5.600 HP sur l'arbre des turbines, en leur supposant un rendement de 75 0/0.

L'eau de force vient directement du lac Carré dans l'usine, à travers le souterrain qui la conduit aux turbines, en faisant par le bas de la conduite le réglage du débit.

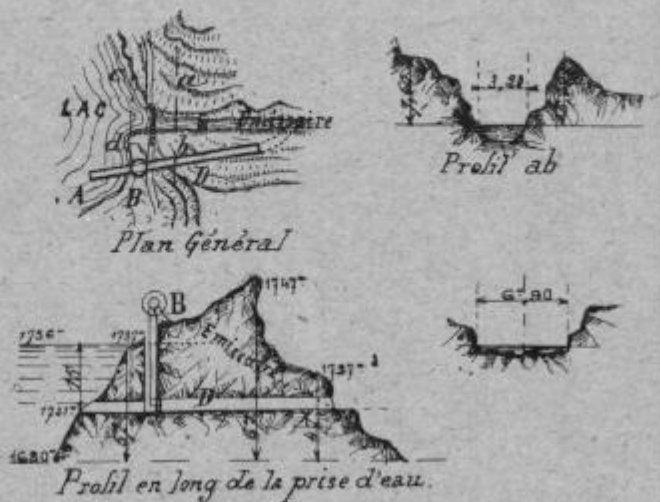


FIG. 684.

203. Régularisation du torrent le Doron par l'aménagement du lac de la Girotte. — Le bassin du Doron a une superficie d'environ 450 hectares ; la hauteur d'eau tombant annuellement est de 1m,50 à 2 mètres, et le débit d'étiage du Doron est de 4 à 5 mètres cubes par seconde.

Le lac, qui a environ 57 hectares de superficie, peut, convenablement aménagé, porter à 6 et 7 mètres cubes par seconde le débit d'étiage du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Doron, en faisant varier la dépense de la nappe d'eau de 500 à 3.000 litres par seconde. Les travaux d'aménagement consistent dans le percement d'une galerie ABD de 50 mètres environ de longueur, à 15 mètres de la surface actuelle des eaux du lac (*fig.* 684) ; cette galerie est reliée à un puits au fond duquel est placée une vanne de réglage. Le souterrain a une pente de $0^m,02$ par mètre.

204. Régularisation de la rivière La Têt. — Un réservoir a été établi sur la Têt en 1899, aux abords de Montlouis, à une altitude de 1.600 mètres, en vue de déterminer le cube emmagasinable à l'étang des Bouillouses. Ce déversoir a été enlevé en 1900, rétabli en 1901 et de nouveau démoli en 1906.

M. l'Ingénieur en chef Malterre a été amené à envisager, pour le fonctionnement d'un réservoir de régularisation, les années successives comme partant du 1er avril et finissant le 31 mars.

Le tableau suivant donne pour chaque année :

V, cube total d'eau apporté par le bassin versant ;

H, lame d'eau correspondant à ce cube, supposé réparti sur le dit bassin ;

D, débit moyen annuel par seconde ;

C, capacité du réservoir nécessaire pour réaliser ce débit moyen ;

K, coefficient de régularisation égal à $\frac{C}{V}$

ANNÉES	V	H	D	C	K	OBSERVATIONS
1899-1900	30.600.000	0,624	0.970	10.260.000	0.334	Altitude : 1.600 env.
1902-1903	41.300.000	0.843	1.310	14.570.000	0.352	
1903-1904	39.880.000	0.814	1.260	14.320.000	0.359	Bassin versant... 4,900 h
1904-1905	44.000.000	0.900	1.395	22.720.000	0.518	
1905-1906	35.475.000	0.726	1.125	9.363.000	0.260	
Moyennes ..	38.255.000	0.78	1.212	14.253.000	0.372	
Moyennes .. (sauf 1914-1915)	36.814.000	0.75	1.166	12 114.000	0.33	

Pour obtenir la régularisation du débit de la Têt, et pour assurer l'alimentation de l'usine hydroélectrique de la Cassagne qui fournit l'énergie électrique à la ligne de Villefranche à Bourg-Madame, l'État a construit, dans la partie amont de la Têt, à l'emplacement de l'étang de la Bouillouse (2.000 mètres d'altitude), un réservoir de 13.000.000 de mètres cubes.

Cette capacité correspond à 35 0/0 de l'apport moyen annuel de la rivière au droit de Montlouis (abstraction faite de l'année 1904-1905).

Il est facile de voir à l'aide du tableau ci-dessus et à l'aide de l'épure qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a servi à le dresser, que le réservoir des Bouillouses, si on avait pu prévoir à l'avance le débit moyen de chaque année, aurait permis de maintenir un débit de 970 litres en 1899-1900, 1.200 litres en 1902-1903 et 1903-1904, 900 litres en 1904-1905, 1.125 litres en 1905-1906.

Sauf pour l'année 1904-1905, qui est anormale, ce réservoir aurait donc suffi pour assurer la régularisation presque complète du débit annuel. Ce résultat est d'autant plus intéressant que le débit minimum de la Têt tombe fréquemment en hiver à 200 litres et même à 150 litres.

Régularisation du ruisseau de Fontvives (Bassin de la Sègre). — Un déversoir a été établi sur le torrent de Fontvives, un peu en amont de Porté, pour jauger le débit de ce cours d'eau et déterminer la capacité d'un réservoir projeté au lac Lanoux. Ce réservoir est destiné à alimenter l'usine hydro-électrique du Transpyrénéen d'Ax à Puigcerda.

L'altitude de la station de jauge est d'environ 1.780 mètres et le bassin versant de la rivière en amont est de 3.700 hectares.

Les observations ont été poursuivies à l'aide d'un enregistreur depuis 1904, et leurs résultats sont consignés dans le tableau suivant :

ANNÉES	V	H	D	C	K	OBSERVATIONS
1904-1905	38.275.000	1.02	1.214	17.900.000	0.460	
1905-1906	40.600.000	1.08	1.287	11.150.000	0.277	Observations incomplètes en hiver.
1906-1907	47.430.000	1.27	1.500	20.200.000	0.427	
1907-1908	57.900.000	1.55	1.830	27.200.000	0.470	id.
1908-1909	38.870.000	1.04	1.230	17.860.000	0.460	
1909-1910	34.800.000	0.93	1.100	12.740.000	0.367	
Moyennes ...	42.980.000	1.15	1.360	17.860.000	0.410	
Moyennes ... (sauf 1907-1908)	40.000.000	1.07	1.260	16.000.000	0.400	

L'examen de ce tableau montre qu'un réservoir de 16 millions de mètres cubes aurait permis de maintenir, au droit du poste de jaugeage, un débit constant de 1.100 litres au moins, tandis que le débit tombe fréquemment à 160 ou 220 litres pendant l'étiage d'hiver.

Avec un réservoir de 18 millions de mètres cubes, correspondant à 45 0/0 de l'apport moyen annuel, on aurait pu réaliser un débit constant de 1.200 litres, sauf pendant une année (1909-1910).

Au lac Lanoux, le bassin versant n'est plus que de 1.912 hectares en y comprenant le bassin du torrent de Fourats, facile à dériver vers le lac. On peut donc compter sur un débit moyen annuel de 615 litres, à la condition de disposer d'un réservoir de 9.200.000 mètres cubes. Toutefois, ces chiffres sont des minima, parce que la hauteur d'eau H augmente avec l'altitude moyenne du bassin versant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme le lac Lanoux se prête très bien à la création d'un grand réservoir, il est vraisemblable que l'on sera amené à créer un emmagasinement supérieur à 9.200.000 mètres cubes, pour tenir compte de la majoration de l'apport résultant de la haute altitude et pour parer aux années de sécheresse exceptionnelle.

Régularisation de la rivière l'One (affluent de la Pique). — Le lac d'Oo est à l'altitude de 1.500 mètres ; son bassin versant a une superficie de 2.208 hectares et se trouve limité par des crêtes atteignant presque partout 3.000 mètres.

Le service hydraulique ayant eu, il y a quelques années, à envisager la création d'un réservoir au lac d'Oo, des jaugeages par déversoirs ont été effectués à la sortie de ce lac de 1883 à 1894.

On peut considérer les chiffres que nous indiquons ci-dessous comme donnant une première approximation très intéressante.

Les résultats des jaugeages sont consignés dans le tableau ci-dessous :

ANNÉES	V	H	D	C	K	OBSERVATIONS
1883-1884	27.843.000	1.26	0.883	11.300.000	0.40	L'année considérée commence le 1er mai et finit le 30 avril. Au mois de mai le débit moyen mensuel est très régulièrement supérieur au débit moyen annuel et la fonte des neiges intéresse d'ordinaire les cinq mois de mai, juin, juillet, août et septembre.
1884-1885	30.055.000	1.36	0.953	12.000.000	0.40	
1886-1887	28.750.000	1.30	0.911	12.440.000	0.42	
1887-1888	31.760.000	1.43	1.000	14.170.000	0.44	
1888-1889	23.240.000	1.05	0.737	8.726.000	0.37	
1890-1891	25.700.000	1.16	0.815	9.420.000	0.37	
1891-1892	28.976.000	1.31	0.916	10.973.000	0.38	
1892-1893	29.646.000	1.34	0.940	8.640.000	0.29	
Moyennes ...	28.221.000	1.27	0.894	10.960.000	0.38	

Ce tableau montre qu'avec un réservoir de 12.000.000 de mètres cubes, dont la capacité correspond à 42 0/0 de l'apport moyen du bassin, l'on aurait pu maintenir, sauf pendant deux années, un débit constant se rapprochant très sensiblement du débit moyen annuel de 900 litres.

Régularisation de la rivière la Neste. — Le Ministère de l'Agriculture poursuit aujourd'hui dans la haute vallée de la Neste la construction de tout un ensemble de réservoirs destinés à régulariser le débit de la Neste à Sarrancolin et à assurer l'alimentation du canal de la Neste.

Les réservoirs d'Orédon (7.300.000 mètres cubes), de Caillaouas (6.800.000 mètres cubes), d'Aumar (1.150.000 mètres cubes), de Cap de Long (7.000.000 mètres cubes), sont en fonctionnement. Un cinquième réservoir, celui d'Aubert (4.600.000 mètres cubes), est en construction.

Le réservoir d'Orédon étant depuis longtemps en fonctionnement, le Service de distribution des eaux de la Neste a pu étudier l'apport du bassin versant qui alimente ce lac, en tenant compte du cube débité par le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déversoir, de celui qui est évacué par les robinets et du volume emmagasiné par le réservoir à différentes hauteurs de l'échelle. Soient h et h' les hauteurs de l'eau à l'échelle à la fin d'une période considérée, V_h et $V_{h'}$ les cubes emmagasinés à chacune de ces hauteurs, Q et Q′ les volumes débités par le déversoir et les robinets, l'apport du bassin versant est évidemment $Q + Q' + V_{h'} - V_h$.

Nous donnons ci-dessous, pour Orédon, un tableau dressé dans la même forme que précédemment.

Nous rappellerons que l'altitude du lac d'Orédon est de 1.870 mètres et que le bassin versant est de 3.036 hectares.

ANNÉES	V	H	D	C	K	OBSERVATIONS
1894-1895	40.508.000	1.33	1.352	14.200.000	0.33	Les années sont considérées comme commençant en mai. La fonte de neige commence au mois de mai et intéresse généralement mai, juin, juillet et août.
1895-1896	36 037.000	1.18	1.143	14.240.000	0.39	
1896-1897	37.000.000	1.21	1.220	12 200.000	0.33	
1897-1898	49.078.000	1.61	1.524	22.300.000	0.45	
1898-1899	30.895.000	1.01	0.979	9.480.000	0.30	
1899-1900	39.105.000	1.28	1.240	12.100.000	0.31	
1900-1901	39.764.000	1.30	1.260	16.300.000	0.41	
Moyennes ...	39.000.000	1.27	1.245	14.400.000	0.37	

205. Régularisation du régime du fleuve Congo par l'aménagement de ses lacs et des anciens lacs congolais (Projet). — Cette étude a été faite par le service des études des Forces hydrauliques du Bas-Congo que nous avons défini au (§ 26) (voir *fig.* 56 à 69).

Les opérations ont porté sur les rivières Kwilu, M'Pozo, de l'Inkisi affluents du Congo et sur ce dernier. Les chutes étudiées en vue du but poursuivi sont celles dites : rapides de la M'Pozo sur la M'Pozo, perles du Kwilu, sur le Kwilu, rapides de Kilemfy, chute de Sanga, de Zorgo, Matunda-Sengele sur l'Inkisi et rapides de Kintambo sur le Congo.

L'énorme bassin du Congo s'étend sur les deux hémisphères et possède de ce fait un régime déjà remarquablement régulier. Malheureusement la partie du bassin au sud de l'Équateur est de beaucoup supérieure à la partie au nord, la différence est d'environ 974.270 kilomètres carrés.

Des lacs nombreux et d'étendue considérable permettent par l'heureuse topographie de leurs rives et par l'étroitesse des gorges et chenaux leur servant d'exutoires de créer des réserves d'eau considérables, environ 67 milliards de mètres cubes, de régler le débit d'une notable partie de la région sud du bassin du fleuve. La retenue de ces énormes quantités d'eau en saison de pluies limitera les grandes crues et les inondations des rives qui proviennent principalement de l'excès de superficie des bassins de la partie sud sur les bassins de la partie nord, tandis que la restitution de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'eau en saison sèche donnera au fleuve un débit considérablement supérieur au débit d'étiage. Quelques barrages judicieusement placés permettraient d'être maîtres des débits provenant des parties sud et leur prépondérance sur les parties nord serait plus grande, de l'ordre $\frac{4}{10}$, au point de vue de la surface occupée.

Pour l'étude du régime du fleuve proprement dit et de ses principaux affluents, et en vue de l'établissement des barrages, il conviendrait d'installer une vingtaine de postes de jaugeage, nécessitant une dépense estimée à 1.090.000 francs pour la première année pour les études et 350.000 francs pour les années suivantes.

Des devis approximatifs fixent à 6 millions la dépense totale pour toutes les études et à 2 millions le coût du barrage prévu au lac Tanganika et au lac Moero. Il est intéressant de remarquer que pour les deux lacs, les réserves se présentent dans des conditions exceptionnelles, car les barrages (46 milliards 200 millions de mètres cubes pour le lac Tanganika) et 13 milliards 884 millions pour le lac Moero) n'exigeraient que des hauteurs de 3 à 5 mètres sur une largeur inférieure à 250 mètres pour le lac Moero et que le prix de revient du mètre cube emmagasiné serait de beaucoup inférieur à celui de 0 fr. 04 par mètre cube obtenu pour le barrage de Vanern (Suède), la plus grande réserve ou retenue d'eau réalisée à ce jour (8 milliards 400 millions de mètres cubes).

On pense exécuter les travaux du Tanganika à moins de 4 millions.

M. Robert Thyss estime que la régularisation du fleuve Congo devant changer radicalement les conditions de navigabilité et assurer les communications parfaites entre les différentes colonies du centre africain, les gouvernements intéressés accorderaient certainement leur concours financier pour l'exécution des travaux.

II. — EXEMPLES DE LACS RÉGULARISÉS OU EN COURS DE RÉGULARISATION

206. Lac d'Annecy (Haute-Savoie).— Ce lac délicieux n'a pas seulement été créé pour l'enchantement des yeux, car l'homme l'a assoupli à ses besoins industriels.

Il a une superficie de 2.700 hectares et est entouré de sommets élevés, sur un rayon de 9 hectares. Ses versants, qui lui forment un cadre merveilleux, ont une pente moyenne de 10 0/0 ; peu absorbants et imperméables, ils abandonnent leurs eaux de pluie au gouffre bleu.

Son niveau subit des oscillations très sensibles avec des maxima et des minima à des dates très variables et dans des périodes de deux à neuf mois.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chaque année, et surtout à la fin de la saison estivale et en automne, il se produit un abaissement important de la nappe d'eau. Les courbes de débit suivent celles des niveaux.

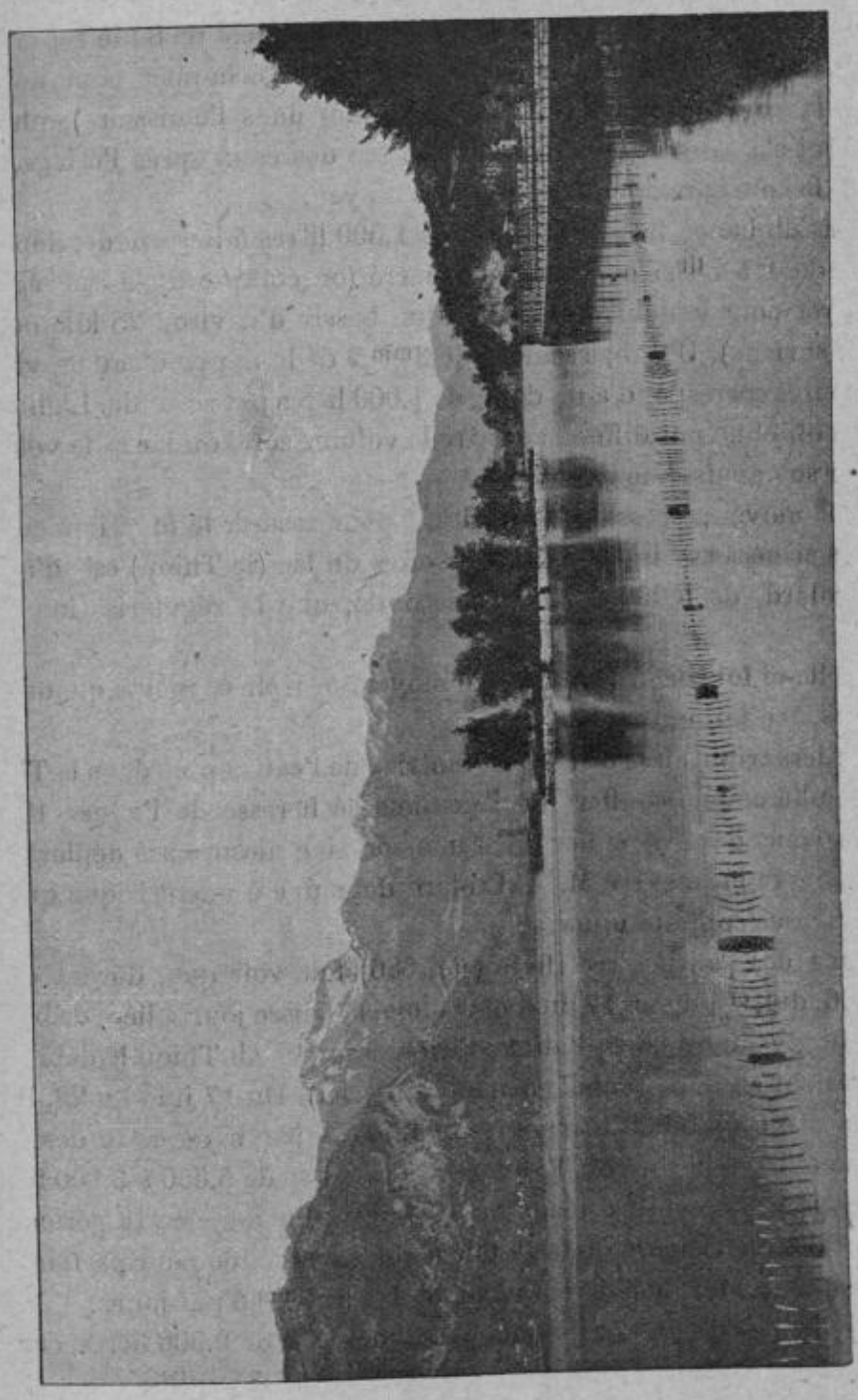


Fig. 685. — Lac d'Annecy et ses montagnes.

Le président Carnot, alors qu'il était ingénieur des Ponts et Chaussées à Annecy, eut à se rendre compte, en vue de la régularisation du lac par ses émissaires, des crues déterminées pendant la saison des pluies.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour opérer dans le lac une retenue qui permît de ne dépasser en aucun cas la cote de $0^{m},80$, M. Carnot eut recours à des vannes fournissant un débit constant et accompagnées de vannes de décharge, ces dernières donnant une section égale à celle des canaux (1).

Le débit moyen de l'émissaire (canal du Thiou) est de 8 mètres cubes, débit qui comporte le volume qu'il faut laisser échapper pour ne pas dépasser la cote de $0^{m},80$ (niveau maximum dans l'émissaire), plus le volume qui s'accumule, pendant la montée des eaux après l'étiage, au-dessus de la cote correspondant au débit moyen.

Le débit du lac en basses eaux est de 1.500 litres à la seconde, dépense correspondant à $5^{lit},5$ par kilomètre carré (on compte dans ces régions 5 à 10 litres pour le débit minimum d'un bassin d'environ 25 kilomètres carrés de surface). Un abaissement de $3^{mm},2$ de la nappe d'eau en vingt-quatre heures correspond à un débit de 1.000 litres par seconde. L'alimentation est obtenue par différence entre le volume sorti du lac et le volume fourni par son abaissement.

Le débit moyen nécessaire et suffisant pour assurer le fonctionnement des usines situées sur les canaux émissaires du lac (le Thiou) est, d'après M. A. Crolard, de 5.000 litres par seconde, que la régularisation doit assurer.

Ainsi celle-ci fournit une puissance moyenne triple et même quadruple de la puissance minimum.

Les usiniers tributaires de la force motrice de l'eau captée dans le Thiou ont particulièrement souffert de l'extrême sécheresse de l'année 1906 ; on eût pu cependant atténuer dans une certaine mesure ses déplorables effets, ainsi que l'a montré M. A. Crolard dans une étude critique qu'il a bien voulu nous communiquer.

L'examen des courbes rectifiées (*fig.* 686) fait voir que, durant cette année 1906, du 1er juin au 17 du même mois, la baisse journalière de 5 millimètres du niveau du lac et l'alimentation assurent au Thiou le débit des 5.000 litres par seconde (débit normal industriel). Du 17 juin au 22, l'alimentation a été de 5.000 litres en moyenne. A partir de cette dernière date, le lac étant à la cote 82, l'alimentation baisse de 5.000 à 3.000 litres et se maintient à ce chiffre jusqu'au 10 juillet. Pendant cette période il faut demander à la réserve du lac 2.000 litres par seconde pour parfaire les 5.000 litres, ce qui fait baisser le niveau du lac de $7^{mm},5$ par jour.

Du 10 juillet jusqu'au 20, l'alimentation descend de 2.500 litres, ce qui entraîne un abaissement par jour de $8^{mm},5$, soit 85 millimètres pour 10 jours, et le niveau est : $(0^{m},66 - 0^{m},08) = 0^{m},58$. Du 20 juillet au 8 août, en admettant comme alimentation moyenne 3.500 litres et en

(1) Albert CROLARD, *Comple rendu du premier Congrès de la Houille blanche.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

demandant au lac 1.500 litres, correspondant à une baisse de niveau de 5 millimètres par jour, soit pour 19 jours $= 0^m,095$, le niveau reste à : $(0^m,58 - 0^m,095) = 0^m,485$.

A partir du 8 août, l'alimentation n'est plus que de 1.200 litres ; on aurait pu, à ce moment, ne donner au Thiou que 4.000 litres, et il restait à prendre à la réserve $(4.000 - 1.200) = 2.800$ litres, correspondant à une

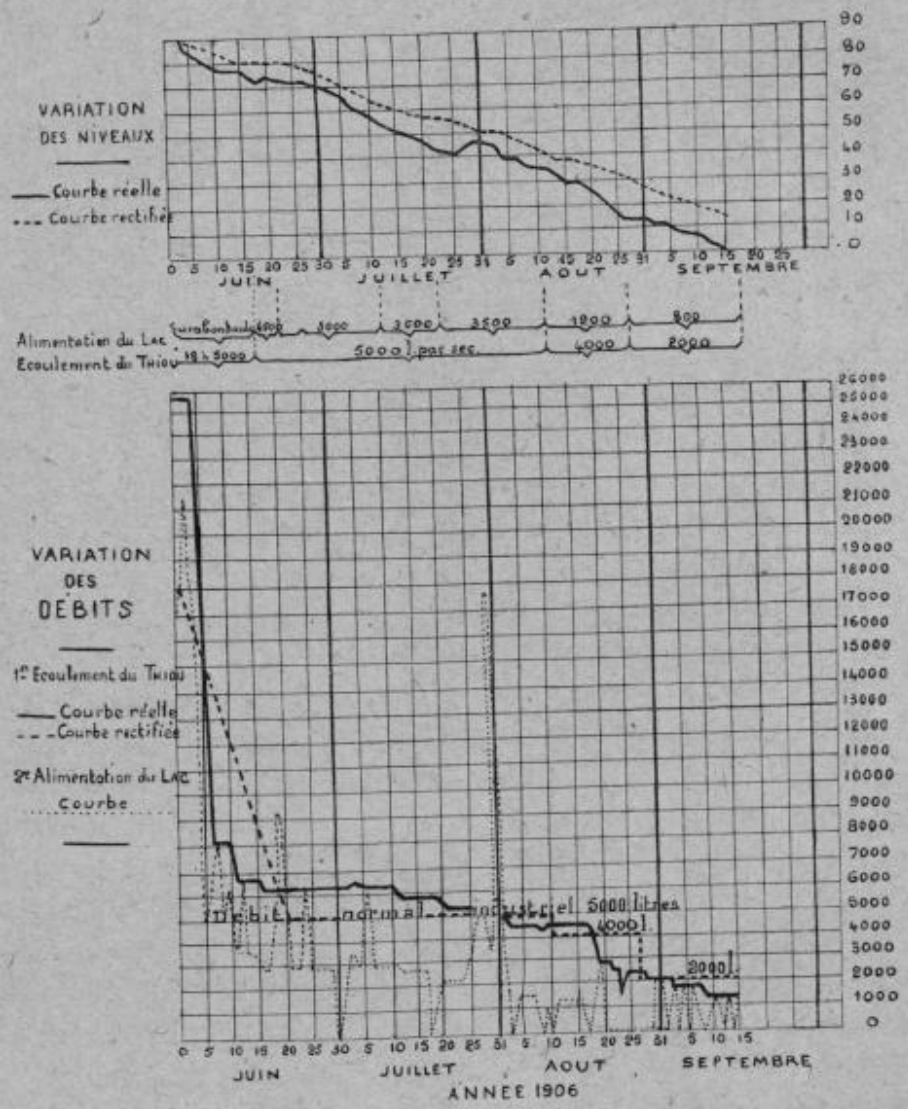


FIG. 686.

baisse de niveau de $0^m,01$ par jour, soit, pour atteindre le 25 août, un abaissement de 17 centimètres du plan d'eau, et le niveau aurait été de $(0^m,485 - 0^m,17) = 0^m,315$.

Enfin, à partir du 25 août, si on laisse l'alimentation se réduire à 800 litres, on ne fournit plus au Thiou que 2.000 litres, soit 1.200 à prendre sur la réserve, et on aurait une baisse journalière de 4 millimètres,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce qui, pour arriver à la cote 20 de l'étiage, demande vingt-huit jours $\left(\frac{0^m,315 - 0^m,20}{0^m,004} = 28\right)$, soit jusqu'au 22 septembre.

En résumé, les courbes des niveaux rectifiés dressés par M. A. Crolard montrent que le niveau du lac aurait pu baisser moins rapidement si l'on avait commencé à fermer les vannes à la cote 90, tout en laissant une décrue de $0^m,005$ par jour. Au 8 août, le niveau aurait été de $0^m,485$ au lieu de $0^m,35$, le débit ayant été maintenu à 5.000 litres. En réduisant ce débit à 4.000 litres, du 8 au 25 août, et à 2.000 litres ensuite, on ne serait ainsi arrivé à la cote 20 qu'au 22 septembre.

Le Thiou se jette dans le torrent le *Fier*, dont le régime capricieux et désordonné justifie bien son nom ; ce dernier donne lieu à des crues toutes les saisons de l'année. M. A. Crolard, a été, de ce fait, obligé de recourir à des moyens spéciaux pour l'aménagement de l'usine des forces motrices du Fier installée à Brassilly dont nous rapportons la description au (§ 318).

En vue d'utiliser d'une façon plus considérable le lac d'Annecy, la Société des Forces motrices du Fier et la Société hydroélectrique de Lyon ont décidé d'entreprendre l'aménagement d'une chute sur le Thiou. L'installation de l'usine hydroélectrique provenant de la force du Thiou remplacerait les cinq usines hydrauliques existant sur ce cours d'eau, auxquelles on donnerait une puissance électrique équivalente comme clients de la nouvelle Centrale.

La chute du Thiou permettrait de remplacer l'écoulement actuel du débit constant du lac par un écoulement à débit variable suivant l'importance des besoins et les disponibilités des autres usines. Elle serait construite pour un débit de 20 à 25 mètres cubes par seconde et 34 mètres de hauteur de chute (cotes 444-410). Son influence régularisatrice se ferait sentir sur les usines hydroélectriques de Brassilly, du Val de Fier et de Chavaroches (§ 318).

207. Lac de Genève (Suisse). — *a*) Altitude : $372^m,28$; *b*) surface : $582^{km^2},26$; *c*) variation de niveaux : $0^m,60$; *d*) cube de régularisation : 349.200.000 mètres cubes ; *e*) chute utilisée : 4 mètres ; *f*) puissance donnée par la réserve : 38.000.000HPH.

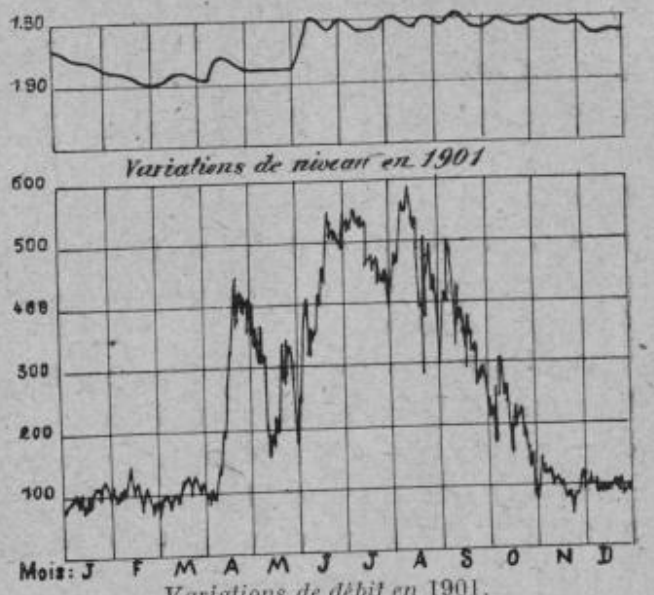
Le débit du Rhône à la sortie du lac variait, avant les travaux de régularisation, de 50 à 500 mètres cubes à la minute. Par suite de ces travaux, le débit maximum a été porté à 700 mètres cubes, et la variation de $0^m,60$, admise pour la différence des niveaux extrêmes, a permis d'élever à 100 mètres cubes, à la sortie du lac, le débit du Rhône en hiver, et à 120 mètres cubes à l'aval du confluent de l'Arve. Le volume emprunté à la réserve pendant l'étiage du Rhône, pour la marche normale des usines

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

situées sur ce fleuve, correspond à une baisse de 1 centimètre par jour.

Il sort beaucoup plus d'eau du lac qu'il paraît n'en rentrer d'après les données pluviométriques (8.300 millions de mètres cubes au lieu de 7.267 millions d'eau tombée annuellement). On explique cette différence par le déversement dans le bassin du Rhône de tout ou partie d'eaux provenant d'autres bassins. Les eaux qui s'écoulent sont dues à l'eau de pluie ou de neige tombée à la surface du bassin d'alimentation et à l'eau condensée directement sur les corps froids, rosée et givre. La quantité d'eau enlevée par évaporation est estimée à 1 ou 2 décimètres par an.

La (*fig.* 687) montre les variations de débit du lac de Genève (année 1901) ainsi que les variations de niveau durant la même année.



Variations de débit en 1901.
FIG. 687.

Le lac de Genève fonctionnant comme un réservoir naturel n'influe pas autant que les glaciers sur les variations saisonnières du Rhône. Il a plutôt pour effet d'atténuer les variations brusques et extrêmes, soit des crues, soit des étiages. Les travaux qui ont été effectués ont permis d'accumuler pendant les mois d'avril, mai, juin et juillet, 325 millions de mètres cubes qui sont rendus à l'émissaire pendant les autres mois de l'année.

208. Lac de Lugano (Suisse). — Ce lac comporte deux bras principaux, de part et d'autre du mont San Salvatore, et il a une superficie totale de 48$^{km^2}$,90, dont les 37 0/0 environ appartiennent à l'Italie et le reste à la Suisse.

La profondeur moyenne est de 130 mètres. Le lac est divisé en trois bassins distincts par le pont-digue de Mélide-Bissone et par le détroit de Lavena, qui ferme presque complètement le petit golfe de Ponte-Tresa, au fond duquel s'amorce la Tresa.

Le lac Lugano est alimenté par des rivières torrentielles, à débit très variable ; aussi son niveau varie lui-même sensiblement ainsi que le débit de son exutoire : la Tresa. M. Ghezzi, ingénieur du Service hydrographique a conçu un important projet de régularisation du lac de Lugano.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'altitude moyenne de ce lac est de 274 mètres et le débit moyen de la Tresa, 24^{m3},83 à la seconde.

L'utilisation de la décharge produirait une quantité d'énergie importante, et en même temps sa régularisation maintiendrait son niveau constant malgré les variations importantes des apports de ses affluents. Ainsi le débit de la Tresa varie de 4 mètres cubes à 233 mètres cubes.

La régularisation comporte les travaux suivants : 1° construction d'un barrage fixe, à 18 mètres en amont de Ponte-Tresala. La longueur de cet ouvrage serait de 71 mètres et sa crête serait au niveau du zéro de l'hydromètre de Ponte-Tresa.

2° La construction d'un barrage mobile, adossé au pont-digue sur la Tresa, qui serait modifié en conséquence, et destiné à régler le débit aux basses eaux.

3° La correction du lit de la Tresa dans sa partie amont sur 3 kilomètres environ, pour rectifier le lit du fleuve et lui donner une pente uniforme de 2,50 0/00.

4° L'abaissement du fond du lac sous les arches du pont-digue de Mélide-Bissone. Cet abaissement faciliterait à la fois l'écoulement de l'eau d'un bassin à l'autre et rendrait la navigation plus aisée.

Ces travaux assureraient les avantages suivants : l'abaissement des plus hautes crues connues jusqu'ici, de 1^{m},04 à Ponte-Tresa, et de 1^{m},06 à Lugano ; le relèvement du niveau du lac aux basses eaux de 0^{m},29 ; la possibilité de naviguer en tout temps dans le détroit de Lavena et sous le pont de Mélide-Bissone ; enfin, le débit minimum extraordinaire de la Tresa passerait de 4^{m3},5 à 8 mètres cubes à la seconde.

209. Lac de Constance (Allemagne). — Actuellement, sur ce lac, la différence de niveau entre l'étiage et l'eau moyenne des crues est de 1^{m},80. Comme le lac a 590 kilomètres carrés de superficie, on pourrait, par la construction d'une digue-réservoir, relever le niveau du lac supérieur à la cote maximum de 396^{m},27 et créer un bassin de retenue de 2 milliards 385 millions de mètres cubes. En abaissant le niveau normal du lac inférieur de 4^{m},15 au-dessous du niveau actuel et en construisant une digue, on pourrait transformer ce lac en un bassin de retenue d'une capacité de 300 millions de mètres cubes. En même temps on pourrait canaliser le lit actuel du Rhin pour créer un chenal toujours navigable.

D'après M. Wilhem Bürler, ces travaux auraient pour résultat : d'augmenter de 200 mètres cubes par seconde le débit minimum actuel (50 mètres cubes) du Rhin ; de faciliter la navigation du fleuve comprise entre Strasbourg et Schaffhouse ; de rendre utilisable une puissance de près de 1 million de chevaux entre Constance et Strasbourg, et enfin de créer à peu de frais des moyens d'irrigation des terres actuellement arro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sées par le Rhin et qui seraient privées d'eau par ces modifications.

Le projet de régularisation du lac de Lugano, qui est décrit au paragraphe précédent, est lié à celui du lac de Constance. De cette façon la durée de navigabilité du Rhin entre Bâle et Strasbourg sera prolongée et la puissance des usines hydrauliques à l'aval du lac de Constance sera augmentée de 10 0/0 en basses eaux.

210. Lac de Joux (Suisse). — *a*) 1.008m,50 ; *b*) 10 kilomètres carrés; *c*) 3m,50 ; *d*) 35.000.000 de mètres cubes ; *e*) chute : 234 mètres ; *f*) 22.000.000 HPH.

La Compagnie des Forces motrices vaudoises a aménagé les chutes des lacs de Joux et de Brenets. L'alimentation du premier provient surtout de la rivière l'Orbe, complétée par quelques petits affluents et par des sources sous-lacustres. Les eaux non évaporées s'écoulent dans le bassin inférieur de l'Orbe par des fissures appelées entonnoirs, les uns visibles, les autres invisibles.

Quelques-uns des premiers sont utilisés comme force motrice. M. Michaud estime que les entonnoirs visibles débitent 5 à 6 mètres cubes par seconde quand le niveau atteint la cote 1.009, et que le débit des entonnoirs invisibles est de 1.000 litres. Le niveau maximum étant fixé à la cote (1.008,50) et la cote minima étant (1.005), on dispose d'une réserve de 35.000.000 de mètres cubes, qui donne un minimum utilisable pour la force motrice de 1.600 litres à la seconde. La chute nette étant de 234 mètres, la puissance minimum est de 3.750 HP.

Les travaux de régularisation consistent dans la cancellation des entonnoirs au niveau de la retenue maximum, la prise d'eau, le canal de dérivation en tunnel et les conduites de décharge sous pression (1m,50 de diamètre en haut et 0m,90 en bas) permettant d'évacuer les 21 mètres cubes débités par le canal. La conduite de pression a 1m,10 de diamètre.

Le canal peut être fermé par des vannes de réglage placées dans un barrage qui est au nord de Brenets. L'usine génératrice a été installée pour 7.500 kilowatts avec des unités de 750 kilowatts. Les turbines, qui sont du genre Pelton à injection partielle, ont un rendement de 78 0/0 ; elles sortent des ateliers Escher Wyss. Les alternateurs triphasés (Oerlikon) produisent, à la vitesse de 375 tours, une tension de 13.500 volts, à une fréquence de 50 périodes (inducteurs tournants). L'usine dessert 212 communes avec une population de 92.000 habitants.

211. Lac de Challain (Ain). — *a*) 500 mètres ; *b*) 2km²,31 ; *c*) 10 mètres ; *d*) 23.100.000 mètres cubes ; *e*) 19 mètres ; *f*) 1.200.000 HPH.

Les débits de la rivière l'Ain sont de 6 mètres cubes en étiage ordinaire

CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de 15 à 20 mètres cubes en eaux moyennes, pour atteindre 700 mètres cubes en crues. Avec une chute de 19 mètres au Saut-Mortier, le débit minimum de 4.500 litres à la seconde ne donnait que 800 HP. La réserve créée au lac Challain par une tranche d'eau de 10 mètres permit de porter à 16 mètres cubes le débit d'étiage de l'Ain en ce point.

Les travaux de régularisation comportent une conduite de $2^{m},60$ de diamètre débouchant dans le lac à 10 mètres en contre-bas du niveau moyen et terminée par une crépine. Elle est suivie d'un puits de visite et d'un puits de communication de 30 mètres de profondeur muni de vannes et amenant l'eau à une galerie de 170 mètres de longueur, qui va en remontant jusqu'à la cote (—20) au puits de berge ; de là le souterrain de Marigny, de 772 mètres de longueur, amène les eaux dans un canal ouvert de 250 mètres qui les conduit dans l'Ain (vidange du lac).

212. Lac du Bourget (Savoie). — Ce lac, immortalisé par les chants du plus suave des poètes, lac que les auteurs du projet de transport de force « Genissiat-Paris » ont l'intention d'utiliser comme régulateur du débit du haut Rhône, a une surface d'environ 45 kilomètres carrés et reçoit divers cours d'eau dont le débit total est de 12 mètres cubes par seconde. Il se déverse dans le Rhône par le canal de Savières, long de 4 kilomètres et dont la pente est très faible ; de sorte que, lorsque le Rhône est haut, il se déverse dans le lac en renversant le sens de l'écoulement dans le canal et il peut même pénétrer dans le lac directement par la plaine et par les marais avoisinants.

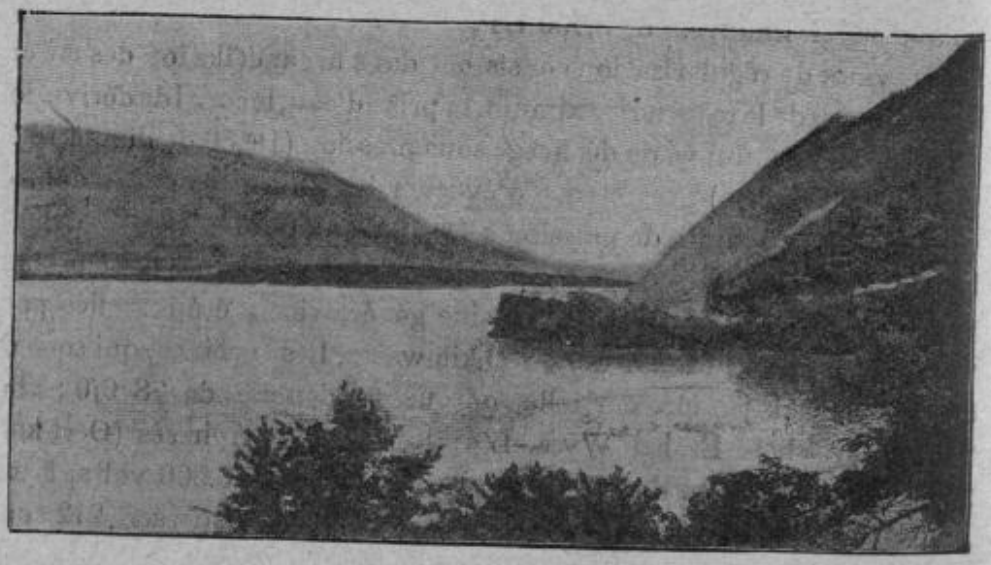


FIG. 688. — Lac du Bourget. Port de Haute-Combe.

Il en résulte que les mouvements du lac dépendent principalement des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

variations du Rhône pendant les mois d'été et au moment des crues de printemps ou d'automne : il baisse à l'automne et reste bas pendant l'hiver. L'amplitude des variations, variable suivant les années, est toujours d'au moins 2 mètres.

L'eau qui retourne au Rhône à l'automne, lorsque celui-ci baisse, est sans utilité pour la navigation, parce que le Rhône est encore très haut ; en la retenant dans le lac, on constituerait un approvisionnement qu'on pourrait restituer pendant l'hiver, au moment de l'étiage du fleuve, pour corriger et pour atténuer les variations introduites à l'amont dans son régime. En fournissant au Rhône un débit supplémentaire de 45 mètres cubes par seconde, pendant les dix heures de chaque journée où le débit de l'usine est moindre que 80 mètres cubes, on y rétablirait ainsi pendant toute la journée des mois d'hiver au moins le minimum de 100 mètres cubes ; pour obtenir ce résultat, pendant quarante-cinq jours de l'année au moins, il suffirait d'emmagasiner 67.500.000 mètres cubes, ce qui exigerait seulement une tranche d'eau de $1^{m},50$ que l'on peut retenir en exécutant un barrage à deux pertuis de 10 mètres, fermés par des vannes Stoney, avec écluse accolée à l'entrée du canal de Savières. Celui-ci devrait en outre être élargi jusqu'à 25 mètres et approfondi jusqu'à 2 mètres à l'étiage pour avoir la pente nécessaire pour fournir le débit.

213. Lac de Paladru (Isère). — *a*) $500^{m},70$; *b*) $3^{km^2},90$; *c*) $3^{m},70$; *d*) 14.350.000 mètres cubes ; *e*) 300 mètres ; *f*) 12.000.000 HPH.

Les ouvrages de régularisation comportent un déversoir et une vanne de prise dont on règle la levée suivant le niveau des eaux. Par le déversoir, on se met à l'abri des crues, et par la vanne de prise, tant que le niveau n'est pas trop bas, on a un débit peu influencé par les variations du niveau.

Le débit varie de 650 litres à 1.000 litres (période montante) et de 650 à 800 litres (période descendante).

214. Lac de la Girotte (Savoie). — *a*) 1.736 mètres ; *b*) $0^{km^2},34$; *c*) 15 mètres ; *d*) 8.520.000 mètres cubes ; *e*) 1.200 mètres ; *f*) 30.000.000 HPH.

La régularisation est déterminée à 6 ou 7 mètres cubes par seconde de l'étiage du Doron par une vidange du lac à 15 mètres au-dessous du niveau actuel et au moyen d'une prise variant de 500 à 300 litres par seconde. La surface du bassin de ce lac ($4^{km^2},544$) est plus de 10 fois celle du lac lui-même. La hauteur d'eau tombant annuellement (2 mètres) assure le remplissage. Les travaux de captation consistent en un puits de 15 mètres au-dessous du déversoir actuel et en une galerie lui faisant suite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

215. Lacs Trout et Coquitlan (États-Unis). — La Vancouver Power Cº utilise actuellement les eaux des deux lacs ci-dessus pour produire de l'énergie électrique. Le lac Coquitlan, le plus important des deux, est à 132 mètres au-dessus du niveau de la mer et le débit minimum minimorum de l'émissaire de ce lac est de $8^{m3},5$ pendant quinze jours. Le lac Trout est à 10 mètres en contre-bas du précédent et en est séparé par une chaîne de montagnes.

La captation de ces lacs est opérée comme suit : l'émissaire du lac Coquitlan a été barré par un caisson en bois rempli de pierres, de $4^m,26$ de hauteur ; au moyen d'un barrage en maçonnerie de $16^m,42$ de hauteur au-dessus des fondations, on a fait varier le niveau du lac de $4^m,90$, et comme la surface moyenne est à peu près de 200 hectares, on a ainsi un réservoir de 10 millions de mètres cubes, à l'effet d'augmenter le débit d'étiage.

Les deux lacs sont reliés entre eux par un tunnel de 3.890 mètres ayant une section rectangulaire de $2^m,75 \times 2^m,75$ avec angles arrondis. Le tunnel a d'abord une pente de 1 0/0 sur 260 mètres (côté Coquitlan), puis il remonte à 0,02 0/0 sur 1.710 mètres, pour redescendre à 0,14 0/0 sur 1.920 mètres.

La maçonnerie du barrage est constituée de blocs de pierre noyés dans un béton composé de 2 parties de ciment, 5 parties de sable de mer et 11 parties de pierres cassées. Toutefois sur les 50 premiers centimètres du côté de l'eau, on a employé un béton plus riche.

Les conduites d'amenée partent du barrage du lac Trout dans lequel elles sont noyées à $6^m,71$ au-dessous de la retenue maximum. Il y a dix prises en tôle d'acier de $1^m,37$ de diamètre et deux de $0^m,61$ de diamètre. L'usine comporte dix groupes électrogènes de 3.000 HP avec roues Pelton.

216. Lac de Poschiavo (Suisse). — La caractéristique de cette installation est l'établissement d'un siphon allant prendre les eaux à 60 mètres dans le lac, jugé nécessaire pour éviter tout risque d'éboulement des parois du puits comme cela aurait pu se produire si on l'avait creusé au bord même du lac.

Ce dernier, situé au sud du massif montagneux de la Bernina, reçoit les eaux de divers torrents, dont le bassin hydrologique global embrasse 200 kilomètres carrés ; sa superficie est de 2 kilomètres carrés et sa profondeur maximum atteint 80 mètres. Le torrent de Poschiavino, qui lui sert d'exutoire, va se jeter dans l'Adda. Le siphon de prise d'eau (*fig.* 689), de 82 mètres de longueur et de 2 mètres de diamètre, est constitué par des tôles de 11 millimètres d'épaisseur et des tronçons de 11 mètres. Il plonge dans le lac de $8^m,40$ et débouche dans un puits d'où part un canal d'amenée souterrain.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le puits, qui a 4m,50 de diamètre, a été exécuté à l'aide de l'air comprimé dans sa partie inférieure au moyen d'un sas à air, les infiltrations d'eau étant trop considérables pour pouvoir être contenues. Le percement de la galerie horizontale aboutissant au fond du puits a été fait à l'aide d'un autre sas jusqu'à un second puits d'attaque situé à 60 mètres au delà du premier ; les infiltrations à partir de là ne gênèrent plus le travail.

Le canal d'amenée en tunnel a 5.250 mètres de longueur, aboutissant à une chambre d'eau qui domine de 420 mètres l'usine bâtie au bord du Poschiavino.

Lac d'Oule (Hautes-Pyrénées). — L'aménagement de ce lac fait partie de l'installation de l'usine d'Éget créée pour la fourniture de l'énergie électrique des lignes de traction transpyrénéennes de la Compagnie des chemins de fer du Midi (§ 414).

Le barrage nécessité en vue d'une chute de 710 mètres de hauteur a 168 mètres de longueur, 30 mètres de hauteur et 28 mètres de largeur à la base. La tranche d'eau a une hauteur de 22m,50 représentant 6.500.000 mètres cubes. La prise d'eau dans le lac est formée par un tunnel traversant le rocher sur lequel est établi un barrage. Ce tunnel est constitué par un massif en maçonnerie de 11 mètres d'épaisseur dans lequel sont noyés six tuyaux de 400 millimètres de diamètre qui sont réunis deux par deux à un grand collecteur

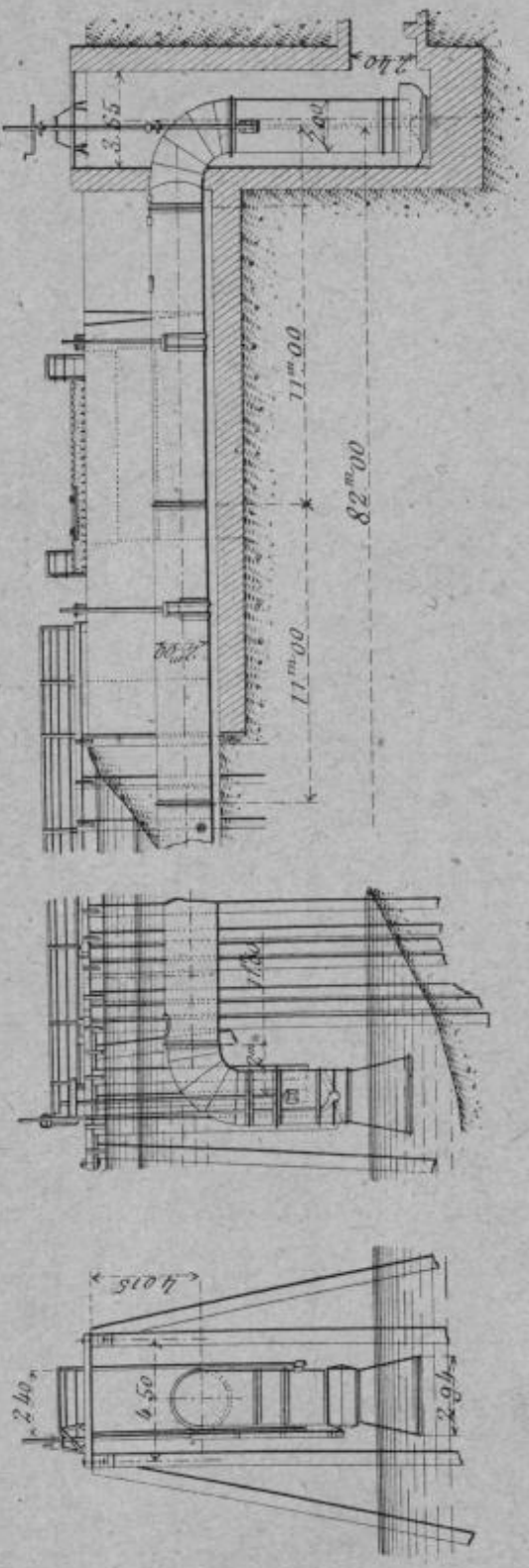


Fig. 689. — Vue en bout et élévation du siphon de prise d'eau (à gauche, prise d'eau dans le lac ; à droite, départ du canal souterrain).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cylindrique d'où part une conduite de $0^m,50$ et sur lequel est monté un compteur Venturi et un robinet conique.

A l'aide de l'aménagement du lac d'Oule on a pu tabler sur un débit de 2.050 litres en été et de 1.600 litres en hiver, correspondant sous la chute de 710 mètres à une puissance moyenne de vingt-quatre heures égale à 16.400 poucelets en été et 14.400 en hiver.

En outre la présence des lacs de Cap de Long, d'Aumar, d'Oredon, de Caillabouas et d'un réservoir journalier de 3.000 mètres cubes permettent de parer à de grandes irrégularités soit instantanées, soit dans le cours de la journée. On a reconnu la possibilité d'atteindre 22.000 poucelets à l'entrée des turbines.

217. Lacs du bassin de Barèges. — La vallée de Barèges est orientée à peu près de l'ouest à l'est. La partie nord est limitée par une crête très élevée se tenant presque constamment à l'altitude de 2.400 mètres et son point culminant est le pic du midi de Bagnères qui atteint 2.877 mètres.

La partie sud du bassin de Barèges est plus étendue que la partie nord. Elle forme trois vallées profondément encaissées, dominées par une ligne de hauteur dont le point culminant est le pic d'Ambert qui atteint 3.092 mètres d'altitude.

Les ruisseaux provenant de ces hauteurs servent de déversoirs à des lacs dont l'altitude est supérieure à 2.000 mètres, alimentés en toutes saisons par la fonte des neiges.

Ces lacs sont : ceux de Aygue-Cluse, de Concyla, d'Escoubous, lac Blanc, lac de Tracena, lac Noir, de Claire, du Maille et de Loncy-Nègre.

Un projet à l'étude envisage le cirque d'Escoubous comme collecteur central des eaux à ramasser et à emmagasiner dans tous les lacs des autres vallées (cirque d'Aygue-Cluse, vallée de la Glaire ou du Lienz, vallée du Bolou). Dans la partie sud du bassin, le débit d'étiage des lacs et des ruisseaux en dépendant est de 1.300 litres-seconde, pouvant être porté à 2.000 litres par le captage des lacs.

La hauteur de chute (2.020-1.555 mètres) est de 465 mètres, soit donc une puissance de 9.300 HP.

Dans la partie nord, à l'aide d'un canal d'amenée de 7 kilomètres de longueur, débouchant au-dessus du plateau d'Estibière, on pourra déterminer une chute de 640 mètres de hauteur (1.380-740). Le débit d'étiage qui est de 800 litres sera porté à 1.200 litres par l'aménagement des lacs d'Oncet qui en plus des 2.000 litres signalés plus haut atteindra 3.200 litres, soit une puissance de 20.160 HP. Soit ensemble 29.480 HP. Les travaux d'aménagement se répartissent comme suit :

a) Barrage du ruisseau du Bolou au niveau du lac de Loncy-Nègre ; barrage de retenue à l'issue de ce lac, destiné à emmagasiner les eaux de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vallée du Bolou ; galerie reliant le lac au bassin de Glaire, d'une longueur d'environ 200 mètres ; usine génératrice au lieu dit : Pont de la Gaubie ;

b) Barrage de retenue des eaux de la vallée d'Aygue-Cluse ; galerie souterraine reliant le barrage au bassin d'Escoubous, d'une longueur de 1.200 mètres ; barrage de retenue des eaux à l'issue du lac de Glaire ; galerie reliant ce dernier au bassin d'Escoubous, d'une longueur de 1.200 mètres.

La conduite forcée reliant la chambre d'eau installée à l'issue du canal d'amenée, d'une longueur de 2.400 mètres, déterminera la chute de 465 mètres annoncée ci-avant et aboutissant à l'usine hydroélectrique du pont de la Gaubie (9.300 HP) ;

c) Barrage sur le bassin ; canal d'amenée couvert (en raison des avalanches), de 4 kilomètres de longueur ; conduite souterraine, de 7 kilomètres de longueur ; chambre d'eau au lieu dit Som de Massajou ; conduite forcée de 1.500 mètres de longueur aboutissant à une usine hydroélectrique installée à Sère, près de Luz et produisant une chute de 640 mètres de hauteur (20.160 HP).

218. Aménagements de la vallée d'Aure et de la vallée d'Ossau, dans les Pyrénées. — La vallée d'Aure qui se termine à Arreau est contigue à l'est à la vallée du Louron ; elle est limitée au sud par la frontière franco-espagnole et à l'ouest par la haute vallée du Gave de Pau et celle de l'Adour.

En allant de l'aval vers l'amont, la pente est relativement faible d'Arreau (cote 700) à Saint-Larry (cote 820) ; de Saint-Larry à Eget (cote 1.010), la pente augmente. A partir d'Eget jusqu'à Fabian, la vallée prend le caractère de haute montagne à très forte pente.

A Fabian, où se termine la vallée d'Aure proprement dite, on débouche dans les vallées de Neste, de Couplan et d'Arragnonet. Nous avons par ailleurs décrit les lacs qui alimentent la vallée de la Neste de Couplan, en décrivant l'usine d'Eget appartenant à la Compagnie du chemin de fer du Midi.

M. Eydoux, ingénieur des Ponts et Chaussées, qui a particulièrement étudié la constitution des bassins du département des Hautes-Pyrénées, indique comme débits les chiffres suivants : partie haute des vallées ; débit caractéristique d'étiage, 12 litres-seconde et débit caractéristique moyen, 36 litres-seconde ; partie d'altitude moyenne : respectivement, 10 litres et 34 litres, et enfin partie basse, 10 litres et 30 litres.

La haute vallée d'Aure possède actuellement comme usine en fonctionnement, celle d'Eget (§ 423) et les usines en construction ou en projet, en descendant de l'amont vers l'aval sont : 1° *usine haute ou d'Eget* (*Penarroya*) en utilisant les eaux des bassins supérieurs de Badet, de Géla, de Saux, du Moudang et du Rioumajou, soit 115 kilomètres carrés environ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La chute réalisée atteindra 350 mètres (1.013-663).

La puissance moyenne annuelle que fournira l'usine est estimée à 15.400 poncelets, avec un maximum de 17.000 kilowatts et un minimum de 3.600 kilowatts aux bornes des alternateurs.

2° *Usine intermédiaire de Saint-Lary.* — Cette usine dont les travaux sont actuellement en cours d'exécution, a sa prise sur la Neste, immédiatement à l'aval de l'usine précédente, à la cote 1.011. Des dispositions sont prises pour que les eaux décantées de l'usine d'Eget (Penarroya) et de l'usine d'Eget (Midi) soient envoyées directement dans le canal d'amenée.

Une réserve de 15.000 mètres cubes est constituée en amont des conduites forcées de l'usine d'Eget (Midi) pour compenser l'effet pertubateur de cette dernière usine.

Le canal d'amenée donne à lui seul 4.000 mètres cubes et les 11.000 mètres cubes supplémentaires sont fournis par un réservoir.

La chute réalisée est de 172 mètres environ.

La puissance moyenne est de 15.800 poncelets avec un maximum de 17.000 kilowatts et un minimum de 4.700 kilowatts aux bornes des alternateurs.

3° *Usine inférieure ou d'Arreau.* — La prise d'eau est aussi prévue sur la Neste, à la cote 825, sensiblement à la hauteur de la précédente. La chute réalisée sera de 105 mètres environ.

La puissance moyenne atteindra 12.700 poucelets, avec 8.900 kilowatts et un minimum de 3.300 kilowatts aux bornes des alternateurs. La superficie totale des bassins utilisés étant de 310 kilomètres carrés, on voit que l'on obtient dans cette région de haute altitude et par son utilisation totale, une puissance de 140 kilowatts au kilomètre carré.

Le caractère de ces usines est donc défini par celui d'usines utilisant le débit naturel des cours d'eau dans l'année avec consommation constante dans le courant de la journée.

Si nous passons aux usines fournissant une puissance constante dans l'année, mais variable dans la journée, l'aménagement de la haute vallée d'Ossau (Basses-Pyrénées) se prête à de telles éventualités sans le secours d'usines thermiques, grâce à l'utilisation d'un réservoir annuel de capacité convenable.

La vallée d'Ossau est constituée par cinq bassins partiels : Artouste, 7 kilomètres carrés ; Brousset, 54 kilomètres carrés ; Bious, 37 kilomètres carrés ; Sousouéou, 36 kilomètres carrés et bassin inférieur de l'Ossau, 50 kilomètres carrés. L'utilisation rationnelle des chutes à créer, en raison de la très grande différence d'altitude des bassins extrêmes Artouste (2.000 mètres) et Ossau inférieur (800 mètres) ne peut se faire que par un système d'usines en échelon, convenablement conjuguées et création de réserves annuelles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après l'étude hydraulique de MM. Eydoux et Causse sur la haute vallée d'Ossau (Basses-Pyrénées), il serait possible de créer trois usines importantes au moyen de la régularisation du lac d'Artouste, situé à la cote (1.968,60) et ayant 45 hectares de superficie. Il doit jouer le rôle de réservoir annuel. Ces trois usines sont : celle d'*Arlouste*, dite supérieure (cote 1.200 mètres) alimentée par les eaux de l'émissaire du lac d'Artouste ; celle de *Miégeral* ou intermédiaire, qui utilisera les eaux du canal de fuite de l'usine ci-avant et des bassins de Bious, de Brousset et de Sousouéou ; celle *du Houral*, ou inférieure alimentée par les eaux du canal de fuite de l'usine intermédiaire et du bassin moyen du Gave d'Ossau.

Les hauteurs respectives de ces chutes sont : 800 mètres, 380 mètres et 204 mètres, et les puissances moyennes correspondantes : 17.000, 20.500 et 16.500 poncelets ou en puissances installées aux bornes des alternateurs : 18.000, 28.800 et 25.200 kilowatts.

219. Lacs ou réservoirs compensateurs. — Les bassins compensateurs permettent d'emmagasiner le débit inutilisé aux heures de faible charge, pour grossir de cette réserve le débit de la rivière au moment où la puissance des moteurs passe par le maximum. On adapte ainsi le mieux possible, à une utilisation variable, l'énergie disponible correspondant à un débit donné de la rivière. Quand on peut faire le réservoir assez grand, il produit un double effet de régulation : il met en réserve pendant le temps de fortes eaux, et restitue en période de sécheresse, en même temps qu'il opère la régulation journalière. Les volumes de ces bassins sont d'autant plus grands, à puissance et régulation égales, que la chute a moins de hauteur ; ou plutôt ils varient en raison inverse de la hauteur de chute.

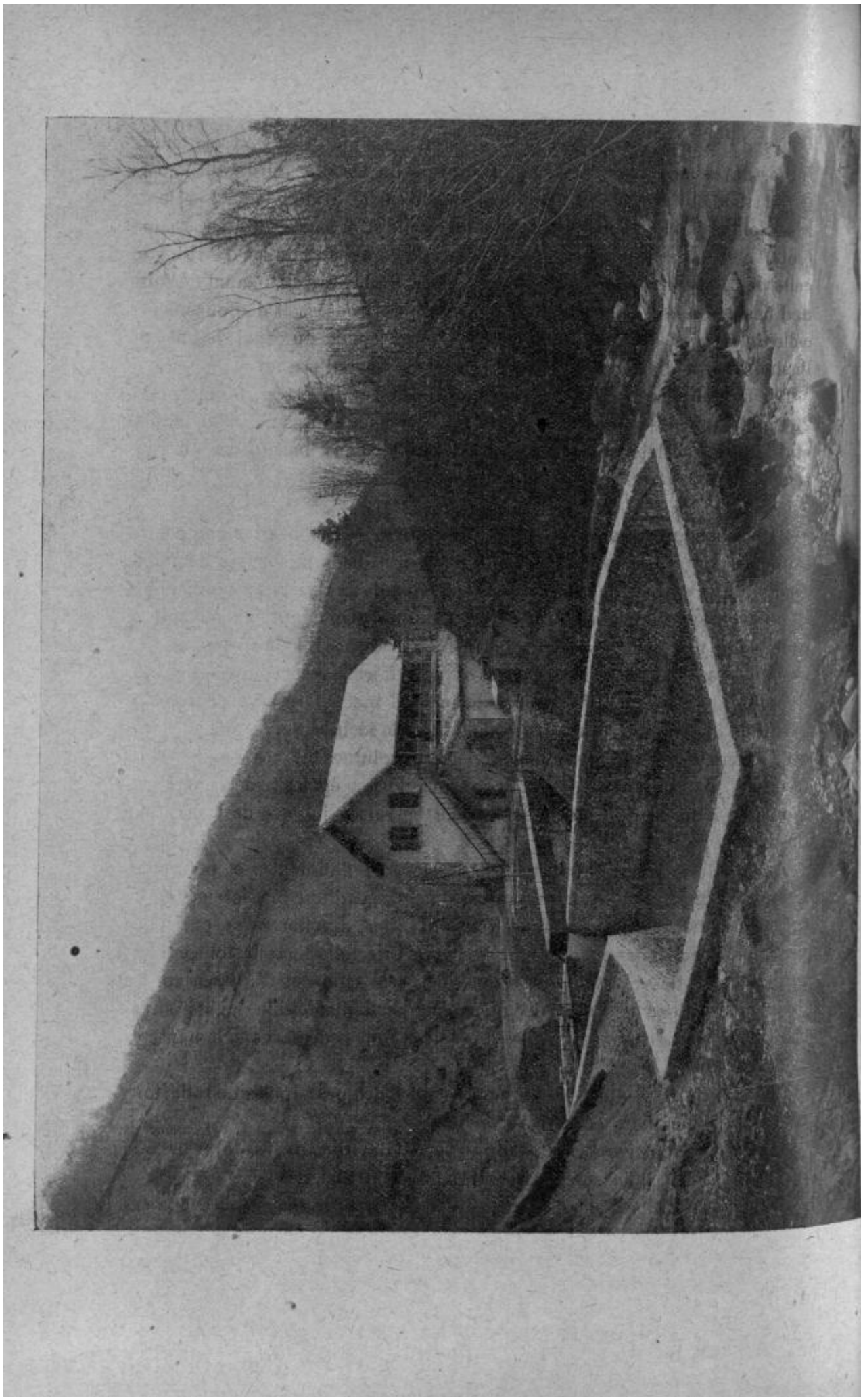
Ainsi, si une haute chute n'a pas de lac pour l'alimenter et permettre l'emploi judicieux de l'eau, on pourra cependant, d'une manière générale, créer un réservoir qui, ne fût-il que journalier, améliorera sa puissance pratique et son pouvoir de régularisation. Une telle installation permet, par exemple, de venir en aide à quelque basse chute et d'utiliser sur les deux cours d'eau une quantité d'énergie totale disponible qui soit supérieure à la somme des puissances des usines isolées desservant la haute et la basse chute.

Nous donnons ci-après les caractéristiques des principales installations réservoirs journaliers connues à ce jour.

Réservoir compensateur journalier de Jonage. — *b*) $1^{km^2},60$; *c*) $0^m,30$; *d*) 480.000 mètres cubes ; 16.000 à 20.000 HP.

Ce lac artificiel est placé vers le milieu du canal d'amenée et a une superficie de 160 hectares. Les eaux surabondantes s'y accumulent de manière à faire face aux besoins pour les heures où la consommation est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maximum. Il permet de porter la puissance de l'usine de 16.000 à 20.000 HP. En supposant que ces 4.000 HP soient produits pendant quatre heures, l'abaissement du plan d'eau résultant est de $0^{m},30$.

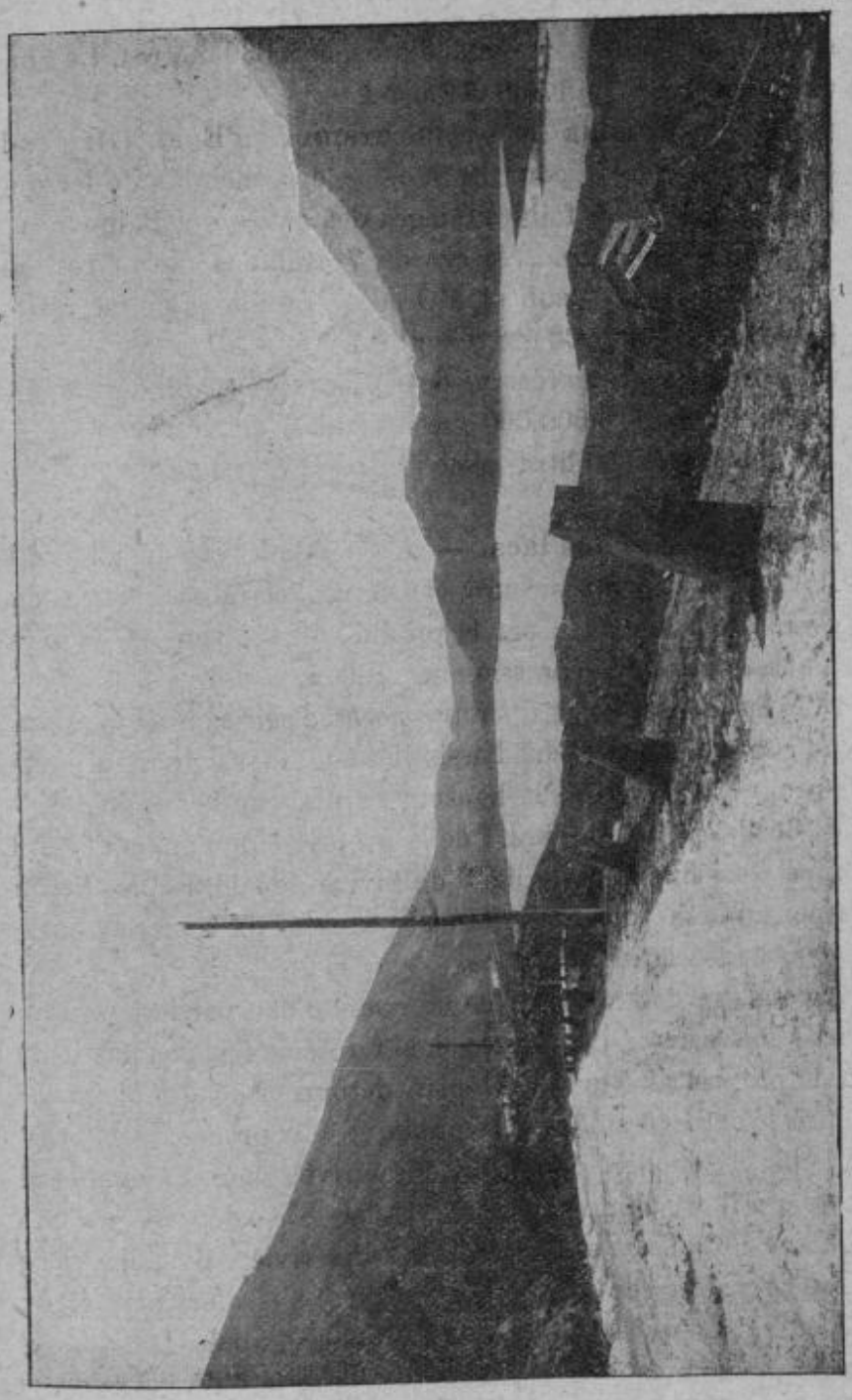


Fig. 691. — Lac du mont Cenis.

Réservoir journalier de Joux. — *b*) $0^{km^2},05$; *c*) 2 mètres ; *d*) 100.000 mètres cubes ; *f*) 13.200 HP de huit heures.

Réservoir journalier de Lancey. — *b*) $0^{km^2},02$; *c*) 3 mètres ; *d*) 86.400 cubes ; *f*) 4.500 HP de vingt-quatre heures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Réservoir de l'usine de Loch-Leven. — Cette usine établie sur la rivière Blackwater a nécessité la construction d'un réservoir de 12 kilomètres de longueur sur 804 mètres de largeur et 22m,85 de profondeur fournissant une capacité de 100.000 millions de mètres cubes. Le barrage a 948 mètres de longueur et le canal d'amenée 5.630 mètres. La chambre d'eau a une contenance de 1.300.000 litres.

Réservoirs de l'usine hydroélectrique d'Egel (Hautes-Pyrénées). — Cette usine créée pour la traction des chemins de fer du Midi a approprié, en raison des faibles étiages des gaves qui l'alimentent, les lacs de Capdelon (avec une réserve de 7 millions de mètres cubes), d'Aumar (1.100.000 mètres cubes), d'Oredon (7 millions de mètres cubes) et de Cail-lalouas (56.500.000 mètres cubes).

En cas d'insuffisance de la réserve de ces lacs on a établi dans une vallée proche un réservoir de 6.500.000 mètres cubes dit réservoir de l'Oule, assurant un débit de 4.800 litres avec un tirant d'eau de 1m,40.

220. Jurisprudence des lacs. — Au point de vue juridique, le lac est défini : « un amas d'eau naturel, causé par l'élargissement énorme du lit d'un cours d'eau, ou bien par le produit du suintement de certaines sources ramassé dans une dépression naturelle ».

Quand un lac constitue une simple *poche d'eau* sans communication avec aucun cours d'eau, on peut l'assimiler à un étang ; par suite, il constitue une propriété privée, et la hauteur normale de l'eau, donnée par la hauteur de décharge, fixe la limite de la propriété de l'amas d'eau. L'autorité compétente fixant cette ligne de niveau idéale, le propriétaire du lac est responsable de tous les dommages causés aux riverains par le fait d'inondations causées par des crues.

Lorsque ce genre de lac constitue un cours d'eau par le jeu normal de l'écoulement de ses eaux, l'émissaire ainsi formé ne fait pas partie du lac ; par suite, le propriétaire du lac ne peut détourner cet écoulement, si ce dernier a pris le caractère d'une eau publique et courante.

Quand le lac est enclavé dans le lit d'une rivière non navigable ni flottable, ou quand il est alimenté par une rivière et se déverse par un émissaire de l'autre côté, il est ou assimilable à une rivière dont il n'est que le lit élargi, ou considéré comme une eau dormante, et alors peut être classé comme un étang. La question doit être tranchée d'après les actes authentiques que les personnes qui se disputent la propriété du lac se proposent de produire, ou par l'État qui a pu en être rendu détenteur par le fait de l'abolition de la féodalité.

En tout cas, la hauteur normale des eaux joue une importance considérable pour les riverains.

D'après M. l'avocat Paul Bougault, suivant la juridiction admise par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le Conseil d'État, l'Administration, même lorsque le lac appartient à un particulier, a le droit de police sur ledit lac et, en particulier, de réglementer la hauteur de retenue pour fixer le niveau conformément aux intérêts de tous.

On admet pratiquement que cette hauteur d'eau est une moyenne entre crues d'hiver et le niveau ordinaire pendant les basses eaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XII

MATÉRIAUX POUR L'ÉTUDE DE L'AMÉNAGEMENT DES CHUTES D'EAU ET L'ÉTABLISSEMENT DES USINES HYDROÉLECTRIQUES

I. — CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DES USINES HYDROÉLECTRIQUES

Il est toujours délicat d'établir un avant-projet d'usine hydroélectrique ; il convient, à cet effet, de s'appesantir longuement sur les considérations locales, d'une part et, d'autre part, sur les données d'expérience acquises au cours de l'exécution de travaux antérieurs similaires ainsi que de l'étude des installations nouvelles. Nous espérons que le lecteur pourra trouver dans ce chapitre quelques éléments capables d'attirer son attention, ce sera la récompense la plus agréable de notre travail. En outre, l'examen des usines dont nous donnons les descriptions dans le Tome II est le meilleur enseignement que nous puissions présenter.

221. Chevaux permanents et chevaux périodiques. — L'utilisation rationnelle de la puissance d'une usine de force hydraulique est d'autant plus difficile à réaliser économiquement que le débit fourni par la chute est irrégulier. Un cours d'eau non régularisé peut être considéré, au point de vue de la puissance que l'on peut en tirer, comme étant la somme de deux quantités : l'une constante, qui est donnée par le débit minimum et que l'on définit par l'expression « chevaux permanents » ; l'autre variable et fonction de la différence des débits moyen et minimum de la chute et de la durée de cette variation, et qui représente les « chevaux périodiques » ; en d'autres termes, la puissance totale ou puissance industrielle de la chute est égale à la somme des chevaux permanents (correspondant au débit minimum et minimorum) et des chevaux périodiques (correspondant au débit dérivé en sus du minimum).

Nous dirons ainsi que la puissance industrielle d'un cours d'eau est celle sur laquelle un usinier pourra toujours compter, abstraction faite de dix jours de chômage par an ou de travail réduit (c'est là l'expression de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la puissance qui a été formulée par M. R. Tavernier pour le débit caractéristique d'étiage).

Enfin la « puissance limite » est fournie par le débit caractéristique moyen (que l'on peut utiliser pendant six mois de l'année) ; elle est égale à la somme des chevaux permanents et des chevaux périodiques.

Le problème de la meilleure utilisation d'une chute consiste, d'après M. F. Côte, à déterminer, pour chaque cours d'eau, le rapport qui existe entre la valeur de l'accroissement des frais à faire pour rendre l'installation apte à l'utilisation du terme variable de la puissance et la valeur de ce terme.

Dans les pays montagneux, il n'y a guère que les industries électrochimiques et électrométallurgiques qui puissent utiliser les chevaux périodiques (installations supérieures à 1.000 chevaux) ; elles peuvent s'accommoder d'intermittences très accentuées de la puissance d'un cours d'eau quand la périodicité annuelle en est à peu près connue d'avance, comme c'est le cas avec les torrents franchement glaciaires. Mais, quand il s'agit de variations qui dépassent la longueur d'une année et ne peuvent plus être précisées, il en est tout autrement.

Les basses chutes, où le cheval permanent coûte cher, ne sont aptes logiquement qu'à servir à l'alimentation des services publics pour le transport d'énergie, l'éclairage, la force motrice ou la traction.

Les hautes chutes peuvent trouver un emploi à l'alimentation d'un service public avec les chevaux permanents et la fourniture à des usines électrochimiques avec les chevaux périodiques, les premiers étant de production coûteuse et devant être transportés au loin pour alimenter des centres de consommation, rares dans les vallées de grande altitude. Ces usines génératrices à hautes chutes ne font pas ordinairement sur les chevaux permanents un plus grand bénéfice que les usines avec basses chutes ; mais les chevaux périodiques étant pour ainsi dire gratuits peuvent être utilisés sur place à des prix rémunérateurs pour la fabrication des produits électrochimiques [1].

---

[1] La comparaison ci-après, empruntée à M. F. Côte, montre bien la différence qui existe d'abord entre le prix de revient du cheval dans les hautes chutes et les basses chutes et ensuite entre les prix de revient des chevaux permanents et des chevaux périodiques.

Voici en premier lieu une basse chute à gros débit : 15 mètres de hauteur, *débit minimum* = 50 mètres cubes, donnant 7.500 chevaux sur l'arbre des turbines. L'aménagement de ces 50 mètres cubes coûte 4.500.000 francs : cela fait 600 francs de frais de premier établissement pour le cheval permanent. Pendant huit mois en année moyenne, on pourrait profiter d'un débit de 70 mètres cubes ; la puissance de l'usine serait alors pendant ce temps de 10.500 chevaux. Mais l'aménagement de ces 70 mètres cubes coûterait 6 millions, soit 1.500.000 francs de dépenses supplémentaires pour avoir 3.000 chevaux de plus pendant en moyenne huit mois par an ; le coût d'installation du cheval périodique ressortirait ainsi à 500 francs, prix élevé, bien voisin, comme on le voit, de celui du cheval permanent.

Considérons maintenant une haute chute à petit débit, d'une puissance minime

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les forces non régularisables qu'on destine à des services publics de transmission de force, de traction ou de lumière, on évalue leur puissance d'après le volume des plus basses eaux et la hauteur de chute. Ces chevaux permanents sont utilisables au fur et à mesure de la demande de l'exploitation et suivant les époques de l'année et les heures du jour. Le service d'éclairage ne demande en général qu'une consommation moyenne annuelle de 1.500 heures et la durée journalière moyenne des services de traction varie entre 12 et 15 heures, soit 2.000 heures par an. Les usines qui travaillent 10 ou 11 heures par jour, en chômant dimanches et fêtes, font un service de 3.000 heures par an. Enfin les industries qui exigent la force motrice pendant toute l'année, c'est-à-dire pendant plus de 8.000 heures par an, sont rares ou peu importantes. Il convient donc d'évaluer à 2.000 heures-an la moyenne générale de consommation des forces motrices des services publics.

M. F. Côte, qui a attaché son nom à cette question si importante de l'utilisation rationnelle des chutes d'eau, fait remarquer que, dans bien des cas, le nombre moyen de kilowatts par vingt-quatre heures consommés est inférieur à la moitié du nombre de kilowatts par vingt-quatre heures en puissance à l'usine. Par suite la quantité de chevaux permanents non utilisés, parfois vingt-deux heures sur vingt-quatre heures et pendant huit à dix mois de l'année, constitue ce qu'on appelle « les résidus d'énergie » ou énergie résiduelle.

Il arrive que, si l'on fait la sommation des HP permanents et des HP périodiques, on obtient un nombre moyen de HP périodiques par vingt-quatre heures un peu plus grand que le nombre journalier de HP permanents. Par conséquent, les chevaux périodiques forment la partie de la puissance de beaucoup la plus massive dont il s'agit de savoir que faire.

L'exemple suivant que M. F. Côte a donné dans *la Houille blanche* est bien fait pour fixer les idées à cet égard.

Dans la (*fig.* 692), la courbe en gros trait est celle des débits pendant la saison la plus sèche de dix années ; le trait fin, la courbe des débits pendant une année de crue, et les traits en pointillé la courbe de la moyenne des débits pendant dix années consécutives.

Ainsi, durant toute une année moyenne, le débit est supérieur à

égale à la précédente (7.500 chevaux) et dont les facteurs sont : hauteur 250 mètres ; *débit minimum* = 3 mètres cubes. Les frais d'installation correspondant à l'utilisation de ce débit sont de 1.800.000 francs, ce qui donne comme frais de premier établissement du cheval permanent sur l'arbre des turbines 240 francs. Pendant sept mois de l'année (année moyenne), le débit du cours d'eau se maintient au-dessus de 8 mètres cubes. L'aménagement de la puissance (20.000 chevaux) donnée par ce débit revient à 3 millions ; on a donc 12.500 chevaux périodiques pour un supplément de dépense de 1.200.000 francs, ce qui met le coût d'établissement du cheval périodique à 96 francs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

6 mètres cubes ; pendant deux cent quarante jours, égal ou supérieur à 12 mètres cubes, et pendant cent vingt jours, égal ou supérieur à 20 mètres cubes, et, enfin, pendant deux cent soixante-seize jours (compris entre les points C et D de la courbe pointillée), le *débit industriel* est de 10 mètres cubes (1).

Pendant tout ce temps, en année moyenne, on dispose (pour une chute de 100 mètres) de :

$$\frac{10.000 \text{ litres} - 3.000 \text{ litres} \times 100}{75} \times \frac{75}{100} = 7.000 \text{ HP périodiques.}$$

De plus, pendant (360 — 276), soit 84 jours, on peut compter en moyenne sur un débit de 7.000 — 3.000 litres = 4.000 litres en sus du débit minimum, ce qui donne encore 4.000 HP périodiques.

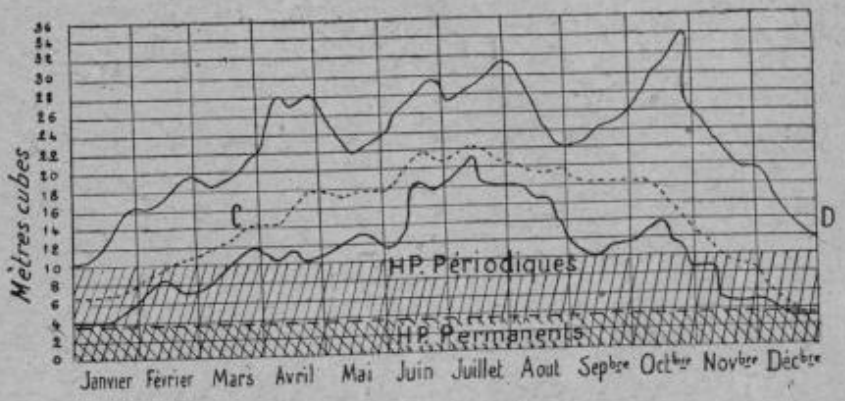


FIG. 692.

Pendant l'année on a donc :

$$360 \times 3.000 = 1.080.000 \text{ HP permanents 24 heures,}$$

et :

$$276 \times 7.000 + 84 \times 4.000 = 2.268.000 \text{ HP périodiques 24 heures.}$$

222. Moyens de parer aux variations de débits et de hauteur d'une chute. — Tamponnage hydraulique. — Quand l'aménagement de la chute ne comporte pas de réserve hydraulique, on sait que la puissance disponible en tout temps est donnée par le débit minimum minimorum sous la hauteur de chute utile. Lorsqu'il s'agit d'une usine ayant en vue uniquement la vente de l'énergie électrique comme lumière et comme force, il n'est pas prudent, dans ce cas, de tabler sur le débit

(1) Ce débit industriel, d'après M. F. Côte, serait celui égal à celui au-dessous duquel le cours d'eau reste pendant huit mois au mois en année moyenne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moyen, mais de compter au contraire sur un débit inférieur même au débit caractéristique d'étiage ou étiage industriel, car à tout instant la puissance doit faire face aux demandes des abonnés.

On peut avoir intérêt à n'aménager que le débit minimum ou à considérer le débit caractéristique moyen avec l'objectif d'une puissance considérée, même dans ce dernier cas.

Il n'est pas sans utilité de remarquer d'abord que les variations de hauteur de chute et de la quantité d'eau sont des causes de pertes de puissance très sérieuses. Ainsi, au moment des crues, non seulement la hauteur exceptionnelle au-dessus du barrage est sans utilité, mais le niveau du canal de fuite s'élève et influe sur la vitesse des turbines. Pour utiliser la quantité d'eau dépassant la quantité minimum disponible naturellement, on peut, comme nous l'avons dit, l'emmagasiner pour servir aux époques de sécheresse, ou disposer l'installation de façon à utiliser pendant la plus grande partie de l'année toute la quantité d'eau disponible, tandis que son service peut être diminué de beaucoup pendant la saison des basses eaux, ou enfin le service peut être rendu continu au moyen d'une usine de secours (vapeurs, etc.).

Pour des chutes très importantes, l'accumulation de l'eau est en général utile. Si la configuration du pays s'y prête, on construit alors un réservoir qui peut n'être ni très profond ni très coûteux. Pour des chutes moins importantes, le prix de revient par cheval mis en réserve serait beaucoup plus élevé pour la même dépense totale. Dans ce cas, il faut bien se rendre compte de la nature et de la durée des basses eaux, aussi bien que du prix nécessaire pour l'installation des réservoirs.

Lorsqu'on dispose d'un réservoir suffisamment grand, on peut ne laisser écouler l'eau qu'au fur et à mesure des besoins de l'usine, de façon qu'elle soit entièrement utilisée. Ainsi un cours d'eau d'un débit relativement faible peut donner une puissance considérablement plus élevée que celle qu'il fournirait s'il n'était aménagé que pour son débit d'étiage.

Prenons, par exemple, l'usine de Vouvry (§ 427), dont la puissance, avec un débit moyen et constant de 346 litres, est de 3.114 HP, soit $3.114 \times 8.760 = 27.278.640$ HPH, ou 27.278 HP pendant 1.000 heures, 13.639 pendant 2.000 heures et 9.093 pendant 3.000 heures par an.

Ainsi pour un service d'éclairage, soit 1.000 heures, l'écoulement du petit cours d'eau régularisé offre le moyen d'obtenir une utilisation neuf fois plus grande que si le débit du cours d'eau était réduit à son débit naturel.

Sans la présence du réservoir, l'écoulement se serait fait avec un débit variable suivant les époques de l'année, et, pendant la période d'étiage, il n'aurait été que le tiers et même le quart du débit moyen, soit 1.038 ou 779 HP.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autre part, le volume d'eau ne pouvant être modifié suivant les besoins journaliers de l'usine, la puissance se réduirait à cette valeur, et, pour un service de 1.000 heures, elle serait environ 25 à 30 fois moindre que celle obtenue avec l'aménagement du lac de Tanay.

Même avec les chutes moyennes utilisant de gros débits, il serait possible dans beaucoup de cas de créer des réserves capables de faire varier le débit journalier d'un cours d'eau suivant la variation de puissance de l'usine. Le surcroît de dépense qu'occasionneraient ces réservoirs serait le plus souvent justifié, puisqu'il permettrait d'élever au double, au triple et même plus, la puissance réellement utilisable pendant les heures de grosses consommations.

Le tableau suivant montre d'une façon très suggestive le rôle que joue la réserve pour faire produire à une chute une puissance constante avec des durées de marche variant de plus du simple au double. Il concerne l'usine de Bonavaux, décrite au (§ 186).

PUISSANCE A UTILISER	CONSOMMATION D'EAU nécessaire à l'heure	DÉBIT DE LA CREUSE à l'heure	DIFFÉRENCE à PRENDRE sur la réserve	DURÉE DE LA MARCHE	CUBE TOTAL PRIS sur la réserve	ABAISSEMENT CORRESPONDANT de l'eau dans le réservoir	DURÉE DE L'ARRÊT	RELÈVEMENT CORRESPONDANT de l'eau dans le réservoir
Chev.	Mètres cubes	Mètres cubes	Mètres cubes	Heures	Mètres cubes		Heures	
100	4.500	3.600	900	19	17.100	$\frac{17.100}{82.500} = 0^m,20$	5	$\frac{18.000}{82.500} = 0^m,21$
120	5.400	3.600	1.800	16	28.800	$\frac{28.800}{82.500} = 0^m,35$	8	$\frac{28.800}{82.500} = 0^m,35$
160	7.200	3.600	3.600	12	43.200	$\frac{43.200}{82.500} = 0^m,52$	12	$\frac{43.200}{82.500} = 0^m,52$
200	9.000	3.600	5.400	9	48.600	$\frac{48.600}{82.500} = 0^m,59$	15	$\frac{54.000}{82.500} = 0^m,65$
240	10.800	3.600	7.200	8	57.600	$\frac{57.600}{82.500} = 0^m,70$	16	$\frac{57.600}{82.500} = 0^m,70$

Lorsque le cours d'eau est susceptible de régularisation et si on connaît la superficie du réservoir, le graphique du débit du cours d'eau indique de combien on doit élever le niveau pour obtenir le maximum de puissance constante.

Nous avons dit que l'on pouvait réaliser une réserve d'eau, en installant un réservoir dans lequel on pompe de l'eau pendant les périodes de faible consommation, pour être utilisée à l'actionnement des turbines pendant les périodes de forte consommation.

Si l'on ne dispose pas d'une rivière ayant un débit suffisant pour que les variations de niveau dues à l'élévation de l'eau et à son retour après avoir actionné les turbines soient négligeables, on est naturellement obligé d'aménager deux réservoirs de capacités égales, l'un en amont, l'autre en aval, et de remplir l'un de ces réservoirs une fois pour toutes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rendement (en eau élevée) d'un groupe moteur électrique et pompe est d'environ 71 0/0 et celui d'un groupe turbine actionnant une génératrice électrique est sensiblement le même, de sorte que le rendement total du tamponnage hydraulique est de $71 \times 71 = 50$ 0/0.

Un kilowatt-heure représente $102 \times 3.600 = 367.200$ kilogrammètres et comme 1 mètre cube d'eau élevée à la hauteur H mètres représente une énergie potentielle de 1.000 H kilogrammètres, à 1 kilowatt-heure correspondent $\frac{367,2}{H}$ mètres cubes d'eau; le rendement des groupes des turbines étant de 71 0/0, il faudra, par kilowatt-heure utile emmagasiné, élever $\frac{367,2}{0,71\,H} = \frac{500}{H}$ mètres cubes d'eau.

D'autre part, le volume d'eau emmagasiné sera par kilowatt-heure fourni et tamponné : $\frac{367,2 \times 0,71}{H} = \frac{260}{H}$ mètres cubes.

Si P_t est la puissance en kilowatts dont on dispose, comme 1 kilowatt représente 102 kilogrammètres par seconde, le débit des pompes sera de :

$$\frac{102 \times 0,71}{1.000\ H} \times P_t = 0,072 \times \frac{P_t}{H} \text{ mètres cubes par seconde.}$$

Si P_u est la puissance utile fournie par le réservoir, le débit des turbines sera de :

$$\frac{102}{0,71 \times 1.000\ H} \times P_u = 0,144 \times \frac{P_u}{H} \text{ mètres cubes par seconde.}$$

Quand on a la courbe donnant à chaque instant la valeur de la puissance consommée, la détermination de l'énergie à tamponner et par conséquent du volume du réservoir est facile.

Si η_1 est le rendement total du tamponnage, il suffit de mener une parallèle à l'axe des temps de manière à ce que la somme des surfaces comprises entre cette droite et la courbe, situées au-dessous de la droite, multipliée par η_1, soit égale à la somme des surfaces analogues placées au-dessus de la droite.

Les surfaces situées au-dessous de la droite, que l'on peut désigner par des indices impairs, représentent l'énergie fournie et tamponnée, et les surfaces paires (au-dessus de la droite) représentent l'énergie utile restituée par le réservoir et on a :

$$\eta_1 \Sigma s_{2n+1} = \Sigma s_{2n}.$$

Si η_1 est le rapport entre l'énergie tamponnée et l'énergie emmagasinée ($\eta_1 = 0,71$), et η_2 le rapport entre l'énergie du réservoir et l'énergie utile restituée ($\eta_2 = 0,71$), on a : $\eta_1\,\eta_2 = \eta$. En multipliant les ordonnées des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

surfaces impaires par η_1 et en divisant celles des surfaces paires par η_2, on obtient une nouvelle courbe, dans laquelle la somme des surfaces d'indices impairs s'_1, s'_3, s'_5, etc., est égale à celle des surfaces d'indices pairs s'_2, s'_4, s'_6, etc. Les ordonnées de ces surfaces représentent à chaque instant, soit la puissance emmagasinée dans le réservoir, soit la puissance restituée par ce dernier.

On détermine l'énergie totale du réservoir, en calculant successivement les valeurs :

$$s'_2 ; \quad s'_2 - s'_3 + s'_4 ; \quad s'_2 - s'_3 + s'_4 - s'_5 + s'_6, \text{ etc.},$$

et en prenant l'énergie correspondant à la plus forte.

Le tamponnage peut présenter des avantages considérables dans le cas de la distribution d'énergie électrique d'une ville, au moyen d'une chute d'eau.

La consommation d'énergie électrique dans une ville atteint un maximum pendant quelques heures (trois ou quatre au plus), lors de l'éclairage intensif, tandis que pendant le restant de la journée elle est inférieure à la moyenne. Le facteur de charge, c'est-à-dire le rapport entre la puissance moyenne et la puissance maximum fournie aux consommateurs, a une valeur très variable, dépendant des habitudes, de la consommation d'énergie motrice, des prix de vente, etc. Il est d'environ 20 à 25 0/0 dans le cas où la fourniture d'énergie motrice étant faible, la charge est peu importante le jour, et peut s'élever à environ 50 0/0, si la consommation d'énergie pendant les heures où l'on n'éclaire pas est importante.

Si on étudie les diagrammes de la puissance consommée dans une ville, on trouve que pour avoir une charge constante de l'usine, l'énergie utile à tamponner est obtenue en multipliant la puissance maximum par un coefficient qui varie entre 1,30 et 2, suivant que le facteur de charge est 0,25 ou 0,50.

Par suite des pertes dues au tamponnage, la puissance constante à fournir est un peu plus grande que la puissance moyenne ; on trouve, en étudiant les diagrammes, que cette puissance est comprise entre 0,33 et 0,60 fois la puissance maximum, suivant que le facteur de charge est 0,25 ou 0,50, on a donc :

$$P_t = (0{,}33 \text{ à } 0{,}60)\, P_{max}.$$

On peut déterminer la valeur de la puissance maximum à adopter par analogie avec les villes de même importance, déjà pourvues d'une distribution d'énergie électrique.

Comme il est toujours possible d'espérer arriver à un facteur de charge élevé, on doit aménager la chute de manière à ce qu'elle fournisse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(rendue à la ville) une puissance moyenne $0,6 \times P_{max}$, et la ligne de transport doit également être calculée pour la même puissance $0,6 \times P_{max}$ [1].

Pendant la période de consommation maximum, l'installation de tamponnage doit venir en aide à la chute et par conséquent fournir une puissance utile :

$$P_{max} = 0,6 \times P_{max} = 0,4 \times P_{max}.$$

En comptant que cette période dure quatre heures, on est certainement très au-dessus de la vérité, de sorte que l'énergie utile tamponnée doit être au grand maximum de $1,6 \times P_{max}$.

La durée de tamponnage étant de vingt heures, la puissance moyenne utile à tamponner est de :

$$\frac{1,6 \times P_{max}}{20} = 0,08 \times P_{max},$$

mais cependant à certains moments (de consommation nulle), la puissance à tamponner pourra être égale à la puissance fournie, de sorte que l'on fera bien de calculer l'installation pour tamponner au besoin une puissance $0,6 \times P_{max}$.

On installera en outre une station de réserve à vapeur d'une puissance $0,6 \times P_{max}$ [2], devant être utilisée en cas de dérangement à la ligne et servant en outre de tampon à la chute pendant les époques où sa puissance est inférieure à la moyenne.

Dans ces conditions les avantages de l'installation du tamponnage sont les suivants :

1° La chute doit être installée pour une puissance moyenne (fournie en ville) de $0,6 \times P_{max}$, au lieu d'une puissance P_{max}, dans le cas où l'on n'a ni tamponnage ni réserve ;

2° La ligne doit être calculée pour le transport d'une puissance $0,6 \times P_{max}$ au lieu d'une puissance P_{max} dans le cas où il n'y a pas d'installation de tamponnage. Pour une transmission à longue distance l'économie réalisée de ce fait est considérable ;

3° L'usine de réserve n'a également qu'une puissance $0,6 \times P_{max}$ au lieu d'une puissance P_{max}.

Par contre, ce système exige l'installation coûteuse d'un tamponnage et pendant les périodes de fonctionnement de l'usine de réserve, la dépense de combustible est accrue par suite des pertes dues au tamponnage. Nous

---

(1) Dans le cas d'un facteur de charge moins élevée, l'énergie à tamponner serait plus considérable que dans le cas qui nous occupe, elle pourrait atteindre la valeur $2P^{moe}$ au lieu de $1,6^{moe}$.

(2) Dans le cas où l'on craindrait des gelées, la puissance de l'usine de réserve devrait être P^{moe}.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

reviendrons sur cette question, à propos des usines de traction électrique, où elle joue un rôle de la plus haute importance.

L'adjonction d'une usine à vapeur est assez avantageuse dans les régions où l'on peut produire la force en très grande quantité et la distribuer à un nombre considérable de petits consommateurs. L'économie de ce système dépend du rapport entre le prix de la force hydraulique et celui de la force à vapeur. Il y a lieu de remarquer que le prix de cette dernière est plus élevé pour une durée restreinte ; ainsi, pour trois mois par exemple, il est de 50 0/0 environ supérieur à celui d'une année entière. Il varie aussi pour un service de douze heures à pleine charge, selon l'importance de l'installation, le prix du combustible, etc., depuis 100 francs par cheval-an jusqu'à 625 francs et même davantage, avec une augmentation de 1/3 à 1/2 si la charge est variable.

223. Répartition du débit entre plusieurs usines. — Quand des usines sont alimentées par une même prise d'eau ou la même chute, le problème consiste à répartir la puissance hydraulique entre les divers usiniers proportionnellement aux droits de chacun d'eux, et par suite la largeur L des orifices de chacune des usines doit être déterminée de façon à laisser écouler la portion du débit total qui représente leur part.

Si Q est le débit total d'étiage, Q′ celui des hautes eaux et q et q' les fractions de débit correspondantes, dues à une des usines considérées, on a :

$$(1) \qquad q = mLe\sqrt{2g\left(z+\frac{e}{2}\right)} \quad \text{et} \quad q' = m'L(z+e)\sqrt{2gze},$$

e, hauteur de l'orifice pendant la période d'étiage, et z, la charge sur le sommet de l'orifice [1].

Les valeurs moyennes de m et de m' sont le plus souvent prises égales à 0,42 et 0,62; par suite, $\frac{m}{m'} = \frac{0{,}42}{0{,}62} = 0{,}68$ en nombre rond.

La valeur de e peut être quelconque, alors on déduit L de la formule (1). Cependant il convient de remarquer que si e était supérieur à la moitié de la hauteur de la chute $\left(\frac{h}{2}\right)$, le plan d'eau d'amont descendrait jusqu'au bord supérieur de l'orifice, ce qu'il faut éviter.

La hauteur $(z+e)$ détermine la profondeur du seuil des orifices, commune à toutes les prises d'eau. Pour que le travail moteur soit maximum, on donnera à cette hauteur la valeur :

$$(z+e) = \frac{h+e}{3}.$$

[1] *Précis d'hydraulique*, par R. Busquet. J.-B. Baillière et fils, éditeurs, 1905.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le niveau réglementaire étant ainsi le seuil même de l'orifice dans chacun des canaux d'amenée, et, pour les grandes eaux, l'orifice se trouvant ouvert jusqu'au niveau du plan d'eau d'amont, le partage se trouve être fait au mieux des intérêts des usiniers.

Quant aux débits intermédiaires entre l'étiage et les hautes eaux, pour les assurer d'une façon équitable, les vannes devront toutes être levées à la même hauteur.

Si le partage est opéré à l'aide d'orifices noyés, le travail maximum est alors assuré par :

$$h = \frac{H}{3}; \qquad (2)$$

H, différence de niveau entre le plan d'amont, derrière le barrage, et le niveau de l'eau dans le canal de fuite.

La relation (2) permet de déterminer la position du niveau à choisir comme cote inférieure au-dessous de laquelle les divers usiniers s'astreindront à ne pas laisser descendre le plan d'eau dans leur canal respectif, le bord inférieur de la vanne ne devant pas s'élever au-dessus de ce niveau.

Alors :

$$q = mLe\sqrt{2g\,\frac{H}{3}} \quad \text{et} \quad q' = mLE\sqrt{\frac{2gH}{3}};$$

E, hauteur d'ouverture qui correspond au débit des hautes eaux.

On peut poser : $q' = Kq$, et les deux formules ci-dessus donneront :

$$\frac{Kq}{q} = K = \frac{E}{e},$$

c'est-à-dire que les débits sont proportionnels aux ouvertures.

Donc, si on connaît H, K et q, on peut déterminer L, E et e.

On fait généralement : $\frac{E}{L} = 2$ ou $L = \frac{E}{2}$, correspondant au minimum de pente par mètre, pour l'écoulement de l'eau dans le canal.

Enfin, le partage peut se faire par déversoir. Il s'agit alors de déterminer la hauteur h de la crête au-dessus du niveau d'amont, qui doit être maintenu constant, soit à l'étiage, soit au moment des hautes eaux, sauf pour les hautes crues exceptionnelles.

On peut rechercher la valeur de h correspondant au débit des hautes eaux pour obtenir le travail maximum par mètre de largeur de chaque déversoir, ou prendre h correspondant au débit d'étiage, dans quel cas il faudra baisser la crête du déversoir pour laisser passage aux grandes eaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour la première solution, la valeur de h corrélative au plus grand volume d'eau à dépenser par seconde est :

$$h = \frac{3H}{5}.$$

Alors :

$$K \times q \text{ ou } q' = mLh\sqrt{2gh}.$$

A l'étiage, on devra réduire la hauteur à la valeur h', de telle sorte que l'on ait :

$$q = mLh'\sqrt{2gh'},$$

et la levée totale de la vanne verticale $= (h - h')$.

La deuxième solution est fournie par les relations :

$$q = mLh\sqrt{2gh} \quad \text{et} \quad q' = mLh + m'Lz\sqrt{2gh},$$

z indiquant la hauteur sous laquelle le déversoir sera noyé en temps de grandes eaux, avec la condition que la position inférieure de la nouvelle crête soit à une hauteur au moins égale à h, c'est-à-dire que la profondeur de l'eau dans le canal d'amenée devra avoir une valeur au moins égale à $(z + h)$ et la largeur du déversoir être égale à celle du canal, soit : $L = 2(z + h)$. Le niveau fixé pour l'étiage dans le canal d'amenée sera donc maintenu à la même cote, quel que soit le régime des eaux, sauf les crues exceptionnelles.

Les coefficients m et m' ont pour valeur respective : 0,40 et 0,60.

Jusqu'ici on a eu en vue de répartir l'énergie entre les intéressés ; mais le problème pourrait se présenter sous une autre forme, à savoir le partage du volume de l'eau débité par le cours d'eau. Dans ce cas, le maximum du débit correspond à $h = \frac{z}{3}$, et chacun des usiniers est autorisé à produire un abaissement de niveau de cette valeur dans son canal d'amenée. Le maximum de dépense par seconde pour chacun des canaux de largeur l est donné par l'expression :

$$Q = 0{,}385l\sqrt{2gz}.$$

Naturellement la largeur des orifices devra être réduite de manière à ce que chaque prise subisse des réductions proportionnelles à celles du débit total du cours d'eau.

224. Répartition des eaux d'un bassin. — A mesure que les emplois de l'énergie hydraulique se perfectionnent et se multiplient, le partage rationnel des eaux d'un bassin par rapport à l'altitude et à la distance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aux centres d'approvisionnement est une question qui, dans un avenir plus ou moins prochain, présentera un grand intérêt pour la meilleure utilisation économique du travail de l'eau courante.

L'idée de fractionner le débit en un nombre plus ou moins grand de parties égales n'est pas nouvelle, car elle a été souvent énoncée ; mais l'application en est difficile par suite de l'influence des parois, que l'on ne peut éliminer qu'en réalisant une disposition parfaitement symétrique par rapport à un axe ou à un point.

Bergès en a fait une application en 1902, à Lancey, à l'effet de jauger le débit du ruisseau par une fraction minime de son ensemble.

M. de la Brosse, avant Bergès, au cours de l'année 1894, a établi un appareil répartiteur dans les vallées de Lancey et de Domène.

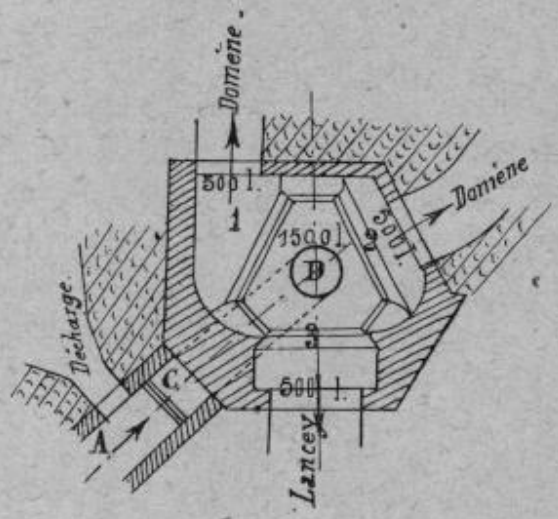


FIG. 693.

L'opération consistait à partager d'une façon permanente le débit variable du ruisseau des Doménons à raison des 2/3 pour Domène et 1/3 pour Lancey. L'éminent ingénieur a réalisé le problème à l'aide d'une disposition symétrique par rapport à un axe vertical, et ayant pour base un triangle équilatéral.

Les eaux réunies dans un canal découvert AC (*fig.* 693) entrent dans un aqueduc CD et remontent verticalement dans le puisard D, au sommet duquel elles s'échappent par trois déversoirs égaux (1, 2 et 3) et symétriquement disposés autour de son axe. On évite ainsi l'action perturbatrice des parois latérales quand elles sont inégalement écartées des orifices.

Dans l'espèce, l'appareil répartiteur a une contenance de 1.500 litres, et chacun des déversoirs débite 500 litres.

L'ouvrage répartiteur est constitué par une enveloppe en maçonnerie à joints apparents, d'où les eaux s'échappent par les orifices 1, 2 et 3, disposés en siphon, afin d'éviter la circulation de l'air à l'intérieur et d'atténuer les effets du froid. Le tout est recouvert de voûtes en béton de ciment portées sur une ossature en acier.

225. Utilisation de l'énergie résiduelle d'une usine. — L'on sait que, dans les usines hydroélectriques distribuant de l'éclairage et de la force motrice, le maximum de charge (*fig.* 694) a lieu en hiver pendant quelques heures, et que la pointe d'extrême charge se produit entre cinq

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et sept heures du soir. En été, cette même circonstance se présente entre sept et huit heures du soir. Si on rapproche d'un diagramme, donnant les courbes des charges journalières, celui des débits d'une rivière à régime torrentiel dans la période où se produit le débit minimum [courbes des débits journaliers (*fig.* 695)], on voit que, sauf la pointe d'extrême charge des journées d'hiver, si on n'avait jamais que la courbe de charge des journées d'été, toutes les parties teintées de la figure représenteraient une énergie disponible. Ainsi la pointe empêche d'affecter aux usines électrochimiques cette puissance non disponible deux ou trois heures, durant tous les jours d'hiver. Il faudrait donc obtenir qu'en toutes circonstances les chevaux permanents puissent passer la pointe formée par la puissance maximum ou, en d'autres termes, que le diagramme de charge maximum en hiver s'inscrive tout entier dans l'aire la plus teintée du diagramme des débits.

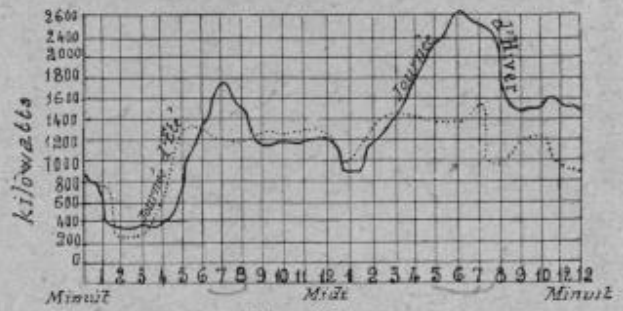


FIG. 694.

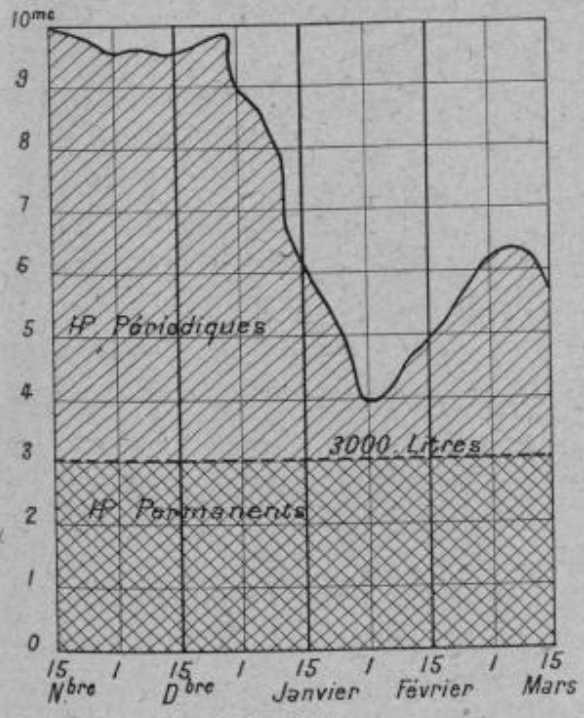


FIG. 695.

De tels résultats ne peuvent être demandés qu'à des moyens artificiels, tels qu'une machine à vapeur, qui servirait ainsi à remplacer les chevaux permanents qui manquent aux basses eaux, des accumulateurs électriques, une commutatrice transformant la quantité voulue du courant des alternateurs pendant les périodes de faible charge, pour charger une batterie d'accumulateurs, et, au moment de passer la pointe, restituant sa charge au réseau par son fonctionnement en sens inverse.

Mais le plus pratique est l'aménagement, sur le canal d'amenée de la chute, d'un réservoir compensateur permettant d'emmagasiner dans les heures de faible charge le volume nécessaire au passage de la pointe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. F. Côte a fait breveter un dispositif mécanique et physique pour l'utilisation de l'énergie résiduelle d'une chute d'eau.

Son ingénieux procédé consiste à refouler de l'eau d'une basse chute, au moment où la consommation de l'usine hydraulique est faible, dans un réservoir situé le plus haut possible, et à faire retomber cette eau, aux moments de grande consommation, sur des récepteurs appropriés, récupérant ainsi, au rendement près, la puissance dépensée pour le refoulement de l'eau. De cette façon, le réservoir étant placé plus haut que la chute, l'usine peut, à certain moment, produire un travail plus grand que celui que peut donner la chute réelle. Les moyens à utiliser sont, soit un moteur hydraulique ou électrique conduisant une pompe de refoulement, soit une turbine sous haute chute actionnant un appareil quelconque d'utilisation du travail mécanique récupéré (par exemple une dynamo génératrice), soit un groupe formé d'une pompe, d'une dynamo alternativement motrice et génératrice et d'une turbine sous haute chute. Le réservoir peut être placé en un endroit quelconque, pourvu qu'il réalise les conditions de hauteur voulues.

D'après les calculs de M. Côte, son système s'applique avec un réel intérêt aux chutes dont la hauteur est comprise entre 0 et 150 mètres. Ce moyen, permettant de dépasser les pointes d'extrême charge dans les usines destinées au transport de l'énergie, par le seul secours de l'eau qu'elles n'utilisent pas au moment de la faible charge, offre aussi la possibilité de donner un débit supérieur au minimum du cours d'eau et de créer un certain nombre de chevaux périodiques, car, lorsque ceux-ci viennent à manquer, la pointe du diagramme de charge, s'élevant au-dessus de la correspondance au débit minimum, ne peut être passée sans leur appoint.

Aux usines d'Aarburg et de Schaffouse, en Suisse, pendant les heures de faible demande d'énergie, l'excédent disponible est employé à élever de l'eau dans un réservoir qui est utilisée pendant les heures de forte charge pour actionner les turbines. Le rendement d'une telle installation est d'environ 50 0/0.

Ordinairement, des groupes de trois machines sont montés sur le même arbre ; à chacune des extrémités de celui-ci sont disposées la pompe centrifuge et la turbine et au milieu la machine électrique qui sert alternativement de moteur ou de génératrice. Quand le groupe fonctionne, la pompe ou la turbine tourne à vide, mais la perte d'énergie est faible.

Une grande application de ce système de pompage serait celle que désire réaliser la société électrique du Haut-Rhin en utilisant deux lacs situés dans les Vosges, pour établir une usine permettant d'emmagasiner pendant la nuit l'énergie disponible fournie par l'usine de Rheinfelden, sur le Rhin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

226. Zones d'action des usines noires et des usines blanches. — Les forces hydrauliques ont actuellement trois principaux débouchés : le transport électrique au loin de leur énergie, l'utilisation sur place de cette énergie pour les industries qui tendent à s'implanter vers les grandes chutes d'eau, et enfin l'alimentation des usines électrochimiques ou électrométallurgiques. Mais il arrive assez souvent que la chute s'utilise à deux fins, c'est-à-dire qu'on l'emploie simultanément au transport de l'énergie et à l'électrochimie par exemple, en raison de la situation industrielle de la région avoisinante. La part d'énergie à consacrer à l'un ou à l'autre de ces débouchés s'établit en se conformant à l'économie financière du problème.

Pour faire une étude raisonnée de la limitation des hauteurs de chute, il faut encore tenir compte des climats, des questions hydrologiques, géologiques, de la nature et de la praticabilité des chemins en toutes saisons selon le relief du pays.

Jusqu'à l'altitude 750, on a affaire aux régions cultivées ; de 750 à 1.500 mètres, on traverse des pays constitués par des prés et des bois, où les voies carrossables sont déjà rares ; de 1.500 à 2.200 mètres, on entre dans les régions des pâturages, où la viabilité est quelque peu rudimentaire et où les transports se font à dos de mulet et le portage à dos d'homme ; aux altitudes de 2.200 à 3.000 mètres, on est en plein dans les rochers nus et la glace.

Ainsi l'usine établie dans la région des prés et des bois pourra profiter d'un débit notable et faire prospérer une usine bien fournie de voies de communication. Dans la région au-dessus, le débit sera moindre et pourra transporter l'énergie au loin. A partir de 1.500 mètres, la région n'est que peu industrielle par elle-même, les voies de communication sont médiocres et l'habitation y est rude ; cependant on y rencontre encore des exploitations de carrières et des mines.

Le besoin d'utiliser les chutes abondantes et puissantes peut amener l'industriel à concurrencer avec la houille noire alimentant des centrales à vapeur ou à gaz pauvre dans des régions éminemment industrielles où se trouvent des villes, des usines, des chemins de fer, c'est-à-dire où les débouchés sont nombreux et considérables. Une étude judicieuse des besoins de l'industrie régionale peut arriver à montrer qu'il y a un intérêt commun, pour les deux grandes sources d'énergie, à limiter leur action, sans se concurrencer, dans des périmètres répondant plus particulièrement à leur application économique par rapport à des valeurs fixées par les besoins des diverses industries de la région.

Cette délimitation a aussi son importance au point de vue de la régularité des réseaux de distribution d'énergie hydroélectrique par des stations centrales à vapeur. La connaissance des rayons d'action économique des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usines les unes par rapport aux autres permet de fixer, d'une façon beaucoup plus sûre, l'emplacement le plus favorable aux stations centrales de houille noire.

M. F. Côte a synthétisé au moyen de la (*fig.* 696) la loi économique de répartition des zones de rayonnement de la houille noire et de la houille blanche. Sur cette figure, D, E, F, sont des centres industriels où se consomme de l'énergie sous les formes lumière et force motrice ; B et H sont des usines hydroélectriques alimentées, la première par une basse chute et la seconde par une haute chute ; C_1 et C_2 sont des mines de houille ou des places d'approvisionnement en charbons et MNOPQ représentent des lignes de chemin de fer.

On voit *a priori* que le centre D doit avoir avantage à prendre son énergie en C_1 par suite de la proximité du charbon et de l'éloignement des chutes ; pour des raisons inverses le centre F doit évidemment être alimenté par B plutôt que par C_2 ou C_1. Mais le centre E doit-il demander l'énergie qu'il lui faut pour son éclairage et sa force motrice aux chutes ou aux places C ? Si l'on cherche le *lieu économique* où, — toutes choses restant égales d'ailleurs, — le prix de l'énergie qui vient des forces hydrauliques est pratiquement le même que celui de l'énergie venant des points C, soit par voie de transmission électrique, soit par convoyage du charbon, l'on trouve qu'il est représenté par la ligne ALZ. La partie hachurée du schéma représente donc la zone d'action de la houille noire et la partie blanche celle des forces hydroélectriques. L'intérêt du centre E est de s'alimenter en B et non en C_2 ou C_1.

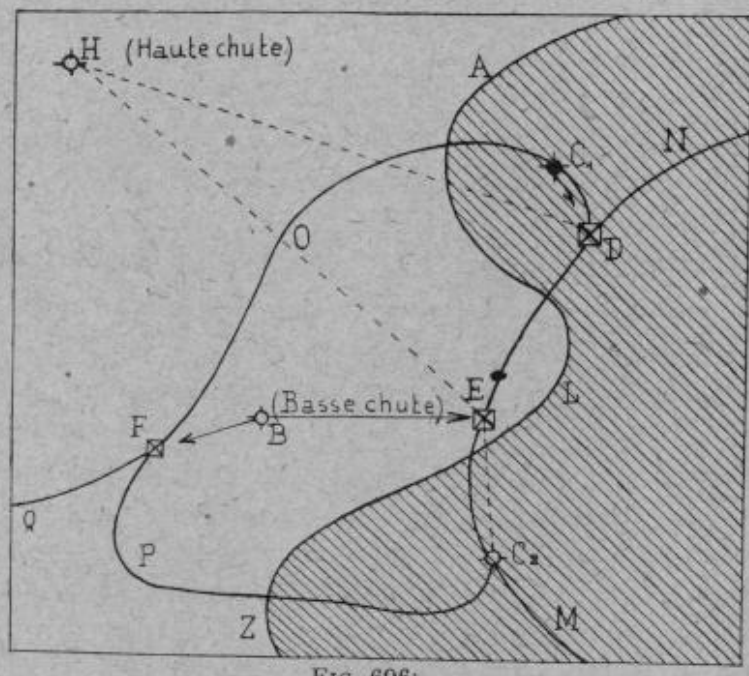


FIG. 696.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On ne commettrait pas l'erreur d'envoyer en F des charbons de C_1 ou C_2 pour l'éclairage et la force motrice, mais on pourrait très facilement commettre celle d'envoyer en D, pour les mêmes usages, du courant électrique engendré en H. Notamment, si l'on considère les lignes de chemins de fer figurées sur le schéma, on pourrait croire, en l'absence de ces considérations, qu'il y a intérêt à opérer sur tout leur parcours la traction des trains au moyen de l'énergie des chutes N et B. Mais on comprend que, pour réaliser le meilleur prix de revient dans cette traction, il faut alimenter par les points C les sections qui passent dans la zone hachurée et par les chutes H et B, les sections comprises dans la zone blanche.

Ceci posé, examinons maintenant le cas d'un centre industriel déterminé, à pourvoir d'énergie. Sa position est telle que la houille blanche y sera plus économique que la houille noire ; on l'alimentera donc d'énergie hydroélectrique. Pour cela, on a le choix entre deux forces hydrauliques de même puissance. L'une est une basse chute à gros débit peu distante du centre en question ; l'autre est une haute chute à petit débit située beaucoup plus loin. A laquelle donnera-t-on la préférence ? Évidemment à celle qui procurera le meilleur prix de revient de l'énergie au lieu d'emploi. Or, la première chute donne à l'usine génératrice un prix de revient élevé ; par contre, le coût du transport de l'énergie sera faible. La seconde chute donne sur l'arbre des turbines un prix de revient moins élevé, mais aussi, par contre, la dépense de la transmission de l'énergie sera plus forte. En faisant pour chaque installation la somme des deux quantités : prix de revient à l'usine, plus coût du transport, on trouve qu'elle est en faveur de la basse chute plus près du centre où doit s'employer l'énergie. C'est pour cette raison que, d'après le schéma précédent, le centre E par exemple aura avantage à recevoir l'énergie de la basse chute B plutôt que celle de la haute chute H, beaucoup plus éloignée.

Il n'est pas besoin de faire remarquer que, pour tout imaginaire que soit cet exemple, il n'en correspond pas moins à des cas très réels, fort nombreux, et qui vont se multiplier au fur et à mesure de l'aménagement de nos grandes forces hydrauliques. Les basses chutes, en effet, se rencontrent dans les régions inférieures des vallées, là où se trouvent les centres industriels, les villes et les pays de plus dense population. Les hautes chutes, au contraire, sont toujours situées dans les gorges escarpées de nos grandes montagnes aux rares habitants et où la vie industrielle, née de la houille noire, n'a créé aucun centre de consommation d'énergie.

Pour rendre plus frappants les rôles différents des hautes et des basses chutes suivant leur position par rapport aux régions où est appelé l'emploi de leur énergie, nous donnons le schéma ci-après imaginé par M. F. Côte (*fig.* 697). Soit SP le profil en long d'une vallée suivant son thalweg occupé par une rivière. La grosseur des traits qui va en croissant de S à P est figu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rative du débit qui se grossit des affluents au fur et à mesure que le cours de la rivière descend vers la plaine ; V figure la région peuplée, industrieuse, capable de consommer sous forme de lumière et de force motrice l'énergie d'une chute. En H est la région des hautes chutes à petit débit, donnant le cheval à bon marché sur les turbines ; en M sont les chutes moyennes comme hauteur et comme débit ; enfin en B se trouvent les basses chutes à gros débit qui produisent le cheval cher. Mais tandis que le coût du transport en V par cheval de ces dernières ne sera que d, c'est-à-dire sensiblement proportionnel à la faible distance de ces chutes au centre de consommation, il sera par exemple de $20d$ par cheval des hautes chutes situées à beaucoup plus grande distance.

La conséquence de cette situation respective des hautes et des basses

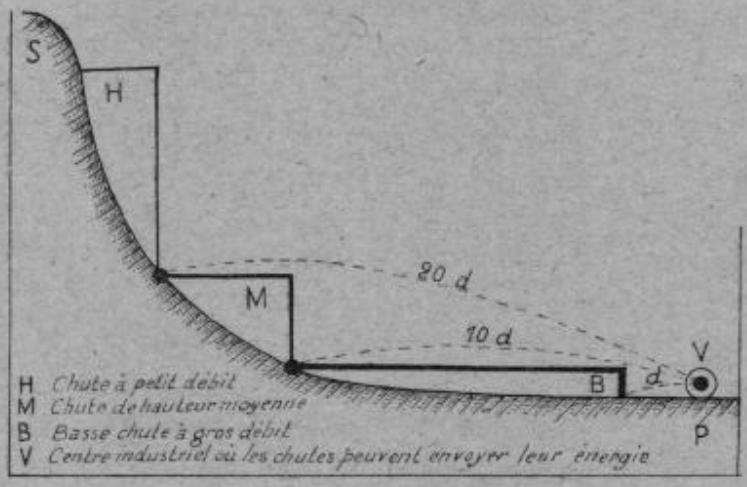


FIG. 697.

chutes par rapport aux régions peuplées ressort immédiatement : c'est que dans la généralité des cas les services publics pourront être alimentés par les unes ou par les autres avec une égale économie.

Dans certaines régions, on a fait appel au transport de force pour renforcer des usines à vapeur existantes. La Compagnie électrique de la Loire a été une des premières à entrer dans cette voie : possédant à l'origine 2.000 chevaux fournis par machines à vapeur, elle a créé à ce moment deux usines hydroélectriques (l'une à Saint-Victor sur la Loire, l'autre sur le Lignon, cette dernière comportant un transport de 30 kilomètres à 30.000 volts) ayant ensemble une puissance de 6.000 chevaux. Dans cette combinaison, les 2.000 chevaux-vapeur sont considérés comme chevaux de secours en cas de trop basses eaux du Lignon, permettant ainsi à la Compagnie électrique de la Loire d'échapper aux grosses difficultés dans lesquelles ont eu à se débattre certaines usines des Alpes.

L'industrie des chutes d'eau bénéficie heureusement de l'esprit d'entente qui anime les industriels qui, au lieu de se faire une concur-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rence à outrance, se prêtent un secours mutuel par l'échange de leurs excédents et limitent leurs domaines d'exploitation dans des champs respectifs basés sur le revenu le plus profitable à chacun d'eux.

Donc, si on se met dans l'hypothèse d'une bonne marche industrielle, les usines noires et les usines blanches peuvent parfaitement se suppléer dans la plupart des cas, les dernières apportant l'appoint de leur énergie moins coûteuse, les premières corrigeant le défaut de régularité dans la puissance fournie par eau.

On peut parer aux inégalités de débit, et aux variations de la puissance disponible qui en résultent, par l'emploi des gaz de distillation ou de combustion du bois dans des machines de force appropriée. On arrive ainsi à des solutions mixtes par force hydraulique, vapeur ou gaz au bois.

Ce dernier système se prête aussi fort bien aux conditions d'un fonctionnement intermittent, les gaz étant mis en dépôt dans des gazomètres constituant des réserves d'énergie. Cette solution est d'autant plus intéressante qu'elle se présente à l'endroit même où se tire la chute d'eau dans la montagne.

Un kilogramme de bois distillé par combustion, ou 400 grammes de houille de qualité moyenne, ou 1 kilogramme de bois, sciures ou déchets, tourbe, fournissent 700 à 800 litres de gaz, de 3.000 à 3.300 calories au mètre cube, et laissent comme résidu 200 grammes de bon charbon de bois.

Au moyen du gaz Riché, le cheval-heure effectif est réalisé avec 1.800 grammes de bois moyennement sec, et le prix d'installation est de 270 à 350 francs pour une puissance de 100 à 200 HP, 240 à 270 francs pour 200 à 500 HP, et enfin 200 à 240 francs pour 500 à 1.000 HP.

Le problème peut être envisagé d'une autre manière, par exemple pour une ligne de chemin de fer qui traverse des régions accessibles à l'énergie hydraulique. Des stations centrales à gaz ou à vapeur sont alors établies sur certains points de son parcours où elles peuvent avoir une action plus rationnelle aux endroits où les sections sont hors des zones d'action économique des chutes d'eau.

Les lignes de chemins de fer seront ainsi alimentées par des forces hydroélectriques ou pourvues de centres d'approvisionnement de charbon dans les zones respectives d'action du prix de revient minimum des deux agents de force. Alors les centrales à vapeur, placées sur les limites des zones, servent à passer les pointes du diagramme de débit du réseau général, et les usines hydroélectriques n'ont à fournir que les chevaux permanents, les chevaux périodiques ne se présentant pas au moment de ces pointes.

La plus grande partie des centrales à vapeur modernes emploient des machines à surchauffe, à multiples expansions, compound en général, et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une puissance de 1.000 à 10.000 HP. A partir de 2.000 HP, on fait appel généralement à la triple et même à la quadruple expansion.

Elles sont le plus souvent horizontales, tandem ou cross compound. Mais l'encombrement de ces énormes machines et leur poids élevé ont amené peu à peu l'introduction des turbines à vapeur, dont l'emploi se répand de plus en plus et qui conviennent d'ailleurs particulièrement bien pour la commande des alternateurs.

Aujourd'hui, elles sont pour ainsi dire presque exclusivement employées et on a construit des unités atteignant 30.000 chevaux de puissance et plus.

Quant au moteur à gaz pauvre, dont la puissance unitaire s'est limitée jusqu'ici à des types de 3.000 HP à 5.000 HP au plus, son usage ne paraît être bien rationnel qu'à proximité des hauts fourneaux qui lui fournissent le gaz à peu près gratuitement.

On produit actuellement dans les centrales à vapeur modernes, par une utilisation appropriée d'unités extrêmement puissantes, le kilowatt-heure à 4 et même 2,5 centimes, tous frais compris.

227. Détermination de la puissance rationnelle des chutes d'eau. — Lorsque l'on a en vue l'aménagement d'une chute, on doit d'abord se renseigner sur les variations de débit du cours d'eau et sur la durée maxima des périodes de sécheresse. S'il a été antérieurement fait des jaugeages sur la rivière, on en contrôle les résultats par les moyens que nous avons indiqués et l'on procède à une enquête auprès des riverains en contrôlant leurs renseignements les uns par les autres.

Les différents ouvrages à établir résulteront de la nature du cours d'eau et des études faites sur place. Si le cours d'eau est à régime variable, on devra envisager la solution d'une réserve hydraulique.

S'il n'y a pas possibilité de créer une accumulation d'eau, la puissance disponible est donnée par le débit minimum minimorum sous la hauteur de chute utile. Si on a en vue un transport d'énergie, il ne faut pas se baser sur le débit moyen de la rivière, car ici la puissance utilisée ne varie pas avec la puissance disponible, comme dans les industries électrochimiques ou électrométallurgiques. Il convient dans ce cas de compter sur un chiffre, inférieur même au débit caractéristique d'étiage ou étiage industriel.

Mais, si l'on envisage l'emploi d'une certaine partie de la force pour alimenter par intermittences, en sus du transport de force, une usine électrochimique ou électrométallurgique, on pourra aménager la chute en comptant sur la valeur du débit caractéristique moyen (puissance limite).

Dans un transport de force, on peut prendre comme rendements moyens les chiffres suivants : génératrice, 0,92 ; transformateurs-éléva-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs, 0,97 ; ligne, 0,85 à 0,90 ; transformateurs-abaisseurs, 0,97 ; distribution, 0,97 ; soit un rendement final de 0,72 à 0,75.

Il faut alors établir, selon le nombre de chevaux dont on dispose, la répartition du nombre de chevaux par vingt-quatre heures, douze heures ou dix heures, que l'on pourra distribuer. On remarquera que les chevaux dix heures s'arrêtent une grande partie de l'année, au moment où l'éclairage commence. Si les basses eaux sont en été, la circonstance est particulièrement favorable.

La possibilité de créer une réserve hydraulique permet de parer à l'insuffisance du débit pendant toute la période de sécheresse et, en basses eaux, d'accumuler, pendant certaines heures de la journée, le débit inutilisé, pour le restituer aux heures de fortes charges. Le cas le plus facile est celui qui consiste à créer une réserve seulement pour faire face aux variations journalières du débit, car on ne met en jeu qu'une fraction du débit total en un jour. En effet, pour parer aux périodes de sécheresse, il faut une réserve importante qui ne peut guère se trouver que dans les hautes chutes et de faible volume. On ne peut la créer qu'exceptionnellement avec les basses chutes.

Les bassins dont le sous-sol est imperméable, où les sécheresses sont courtes et fréquentes et où une pluie abondante suffit pour remplir la réserve, se prêtent particulièrement à cette solution. Quoi qu'il en soit, connaissant la capacité de la réserve et la plus grande durée possible de la saison sèche, le quotient de ces deux facteurs donne le cube d'eau disponible par jour en plus du débit minimum.

Supposons une usine destinée à assurer un transport de force, au moyen d'un certain débit fourni par une chute plus ou moins conséquente. On veut distribuer des chevaux de vingt-quatre heures et alimenter un réseau d'éclairage, le reste de la puissance devant être employé en HP de douze heures. Cherchons quelle devra être la capacité de la réserve et le nombre de HP douze heures disponibles. Les HP de vingt-quatre heures exigeant un débit constant que l'on calcule, il reste une quantité disponible pour l'éclairage et les HP douze heures, laquelle donne en vingt-quatre heures un volume d'eau de N mètres cubes qui sera la capacité de la réserve d'eau.

Pour avoir le volume d'eau qu'exige l'éclairage chaque jour, on peut admettre, avec M. P. Girardet, qu'au moment de la sécheresse la puissance moyenne correspond au 1/3 des lampes installées pendant quatre heures par jour, et si n est ce volume en quatre heures, le réservoir devra en donner les $\frac{5}{6}$, afin de répartir cette prise sur les vingt-quatre heures. Il reste donc $(N - n)$, volume d'eau qui détermine les chevaux de douze heures que l'on peut alimenter. Le réservoir doit fournir pendant douze

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

heures la moitié de ce volume qu'il a, en effet, emmagasiné pendant les douze autres heures. Par suite, la capacité totale c du réservoir sera :

$$c = \frac{5}{6} n + (N - n),$$

dans laquelle N est le volume d'eau disponible par jour, en dehors du débit absorbé par les HP vingt-quatre heures, et n le volume d'eau absorbé par l'éclairage.

La puissance à installer à l'usine devra être au moins égale à la plus grande puissance demandée au même instant dans le réseau, divisée par le rendement total de l'installation.

Il y a lieu de prévoir, en outre, un réservoir en aval, de façon à ne pas modifier le régime du cours d'eau en aval de l'usine. Toutefois cet ouvrage n'est pas utile quand le cours d'eau a un faible volume ou lorsqu'on n'utilise seulement qu'une faible fraction du débit total.

Lorsqu'on ne possède pas de réserve d'eau, les chevaux utilisés pour l'éclairage restent inactifs pendant une bonne partie de la journée à moins qu'on ait trouvé leur emploi pour l'actionnement de moteurs chez des industriels. Ces chevaux de jour se vendent à des prix très bas. Mais, dans le cas d'une réserve, il n'y a pas avantage à vendre ces chevaux de jour, puisqu'on emmagasine l'eau aux heures de faible charge.

Le prix de vente du cheval dépend de plusieurs facteurs et notamment de la quantité de chevaux vendus à la fois et du prix de revient de l'énergie par la vapeur ou par le gaz dans la région où l'usine hydroélectrique peut se créer des débouchés.

Ainsi, pour la clientèle de force motrice, la vente par petites quantités d'énergie (petits industriels) est plus profitable que la division en grosses unités.

228. Emplacement de l'usine. — L'utilisation de la chute d'un cours d'eau, c'est-à-dire la différence de niveau comprise entre le point d'amont au-dessus duquel le débit est insuffisant et le point d'aval où commence le cours en plaine, peut être faite, comme l'on sait, par des usines disposées en gradins le long du cours d'eau.

Dans presque toutes les vallées de montagne, la pente n'est pas constante ; elle est beaucoup plus faible dans la partie inférieure de la vallée, et on peut installer un escalier de chutes de même puissance comme il est symbolisé par la (*fig.* 698).

Par suite de cette configuration, le dernier échelon comporte des ouvrages de prise beaucoup plus développés que le premier, et le cheval installé y est plus coûteux. D'autre part, le prix du transport du cheval est plus faible à mesure qu'on descend dans la vallée. Il est donc impossible

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de dire *a priori* à quel échelon il faut s'arrêter pour déterminer dans quelle mesure l'économie résultant des frais de transport compensera les frais d'installation.

Actuellement les usines de transport d'énergie se sont plutôt installées dans le bas des vallées à forte pente, par la raison que le camionnage joue un grand rôle dans les frais généraux au point de vue d'une fabrication importante. Mais, lorsque l'utilisation des chutes d'eau sera plus complète et plus rationnelle, il y aura avantage à s'installer plus avant dans les vallées, où la main-d'œuvre et les logements sont moins chers, ainsi que les terrains (1).

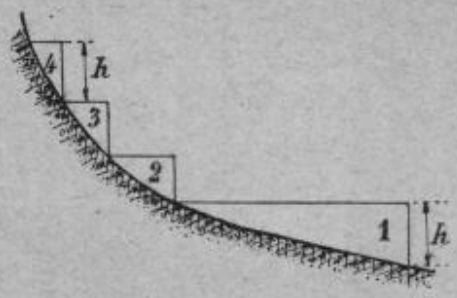


FIG. 698.

Ce mouvement est déjà grandement prononcé à l'heure actuelle et il existe de très grosses usines installées dans ces conditions ainsi que sur les fleuves ou rivières du domaine public.

D'autre part, l'établissement de chemins de fer économiques, ramifications des voies existantes, l'aménagement des voies de communication permettent plus facilement l'accès des marchandises aux usines éloignées des vallées, surtout en ce qui concerne les usines électrochimiques et électrométallurgiques.

229. Association des chutes. Installations d'usines de secours. — Pour éviter des chutes de trop grande hauteur et l'effet d'une trop grande pression dans les conduites, on peut créer deux ou trois stations distinctes en fractionnant la chute.

Prenons le cas de deux chutes et examinons-les au point de vue de l'exécution des travaux ; une fois ceux de la chute d'aval terminés, on peut établir un plan incliné à treuil fonctionnant à l'aide de l'énergie empruntée à cette chute et qui permettra l'ascension à la station d'amont des matériaux de construction ainsi que du matériel électrique de la station génératrice. Il est possible aussi d'installer par exemple un porteur aérien pour le transport des conduites métalliques et de la chaux hydraulique nécessaire pour la construction du barrage et des autres ouvrages d'art.

Quand la disposition du terrain, malgré que la chute totale ne sorte pas

(1) Dans certaines usines à basse chute on a disposé les chambres d'eau de façon qu'un quart du débit qui alimente chaque unité est amené dans un canal spécial à l'effet de distribuer ce quart sur la circonférence de la turbine à l'effet d'éviter les tourbillons que l'on a remarqué dans d'autres installations où cette disposition n'existe pas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des limites acceptables, ne permet pas l'utilisation, par le moyen d'une seule installation, de toute la puissance de la partie de la rivière dont on a acquis les droits de riveraineté, on a le moyen de la fractionner ; alors, par le jeu de canaux d'intercommunication entre les chutes ou par celui de transports de force électrique d'une usine à l'autre, on peut arriver à une combinaison en rapport avec les besoins des industries exploitées et avec les débits. Au cas où les variations de débit ne seraient pas compensées par une réserve hydraulique, on pourrait les régulariser par l'installation d'un réservoir compensateur placé en tête de l'installation.

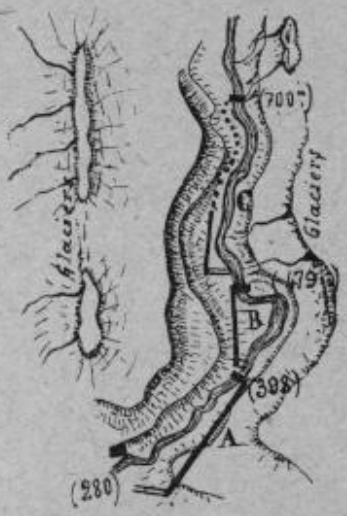


FIG. 699.

Prenons, par exemple, une installation avec trois usines en cascade (*fig.* 699) ; si l'usine A devait utiliser toute la puissance de la chute pour distribuer de l'éclairage et de la force motrice, on lui enverrait, au moyen de conducteurs électriques, le courant produit par les usines B et C.

Pour évaluer la puissance, supposons que le débit du torrent soit de $1^{m3},5$ par seconde, en basses eaux. Si l'on compte cinq mois d'étiage par an (dans les Alpes, on divise l'année en deux périodes : saison estivale : huit mois, et saison hivernale : quatre mois), on aura pour le débit moyen, celui d'été étant de 3 mètres cubes :

$$\frac{1,5 \times 5 + 3 \times 7}{12} = 2^{m3},38.$$

Si on admet une perte de 4 0/0 dans le canal d'amenée et dans la canalisation métallique, compris les chutes de pression par les coudes et par les contractions dues aux robinets-vannes, la hauteur de chute utile de l'usine C sera :

$$(700 - 479) - 4\ 0/0 = 212^{m},16.$$

Avec un rendement total de 0,70 pour l'ensemble, turbines, alternateurs et transformateurs, la puissance moyenne que l'usine C fournira à l'usine A aura pour valeur :

$$\frac{2.380 \times 212,16 \times 70}{75 \times 100} = 4.740 \text{ HP}.$$

L'usine B et l'usine A donneront respectivement, en opérant de la même façon :

$$B = 1.735 \text{ HP} \quad \text{et} \quad A = 2.533 \text{ HP};$$

soit ensemble : 9.000 HP en nombre rond.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'installation de l'usine de la Société Digli Aquedotti de Ferrari-Galliera, à Gênes (*fig.* 700), se composait, avant sa transformation, de trois stations en cascade, employant successivement trois chutes du même cours d'eau, et la transmission d'énergie avait lieu par des génératrices couplées en série suivant le système Thury.

On peut aussi faire soutenir les forces provenant de hautes chutes par celles demandées à des basses chutes. On sait, en effet, que les hautes chutes faiblissent pendant les sécheresses et les grands froids, mais que l'on peut mettre la dépense d'eau en rapport avec la demande d'énergie, par le moyen de lacs naturels ou artificiels employés concurremment avec les réservoirs journaliers, et que, de cette façon, on a la faculté de décupler la puissance apparente du cours d'eau, lorsque la puissance demandée aux turbines a des variations importantes dans le cours de la journée de vingt-

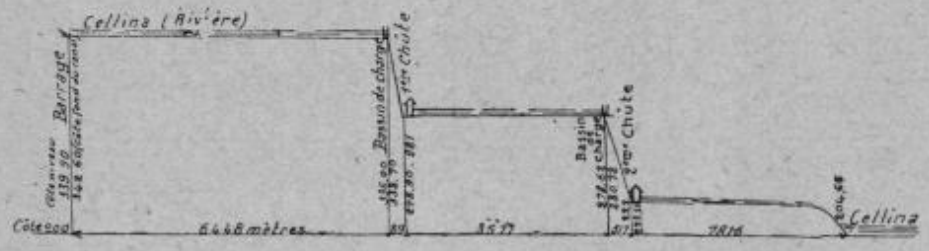


FIG. 700.

quatre heures. Ces usines sont ainsi à même de donner leur maximum d'effet utile.

Les usines à basse chute n'étant susceptibles, dans la plupart des cas, de marcher qu'avec le débit d'étiage, peuvent donc tirer un grand secours de l'appoint d'une chute aménagée comme il vient d'être indiqué, et, en cas de froids intenses, sauver leur situation.

C'est dans cet ordre d'idées que l'usine du Cernon a fusionné avec celle du Bréda et que la Société de Fure et Morge s'est alliée avec l'usine hydroélectrique de Vizille.

On accouple électriquement à une usine hydroélectrique une autre usine alimentée par une chute dont l'énergie est disponible au moment des pointes du réseau de distribution. Des chutes à régime quelque peu différents se marient et s'envoient alternativement de l'énergie lorsque les disponibilités de l'une correspondent aux surcharges de l'autre. De cette façon diverses chutes accouplées sur un même réseau de transport peuvent utiliser un certain nombre de chevaux périodiques.

Au point de vue électrique, un système qui a donné d'excellents résultats consiste, par exemple si on a trois usines génératrices hydrauliques à faire fonctionner en parallèle sur un réseau commun, à munir une des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usines d'alternateurs asynchrones et les deux autres de générateurs synchrones.

Les ateliers d'Oerlikon ont appliqué cette disposition pour trois centrales situées entre Lienz et Moutlingen (Suisse) utilisant des chutes de $3^{m},50$. A cet effet une des usines génératrices est pourvue d'alternateurs synchrones, tandis que les deux autres sont équipées avec des génératrices asynchrones autrement dit des moteurs d'induction tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme. En effet de ce qu'une génératrice asynchrone fournit une intensité de courant constante pour une charge déterminée du moteur qui l'actionne il en résulte que les turbines peuvent être dépourvues de régulateurs. Si la charge du réseau diminue, il en résulte une accélération des génératrices synchrones dans l'usine principale ; il suffit alors de mettre hors circuit les génératrices asynchrones et de fermer les vannes d'amenée.

Nous avons dit que l'on peut associer fort efficacement des usines tributaires de cours d'eau de régimes différents. Soit une rivière alimentée par des névés et quelquefois par des sources et des eaux d'infiltration provenant de pâturages et de forêts, elle présente un régime d'hiver, en année normale, très favorable ainsi qu'un régime d'été du reste ; mais par contre, dans les années de sécheresse, le cours d'eau peut subir un étiage d'été. Il est possible alors de soutenir un tel régime par un autre cours d'eau alimenté par des glaciers. En mariant ainsi deux régimes bien différents, on obtient une moyenne annuelle de force très régulière et très favorable, car les rivières de glaciers donnent, comme nous l'avons vu, leur maximum dans la saison chaude au moment où les rivières alimentées par des pluies peuvent baisser en cas de sécheresse prolongée, mais qui par contre assurent en hiver un bon régime. C'est ainsi que l'usine d'Ugine (Savoie), établie sur la rivière l'Arly alimentée par des névés, a régularisé ses forces par l'aménagement d'une chute sur le Bonant, torrent à régime glaciaire.

L'accouplement des usines hydroélectriques constitue de nos jours un des plus grands progrès intervenus dans la technique de la houille blanche. De grands réseaux se sont établis, comportant plusieurs usines hydroélectriques et des centrales à vapeur, ces dernières destinées à parer non seulement aux pointes, mais encore aux alternatives d'abondance et de disette, pour la meilleure utilisation de la puissance dynamique et économique des cours d'eau. Parmi les installations modernes les mieux conçues sous ce rapport sont celles de la Brillanne et de Tuilière dont nous donnons des monographies spéciales dans le Tome II.

Aujourd'hui l'on peut prévoir que toutes les usines, grandes et petites, en viendront à employer ce système.

Les usines de la Compagnie Électrique de Janesville offrent par leur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

groupement une solution du problème des installations de secours dans les usines hydroélectriques.

Cette Compagnie possède sur le « Rock River » quatre centrales hydrauliques à basses chutes : l'usine de Fulton produisant du courant à 6.600 volts et l'envoyant à l'usine Indian Ford ; l'usine de Janesville, à la fois hydraulique et thermique, enfin l'usine de Mouterey aussi hydrothermique.

L'usine de Janesville en particulier qui produit du courant continu peut fonctionner soit au moyen de ses turbines, soit à la vapeur, soit au moyen de moteurs à courant alternatif et, dans le cas où les générateurs à courant alternatif des usines de Fulton, Indian Ford et Mouterey ne débiteraient plus, les moteurs synchrones de l'usine de Janesville peuvent fonctionner comme alternateurs si on les entraîne soit par les turbines hydrauliques, soit par la vapeur.

Pendant les périodes de débit normal du Roch River, toutes les usines fournissent leur puissance normale en courant alternatif transporté à Janesville ; une partie est distribuée sans transformation aux quartiers extérieurs ; le reste est utilisé pour actionner les moteurs à courant alternatif de l'usine de Janesville qui concourent avec les turbines hydrauliques à l'entraînement des machines à courant continu (*fig.* 701).

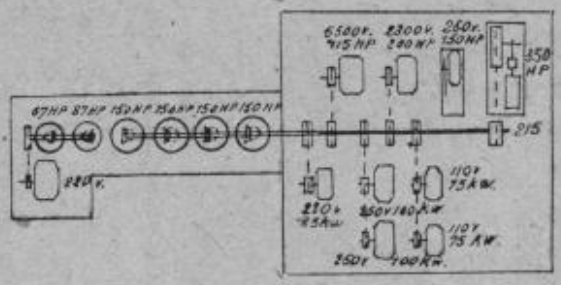


FIG. 701.

Quand les usines de Fulton et d'Indian Ford cessent de fonctionner, pendant les périodes de faible charge, le service en courant alternatif est alimenté par les machines synchrones de Janesville fonctionnant comme alternateurs et entraînées soit par les turbines, soit par la vapeur si les eaux sont basses.

L'usine hydroélectrique du Boulder (Colorado), qui utilise une chute de 556 mètres de hauteur et qui marche en parallèle avec l'usine de Gleuwood sur le Shoshone offre un exemple d'association d'une usine ayant une très grande réserve avec une autre possédant une réserve peu abondante. L'usine du Boulder possède un réservoir pouvant accumuler 14.560.000 mètres cubes.

Une conduite relie ce réservoir à un autre en tête des conduites forcées d'une capacité de 150.000 mètres cubes. Dans ces conditions l'usine du Boulder peut développer une puissance de 15.500 chevaux pendant 100 heures. En cas d'arrêt de l'usine de Gleuwood, l'usine du Boulder peut assurer le service à elle seule.

Pour l'installation de l'usine hydroélectrique de Capdella, sur le Rio

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Flamisell (Espagne), on disposait de deux chutes, l'une d'environ 830 mètres de hauteur, l'autre de 300 mètres, permettant de mettre en jeu une puissance de 60.000 chevaux. On s'est décidé à répartir cette puissance en deux usines en les disposant en série sans réservoir intermédiaire important en partageant la production dans le rapport $\frac{1}{2,5}$ environ, l'usine d'aval recevant en plus des eaux de l'usine d'amont, celles du bassin inférieur.

Les usines hydroélectriques d'Augst et de Wylhem sur le Rhin (Allemagne) qui utilisent une chute de 6 mètres de hauteur offrent cette particularité que le même barrage sert pour les deux usines. Cet ouvrage comporte dix ouvertures avec vannes levantes. Celles-ci ont 9 mètres de hauteur. On peut adventivement obturer une ouverture du barrage à l'aide de poutres-vannes avec un dispositif spécial pour la mise et l'enlèvement de la fermeture temporaire.

L'association des deux usines hydroélectriques de Subiaco et de Tivoli (Italie) est combinée de telle sorte que la première doit servir de secours à la seconde pendant les périodes où la puissance engendrée dans cette dernière ne suffit pas aux demandes des services de la ville de Tivoli. Le mariage a lieu à l'aide de courants de nature différente : le courant est généré par des alternateurs triphasés et monophasés. Pour la traction on a recours à une installation de convertisseurs de courant monophasé en courant continu disposés en parallèle avec une batterie d'accumulateurs avec interposition entre les convertisseurs et les feeders des tramways d'une résistance variable consommant au plus 2,5 0/0 de l'énergie engendrée. Ainsi on a réussi à alimenter avec du courant monophasé une distribution simultanée de lumière et de force motrice extrêmement variable parce que la charge sur les convertisseurs est maintenue toujours constamment sur la dépendance de la résistance régulatrice.

L'installation de Rjukanfos (Norvège) comporte une disposition en deux gradins qui portent les désignations de Rjukan I et de Rjukan II. Cette utilisation d'une seule dérivation d'eau en deux chutes successives présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul barrage pour les deux usines grâce aux dénivellations favorables de la rivière. Le lecteur trouvera d'ailleurs la description de l'usine de Rjukan I dans le Tome II de cet ouvrage.

Il peut arriver qu'en subdivisant la chute totale en plusieurs chutes en série, on puisse obtenir une installation plus économique que celle correspondant à une seule centrale, en envisageant naturellement toutes les dépenses depuis la prise d'eau jusque et y compris les lignes de transport électrique.

D'après l'ingénieur italien F. Pagliaro, si on appelle S_1 les dépenses pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une centrale unique, C le prix de la ligne de transmission, F_1 le coût total de la conduite forcée, la formule :

$$\frac{1}{2} F_1 > (S_1 + C)$$

indique la limite, à partir de laquelle il faudrait fractionner, soit en deux, trois, etc. centrales.

230. Choix des turbines. — Nous complétons dans ce paragraphe les indications données au (§ 157). Les turbines sont généralement établies pour que le rendement maximum soit obtenu un peu au-dessous de la puissance maximum. Le rendement des turbines d'action, à demi-charge, est plus élevé que celui des autres turbines, tandis qu'il est moins bon à pleine charge, pour des chutes modérées. Les pertes d'énergie dans une installation dépendent du frottement des supports, généralement faible, du frottement de l'eau et des tourbillons dans les aubes mobiles et directrices, des fuites d'eau, de la forme défectueuse de certaines parties de la turbine et enfin des pertes de hauteur de chute. Dans les meilleurs appareils hydrauliques, l'ensemble des pertes se tient entre 15 ou 20 0/0 ; celle provenant du frottement de l'eau est la plus importante, car elle s'élève jusqu'à la moitié du total, surtout pour les chutes de grande hauteur.

Nous avons (§ 121) renseigné sur les avantages et les inconvénients des turbines à axe horizontal et à axe vertical et, au cours de l'étude des divers genres de turbines, signalé les causes qui justifient le choix de l'un ou de l'autre, selon les débits et les hauteurs des chutes d'eau. En outre, les descriptions d'usines aménagées qui font l'objet du Tome II sont, à cet égard, d'un enseignement d'ordre très pratique.

En résumé, l'on peut avancer qu'il est préférable de recourir à la disposition avec axe horizontal, chaque fois que cela est possible. L'application des turbines à réaction, à la commande des machines électriques, est très pratique pour les basses chutes. Pour de plus grandes hauteurs, la vitesse de rotation devient beaucoup plus rapide, car la turbine à réaction ne donne un bon effet que si la vitesse circonférencielle est à peu près égale aux 3/4 de la vitesse de l'eau due à la hauteur de la chute. Lorsqu'on emploie des turbines sous de très hautes chutes, il faut que la dynamo soit de construction spéciale, ou bien qu'elle tourne moins vite que les turbines.

Les turbines d'action, comme nous l'avons fait ressortir, présentent de réels avantages sous le rapport de la vitesse. Les turbines Girard ont un réglage économique et un bon rendement pour des charges modérées ; ces récepteurs conviennent bien à la commande des machines électriques.

Les turbines à libre déviation utilisent l'eau d'une manière plus efficace

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sous des charges partielles, et leur vitesse s'adapte mieux aux charges moyennes.

Les roues à impulsion tangentielle ont, à pleine admission, un rende-

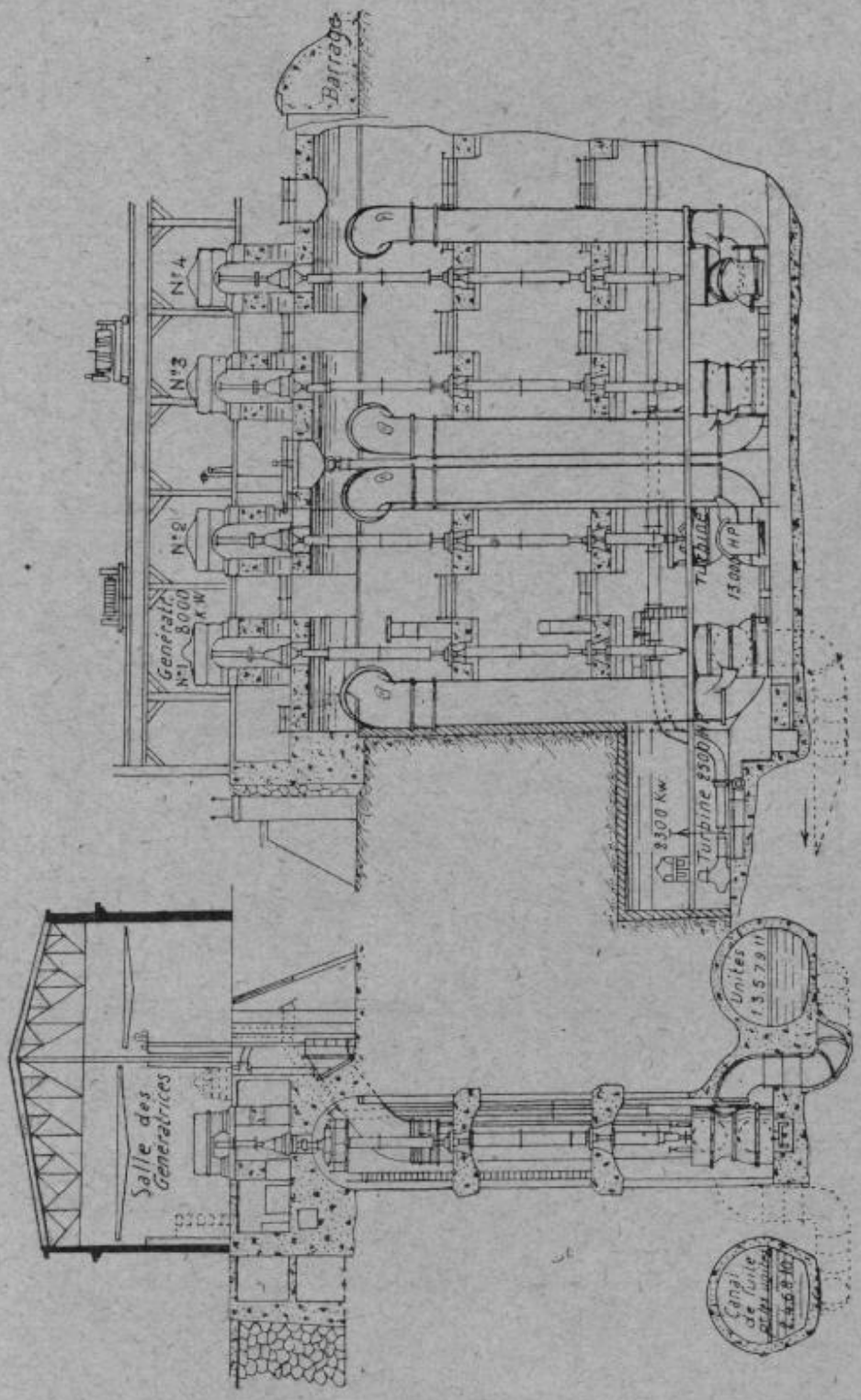


Fig. 702. — Usine hydroélectrique de l'Electrical Development Cº à Niagara.

ment absolument égal à celui des meilleures turbines ; pour de très hautes chutes, elles semblent préférables aux turbines par la raison qu'elles pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

portionnent mieux la puissance à la vitesse et que leur extrême simplicité est un avantage important. Par suite, les roues Pelton sont indiquées pour les très hautes chutes (à partir de 300 mètres). La vitesse à la périphérie doit être la moitié de celle de l'eau et on peut dimensionner la roue pour avoir la vitesse désirable. Le réglage de ces roues est d'ordre simple et facile. Les résultats pratiques obtenus avec elles ont donné toute satisfaction dans les installations où les circonstances ont permis de les utiliser.

Une petite turbine est peu coûteuse, mais elle travaille avec une grande perte due à la vitesse de sortie. Une grande turbine travaille avec moins de perte. Les dépenses d'installation d'une petite turbine sont modérées, mais elles donnent moins de bénéfices pendant tout le temps de son fonctionnement. Avec une grande turbine, les dépenses premières sont plus lourdes,

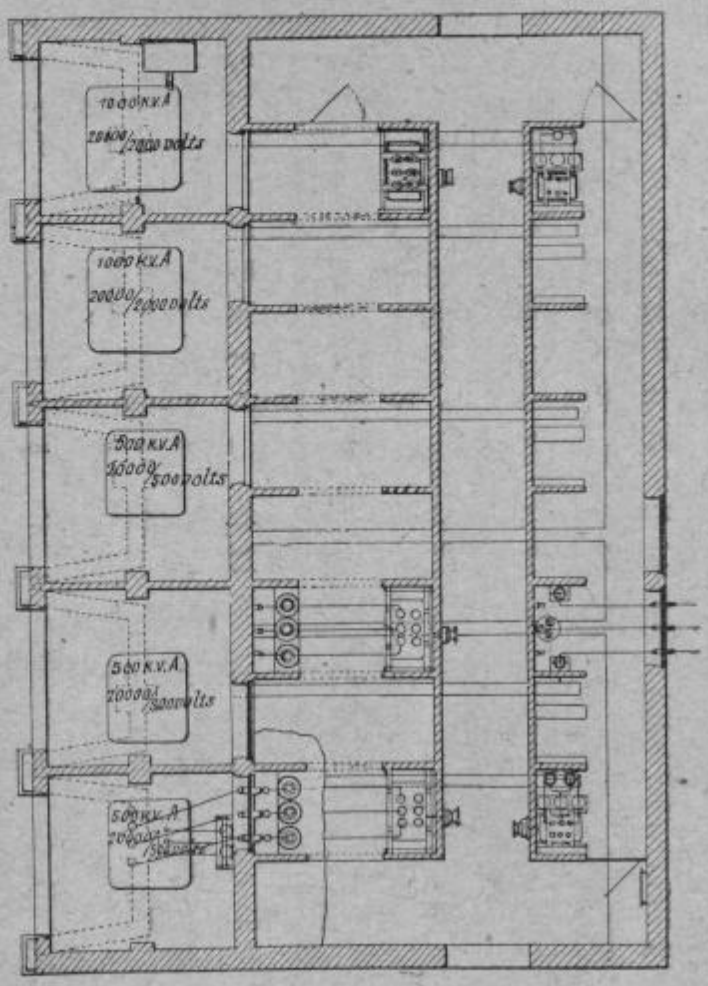


Fig. 703. — Poste de transformation (plan).

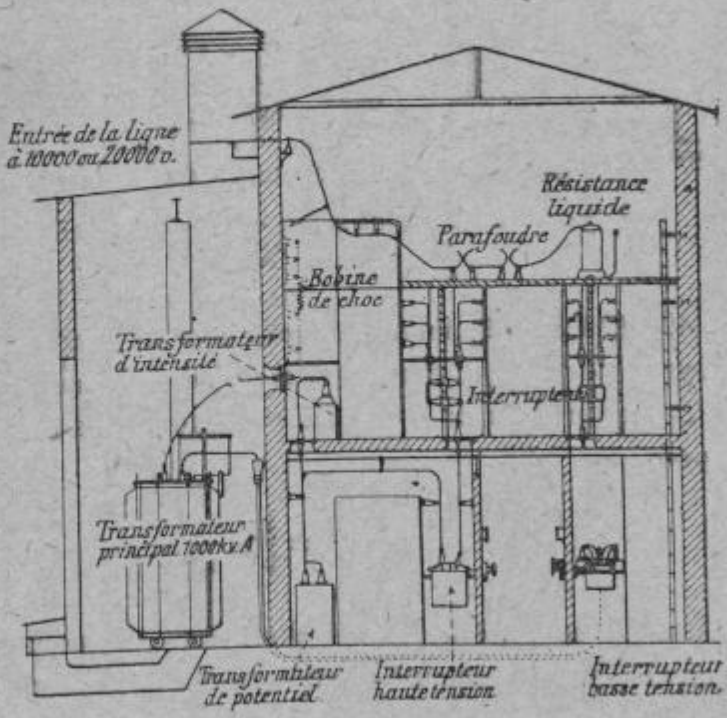


Fig. 704. — Poste de transformation. Élévation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mais la turbine produit mieux pendant tout le temps de l'exploitation. Si l'on ne dispose pas de gros capitaux pour l'installation et si la turbine ne doit pas fonctionner d'une façon continue, il vaut mieux installer une petite turbine. Au contraire, quand les capitaux ne manquent pas, et si l'on veut faire fonctionner la turbine d'une façon intensive, on prendra une turbine de grand diamètre.

Les poids et les prix des turbines américaines, pour une même valeur du rapport de la distance des couronnes de la roue directrice au diamètre de la turbine, sont entre eux approximativement comme les carrés de leur diamètre ; ensuite, pour le même diamètre, si ce rapport augmente du double, les poids et les prix des turbines augmentent approximativement

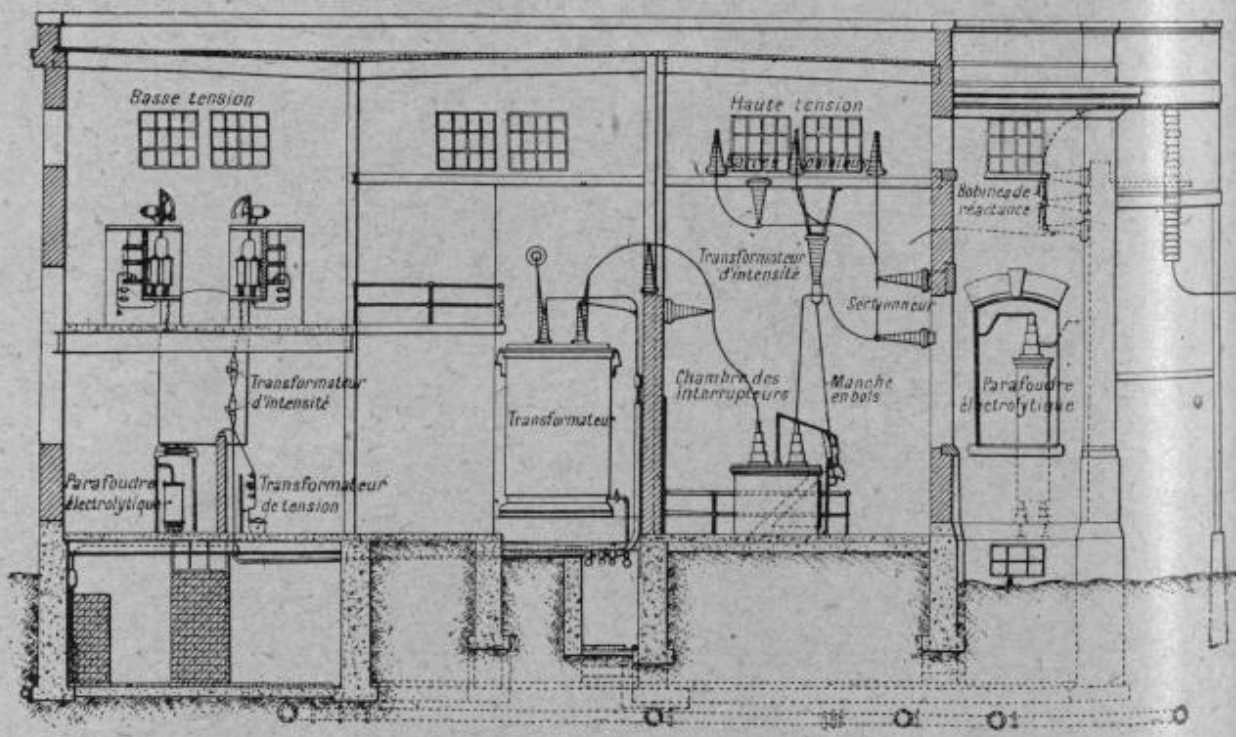


FIG. 705. — Bâtiment de la sous-station de Toronto (Usine hydroélectrique de l'Ontario Power).

de 40 0/0 à 80 0/0, suivant la grandeur du diamètre de la turbine, soit en moyenne de 60 0/0. Par suite, si on désigne par p et q les poids et les prix de deux turbines de 4 mètres et 2 mètres de diamètre, on aura pour le rapport :

$$\frac{p}{q} = \frac{4}{2} \times \frac{1}{1,6} = 1,25.$$

Mais, si on bénéficie d'une diminution de poids et de prix de une fois et quart, on obtient une augmentation de taux de perte due à la grande vitesse de sortie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

231. Bâtiments. — Postes à haute tension. — Les fondations de l'usine doivent être des plus soignées pour résister aux inondations, à l'ébranlement continuel dû aux machines, aux vents extrêmement violents, et pour supporter sans danger le poids des lourdes machines qu'elles

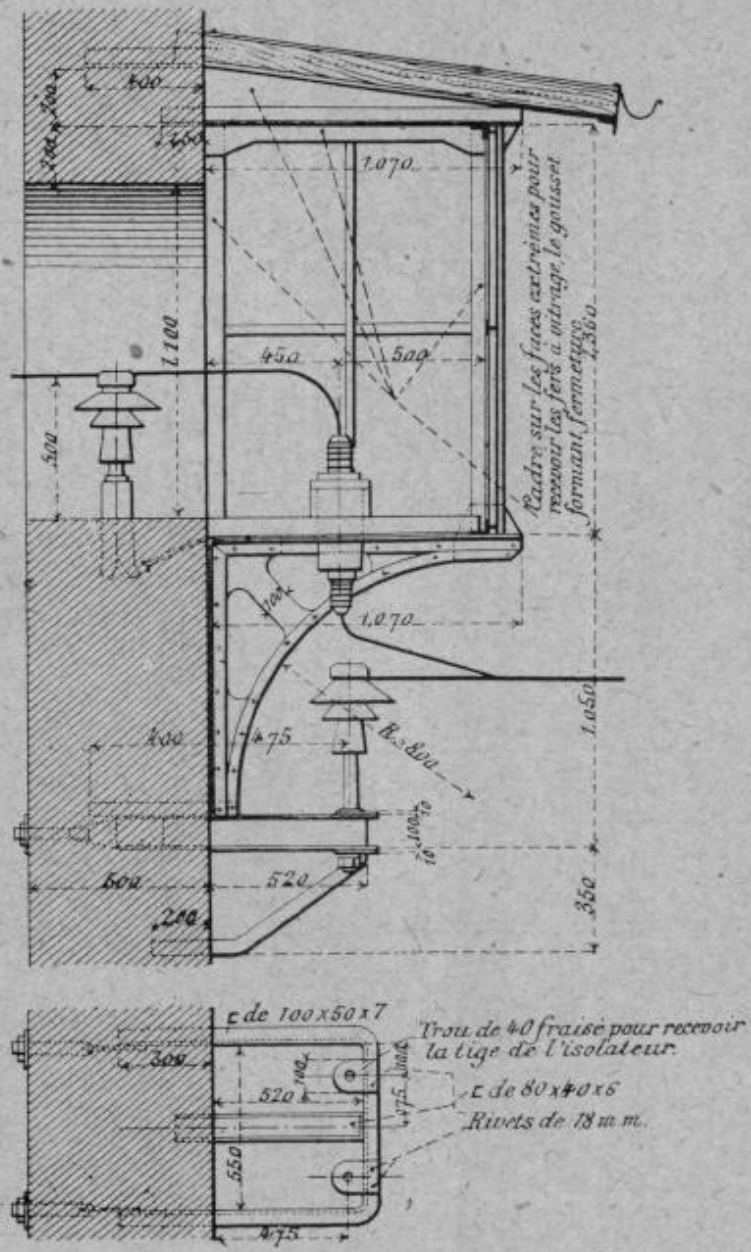


FIG. 706. — **Usine hydroélectrique de Tuilière.** Sortie des lignes à 50.000 volts du poste élévateur de l'usine.

sont destinées à recevoir. On sépare le plus souvent la chambre des dynamos de celle des turbines (dans le cas d'une commande par courroies) par un mur très étanche, lorsqu'il est nécessaire d'avoir les dynamos au même niveau que les turbines. Le mieux est de ne faire qu'un seul canal de fuite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

commun pour les turbines, à l'effet d'éviter les frais d'un canal de fuite à voûtes séparées, toujours dispendieux.

Au point de vue de la marche des machines, le meilleur est de les faire reposer sur des fondations de maçonnerie et de béton ; si on est obligé de

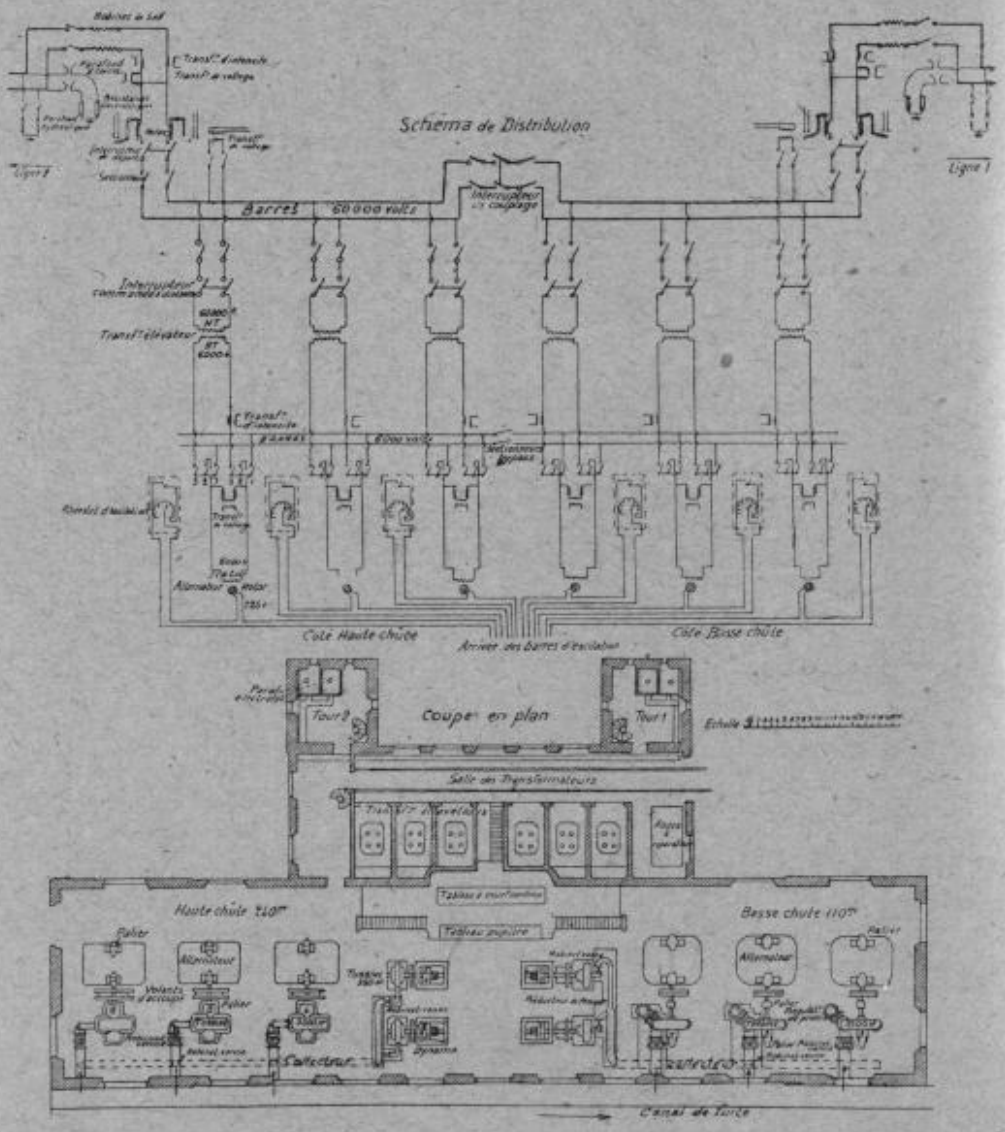


FIG. 707. — Usine hydroélectrique de Soulom.

placer des poutres, il faut les soutenir par des colonnes en fer ou des piles en maçonnerie.

Il est d'une bonne disposition de placer les unités côte à côte et en ligne parallèle pour la facilité de la surveillance, disposition d'autant plus avantageuse que les turbines sont horizontales, évitant ainsi des canalisations longues et sinueuses. Dans tous les cas, il est plus convenable de faire commander chaque génératrice par sa propre turbine pour empêcher toute complication. On installe rarement plus de deux turbines pour conduire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une seule génératrice, à cause de la difficulté d'alignement de réglage et d'accouplement.

Lorsqu'on emploie la commande par courroies ou par câble, on dispose plutôt les machines à des niveaux différents, les dynamos installées à l'étage supérieur.

Les génératrices à haute tension nécessitent un parfait isolement, aussi

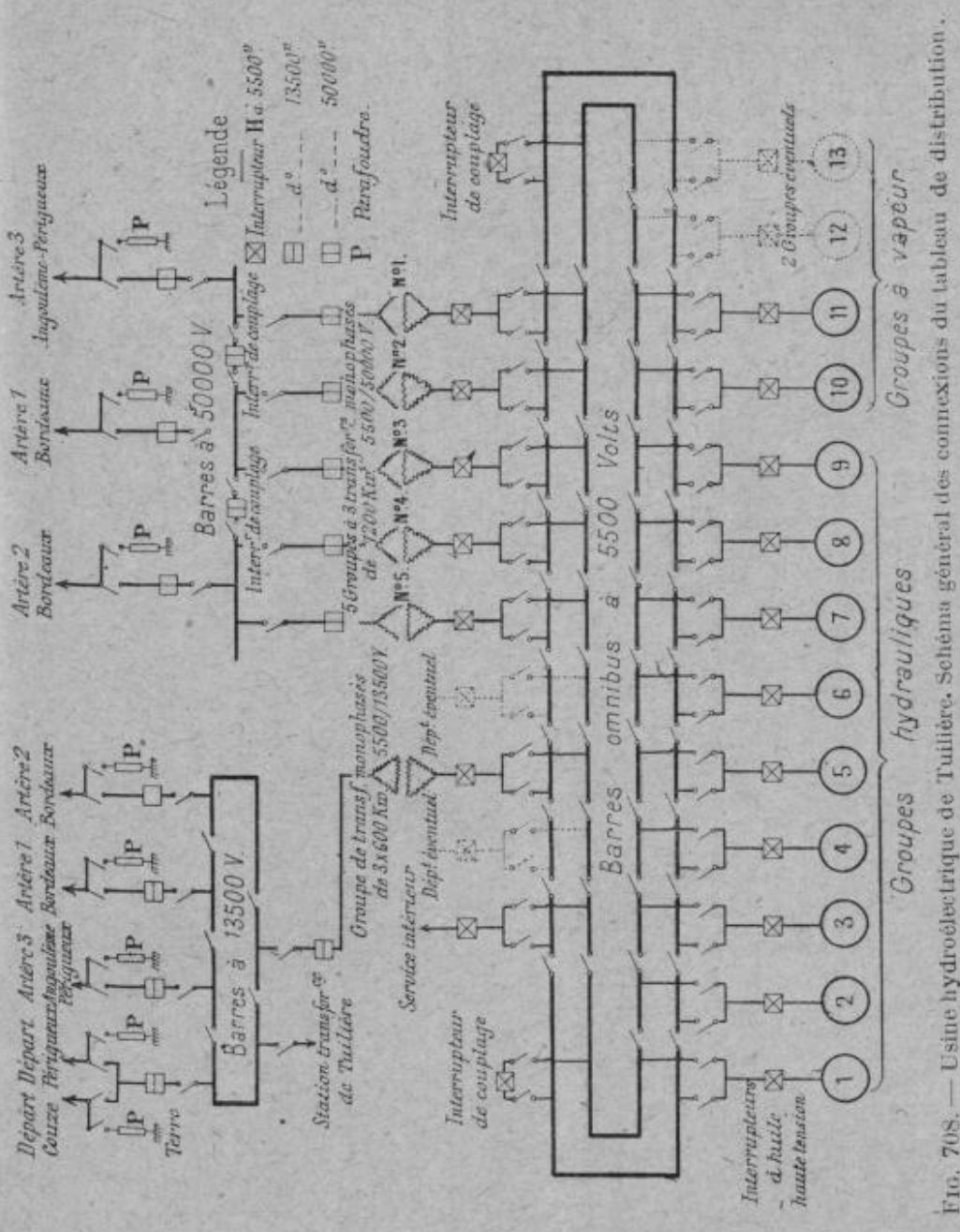


FIG. 708. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Schéma général des connexions du tableau de distribution.

bien du sol et des fondations que des mécanismes d'accouplement. On isole leur fondation à l'aide de soufre et d'un bain d'huile. Les transformateurs à haute tension sont généralement placés dans une salle isolée et éloignée de celle des machines ; on les pose sur des isolateurs à bain d'huile

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fixés sur le sol et sur un plancher en bois sec recouvert d'une substance isolante.

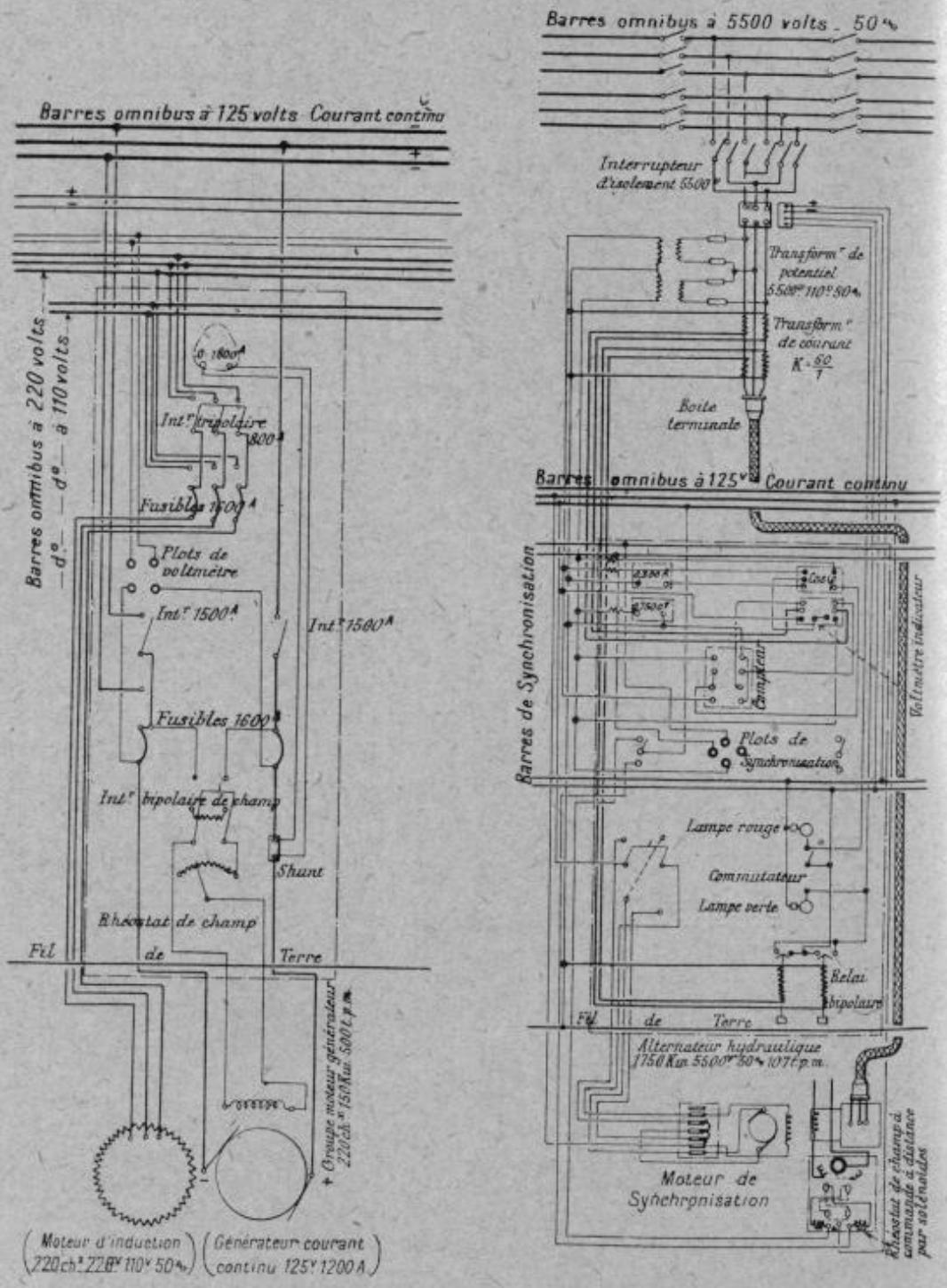


FIG. 709. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Panneaux d'excitation et d'alternateur.

Les tableaux de distribution à voltage élevé demandent à être construits avec le plus grand soin, d'un accès facile, et la lecture des appareils

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pouvant se faire de loin. Chaque génératrice a son panneau, et l'ensemble forme le tableau général.

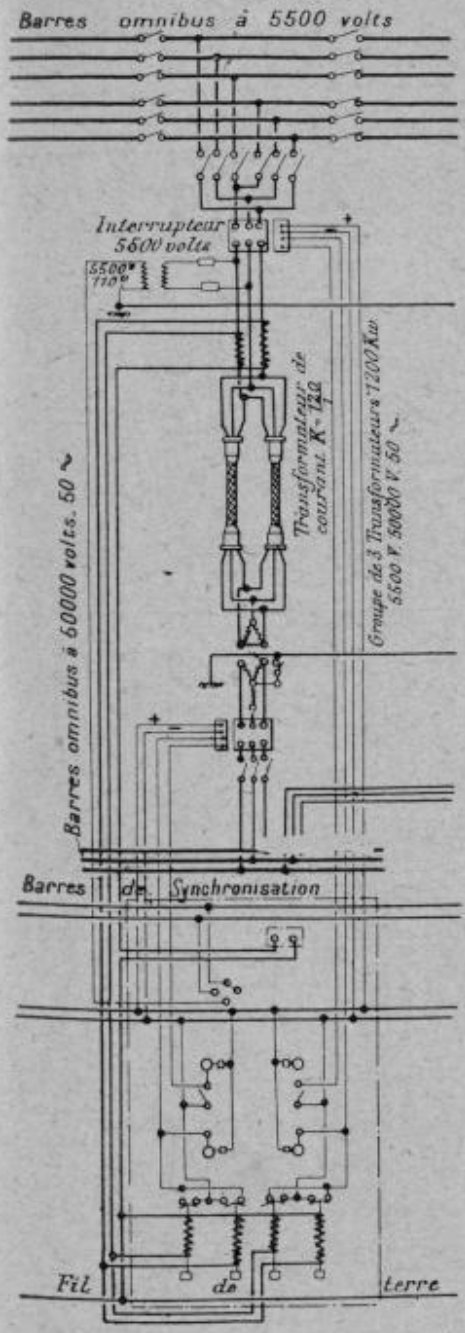


FIG. 710. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Panneau de transformateur élévateur.

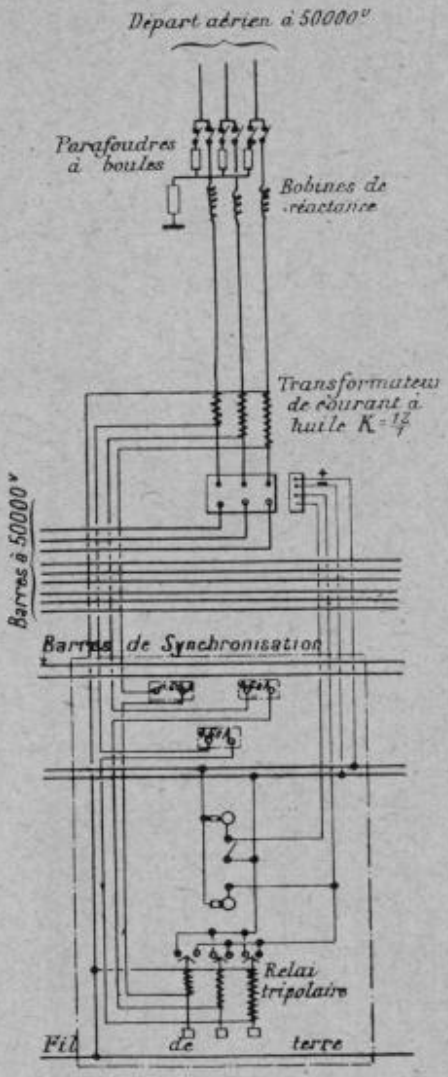


FIG. 711. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Départ à 50.000 volts.

Dans certaines usines hydroélectriques de création récente on a disposé le tableau dans un bâtiment spécialement réservé à son service. Par exemple pour des usines à basse chute, le bâtiment du tableau est dis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

posé sur la rive et sur le sol naturel alors que les machines génératrices sont placées dans le bâtiment principal disposé parallèlement ou en travers dans le lit du fleuve. Comme usine de cette catégorie, la plus importante à ce jour est l'usine de Koebuk (États-Unis), dont la chute a

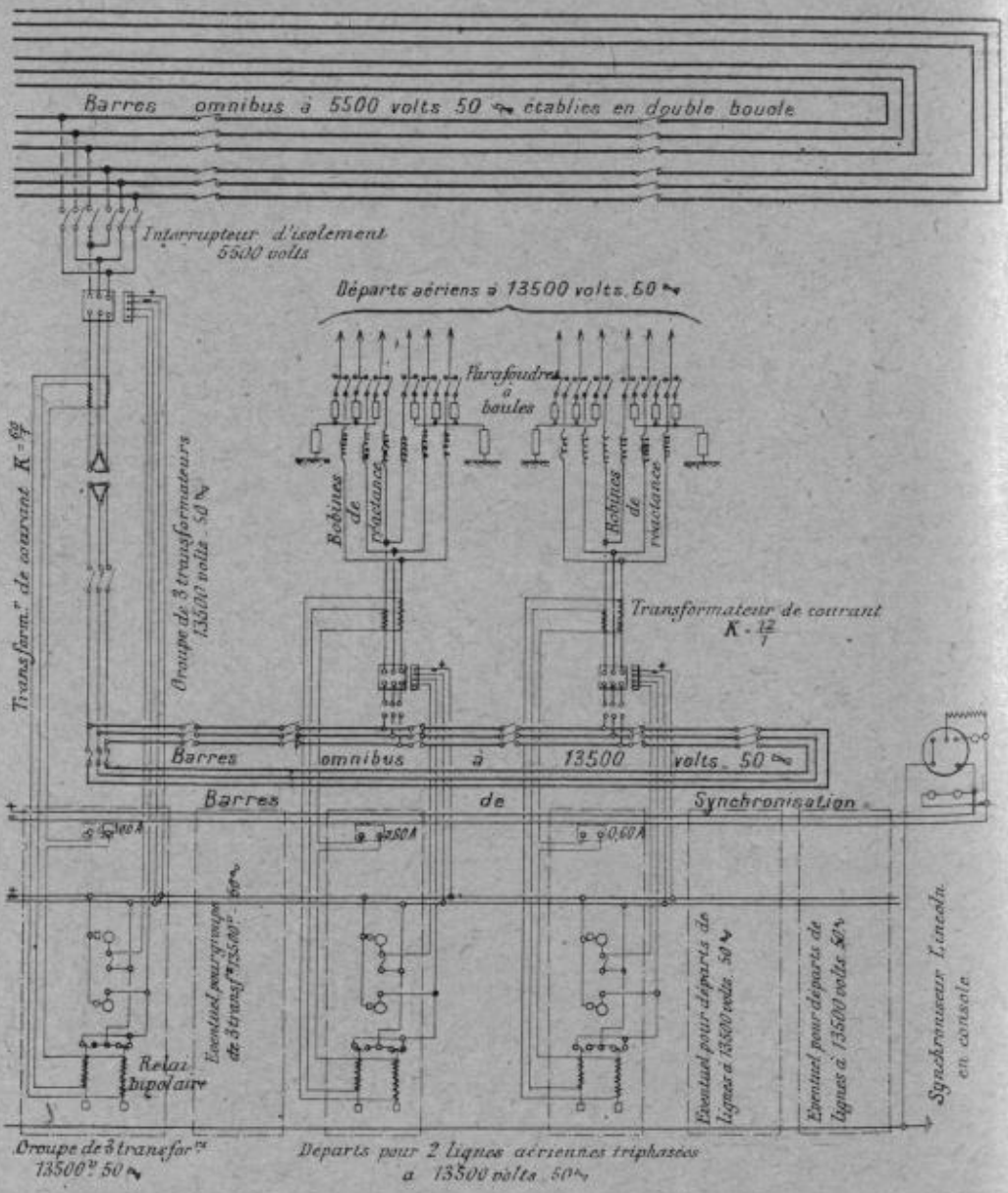


FIG. 712. — Usine hydroélectrique de Tuilière. Départ à 15.500 volts.

11 mètres de hauteur et dont le bâtiment principal qui a 525 mètres de longueur contient 30 unités génératrices.

Dans les usines de transformation, les appareils sont fréquemment placés du côté de la basse tension, de façon à laisser la ligne à haute tension livrée à elle-même.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quant à la construction des bâtiments, elle est adéquate aux matériaux du pays et le plus souvent en briques ; les planchers sont en fer et on cherche à obtenir un éclairage de jour parfait et une bonne ventilation. Un facteur intéressant de la dimension des bâtiments des postes à haute

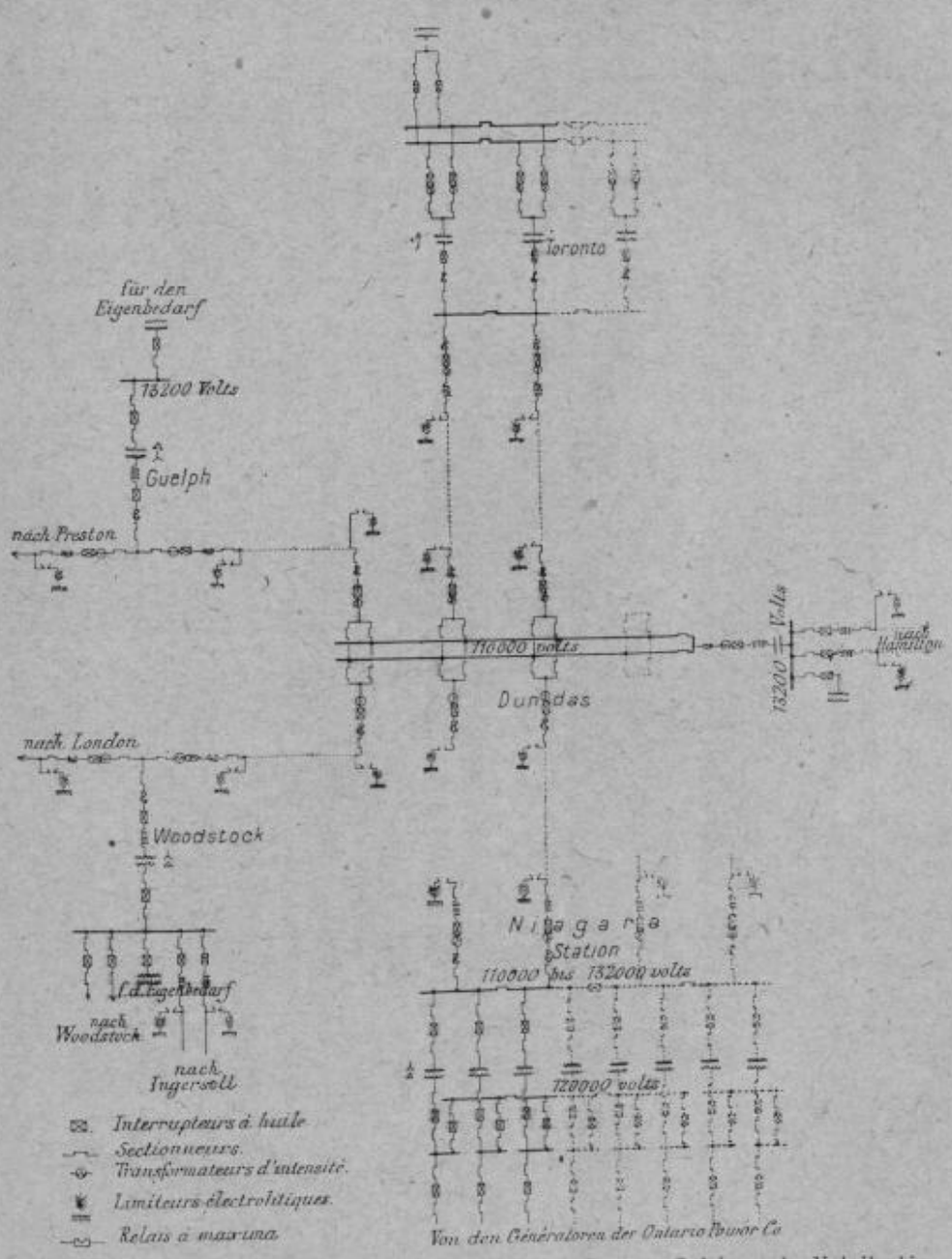


FIG. 713. — Usine hydroélectrique de l'Ontario Power. Schéma de distribution des lignes à haute tension.

tension est leur hauteur. Il dépend presque uniquement de la valeur de la tension qui doit régner dans le poste : entre 15.000 et 50.000 volts les conducteurs qui pénètrent dans les locaux sont alors aériens et la hauteur du bâtiment sera comprise entre 8 et 12 mètres ; pour des tensions de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1.000 à 15.000 volts, les conducteurs peuvent être aériens ou souterrains et la hauteur sera de 8 mètres dans le premier cas et pourra n'être que de 3 mètres dans le second cas. Lorsque des transformateurs de grande

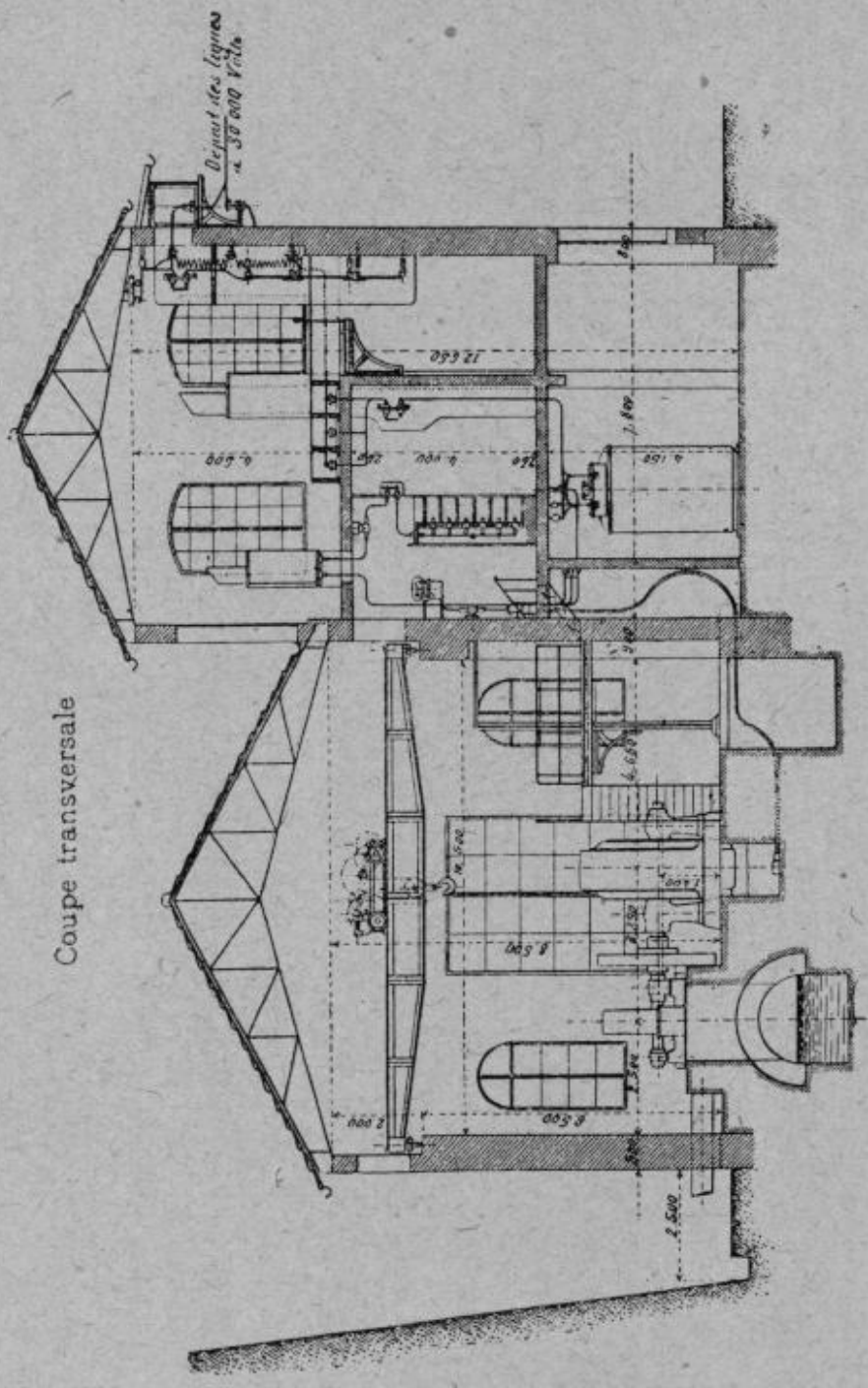


FIG. 714. — Usine de la Siagne. Coupe transversale.

puissance doivent être annexés au poste de haute tension d'une usine centrale, et si à ces transformateurs vient s'ajouter toute une machinerie auxiliaire, une bonne disposition consiste à flanquer le corps principal du bâtiment d'un avant-corps formant rez-de-chaussée et divisé en plusieurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cellules dans lesquelles on loge les transformateurs, les moteurs-pompes, les moteurs-générateurs et la batterie d'accumulateurs.

Nous avons signalé la disposition de barrages avec l'usine hydroélectrique installée à l'intérieur de ces ouvrages. L'usine hydroélectrique de Mockjord (Suède) offre cette particularité que la salle seule des machines est établie souterrainement. La charge des turbines est évacuée dans un tunnel qui rejoint le lit de la rivière en aval d'une ligne de rapides.

Les puits des turbines et la salle des machines ont été excavés dans le roc à l'aide d'explosifs.

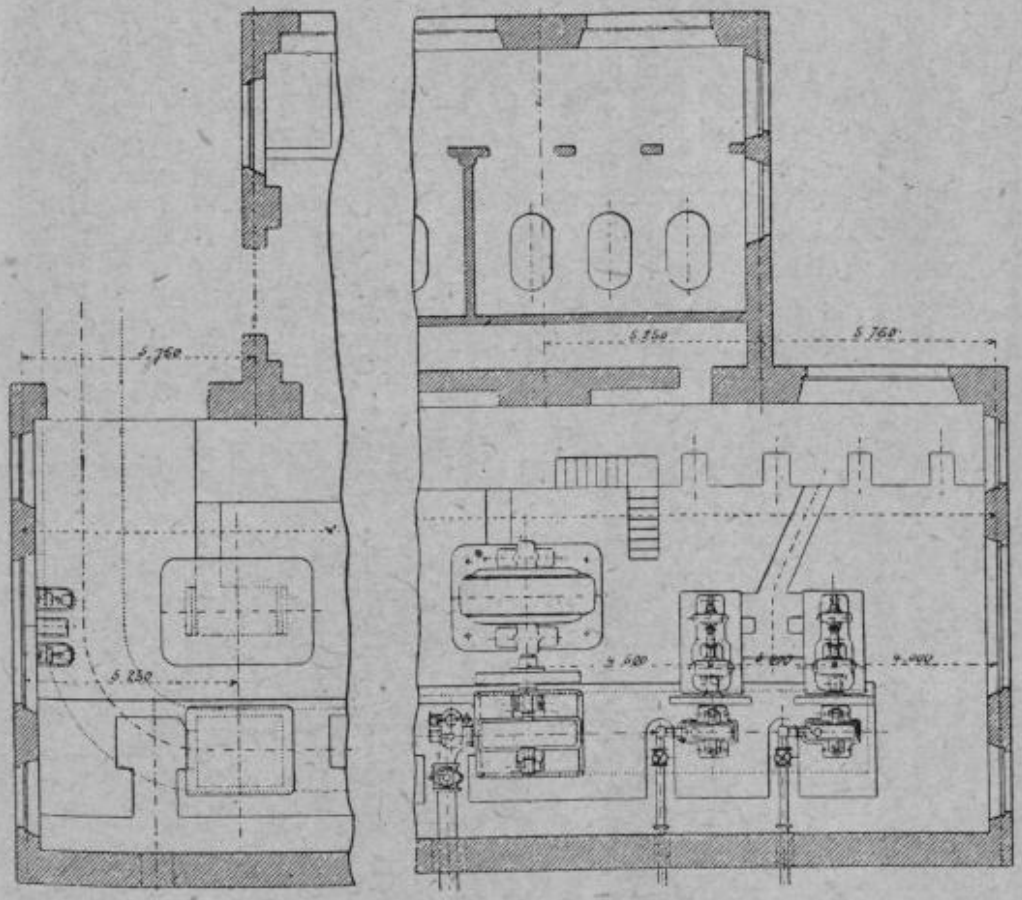


FIG. 715. — Usine de la Siagne. Plan.

Cette salle des machines communique par un tunnel incliné avec la salle des transformateurs installée sur la rive et sur le sol de celle-ci.

L'air de refroidissement des alternateurs aspiré en partie par un caniveau, où passent les câbles, est évacué dans un conduit vertical disposé au-dessus de la salle des machines et est distribué en hiver, à l'aide de ventilateurs, dans la salle des transformateurs, qu'il sert à chauffer et au bassin de prise d'eau, pour empêcher la glace d'obstruer les barreaux des grilles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'emploi de conducteurs à cuivre nu est généralement consacré dans ce genre d'installation ; l'important est de prendre toutes les précautions nécessaires pour leur isolement, leur fixation, à l'effet d'éviter des chutes dangereuses pour le personnel, et de les disposer méthodiquement pour

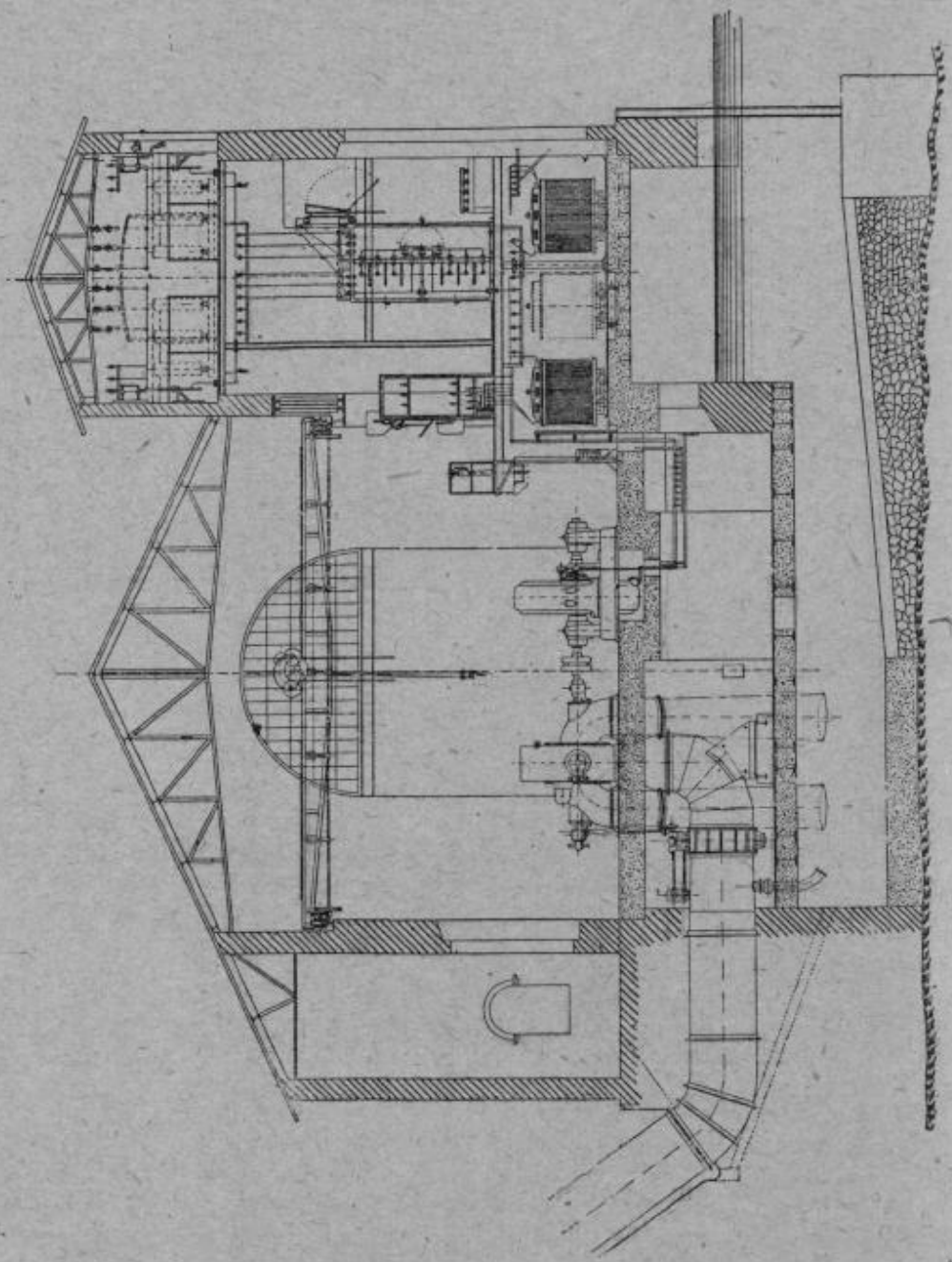


Fig. 716. — Usine de la Souffe. Coupe transversale.

la compréhension facile du schéma de la distribution. Les distances minima que l'on peut admettre entre fils de phase sont les suivantes : pour des tensions entre 30.000 et 50.000 volts, 1 mètre ; pour 15.000 à 30.000 volts, $0^{m},75$; pour 5.000 à 15.000 volts, $0^{m},50$; pour 1.000 à 5.000 volts, $0^{m},25$. Quand dans la même distribution il existe des circuits

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

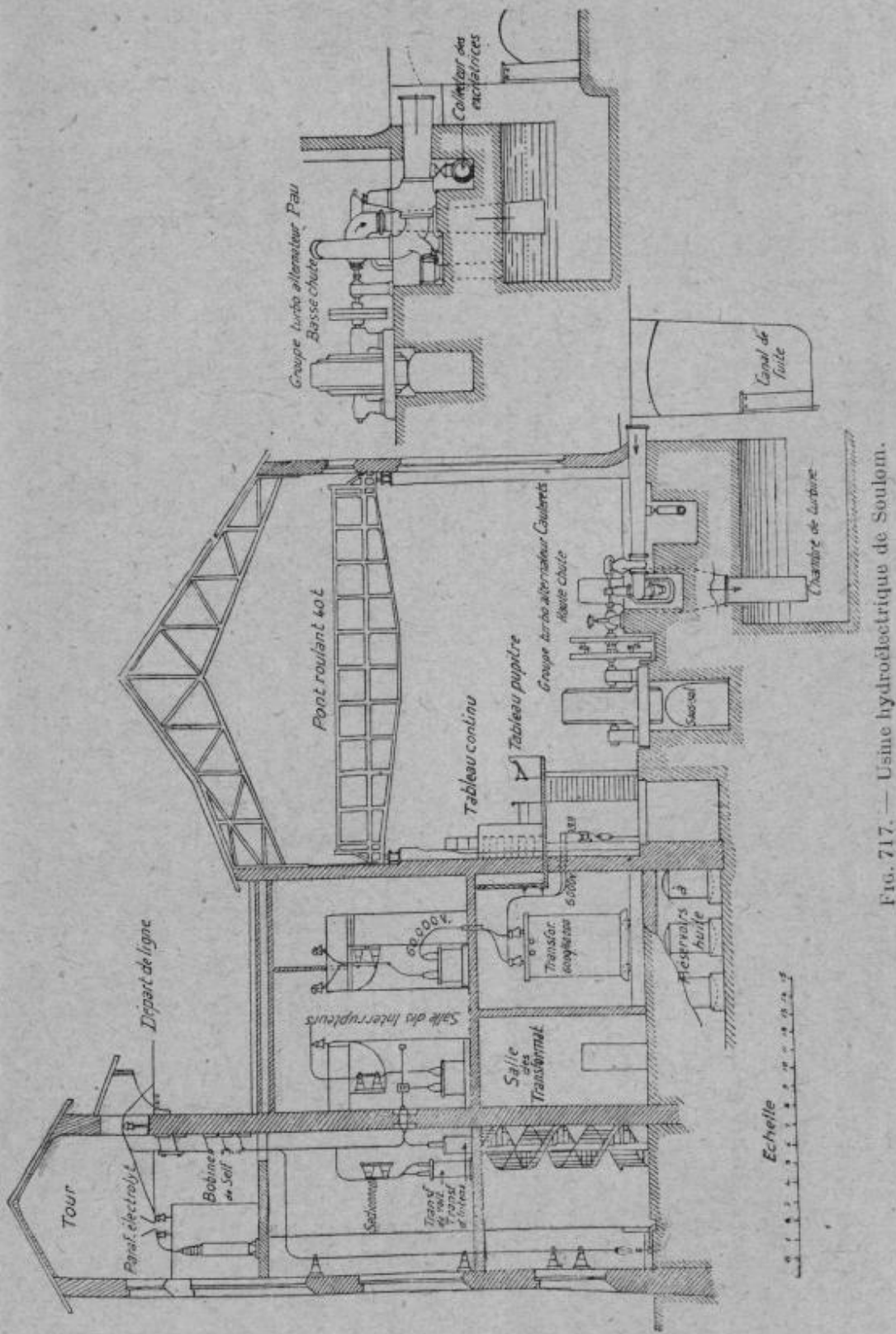


FIG. 717. — Usine hydroélectrique de Soulom.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de tensions différentes, les distances entre circuits de 50.000 et 20.000 volts sont portées à 1m,50, celles entre 20.000 et 10.000 volts 0m,75, et entre 1.000 à 5.000 volts, 0m,50.

Le plus souvent on divise le bâtiment spécial affecté à la haute tension en deux étages, l'un comprenant les barres collectrices ou omnibus, les

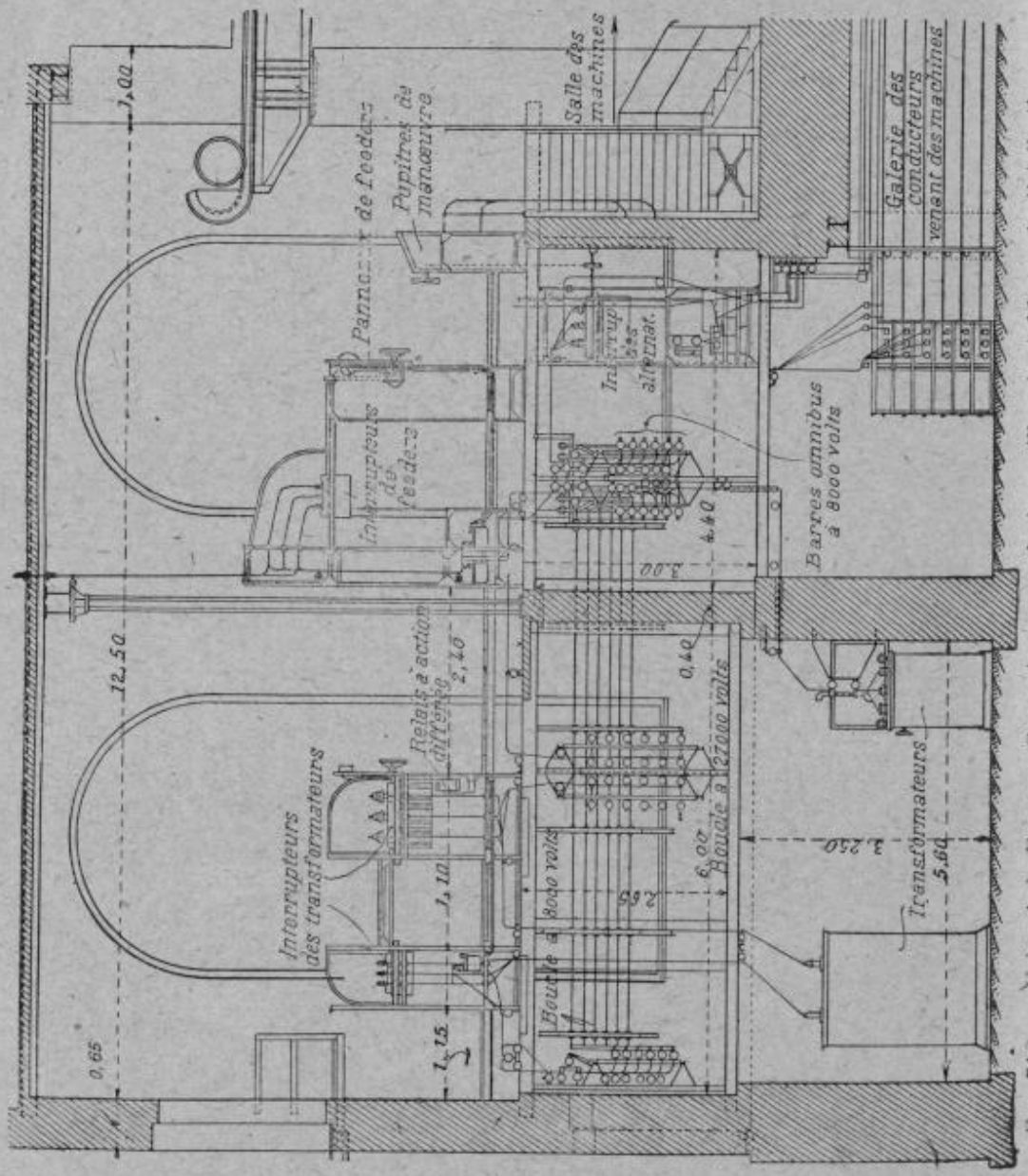


FIG. 718. — Usine de la Beznau. Coupe transversale du pavillon des tableaux de distribution.

couteaux de prise ou d'envoi de courant sur ces barres, les boîtes d'arrivée ou de départ des lignes souterraines et leurs couteaux d'isolement ; l'autre, comprenant les interrupteurs avec leurs organes de commande, les transformateurs de courant et de potentiel alimentant les appareils de mesure et de réglage, les limiteurs de tension, les parafoudres ou déchargeurs et enfin les arrivées ou départs des lignes aériennes. La disposition

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

schématique présentée par la (*fig.* 720) se rapporte à un poste de haute

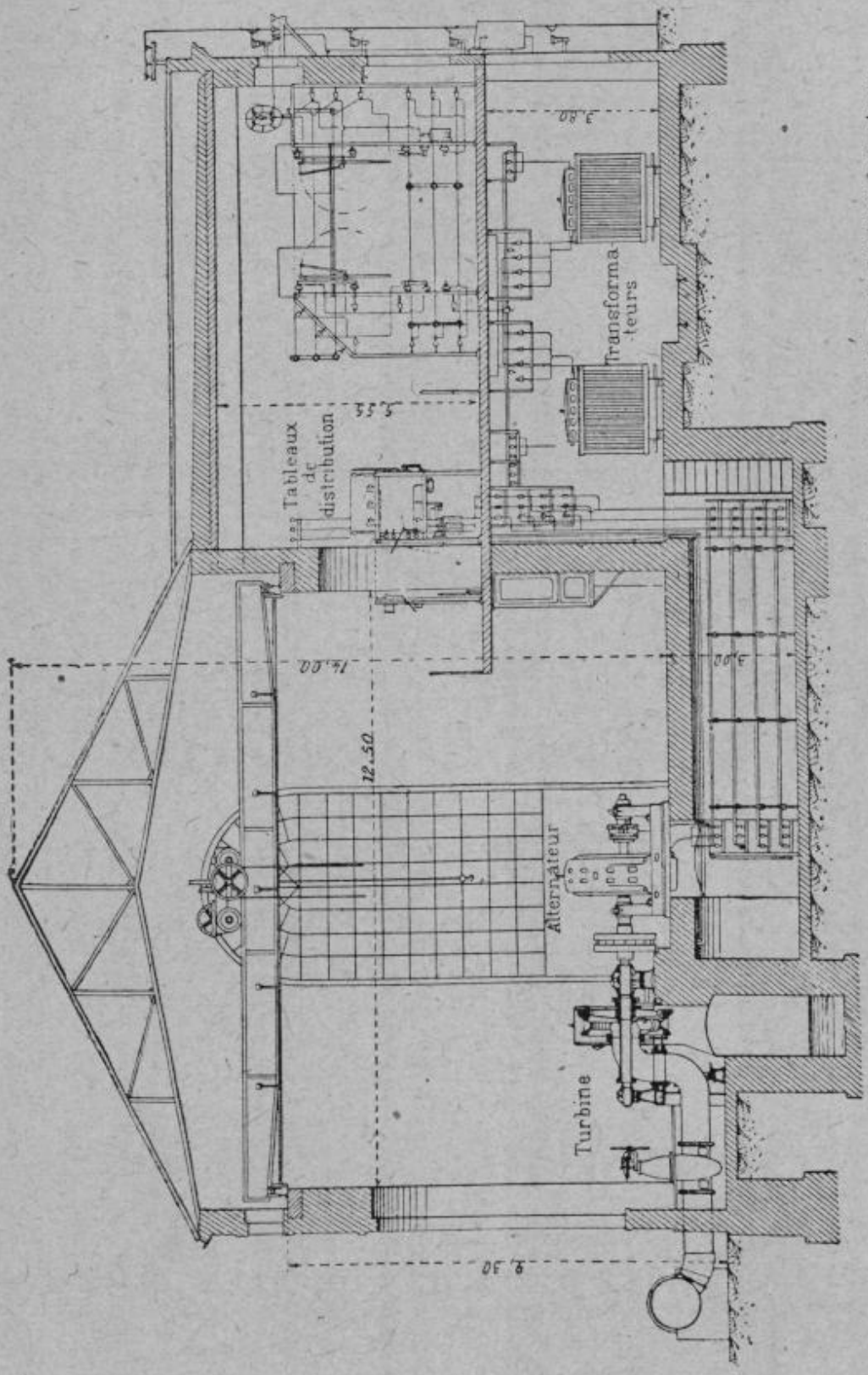


FIG. 719. — Usine de Tusciano. Coupe verticale de l'usine montrant la salle des machines et le poste des transformateurs.

tension d'une usine centrale ; elle offre cet intérêt que tous les appareils

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou organes nécessitant une visite fréquente du personnel sont tous rassemblés à l'étage, et qu'au rez-de-chaussée les barres omnibus sont concentrées au centre de la salle, les couteaux de prise de courant étant répartis sur la périphérie, de façon à dégager leurs abords et à pouvoir profiter plus facilement du jour de la salle.

Il y a aussi des dispositions à quatre étages comportant en sous-sol spécialement les câbles à haute tension reliant les alternateurs aux

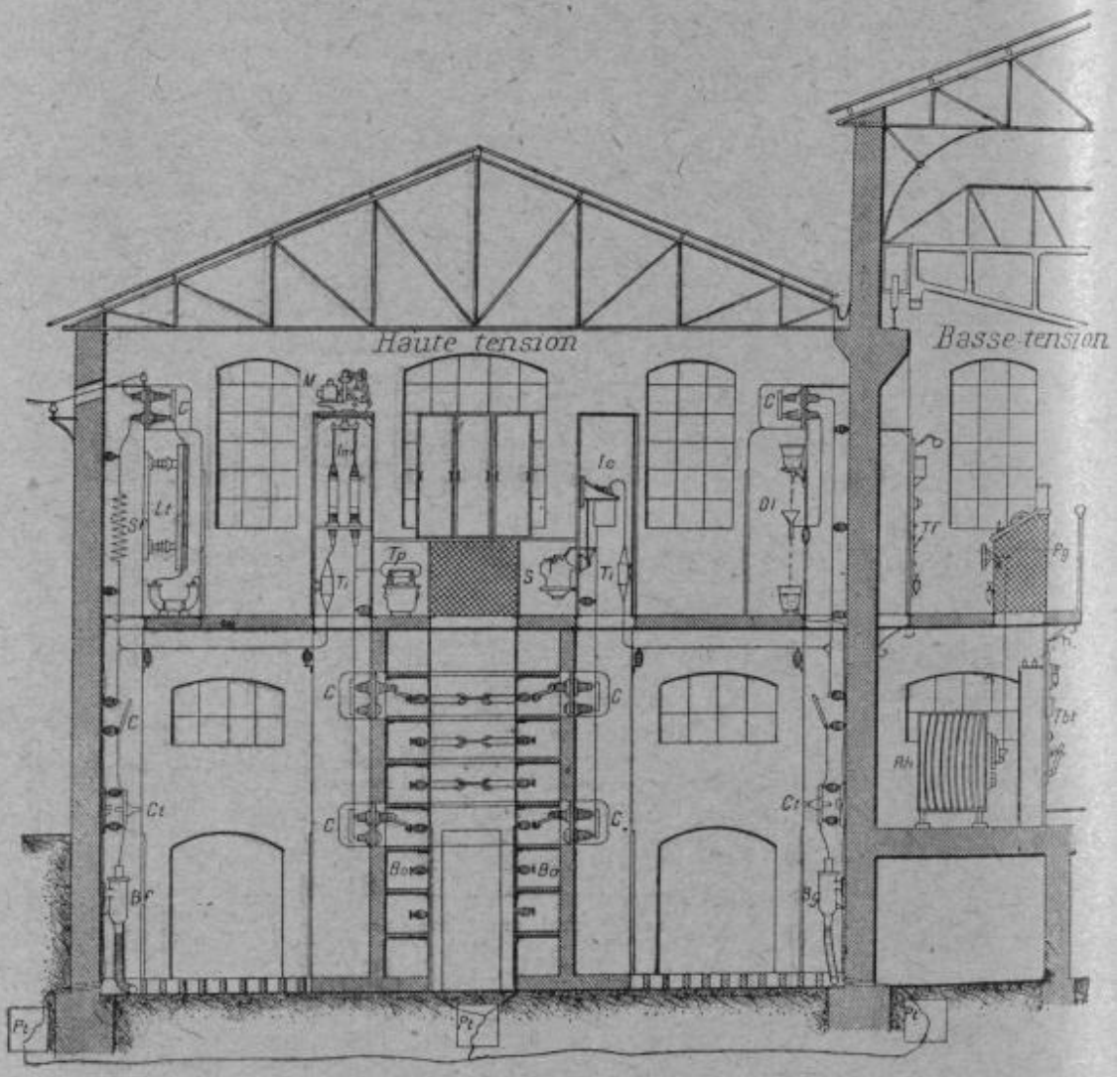


FIG. 720.

barres qui sont situées au rez-de-chaussée. Au premier étage on trouve les interrupteurs à huile pour les machines, les lignes et les transformateurs ; au deuxième étage sont les parafoudres à la naissance des départs des lignes à haute tension.

S'il s'agit de postes de sectionnement ou de transformation, on place les panneaux de commande transversalement à la ligne des interrupteurs et sur une estrade dominant ces derniers, dans l'hypothèse d'une com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mande uniquement prévue à distance. Dans le cas d'une commande à main, on dispose les panneaux derrière chaque interrupteur, de manière qu'ils se fassent vis-à-vis dans l'allée centrale.

S'il s'agit d'un poste d'usine centrale, les panneaux de commande doivent être situés sur une estrade dominant la salle des machines. L'économie, qui résulte de la concentration des panneaux de commande des feeders sous forme d'une rangée de tableaux de marbre consécutifs et relativement étroits, n'acquiert d'importance notable que dans le cas où toutes les commandes sont rassemblées sur l'estrade indiquée plus haut. On dispose dans ce cas, sur la partie antérieure de l'estrade, tous les pupitres relatifs aux commandes des génératrices des moteurs des services auxiliaires et des interrupteurs de couplage, tandis que le mur séparant le poste des machines supporte les panneaux en marbre correspondant à la commande des feeders.

Les barres omnibus et leurs interrupteurs, divisés en plusieurs sections raccordées chacune à une génératrice et à des réceptrices, doivent pouvoir alimenter indifféremment les feeders d'une section par la génératrice de cette section ou par l'une quelconque des génératrices des autres sections ; on doit en outre pouvoir coupler en parallèle les diverses sections et enfin mettre en charge un feeder quelconque par une génératrice quelconque à l'aide de barres auxiliaires et coupler les barres auxiliaires et les barres principales. Les tableaux de l'usine de la Brillanne ont été tout particulièrement étudiés pour remplir toutes ces conditions.

C'est derrière les tableaux à basse tension, que l'on place, dans le cas d'une usine-centrale, les rhéostats d'excitation des génératrices, les volants de commande de ces rhéostats se trouvant sur les panneaux de l'estrade supérieure, afin de concentrer les manœuvres de couplage dans la main d'un seul homme.

L'étage des barres omnibus se divise en trois compartiments dont un central pour les barres elles-mêmes et deux latéraux pour les couteaux. De chaque côté du mur séparant les premières des secondes, on dispose des cloisons de séparation qui sont horizontales pour les barres et verticales pour les couteaux.

Les cloisons se font en ciment armé ou à l'aide de murettes en briques soutenues par une charpente en fer et en séparant les différentes barres omnibus par de petites dalles amovibles en ciment armé ou en matière plus isolante.

Du côté des couteaux, on place des cloisons verticales à chaque changement de feeder ou de machine, et si l'on ne craint pas la dépense, à chaque changement de polarité des conducteurs. La fixation des panneaux dans la murette centrale a lieu à l'aide de plaquettes en marbre dans le cas d'une murette en briques, ou directement à l'aide de leurs porcelaines de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

supports lorsque celle-ci est en ciment armé. En général chaque couteau repose sur une porcelaine pleine et sur une porcelaine perforée. Nous en donnons des exemples dans le tome II.

Quel que soit le type d'isolateur employé pour soutenir les différentes canalisations à l'intérieur des bâtiments, isolateur de ligne ou isolateur accordéon, il est recommandable de profiter du voisinage d'une charpente métallique pour y boulonner la tige de l'isolateur et d'amarrer le conducteur électrique sur la tête de ce dernier. S'il n'existe pas de charpente au voisinage du conducteur, on peut toujours établir un fer plat en forme de berceau scellé dans le plafond et portant les isolateurs. Cette disposition évite que les fils ne tombent à terre si un isolateur venait à se casser.

Les limiteurs de tension et les déchargeurs liquides sont réunis aux conduites qui existent dans l'usine par l'intermédiaire de leurs circuits de terre et, en outre, à plusieurs grandes plaques de cuivre de 1 mètre carré au moins de superficie, placées verticalement dans des fosses qu'on remplit de coke concassé et situées non loin des rigoles d'écoulement des eaux pluviales. On réunit en outre par des barres de fer plat, solidement boulonnées, tous les éléments métalliques de la charpente générale de l'usine et des principaux organes qui y sont contenus, lesquelles barres sont d'autre part soudées à une ou plusieurs plaques de terre reliées à celles des parafoudres. C'est aussi par de telles barres que l'on met en relation les circuits de terre généraux des différents panneaux de commande : terres des transformateurs de courant et de potentiel, terres des compteurs et des wattmètres, terres des relais.

Dans les terrains bons conducteurs, on peut sans inconvénient réunir toutes les terres appartenant à des circuits de tensions différentes, mais pour les terrains mauvais conducteurs (granits, basaltes et autres roches d'origine éruptive), il convient de séparer les circuits par des résistances ohmiques convenablement appropriées, tel qu'un massif de coke concassé pour séparer deux terres voisines.

Une disposition toute particulière a été employée à l'usine hydroélectrique de l'Ontario Power Cº pour le transport à 150.000 volts. Le réglage ne se fait pas de la salle des machines, mais du bâtiment des transformateurs situé sur le haut de la rive.

En raison de la tension élevée de ce transport de force, nous en rappelons les caractéristiques principales.

Sur la ligne, à 110.000 volts, les lueurs la nuit provenant de la décharge silencieuse ne commencent que lorsque la tension atteint 160.000 volts. On est monté jusqu'à 187.000 volts aux essais.

Les portées normales des pylônes sont de 160 à 170 mètres. Les isolateurs sont du type suspendu à huit éléments et leur hauteur totale est de $1^{m},58$. Les isolateurs ont résisté à la tension de 330.000 volts à sec et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

220.000 volts sous pluie de 12mm,5 de hauteur tombant à 45° et 250.000 volts sous une pluie verticale.

La résistance mécanique des isolateurs est de 3.600 kilogrammes pour les isolateurs ordinaires et 4.550 kilogrammes pour les isolateurs d'arrêt.

Les pylônes ont 20 mètres de hauteur et le point le plus bas des conducteurs est à 14 mètres du sol. Ils sont établis pour ligne double avec deux traverses horizontales. La traverse supérieure a 5m,13 et l'inférieure 10m,70. Le poids des poteaux normaux est de 1.810 kilogrammes et leur prix de revient de 975 francs. La surface couverte aux pieds est de 5m²,180. Une voiture peut passer entre les pieds.

Les frais pour les canalisations seules se sont élevés à 5,3 millions de marks.

Au surplus, les matières concernant ce paragraphe sont traitées avec plus d'ampleur dans le tome III de cet ouvrage (Stations centrales).

PRIX DE REVIENT ET DE VENTE DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

232. Avantages économiques des usines hydroélectriques. — Une comparaison entre l'énergie hydraulique et l'énergie thermique doit être envisagée sous les rapports de la sûreté de fonctionnement, de la facilité d'installation, du rendement et du coût de l'énergie.

Dans une installation à vapeur, l'arrêt peut provenir du manque de combustible par suite d'une interruption dans le transport, où les questions de grève et de manque de matériel jouent un rôle qui demande à être sérieusement pris en considération. Les réparations qui sont très fréquentes dans la machinerie à vapeur, en raison des nombreux appareils qui la constituent, peuvent demander parfois des jours entiers, si on n'a pas à sa disposition des unités de rechange en nombre suffisant.

Dans une usine hydroélectrique, l'énergie provenant de l'eau en mouvement sur des pentes, est réglée par des lois naturelles et il suffit d'une réserve bien appropriée pour parer à tout arrêt de l'installation. Les réparations pour cause de remplacement d'organes ne sont pas importantes. Les turbines sont d'un fonctionnement pratiquement automatique ; les générateurs qu'elles actionnent, les transformateurs et même les lignes de transmission, installés d'une façon méthodique et prudente, ne donnent pas lieu à des accidents qui puissent entraver la marche continue de l'exploitation.

L'installation à vapeur nécessite beaucoup d'espace pour l'emmagasinement du combustible, l'emplacement des chaudières et des machines. Les poussières, la chaleur, sources d'usure constante, entretiennent un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mauvais état d'hygiène. Avec l'usine hydroélectrique, on a réalisé le maximum de confort touchant ces points de salubrité ; de plus, la marche est silencieuse et un air pur y verse à flots ses effluves vivifiants.

Une usine hydroélectrique peut être très ramassée et ne nécessiter qu'un espace relativement restreint relativement à la puissance qu'elle fournit.

En ce qui concerne le rendement ; avec l'installation à vapeur, il faut tenir compte du rendement de la chaudière, de la machine et des transmissions. Celui propre à la chaudière tient à la nature du combustible employé et le genre et la pression de la vapeur produite. On sait que la transmission par arbre et courroies absorbe une proportion importante de l'énergie produite. Les rendements de chacune des parties de l'installation baissent vite avec les diminutions de charge.

L'appareil hydroélectrique présente au contraire une constance de rendement remarquable : les différences entre le rendement à pleine charge et à demi-charge pour les turbines ne dépassent pas 2 à 5 0/0 et pour les génératrices, 10 0/0. La transformation de l'énergie des chutes d'eau se réalise, dans la plupart des cas, en employant des génératrices directement accouplées aux turbines, avec un rendement de 72 à 76 0/0. L'installation complète, non compris la ligne, atteint donc 75 0/0. Aux lieux d'utilisation, on arrive avec un rendement total, dans le cas d'une longue ligne de transport, de 60 0/0.

Avec l'appareil à vapeur, le rendement mesuré à l'atelier d'utilisation ne dépasse pas 20 à 25 0/0.

Pour se rendre compte du coût de l'énergie, il faut, avec l'installation à vapeur, tenir compte de celui de la production de l'énergie, de l'entretien, de la surveillance, des réparations et enfin du facteur de charge. L'entretien joue surtout un grand rôle et les manutentions y sont multiples et portent sur un tonnage considérable.

Pour une installation de 1.000 chevaux par exemple on peut tabler sur les prix suivants :

	A vapeur	Hydroélectrique
Bâtiments et ateliers	50.000	200.000
Chaudières, pompes, machines à vapeur consommant 700 grammes de charbon par HPH	250.000	»
Turbines et génératrices	»	75.000
Transport de force (30 kilomètres)	»	200.000
Transmission mécanique	25.000	»
Équipement électrique de distribution	»	50.000
TOTAUX	325.000	525.000

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dépenses d'exploitation :

Intérêt du capital 5 0/0	16.250	26.250
Combustible à 12 fr. 50 la tonne	26.875	»
Eau	2.830	»
Main-d'œuvre (3 chauffeurs)	16.950	19.000
Graissage	6.600	2.500
Entretien et réparations	18.750	16.000
Impôts	6.750	10.500
Assurance	3.250	»
	96.255	74.250

Admettant les taux de rendement ordinaires, on trouve pour la dépense par cheval-an :

	A vapeur	Hydroélectrique
Avec facteur de charge de 75 0/0	184,50	114,50
— — — 50 0/0	338,75	165,00

On voit ainsi que les usines hydroélectriques permettent de récupérer avec plus d'économie l'énergie disponible.

Dans l'établissement d'une chute, une question importante est celle de la dépense à laquelle elle donne lieu, selon les travaux plus ou moins considérables qu'entraîne son aménagement. M. R. Tavernier, dans un rapport inséré aux *Annales des Ponts et Chaussées* (2e semestre 1900), a fait ressortir que, dans l'hypothèse de trois cents jours de travail par an, à raison de vingt heures par jour, et pour une puissance de 10.000 HP, le cheval-an revient à 240 francs avec la vapeur, — au point de vue des frais annuels, — et à 10 francs seulement avec aménagement hydraulique, la dépense de premier établissement étant comptée à raison de 100 francs le cheval hydraulique, prix qui est atteint assez couramment.

Les tableaux I et II ci-après donnent, à cet égard, quelques indications d'un grand intérêt.

D'après un certain nombre de constatations et dans les mêmes conditions que ci-dessus, le prix du cheval-an reviendrait à 160 francs pour une usine hydroélectrique de 50 HP, à 90 francs pour 300 HP, à 65 francs pour 500 HP et 10 francs pour 10.000 HP, alors que les prix respectifs pour usine à vapeur s'élèveraient à 420, 330, 270 et 240 francs.

Cependant la puissance hydraulique semble plutôt réservée aux industries de grande importance qui ont recours à une installation continue ; tel est le caractère des usines d'électricité et principalement des usines électrochimiques et électrométallurgiques. Pour les usines peu considérables, la machine à vapeur peut encore concurrencer la force hydraulique, car, alors que les périodes de chômage ne déterminent pas une réduction dans les dépenses de fonctionnement d'un moteur hydraulique, elles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU I. — **Coût des usines de secours thermiques.**

INSTALLATIONS	PUISSANCE HYDRAULIQUE	PUISSANCE THERMIQUE DE SECOURS	TYPE DE MACHINES	COUT DE L'INSTALLATION DE SECOURS (générat. et machines)	PRIX PAR CHEVAL
	Chevaux	Chevaux		Francs	Francs
Kemten	500	150	Machine à vapeur	87.500	580
Untertur Kheim	900	600	d°	—	—
Hirschau	1.000	600	d°	137.500	230
Chur	1.500	250	d°	—	—
Lauterbrunnen	2.160	1.000	Moteur à gaz	—	—
Ruppoldingen	3.200	1.000	Turbine à vapeur	306.000	306
Usine de la Kubel	4.000	1.000	Machine à vapeur	180.000	180
Usine de l'Isar	5.400	2.000	d°	—	

TABLEAU II. — **Coût des travaux de captage d'eau.**

INSTALLATIONS	PUISSANCE EN CHEVAUX	COUT TOTAL D'ÉTABLISSEMENT					OBSERVATIONS
		TRAVAUX DE CAPTAGE DÉDUITS		TRAVAUX DE CAPTAGE SEULS			
		En francs	En francs par cheval	En francs	En francs par cheval	En 0/0 des autres coûts	
Rabinsa	750	353.000	470	171.000	228	48,6	
Troudhjem	2.500	957.000	383	140.000	56	14,7	Longueur du canal, 8 km.
Kubelwerk	4.000	3.600.000	900	1.600.000	400	44,4	
Montbovon	6.000	1.900.000	317	3.000.000	500	158,0	Longueur du canal, 280 km.
Saint-Maurice	6.000	3.640.000	607	590.000	98	16,3	
Chèvres	10.000	5.200.000	520	2.190.000	219	41,9	
Hauterive	10.000	5.600.000	560	5.370.000	537	96,0	Longueur du canal, 56 km.
Albula	24.000	6.530.000	272	4.100.000	171	62,5	Longueur du canal, 130 km.
Aveto	40.000	11.750.000	294	3.185.000	80	27,1	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

comportent, au contraire, une économie de combustible pour la machine à vapeur, d'autant plus sérieuse que l'interruption de marche est plus grande.

Au point de vue du rayon d'action économique des usines, nous citerons l'exemple topique ci-après étudié par M. Éric Girard, alors qu'il était directeur de l'Institut électrotechnique de Montefiore. Il considèrait sept villes, distantes chacune de 10 kilomètres environ d'un centre houiller et consommant chacune pendant 2.000 heures par an : 200, 300, 400, 3.000, 3.500, 4.000 et 5.000 kilowatts. En tablant sur une perte de 20 0/0, la centrale à vapeur devrait être de 20.000 kilowatts. Si le prix du charbon à la mine même était de 15 francs la tonne, le kilowatt tout compris, coûterait 4,11 centimes et pourrait se vendre 6 centimes. Si toutefois on avait à transporter le combustible dans chacune des sept villes et si on y installait dans chacune une centrale spéciale, le coût total du kilowatt à chacune des petites usines mêmes oscillerait entre 7,63 et 9,63 centimes. Au surplus le coût global pour l'installation de ces différentes petites centrales serait de 2.662.000 francs, supérieur d'environ 222.000 francs à celui d'une seule usine centrale. En résumé, pour les pays pourvus de réseaux de chemins de fer très développés et à trafic intense, le transport du combustible à des distances de 10 à 100 kilomètres grève de 10 à 30 0/0 le prix du charbon, qui rèprésente environ 25 0/0 du coût total du kilowatt-heure, tandis que le transport à distance par l'électricité ne représente lui que 2,5 à 7,5 0/0 du coût total.

D'autre part, les usines hydroélectriques, pour combattre les variations dans l'utilisation et donner à celle-ci le caractère de continuité, qui a des conséquences économiques remarquables, cherchent de plus en plus à englober plusieurs industries, livrant ainsi un combat acharné à la houille noire, dont la prépondérance est appelée à disparaître dans un avenir peut-être prochain.

Aussi tous les jours s'élèvent des usines hydrauliques nouvelles mettant ainsi à profit les progrès vraiment prodigieux des applications industrielles de l'électricité. En France, les départements de l'Isère, de la Savoie et de la Haute-Savoie sont ceux où la mise en valeur des grandes chutes est poussée au plus haut degré ; ce mouvement répond victorieusement à l'objection que la chute d'eau ne saurait être susceptible d'un grand essor, puisque, par son essence même, elle se trouve localisée en des points déterminés, et à cette autre que l'utilisation des cours d'eau à faible débit ne pouvait obéir aux exigences des industries importantes pour lesquelles les frais généraux priment tout et qui doivent être assurées d'avoir à chaque moment à leur disposition la puissance constante dont elles ont besoin, sans se trouver à la merci d'une insuffisance dans le débit du cours d'eau alimentaire. En effet, pour répondre au premier point, chaque fois

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'une grande chute a été aménagée, il s'est créé autour un réseau de voies destinées à mettre en valeur cette source de richesse et à supprimer son isolement, et, pour le deuxième cas, l'utilisation des lacs naturels ou l'installation de réservoirs artificiels, souvent aménagés au moyen de travaux relativement insignifiants, ont permis de mettre à néant l'éventualité d'un arrêt par suite de tarissement de l'eau motrice.

233. Dépenses de premier établissement des usines hydroélectriques. — L'ensemble des frais de construction se rapportant à l'établissement des usines hydroélectriques peut se subdiviser comme suit : 1° études préliminaires, achat de la concession, du terrain, des riverainetés ; 2° travaux pour la captation de l'eau, l'établissement des barrages et la canalisation ; 3° superstructure des bâtiments ; 4° installation des turbines, y compris leurs régulateurs de vitesse et tous accessoires ; 5° génératrices et installation électrique jusqu'au tableau de distribution ; 6° ligne de transport à distance et postes ou sous-stations de transformation.

L'achat du terrain est d'un prix moins élevé pour les hautes chutes que pour celles à basse pression, car dans le premier cas on peut établir les canalisations sur des pentes inutilisables et, en outre, la surface de terrain immobilisée est très faible, l'encombrement des ouvrages hydrauliques étant en pareil cas relativement réduit.

Pour l'aménagement des basses chutes, au contraire, très souvent l'achat du terrain nécessaire pour le passage absorbe des sommes considérables et fréquemment on ne peut obtenir ces terrains que par voie d'expropriation. Et c'est surtout là, où les travaux à exécuter comportent le barrage d'une vallée, que les achats de terrains prennent une valeur élevée ; ils représentent jusqu'à 25 0/0 de la valeur globale.

Quant aux indemnités à payer pour torts causés à la culture, du fait de l'établissement des ouvrages hydrauliques, de la suppression des quantités d'eau normales ou d'inondations, elles sont souvent d'une importance telle qu'elles accroissent d'une façon notable les frais courants d'exploitation. Les dépenses véritablement importantes dans cet ordre d'idées proviennent du rachat des droits d'irrigation existants. L'extinction de ces droits a lieu par achat direct et amiable, ou par une compensation de fourniture gratuite d'énergie électrique aux intéressés, en retour de l'énergie hydraulique abandonnée.

La valeur des droits d'eau et de riveraineté est naturellement fonction de la puissance, de la hauteur, de la nature et de la situation de la chute, tous facteurs qui ont besoin d'être évalués à leur juste valeur et apprécia-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion pour en déterminer celle correspondant du cheval-sauvage (1). Il est très difficile *a priori* de donner à ce dernier un prix bien défini. D'après les exemples tirés des usines aménagées dans les Alpes françaises, on peut admettre pour le prix moyen du cheval-sauvage 20 à 40 francs. Pour les basses chutes, le prix peut dans certains cas être plus du double du chiffre ci-avant.

Relativement à la captation de l'eau motrice, les installations établies en plaine ou en terrain faiblement incliné nécessitent des travaux conséquents et par suite plus coûteux que les installations situées en montagne. Ainsi que nous l'avons déjà signalé, dans ce dernier cas, parfois un barrage et un canal d'amenée de peu de longueur suffisent pour l'aménagement de la chute. En Amérique, des installations de ce genre ont donné lieu à des dépenses n'excédant pas 60 francs par cheval-effectif. En moyenne, on peut dire que le prix de revient de l'aménagement hydraulique d'une chute d'eau varie entre 625 francs par cheval utile pour les basses chutes et 125 francs pour les hautes chutes.

Les frais de premier établissement des moteurs hydrauliques et de leurs accessoires deviennent plus faibles à mesure que la hauteur de chute grandit et, dans les installations à haute pression, les coûteuses installations de turbines disparaissent. Il appert d'une manière générale, que pour les petites puissances, deux petites turbines coûtent ensemble 10 à 20 0/0 environ plus cher qu'une seule turbine de même total et en outre que, pour les puissances relativement élevées, cette proportion arrive à dépasser 50 0/0. Plus défavorables encore apparaissent les conditions, lors d'un sectionnement plus accentué du débit entre un certain nombre de turbines élémentaires, sans même tenir compte que l'espace nécessaire et les frais de montage deviennent plus grands en ce cas. C'est pourquoi la tendance moderne dans les usines hydrauliques est d'installer des groupes générateurs aussi puissants que possible. Aujourd'hui on trouve des groupes de 15.000 HP et des turbines absorbant jusqu'à 40 mètres cubes par seconde.

La même règle du moindre coût d'établissement pour les chutes de grande hauteur s'applique, quoique dans une mesure moindre, aux prix des générateurs électriques, cela à cause des grandes vitesses angulaires que l'on peut donner à ces derniers. Les prix respectifs de deux génératrices également puissantes faisant l'une 150 tours et l'autre 500 tours par minute sont entre elles à peu près dans le rapport de 2 : 1. Pour ce qui est de l'influence de la tension produite par les génératrices, on constate à

(1) Le cheval-sauvage correspond à la puissance mesurée dans le collecteur avant l'entrée de l'eau dans le dit collecteur. Il a pour valeur 100 kilogrammètres-seconde et est constitué par la possession de tous les droits d'eau et de riverainété nécessaires pour la création de ces 100 kilogrammètres ou un poncelet hydraulique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peu près universellement que, pour les tensions de 500 à 5.000 volts, les prix de revient sont à peu près identiques ; il n'y a accroissement sensible de ce prix que si la tension tombe au-dessous de 500 volts ou s'élève au-dessus de 5.000 volts.

En résumé pour les hautes chutes, les dépenses de premier établissement, selon l'importance des usines, varient de 100 francs à 600 francs par cheval hydraulique sur l'arbre des turbines et de 400 francs à 1.000 francs par cheval électrique, soit 500 francs à 1.000 francs par kilowatt à l'usine.

Dans les pays de plaine, le prix du cheval hydraulique est de 600 à 1.200 francs et celui du cheval électrique de 1.000 à 1.500 francs, soit 1.500 à 2.000 francs par kilowatt à l'usine.

Le tableau ci-dessous a trait au prix de revient du cheval aménagé de chutes au-dessus de 2.000 HP :

France.

	Puissance	Hauteur de chute	Prix du cheval
Usine de Ponsonnas	20.000 HP	50 mètres	110 fr.
— de Lancey	3.800 »	500 »	150
— de Saint-Félix-en-Maurienne	3.200 »	20 »	180
— de la Praz	14.000 »	160 »	212
— du Giffre	9.000 »	71 »	215
— de Saint-Michel-de-Maurienne	4.000 »	130 »	220
— de Gavet-Livret	15.000 »	60 »	230
— de Saint-Béron	3.500 »	60 »	270
Société des Forces motrices du Rhône	20.000 »	11 »	1.800
Forces motrices de l'Arve	12.000 »	140 »	120

Suisse (1).

Usine de Chedde	13.000 »	180 »	175 fr.
— de Vouvry	12.000 »	950 »	800 et 260
— de Lauterbrunnen	2.130 »	35 »	260
— d'Hauterive	5.000 »	56 »	600
— de Beznau	10.000 »	4 »	945
— d'Etzelwerk	29.500 »	480 »	200

Espagne.

Usine de Grenade	1.800 »	104 »	400
— d'Esparraguerra	2.500 »	12 »	420
— d'Abula	20.000 »	142 »	537

(1) La dépense moyenne par kilowatt installé revient à 536 francs pour les usines hydrauliques, 724 francs pour usines thermiques et hydrauliques et 855 francs pour les centrales à vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Allemagne et Autriche.

	Puissance	Hauteur de chute	Prix du cheval
Usine de Rheinfelden	17.000 »	6,80	235
— d'Eglisau	11.600 »	4 »	550
— de Méran	8.000 »	60 »	400

Suède.

Usine de Montboe	5.000 »	» »	260
— Delf-Elf	20.000 »	» »	260
— Gullspang	»	» »	265

Dans ce pays où les chutes varient de 40 à 200 mètres, les dépenses d'installation se tiennent entre 250 et 500 francs.

États-Unis.

	Puissance	Hauteur de chute	Prix du cheval
Montréal, sur le Saint-Laurent	1.000.000 HP	» »	500 fr.
Saint-Louis (Mississipi)	200.000 »	7m,13	625

Norvège.

Chute de Dal-Elf (Les chutes atteignent jusqu'à 450m. Les dépenses par cheval varient de 300 à 200 francs.)	20.000 »	» »	760

Pour une chute d'eau de 350 mètres de hauteur et d'une puissance de 15.000 HP, les dépenses se répartissent comme suit :

Travaux de construction	1.253.700 fr.
Installation hydraulique	708.400
Installation électrique	700.000
Intérêts perdus	200.000
Transmission jusqu'à la mer	450.000
	3.312.000 fr.

soit 237 francs par cheval.

Italie.

Usine du Volturno	12.000 »	» »	580
— de Paderno	10.500 »	30 mètres	500
— de Vizzola	23.000 »	28 »	725

Écosse.

Chute de la rivière Ericht	38.000 »	300 »	800

M. Dusaugey estime que, pour une usine utilisant une chute de 220 mètres, par exemple, sous un débit moyen de 4.000 litres et 2.700 litres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

minimum, ce qui donne une puissance disponible de 4.400 kilowatts environ sur l'arbre des turbines (correspondant à 3.190 kilowatts rendus chez l'abonné et à un rendement total de la distribution de 72 0/0), les dépenses de premier établissement et celles annuelles d'exploitation de l'usine pourraient être établies comme suit :

Dépenses de premier établissement

	TOTALES	PAR KILOWATT A L'USINE
	francs	francs
Usine hydroélectrique	2.463.000	560
Lignes primaires	820.898	187
Sous-station	393.200	89
Lignes secondaires	120 240	27
	3.797.338	863

Dépenses d'exploitation par an

	INTÉRÊT et AMORTISSEMENTS des dépenses de construction	FRAIS GÉNÉRAUX Personnel Entretien. — Divers	DÉPENSES TOTALES Sommes annuelles	Par kilowatt-an sur arbre turbine	Par kilowatt-an rendu chez l'abonné
	francs	francs	francs	francs	francs
Usine hydroélectrique	231.055	131.400	362.455	82,35	113,40
Lignes primaires	72.545	24.000	96.545	21,95	30,20
Sous-station	54.102	13.100	67.202	67,20	21,20
Lignes secondaires	10.500	1.500	12.000	12,00	3,70
			538.202	183,50	168,50

Pour une ligne de transmission de l'énergie, les frais de premier établissement sont sensiblement proportionnels à sa longueur, et il en est de même pour l'intérêt, l'amortissement, l'entretien, ainsi que la perte en ligne.

Prenons à titre d'exemple une force hydraulique de 10.000 HP à transporter à 100 kilomètres avec une perte en ligne de 10 0/0. Admettons, d'autre part, que le prix de cette dernière soit de 16.000 francs le kilomètre et que le prix du cheval-an revienne à 100 francs.

Si nous fixons à 5 0/0 l'intérêt du capital et à 7 0/0 le taux annuel de l'amortissement et de l'entretien, soit 12 0/0 au total, la ligne coûte de ce fait 1.900 francs par an et par kilomètre, soit par cheval 0 fr. 19.

Par le fait de la perte en ligne, ce chiffre doit être majoré de 0 fr. 10, de sorte que le cheval-an rendu au lieu d'utilisation revient à 0 fr. 19 + 0 fr. 10 = 0 fr. 29 par kilomètre. On a donc pour prix de revient du cheval-an à l'usine 100 francs, et pour celui de la ligne, par cheval-an et par kilomètre, 0 fr. 29.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après M. Max du Bois, lorsqu'une usine hydroélectrique n'a pas exigé d'installation exceptionnelle et dispose d'une puissance maximum de 20.000 kilowatts et exige une ligne de 50 kilomètres pour amener au lieu d'utilisation l'énergie qu'elle produit le prix de revient du kilowatt-an, tant que la puissance ne dépasse pas 10.000 kilowatts, diminue à mesure que la puissance augmente, mais croît brusquement à 10.000 kilowatts par suite de la mise en marche de l'usine à vapeur et continue à croître. Dans l'hypothèse où les dépenses d'établissement des installations hydrauliques sont considérables, le prix de revient diminue encore jusqu'à 10.000 kilowatts, valeur pour laquelle il subit une brusque élévation suivie d'une diminution progressive, puis d'une augmentation. Dans cette dernière hypothèse, le prix de revient minimum correspond à 16.000 kilowatts, alors que dans la première il correspond à 10.000 kilowatts.

Dans la première hypothèse l'emploi combiné des usines est toujours plus économique que l'emploi exclusif d'une usine thermique, quelle que soit la puissance utilisée ; mais dans la seconde hypothèse l'emploi de deux usines n'est avantageux que quand la puissance utilisée est comprise entre 6.000 kilowatts et 22.000 kilowatts ; pour une puissance inférieure à 6.000 kilowatts ou supérieure à 22.000 kilowatts, mieux vaut ne pas construire l'usine hydraulique.

234. Coûts d'installation de quelques usines hydroélectriques. — Usine de Ponsonnas. — Les dépenses d'installation de l'usine de Ponsonnas (Isère) (§ 345), dont nous avons vu que le prix du cheval revenait à 110 francs, se décomposent de la façon suivante :

	Francs.
Barrage (49.000 mètres cubes)	615.000
Batardeaux	19.500
Galerie sur la rive droite	16.200
Canal de fuite	33.750
Déversoir du canal de fuite	8.000
Galerie sur la rive gauche	108.000
Tunnel pour les crues	150.000
Premier tunnel d'amenée	26.600
Deuxième tunnel d'amenée	43.700
Puits communiquant aux tunnels	164.000
Fermetures des galeries	40.100
Chambre d'eau	117.500
Conduites forcées	227.480
Bâtiments	98.000
Turbines	320.000
	1.987.830
Frais divers	212.170
Total	2.200.000

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

USINE DE JONAGE (§ 308)

		Francs
Terrains. — 560 hectares		3.111.990
Canal de dérivation :		
Terrassements et défenses des rives	5.397.453	
Ancien ouvrage de garde	1.693.295	
Nouvel ouvrage de garde	1.650.000	
Écluse de garde	1.110.941	
Déversoir	207.867	14.136.227
Écluse double	2.141.270	
Ponts métalliques (7 ponts)	1.213.653	
Ouvrages secondaires	721.798	
Usine barrage	4.245.925	4.416.535
Vannes de prise d'eau, pont roulant	160.630	
Travaux divers et de parachèvement. Frais généraux		3.586.310
Turbines	1.070.470	
Alternateurs	1.034.000	12.992.700
Réseau de canalisation	10.888.230	
TOTAL		38.243.762
Frais de constitution et intérêts du capital pendant la construction.		6.326.855
Matériel, mobilier et outillage		325.772
Moteurs, compteurs et magasin		1.258.805
Disponible, avances sur fournitures, etc		3.844.806
CAPITAL		50.000.000

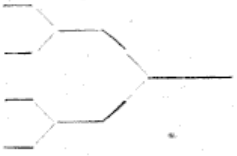
USINES DE LA SOCIÉTÉ DES FORCES MOTRICES DU HAUT-GRÉSIVAUDAN (GRENOBLE)

		Francs
Usine de Bréda (§ 421) :		
Terrains, bâtiments et chutes	771.387	
Matériel hydraulique	138.670	1.303.474
Matériel électrique	222.473	
Groupe vapeur	170.944	
Usine de Cernon (§ 480) :		
Terrains, bâtiments et chutes	233.834	
Matériel hydraulique	114.047	436.140
Matériel électrique	88.259	
Lignes primaires	481.021	
Lignes secondaires	178.288	861.615
Transformateurs abaisseurs	142.502	
Compteurs	59.804	
Usine de carbure		144.207
TOTAL		2.745.436

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

USINE HYDROÉLECTRIQUE D'ORLU (ARIÈGE) (§ 426)

1° *Partie hydraulique :*

	Travaux exécutés Francs	Travaux futurs Francs
Tunnel En-Beys-Naguilhes : 2.800 mètres à 200 francs.	560.000	»
Barrage de Naguilhes	20.000	20.000
Tunnel entre Naguilhes et Coumanilles : 2.000 mètres à 160 francs	320.000	»
Puits au départ des conduites forcées	110.000	»
Conduites forcées : 1.050 mètres de 1 mètre de diamètre, 580 tonnes à 550 francs	319.000	»
 2 × 500 mètres de 0m,70 de diamètre, 560 tonnes à 550 francs	154.000	154.000
4 × 320 mètres de 0m,50 de diamètre, 475 tonnes à 650 francs	77.200	231.600
Plans inclinés. Câbles transporteurs	50.000	»
Turbines de 3.250 HP, 500 tours, avec volants régulateurs et manchons, 8 à 10.750 francs	86.000	258.000
Turbines excitatrices de 300 HP, 800 tours, 2 à 2.275 fr.	4.550	4.550
Vannes tiroirs de 500 millimètres, 4 à 1.656 francs	6.625	6.626
Vannes cylindriques équilibrées, 4 à 1.600 francs	6.400	6.400
Tuyau collecteur	8.800	»
Vannes à tiroir de 300 millimètres, 8 à 369 francs	2.950	8.850
Vannes piston, 8 à 902 francs	7.315	21.945
Petite tuyauterie de commande des vannes à piston	1.000	3.000
Vannes tiroir de 150 millimètres, 2 à 442 fr. 50	885	885
Vannes piston, 2 à 800 francs	1.600	1.600
Pont roulant et outillage d'atelier	26.220	»
TOTAUX	1.767.545	717.455

2° *Partie électrique :*

Alternateurs triphasés de 2.250 kilowatts (2.800 kilovolts-ampères), 5.000 volts, 500 tours, 8 à 12.500 francs	100.000	300.000
Excitatrices de 200 kilowatts (100 volts, 800 tours), 2 à 6.250 francs	12.500	12.500
Transformateurs triphasés à bain d'huile et circulation d'eau, de 2.800 kilovolts-ampères, avec rapport de transformation 5.000/50.000 volts, 8 à 6.250 francs	50.000	150.000
Tableau de distribution complet, 1	37.500	112.500
Tuyauterie d'eau pour les transformateurs, et la pompe à huile. Pont roulant, voie de raccordement, éclairage de l'usine	12.500	37.500
TOTAUX	212.500	612.500

3° *Bâtiments :*

Surface : 1.500 mètres carrés. Cube : 15.000 mètres cubes à 15 francs	112.500	112.500

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4° Réseau haute tension :

	Travaux exécutés Francs	Travaux futurs Francs
a) Ligne à 50.000 volts :		
Feeder mixte, 250 kilomètres à 7.750 francs	1.937.500	
Feeder ville de Toulouse, 153 kilomètres		1.185.750
Feeder du Tarn, 135 kilomètres		1.046.250
Feeder de dédoublement et ligne d'équilibre (206 km).		1.956.500
b) Postes de couplage et de bifurcation :		
Poste complet. 10 postes à 7.500 francs	75.000	225.000
c) Postes de transformation :		
Transformateurs (pour 16.000 kilowatts)	112.500	337.500
Appareillage haute et basse tension (pour 16.000 kw)	50.000	150.000
Bâtiments	55.000	165.000
TOTAUX	2.230.000	4.706.000

5° Réseau intermédiaire à 5.000 volts :

150 kilomètres de lignes à 3.000 francs	450.000	450.000

6° Réseau téléphonique :

250 kilomètres à 300 francs	75.000	45.000

Récapitulation :

Usine génératrice (sous-détails, § 1°, 2° et 3°)	2.092.545	1.442.455
Réseau haute tension	2.230.000	4.706.000
Réseau intermédiaire	450.000	450.000
Réseau téléphonique	75.000	45.000
TOTAUX	4.847.545	6.643.455
ENSEMBLE	11.491.000	

USINE DU FIER (BRASSILLY) (§ 318).

1° Partie hydraulique :

	Francs	Francs
Souterrain		275.300
Barrage :		
Maçonneries	78.900	
Charpentes fer et bois	33.700	128.400
Études et surveillance	15.800	
Études et surveillance des bâtiments	14.700	
Bâtiments	144.200	
Chemin d'accès	4.800	
Chambre d'eau	22.110	344.050
Logement	5.800	
Tuyaux d'amenée	44.210	
Turbines	100.230	
Études et surveillance des machines	8.000	
TOTAL		747.775

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° *Partie électrique :*

	Francs	Francs
Alternateurs	59.200	
Tableaux et appareils divers	21.000	92.230
Atelier de réparation	2.430	
Études et surveillance	9.600	
Réseaux :		
Lignes primaires aériennes	53.800	
Postes de transformation	84.100	
Dépenses de concession	10.200	
Lignes primaires souterraines	92.200	
Réseau secondaire	48.300	436.070
Installation de l'éclairage public	14.000	
Branchements	50.600	
Installations gratuites	64.200	
Appareils en location	8.870	
Matériel et mobilier	9.800	
TOTAL		528.300
ENSEMBLE		1.276.075
Installation électrochimique		53.200
TOTAL GÉNÉRAL		1.329.275

USINES HYDROÉLECTRIQUES DU GROUPE DE L'ARÉTO. — La Société Idroelettrica Ligure installe sur l'Areto, sous-affluent du Pô, une série de trois usines, représentant ensemble une hauteur de chute de 710 mètres et une puissance de 57.500 HP. L'usine supérieure utilisant une chute de 350 mètres comporte 8 groupes générateurs de 3.500 HP chacun ; la deuxième usine, disposant d'une chute de 190 mètres renferme 5 groupes de chacun 3.500 HP et la troisième usine, avec une hauteur de chute de 170 mètres, doit recevoir des génératrices d'une force totale de 12.000 HP. Ces trois usines sont destinées à fournir chaque année 80 millions de kilowatts-heures.

On a construit un barrage haut de 44 mètres et on utilise, en outre, un lac situé dans la montagne. L'eau débitée par le réservoir ($2^{m3},5$ par seconde) parcourt une distance de 9 kilomètres en suivant successivement un chenal à découvert et une galerie.

Le prix de revient des deux premières usines ressort à 16 millions de francs, soit environ 355 francs le cheval.

	Francs	Pourcentage
Achat du terrain	2.000.000	0,125
Construction de routes, d'écoles, etc.	2.500.000	0,155
Bassin d'écoulement	1.500.000	0,095
Réservoir principal, chenal, galeries	4.000.000	0,250
Bâtiments	800.000	0,050

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	Francs	Pourcentage
Moteurs hydrauliques	500.000	0,035
Installations électriques	1.500.000	0,095
Canalisation pour le transport à distance	1.700.000	0,100
Transformation et réseaux ordinaires	1.500.000	0,095
TOTAL	16.000.000	

Aux États-Unis le prix d'une usine hydroélectrique, avec installation de réserve à vapeur peut se chiffrer comme suit :

Usine hydroélectrique : 5.000 kw. à 625 francs	3.125.000 fr.
Ligne	250.000
Sous-station : 4.500 kw. à 40 francs	180.000
Usine à vapeur : 2.500 kw. à 500 francs	1.250.000
TOTAL	4.805.000 fr.
Charges fixes, 10 0/0	480.500 fr.
Entretien de l'usine hydroélectrique	125.000
Entretien et service de l'usine à vapeur	15.000
DÉPENSE ANNUELLE	620.500 fr.

La production totale annuelle de l'usine serait de 13.140.000 kilowatts-heures, dont 10 0/0 seraient perdus en transmission, laissant pour la vente 11.826.000 kilowatts-heures. Le prix total de revient chez les abonnés serait de 5 fr. 25 le kilowatt-heure.

La durée de marche d'une usine influe non seulement sur le prix de revient de l'énergie mais sur le coût de l'installation et cela dans une notable proportion, selon que la force motrice a une durée de dix heures ou de vingt-quatre heures. Les considérations qui suivent ont trait à des exploitations en Amérique.

Pour un service de dix heures avec une machine à vapeur et des générateurs accouplés directement, le coût de l'installation par kilowatt de capacité est d'environ 625 francs. Le coût de la force motrice de cette station avec la houille à environ 21 fr. 25 la tonne rendue à l'usine, soit 23 fr. 75 à la grille, serait d'environ 165 francs par kilowatt-an de trois mille heures, ce qui équivaut à environ 123 francs par cheval-vapeur électrique et par an et à environ 107 fr. 50 par cheval-vapeur indiqué et par an, soit un prix de revient de 0 fr. 055 par kilowatt-heure. Si on emploie des turbines à vapeur à la place des machines, le coût d'installation de l'usine sera réduit à environ 525 francs par kilowatt de capacité. Le prix de revient de la force motrice serait également ramené à environ 147 fr. 50 par kilowatt-an contre 165 francs dans le cas des machines à vapeur. Une partie de la différence provient du moindre prix de la station génératrice et des appareils et une partie de l'économie réalisée par les turbines du fait de l'emploi de la vapeur surchauffée et du vide. Il faut noter que dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'installation de machines à vapeur ci-dessus on suppose que l'installation n'est pas munie de la surchauffe qui donnerait une économie sensible.

Si la force motrice est produite vingt-quatre heures par jour et six jours par semaine, soit trois cents jours par an (comme par exemple dans les papeteries et autres industries semblables), le prix de revient de la force motrice sera d'environ 287 fr. 50 par kilowatt-an pour une installation de machines à vapeur et 265 francs par kilowatt-an pour une installation de turbines, chiffres qui correspondent à respectivement 0 fr. 04 par kilowatt-heure et 0 fr. 03675 par kilowatt-heure. Si on compare ces chiffres avec ceux de 0 fr. 055 par kilowatt-heure pour l'installation de machines à vapeur et 0, 04915 pour l'installation de turbines dans le cas d'un travail de dix heures, on doit noter que la différence provient en partie de ce que les mêmes charges fixes se répartissent sur des nombres d'heures de travail différentes et en partie de ce qu'il y a une économie réelle de combustible dans le travail ininterrompu provenant de ce qu'on n'a pas à repousser les feux.

Il est évident que lorsqu'on se propose de vendre la force motrice sous forme d'énergie électrique ou pour l'éclairage, le prix de revient de la force motrice joue un rôle capital. De même dans les industries électrochimiques, par exemple, c'est la consommation d'énergie qui constitue le facteur de beaucoup le plus important du produit fabriqué. Dans d'autres industries par contre, par exemple dans les industries textiles, la question du prix de revient de la force motrice passe au second plan, c'est le coût de la main-d'œuvre et celui de la matière première qui ont le plus d'importance. Pour une usine de ce genre bien située, le coût de la force motrice ne doit pas dépasser 5 à 6 0/0 de la valeur totale du produit. Par conséquent une économie de 10 0/0 dans la production de la force motrice ne représente ici qu'un demi pour cent environ d'économie sur le prix du produit fabriqué. Il n'en serait pas de même par exemple d'une papeterie où le prix de revient de la force motrice est très important.

235. Prix de vente de l'énergie électrique. — L'échelle des prix de vente du courant électrique pour une usine à créer doit résulter d'une étude approfondie de la région, tant pour la force motrice que pour l'éclairage. Quant au placement possible des lampes, on peut compter sur un minimum de 2 lampes installées par habitant ; dans certaines localités, on a atteint jusqu'à 6 lampes par habitant.

D'après M. A. Blondel, les frais de production, dans une usine ayant coûté 600 francs d'établissement par cheval, font ressortir à 90 francs environ le cheval-an sur les turbines (en admettant 8 0/0 pour intérêt et amortissement du capital, 3 0/0 de frais d'entretien, 4 0/0 pour le personnel et les frais généraux, soit ensemble 15 0/0 environ du capital de premier

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

établissement) ; dans ces conditions, le kilowatt-an à l'usine revient à 134 francs (en admettant 92 0/0 de rendement pour les dynamos), et le kilowatt-an utile, à 160 francs environ chez l'abonné.

En France, dans les cas exceptionnels, le prix de la force distribuée n'arrive pas au-dessous de 0 fr. 025 le cheval-heure, pour s'élever parfois à 0 fr. 125. Le cheval-heure pour l'éclairage ne descend guère au-dessous de 0 fr. 03.

Il est aisé d'ailleurs de se rendre compte de ces prix en consultant les paragraphes concernant les usines aménagées qui font l'objet du Tome II, paragraphes que nous avons mis à part, pour chaque usine, sous la rubrique « Exploitation ».

A titre d'indication, nous donnons ci-après les prix de vente de l'énergie électrique dans quelques grandes villes de France.

Paris. — Prix de l'hectowatt-heure pour l'éclairage, 0 fr. 05 pour l'éclairage et 0 fr. 03 pour les autres usages.

La ville de Paris paye l'énergie aux prix suivants : 1° avant minuit, avec 35 0/0 de réduction sur le tarif des consommateurs, soit 0 fr. 325 le kilowatt-heure ; 2° après minuit, 0 fr. 25 par kilowatt-heure. Le prix moyen de l'énergie pour les services publics de la ville de Paris ressort à 0 fr. 29 environ par kilowatt-heure.

Marseille. — Prix de l'hectowatt-heure pour l'éclairage public, 0 fr. 04 et 0 fr. 025 pour les applications industrielles qui peuvent être demandées par la ville. Celle-ci alloue à la Compagnie pour les diverses obligations du service de l'éclairage : par lampe à incandescence, 4 centimes et par jour, et par lampe à arc, 5 à 8,5 centimes pour foyers de 8 à 15 ampères.

Prix de l'hectowatt-heure pour les particuliers, 0 fr. 08.

Droits d'octroi de 0 fr. 025 par kilowatt-heure d'électricité vendue aux particuliers.

Toulouse. — Prix de l'hectowatt-heure pour l'éclairage public : 0 fr. 0435, 0 fr. 049 et 0 fr. 053 selon les réseaux concédés à la Compagnie exploitante.

Limoges. — Prix de vente maximum de l'énergie électrique : 0 fr. 05 l'hectowatt-heure, plus une taxe fixe annuelle de 15 francs par hectowatt installé.

La moitié des bénéfices nets au delà de 6 0/0 est partagée par la ville. Lorsque la consommation annuelle dépassera 3 millions de kilowatts-heures, le prix du kilowatt-heure sera réduit à 0 fr. 45 et, au delà de 4 millions, à 0 fr. 40.

Les établissements communaux et départementaux sont libérés de la taxe fixe.

Redevance : 10 francs par an pour chaque kilomètre ou fraction de kilomètre de canalisation primaire aérienne ou souterraine ; droits d'entrée sur les charbons, 0 fr. 25 par tonne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Alby. — Pour les particuliers, 0 fr. 04 l'hectowatt-heure pour l'éclairage et le chauffage et 0 fr. 05 le cheval-heure pour la force motrice.

Chambéry. — Éclairage des particuliers, 0 fr. 06 l'hectowatt-heure, ville, 0 fr. 03. Le privilège consenti à la Compagnie n'est pas un monopole de l'éclairage public ou particulier, ni de la distribution de la force motrice.

Amiens. — Le privilège ne concerne que les cinq premières années. La Compagnie paie annuellement à la ville un droit de 12,5 0/0 sur sa recette brute du prix de consommation de l'électricité destinée à l'éclairage des particuliers et au chauffage. Cette redevance est, dans les mêmes conditions, 5 0/0 pour l'électricité destinée à l'éclairage des administrations, des industriels justifiant l'emploi d'une force motrice d'au moins 10 HP. Le courant électrique destiné à l'éclairage des voies publiques est exempt de toute redevance.

Établissements communaux et assimilés : éclairage, 0 fr. 031 l'hectowatt-heure ; force motrice et chauffage, 0 fr. 03.

Voies publiques : 0 fr. 03, compris tous frais d'entretien.

Abonnés : 0 fr. 79 le kilowatt pour consommation annuelle inférieure, par abonné, à 500 kilowatts-heures.

Ces chiffres sont réduits de 1, 2, 4, 6, 8 et 10 centimes lorsque la consommation mensuelle atteint respectivement : 25, 50, 75, 100, 125 et 150 kilowatts-heures.

La moitié des bénéfices nets de la Compagnie, au delà de 6 0/0 du capital utilisé, appartient à la ville.

Comme exemple d'installations vendant leur énergie à forfait et au compteur, nous signalerons l'usine hydroélectrique de Sauviat, alimentant la ville de Thiers. Éclairage (forfait simple) : lampe 10 bougies 24 francs l'an, lampe 16 bougies, 30 francs.

A forfait, au-dessus de 16 bougies, avec limitateur-basculateur Jappy : éclairage de nuit, 1 fr. 875 la bougie-an ; éclairage de jour et de nuit 2 fr. 50. Au compteur horaire : lampe 10 bougies 0 fr. 0125 l'heure ; lampe 16 bougies, 0 fr. 02 l'heure ; abonnement spécial pour les lampes d'ateliers dites lampes industrielles et s'allumant du 1er septembre à Pâques, avec ou sans basculateur : lampe de 10 bougies, 12 francs l'an, lampe de 16 bougies 15 francs l'an.

Au compteur d'énergie : ateliers, 0 fr. 50 le kilowatt-heure ; magasins, 0 fr. 60 ; appartements, 0 fr. 65.

Force motrice : 0fr,30 le kw. heure sans minimum.

Avec minimum :	1/2	cheval	0fr,25	le kwh	(minimum annuel)		75 fr.
—	1	—	0 ,23	—	—	—	150 —
—	2	—	0 ,223	—	—	—	290 —
—	4	—	0 ,210	—	—	—	540 —
—	6	—	0 ,196	—	—	—	768 —
—	8	—	0 ,183	—	—	—	992 —
—	10	—	0 ,170	—	—	—	1200 —

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le tome III de cet ouvrage, en traitant des Centrales de distribution d'énergie, nous reprenons cette question avec plus de développement.

Les Compagnies de distribution d'énergie électrique du Yorkshire et de Lancastre, qui exploitent des régions où on rencontre à peu près tous les genres d'industries, vendent le courant suivant un tarif proportionné au facteur de charge des consommateurs, lequel facteur varie de 5 0/0 à plus de 50 0/0. Les prix de vente du kilowatt-heure respectifs sont 0 fr. 56 et 0 fr. 065, auxquels prix les industriels utilisant des machines à vapeur trouvent avantage à abandonner leur installation de force pour prendre le courant des stations centrales.

Au Niagara, le kilowatt-heure est vendu 0 fr. 10 pour des consommations de moins de 1.000 kilowatts-heures par mois et 0 fr. 032 pour une consommation mensuelle de 80.000 à 200.000 kilowatts-heures.

L'usine hydroélectrique de Koebuk (États-Unis) vend l'énergie électrique au prix de 100 francs le kilowatt-an.

A Gênes, on vend 300 à 200 francs le cheval-an de douze heures et 400 à 270 francs le cheval-an de vingt-quatre heures ; à Venise, le cheval-an varie de 225 à 350 francs ; à Turin, 200 francs le cheval-an de douze heures. La Société lombarde livre le cheval-an-vingt-quatre heures au prix moyen de 145 francs (117 francs minimum et 220 francs maximum). Une moyenne très approximative pour l'Italie serait un prix de 225 francs.

En Amérique, les contrats de marchés de force motrice entre Compagnies de chemins de fer et Compagnies de force motrice se font sur la base d'une redevance fixée sur l'intensité maximum du courant demandé, soit 60 francs par an et par kilowatt ; en plus une redevance d'énergie ou redevance de consommation payée au kilowatt-heure (0 fr. 02). L'emploi combiné de ces deux redevances règlent automatiquement l'influence du facteur de charge sur le prix final. La durée du contrat se fait pour dix années.

236. Prix de revient et taux d'amortissement applicables aux usines hydroélectriques. — Pour l'établissement financier d'une entreprise de transport d'énergie électrique, on peut déterminer le prix moyen de vente par périodes de mise en œuvre de l'exploitation, en fixant les prix minima pour les divers services de la consommation.

Lors de la première période de la mise en service on peut tabler par exemple sur 1/8 pour l'éclairage (1.000 heures-an), 2/8 pour la petite force motrice (au-dessous de 20 HP), 3/8 pour les usines de tramways et usines marchant dix heures par jour (3.000 heures-an) et enfin 2/8 pour les services publics et usines à marche continue pour la distribution de force.

En adoptant le prix de 0 fr. 40 le kilowatt-heure pour l'éclairage, de 0 fr. 10 pour la petite force motrice, 0 fr. 06 pour les usines à 3.000 heures

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et 0 fr. 03 pour les usines de 8.000 heures, on obtient pour le prix moyen du kilowatt-an :

$$\frac{1 \times 0{,}40 + 2 \times 0{,}10 + 3 \times 0{,}06 + 2 \times 0{,}03}{8} = 0 \text{ fr. } 105.$$

Pour la deuxième période, on prendra 0 fr. 09, puis 0 fr. 08 et 0 fr. 07 pour les périodes successives.

La Société Pyrénéenne, pour son grand transport de force, a établi de la façon suivante le prix de revient du kilowatt-heure sur le réseau secondaire.

	Première période	Deuxième période	Troisième période	Quatrième période
Dépenses d'exploitation.....	0fr,033	0fr,020	0fr,016	0fr,013
Amortissement du capital...	0 ,018	0 ,012	0 ,010	0 ,009
Réserve légale.....	0 ,002	0 ,002	0 ,002	0 ,002
Intérêt à 5 0/0 du capital....	0 ,042	0 ,028	0 ,024	0 ,021
Totaux.....	0fr,095	0fr,062	0fr,052	0fr,045

Il importe de distinguer dans le prix de revient de l'énergie les frais d'exploitation directs et les frais indirects, soit pour ces derniers ceux qui résultent des charges financières de l'installation qui ont à assurer le service de l'intérêt du capital engagé, de l'amortissement de ce capital et enfin la constitution d'un fonds de renouvellement.

Le taux de l'intérêt du capital engagé dépend du mode d'acquisition de ce dernier et des circonstances de lieu et de temps ; on peut lui attribuer une valeur moyenne de 4,5 0/0. Le taux d'amortissement du capital est un facteur d'appréciation personnelle des dirigeants de l'entreprise. Pour un taux d'amortissement de cinquante années, le taux sera de 2 0/0.

Les frais directs d'exploitation comprennent : 1° l'amortissement de toutes les parties de l'installation, l'entretien courant et les réparations du matériel générateur ; 2° la main-d'œuvre, le chauffage, l'éclairage et les matériaux nécessaires pour le nettoyage et la lubrification ; 3° les frais généraux.

Les chiffres ci-après peuvent être pris comme des valeurs moyennes courantes.

Partie hydraulique.

Charges annuelles :

1° Amortissement des immobilisations :	
Barrage, 30 ans.....	0fr,021
Canalisations métalliques et accessoires, 20 ans...	0 ,0372
Matériel moteur et accessoires, 12 ans.....	0 ,07
2° Entretien des constructions et du matériel :	
Barrage, travaux hydrauliques et constructions...	0 ,021
Canalisations métalliques et accessoires.....	0 ,025
Matériel moteur et accessoires.....	0 ,060

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Partie électrique.

1° Amortissement des immobilisations :

a) Machines et matériel électriques, 12 ans.....	0fr,07
b) Ligne de transmission et canalisations, 20 ans.	0 ,0372
c) Constructions, 30 ans.....	0 ,021

2° Entretien :

a)	0 ,05
b)	0 ,02
c)	0 ,02

Les frais généraux peuvent être estimés approximativement à 2 0/0 du capital engagé. En résumé, les frais d'exploitation, y compris les frais généraux, atteignent de 10 à 11 0/0 du capital d'établissement.

Pour les premières années, on ne peut compter que sur une fraction des recettes qui ont été calculées pour la marche normale. Par exemple, pour la première année, on prend les 2/5 des recettes et on augmente chaque année de 1/5 jusqu'au bout des cinq années, délai que l'on pense suffisant pour amener l'affaire à son plein développement.

Observations. — Certains articles ne subissent pas de dépréciation, comme la propriété immobilière, les fondations, les remblais et fouilles, et comme ils n'ont pas à être remplacés, il n'y a pas à prévoir de charges d'amortissement.

Les autres catégories doivent être classées suivant la longueur probable de leur vie utile ; le coût de remplacement doit être évalué et augmenté d'une somme suffisante pour couvrir les frais d'enlèvement de l'ancien équipement, dont on déduit la valeur récupérée comme vieux matériel. Certains de ces articles, comme le cuivre, ont une valeur de mitraille de 60 0/0 et plus de leur prix d'origine ; d'autres n'ont aucune valeur et occasionnent même des frais pour leur enlèvement.

Si la nature de l'installation de force motrice est telle qu'elle entraîne un arrêt partiel ou complet de la partie industrielle pendant la période de remplacement, il faut prévoir un chapitre compensant cet incident ; ce chapitre sera basé par exemple sur la réduction de la capacité productive due à l'inaction forcée pendant le remplacement de l'équipement.

Vieillissement. — C'est une charge qui dépend, dans une large mesure, de la nature, des conditions et autres caractéristiques de l'installation industrielle alimentée en énergie. Si l'apparition de types d'appareils ou de machines plus perfectionnés est susceptible d'influencer la capacité productive de l'entreprise industrielle dans la concurrence, il est évident que la question de la « désuétude » doit être envisagée sérieusement. D'autre part, si le même résultat économique peut être obtenu par des améliorations au matériel existant, la dépense devient une charge se rap-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

portant au compte du capital et on doit y pourvoir par un accroissement d'intérêt et d'amortissement.

En tout cas, il y a lieu d'établir une provision pour cette éventualité ou bien l'amortissement de l'installation doit être chiffré sur la base d'une vie utile plus courte.

Un perfectionnement qui ne paye que pour ses charges fixes n'est pas un perfectionnement au point de vue économique ; il doit laisser un bénéfice raisonnable, c'est-à-dire réduire le coût de production.

Taxes. — Cette rubrique est très superficiellement estimée et devrait être étudiée soigneusement. Toutes les taxes devraient être évaluées d'avance, pour l'installation de force motrice, et introduites dans les charges fixes, en y comprenant un accroissement possible des impôts sur la partie industrielle. En analysant la question à fond, on trouvera que les charges de la rubrique Taxes sortent du cadre de toute divination spéculative et que malheureusement elles sont très rarement bien réparties.

L'assurance est un autre article qui doit être traité exactement comme les taxes.

Groupe générateur de réserve. — Le prix de cette installation est peu souvent incorporé dans le coût de revient de la puissance. L'omission de ce point important élimine toute possibilité de comparaison entre les chiffres du prix de l'énergie fabriquée et de l'énergie achetée. Dans ce dernier cas, on peut compter sur la puissance de la station centrale parce que la Compagnie assurant ce service public s'est pourvue d'équipements doubles ou de réserve pour assurer la continuité du service au cas d'accident dans une partie quelconque de l'installation. Cette prévision représente une mise de fonds à considérer. La qualité et la continuité du service forment les bases de toute entreprise de service public : des perfectionnements, des dépenses et des précautions d'une étendue inconnue du public sont réalisés constamment pour ancrer plus fermement l'affaire sur ses fondations.

Nous terminons ce paragraphe par la même observation qui clôt le paragraphe précédent.

237. Impôts et redevances des usines hydroélectriques. — L'impôt sur les propriétés bâties est réglé en raison de la valeur locative de ces propriétés (lois des 8 août 1890 et 13 juillet 1900). Le taux de cette contribution est fixé à 3,20 0/0 de la valeur locative, déterminée par la première loi précitée.

Les taux étant différents selon que l'exploitation est désignée sous le nom de « maison » ou d' « usine », au point de vue du pourcentage adopté (déduction de 20 0/0, maison, et déduction de 40 0/0, usine), il y a tout intérêt pour l'exploitant à se faire classer dans cette dernière catégorie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le matériel est imposable lorsqu'il est immeuble par destination.

La patente des usines électriques est réglée par la loi de finances du 19 juillet 1905 et le décret du 13 juillet 1906. D'après cette loi, l'exploitant d'une usine pour la production ou la transformation de l'électricité est sujet à payer un droit fixe de 90 centimes par kilowatt ou fraction de kilowatt de la puissance utile des machines ou appareils de production ou de transformation, non compris les machines ou appareils de secours ; *ce droit est réduit à 60 centimes pour les établissements à l'égard desquels il est justifié que la puissance des appareils d'éclairage n'excède pas les sept dixièmes de la puissance totale des moteurs et appareils de toute nature installés chez leurs clients, et à 30 centimes pour les établissements à l'égard desquels il est justifié que la puissance des appareils d'éclairage n'excède pas le dixième de la puissance totale des moteurs et appareils de toute nature installés chez les clients.*

Les conduites et câbles extérieurs n'entrent pas dans l'estimation de la valeur locative.

Il résulte de la loi nouvelle que les anciens arrêtés d'assimilation de l'énergie électrique sont supprimés et que l'industrie de la lumière bénéficie d'une réduction de 10 centimes (90 centimes au lieu de 1 franc).

Ainsi les usines vendant plus spécialement de l'énergie électrique sous forme de force motrice sont astreintes à un droit de 60 ou de 90 centimes par kilowatt, selon leur production.

Donc les formes électriques de l'énergie, lumière, force motrice et actions chimiques ou thermiques, se différencient par leur emploi. Ainsi l'énergie rayonnée sous forme d'éclairage et de chauffage est un produit de consommation directe, tandis que, livrée à titre de force motrice ou d'actions chimiques, elle sert d'agent de transformation entrant pour une assez grande quantité dans un autre produit dont il augmente le prix de revient, lequel ne peut s'élever au-dessus des limites fixées par les transactions commerciales.

La prétention affirmée par l'Administration, vis-à-vis des usines d'électricité, a consisté à ajouter le chiffre représentant le montant annuel de l'abonnement payé par l'industriel à une société de distribution d'énergie électrique. De là de vives protestations qui se sont manifestées et qui ont été présentées à l'Administration supérieure pour obtenir d'elle qu'elle donnât des ordres pour faire changer ce mode de taxation.

Frappé de cet état de choses, le Gouvernement a déposé le 17 mars 1908, un projet de loi sur la contribution des patentes, que nous transcrivons *in extenso :* « Toutefois il n'est pas tenu compte, pour l'évaluation de la force motrice, des éléments qui servent à la produire, lorsque ces éléments sont de nature à être consommés ou détruits par l'usage. Les établissements qui prennent au dehors, en totalité ou en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

partie, la force motrice ou l'énergie nécessaire à leur fonctionnement sont assujettis de ce chef au droit proportionnel par comparaison avec les autres établissements de la région dans lesquels cette force ou cette énergie sont produites directement. »

Les nombreux industriels qui usent de la force motrice fournie par des centrales, si durement frappés par l'arrêt du Conseil d'État de 1903, ne voient pas dans le projet de loi ci-dessus une amélioration à la situation qui leur est faite. Ils tournent leur desiderata vers un projet de loi de M. Cazeneuve, déposé le 30 mai 1907, mieux approprié à leurs justes revendications (1).

Les *redevances* imposées aux concessionnaires de prises d'eau sur les cours d'eau navigables ou flottables sont prévues par l'article 44 de la loi du 8 avril 1898 et fixées par le règlement d'administration en date du 13 juillet 1906.

Pour les concessions de force motrice, la redevance est fixée au dixième de la valeur locative de la force motrice concédée : elles varient de 1 fr. 50 à 2 francs et même à 4 francs le cheval-sauvage concédé.

Nombre de concessions demandées (plus de 500.000 HP) n'ont pas vu le jour, depuis des années, faute par les administrations compétentes de n'avoir pu se mettre d'accord sur le chiffre des redevances à imposer aux concessionnaires (travaux publics et finances).

Ces concessions non accordées ont privé l'Etat d'une recette d'au moins 7 millions par an.

Des ingénieurs consultés ont appliqué les prescriptions du décret du 13 juillet 1906 en donnant à la redevance annuelle le taux de 1/10 de la valeur locative du cheval hydraulique aménagé. D'autres ont discuté sur les différents facteurs concernant le cheval-sauvage. Enfin, d'autres ont basé la taxe par kilowatt produit dans l'usine concédée.

Si on admet comme rendements les chiffres moyens suivants : turbines, 0,78, alternateurs 0,95, transformateurs 0,98, soit un rendement de 0,73 pour le cheval électrique.

Par suite ce dernier égale $\frac{1^f,50}{0,73} = 2^f,05$. En admettant 6.000 heures-an on a : $\frac{2^f,05}{6,000} = 0,00034$ ou $\frac{3,4}{10.000}$ par cheval-heure ou $\frac{4,6}{10.000}$ par kilowatt-heure au compteur.

(1) Le Congrès des applications de l'électricité de Marseille, à la suite de la discussion d'une communication présentée par M. Bougault sur le nouveau projet de loi relatif aux patentes des usines, a émis le vœu que le Parlement adopte la proposition de loi de M. Cazeneuve, qui a le grand intérêt de ne pas faire de distinction arbitraire, pour l'établissement du droit de patente, entre les éléments qui servent à produire la force motrice, quand ces éléments sont de nature à être consommés ou détruits par l'usage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les concessions servant à l'irrigation et à la submersion, la redevance est fixée au dixième de l'augmentation brute du revenu dû à l'emploi des eaux concédées, déduction faite de l'intérêt à 6 0/0 des dépenses de premier établissement des ouvrages ainsi que du prix annuel d'entretien de ces ouvrages ; pour les concessions ou autorisations des prises d'eau, autres que celles précédemment définies, la redevance est fixée à 10 centimes par mètre cube pouvant être prélevé ou dérivé en vingt-quatre heures, toute fraction de mètre cube étant comptée pour un mètre. Le puisage par le public de l'eau indispensable aux besoins ordinaires de la vie, n'emportant pas occupation du domaine public, est laissé à titre gratuit.

Dans le cas où une concession de force motrice ou de prise d'eau a pour objet d'assurer un service public non susceptible de bénéfices, la redevance indiquée ci-avant peut être réduite au chiffre normal de 1 franc, sur la proposition des ingénieurs.

Les redevances ci-dessus sont indépendantes de celles qui sont exigibles, le cas échéant, à raison des occupations temporaires qui peuvent être la conséquence des installations de prises d'eau, ainsi que des contributions à imposer au concessionnaire en vertu de l'article 34 de la loi du 16 septembre 1807, à raison de l'utilisation de barrages ou autres ouvrages, intéressant à la fois l'État et les particuliers.

Le chiffre de la redevance à inscrire dans l'acte de concession est proposé par les ingénieurs et arrêté définitivement par l'Administration des Finances. En cas de désaccord entre les agents locaux des services intéressés sur le chiffre de la redevance, celui-ci est fixé par le ministre des Finances. Le pétitionnaire doit, avant la signature de l'acte de concession, produire une soumission, sur papier timbré, portant acceptation du montant de la redevance, et celle-ci doit être revisée dans les délais indiqués par l'acte de concession et, au plus tard, tous les trente ans.

Lorsqu'il y a désaccord sur le caractère de la concession entre les deux Administrations des Finances et des Travaux publics, la question est tranchée par le Conseil d'État.

Pour se faire une idée des charges financières grevant les forces hydrauliques concédées par l'État, nous citerons les deux cas suivants signalés par M. Lépine, ingénieur des Arts et Manufactures. Une société, qui a un capital actions et obligations de 10 millions avec des usines produisant 8.000 HP moyens, paie à l'État pour contributions, patentes, droits de passage, sur le domaine public, droits de contrôle, redevances pour téléphone, abonnement au timbre, droits de circulation des titres et taxes sur le revenu : 100.000 francs par an, soit 12 fr. 50 par HP.

Une autre, dans la même région, au capital de 6 millions, ayant une chute donnant 5.000 HP moyens paie 65.000 francs, soit 13 francs par HP.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il convient d'examiner la répercussion de la loi fiscale du 31 juillet 1917 sur les usines électriques, laquelle est applicable depuis le 1er janvier 1918.

La loi en question supprime les patentes sauf pour les communes et les départements, par suite, l'impôt subsistera pour chaque usine, en se greffant sur l'impôt général exigé par l'État sur le résultat complet de l'exploitation.

La nouvelle loi fiscale ne supprime pas l'impôt foncier ; il est augmenté au contraire et fixé à 5 0/0 ; mais la loi du 29 mars 1914 fixe toujours les bases de cette catégorie d'impôt, qui est revisable tous les dix ans, et cette revision intéresse toutes les usines à gros matériel.

Voilà pour ce qu'on est convenu d'appeler les vieilles contributions. Mais il y a les impôts de remplacement, tel que celui sur le bénéfice déclaré, celui à la charge des salariés, enfin celui sur les revenus des créances, dépôts et cautionnements. Relativement à ces dernières charges nous pensons bon de signaler : 1° que les usines employant un très grand nombre de salariés sont tenues de faire connaître leur nom et le montant de leurs salaires, mais seulement dans le cas où ce salaire dépasserait la partie non exemptée dans la commune ; 2° que les sociétés qui ont recours à des avances provenant de leurs banquiers se verront obligées de fournir à ces derniers les quittances constatant qu'elles ont bien versé les intérêts dus.

238. Prix des matériaux pour constructions. — Les prix que nous fixons ci-après et relatifs à la construction des ouvrages d'art pourront servir de prix de base pour un avant-projet ; ils comprennent la fourniture et la pose de tous matériaux en *temps normal*.

	Prix du mètre cube
Déblais de toute nature pour fouilles et fondations, décapements, etc	1fr,00
Plus-value pour déblais de fondations avec fournitures de bâtardeaux, épuisements	0 ,50
Déblais de toute nature en souterrains, y compris fourniture des boisages et toutes sujétions	10 ,00
Transport au wagonnet, à une distance moyenne de 200m.	0 ,20
Maçonnerie de moellons ordinaires avec mortier de chaux hydraulique	14 ,00
Maçonnerie de moellons tètués, par assises réglées, avec mortier de chaux hydraulique	25 ,00
Maçonnerie de moellons parementés	45 ,00
Maçonnerie de pierre de taille granitique avec mortier de chaux hydraulique	55 ,00
Enrochements à pierre sèche	3 ,00

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	Prix du mètre superficiel
Parement de maçonnerie de moellons ordinaires	1fr,20
Parement vu de maçonnerie de moellons têtués, par assises réglées	3 ,50
Parement vu de maçonnerie de moellons parementés	5 ,00
Parement vu de maçonnerie de pierre de taille granitique	8 ,00
Rejointoiement au ciment de maçonnerie de toute nature	1 ,30
Rejointoiement au mortier de chaux hydraulique	1 ,00
Enduit au ciment de 0m,02 d'épaisseur	3 ,00
Perré à pierres sèches de 0m,30 d'épaisseur	3 ,20
Cloisons en briques simples à plat au mortier hydraulique ou au plâtre	3 ,00
Enduit en plâtre, à deux couches, sur murs et cloisons	0 ,80
Enduit en plâtre, à deux couches, sur plafond	2 ,20
Crépi moucheté en mortier de chaux hydraulique	1 ,30
Carrelage en carreaux de terre cuite de 0m,02 d'épaisseur	2 ,60
Plancher par planches entières, en chêne, de 0m,027 d'épaisseur	5 ,00
Plancher par planches entières rainées, en sapin, de 0m,018 d'épaisseur	3 ,00
Portes pleines en chêne, cadres de 0m,027, frises de 0m,08 à 0m,11, compris ferrements	12 ,00
Portes pleines en sapin, cadres de 0m,027, frises de 0m,08 à 0m,11, compris ferrements	9 ,00
Croisées en chêne, dormant de 0m,054, châssis de 0m,034	18 ,00
Volets brisés en chêne de 0m,027	8 ,00
Plinthes en chêne ou en sapin de 0m,011 × 0m,13	0 ,80
Peinture à l'huile, 3 couches	1 ,00
Couverture en ardoises	4 ,50
	Prix au Kg
Zinc laminé de toutes dimensions pour travaux divers	1 ,00
Fers de toute catégorie pour travaux divers	0 ,40

239. Qualités des matériaux pour constructions. — *Sable.* — Le sable destiné au mortier doit, avant son emploi, être soigneusement lavé et purgé de toute matière terreuse ou argileuse, de grain moyen et passé à la claie. Celui destiné à la pose des moellons parementés et de la pierre de taille doit être tamisé, ainsi que celui devant servir aux rejointoiements et aux enduits.

Pierre cassée. — Pour la pierre cassée composant le béton, on recherchera de la pierre dure, et les morceaux seront tels qu'ils puissent passer dans un anneau de 0m,03 de diamètre. Le béton de ciment sera établi avec 900 kilogrammes de ciment pour 2 mètres cubes de sable et 3 mètres cubes de pierres cassées.

Moellons. — Les moellons bruts doivent être durs, sans fils, passés au lavage ; on les tire des rochers qui bordent la rivière à aménager. Les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moellons têtués ont un bossage variant de $0^m,02$ à $0^m,03$, posé par assises régulières de $0^m,25$ d'épaisseur environ.

Chaux. — Comme dosage, on exige généralement 350 kilogrammes de chaux en poudre par mètre cube de sable ; pour une bonne confection du mortier, l'eau doit être répandue au moyen d'arrosoirs à pomme.

Un bon mortier de ciment peut se faire avec 450 kilogrammes de ciment en poudre pour 1 mètre cube de sable.

Enrochements. — Les enrochements à pierre sèche demandent à être exécutés avec un grand soin ; les matériaux les constituant doivent posséder les mêmes qualités que ceux destinés aux maçonneries. Les moellons de parement seront posés en talus réguliers et normalement aux surfaces des talus. Les perrés à pierre sèche se font à joints brouillés (*opus incertum*).

Joints. — Les joints sont d'abord dégradés et refouillés sur 3 à 4 centimètres de profondeur, puis garnis en mortier de ciment, refoulé et lissé au fer.

Maçonneries de fondation. — Ces maçonneries, qui jouent un grand rôle dans la solidité des barrages, doivent être établies avec le plus grand soin ; le fond des fouilles sera lavé, nettoyé et le rocher gratté à vif. Nous avons déjà renseigné sur le mode d'exécution des maçonneries et la qualité des matériaux dans le chapitre VI.

L'arrêté ministériel du 2 juin 1902, relatif à la réception des matériaux hydrauliques employés dans les travaux soumis au contrôle de l'État, et la circulaire ministérielle qui a suivi cet arrêté fournissent d'intéressantes indications dont nous transcrivons ici les plus utiles à connaître. En ce qui concerne les ciments et la chaux hydraulique, l'Administration fixe comme minimum de poids du litre 1.100 grammes pour les premiers et 700 grammes pour la seconde matière. Pour la durée de prise du ciment portland, immergé dans l'eau, elle ne doit pas être complètement terminée avant un délai de deux heures ni après douze heures. La résistance à la traction du ciment portland pur est fixée comme suit : les éprouvettes immergées dans l'eau potable doivent offrir une résistance de 25 kilogrammes au moins par centimètre carré au bout de sept jours et 35 kilogrammes au bout de vingt-huit jours. Pour les mortiers faits avec des ciments portland ou avec des grappiers, les éprouvettes doivent présenter une résistance de 8 kilogrammes au bout de sept jours, et au bout de vingt-huit jours, 12 kilogrammes pour les grappiers et 15 kilogrammes pour le portland.

Quant à la chaux immergée dans l'eau de mer, on impose 3 kilogrammes au bout de sept jours et 6 kilogrammes au bout de huit jours. La température de l'essai de déformation à chaud est spécifiée à 100° C. maintenue pendant trois heures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

240. Formalités administratives. — Pour mettre en valeur une chute, il faut que l'industriel soit en possession des droits des riverains et qu'il ait acquis les terrains propres à asseoir les ouvrages de captation et les bâtiments.

Ces contrats en main, on adresse une pétition, en double expédition, au préfet, en demande d'autorisation de construction d'une usine hydraulique, en spécifiant le genre d'industrie que l'on veut créer, les établissements hydrauliques placés en amont et en aval, les changements que l'on désire apporter au cours d'eau et la durée probable des travaux à exécuter.

Cette demande doit être accompagnée d'un plan d'ensemble avec courbes de niveau, indiquant l'emplacement du barrage, des chemins d'accès, de l'usine à établir, de la dérivation, ainsi que la limite des terrains à acquérir ; d'un ou plusieurs profils en long sur toute la longueur du plan d'ensemble, avec indication du barrage et autres travaux à établir, du lit de la rivière, du plan supérieur de l'eau, le réservoir étant plein ; de profils en travers ; de coupes transversales des barrages et autres travaux de captation, avec épures de stabilité ; du consentement des divers propriétaires riverains pour la cession des terrains nécessaires à l'exécution des travaux ; enfin, d'un mémoire contenant les calculs justificatifs des ouvrages d'art que l'on se propose d'établir. L'autorisation est donnée suivant la forme prescrite par la circulaire du 21 octobre 1851 et le décret du 25 mars 1852.

L'autorisation, une fois accordée, ne peut être retirée que pour des motifs tirés de l'intérêt public et définis par l'article 14 de la loi de 1898, qui sont : nécessité de prévenir les inondations, de conserver aux eaux leur cours naturel, d'assurer la salubrité publique ou la bonne répartition générale des eaux, le tout, dit l'article 9, de manière à concilier les intérêts de l'agriculture et de l'industrie avec le respect dû à la propriété et les droits et usages antérieurement établis. L'autorisation est toujours donnée sous réserve des droits des tiers.

Pour le surplus : instruction de l'affaire, enquêtes, règlement d'eau, se reporter au (§ 253), qui traite des autorisations d'usines hydrauliques.

Par sa circulaire du 9 septembre 1902, le ministre de l'Agriculture spécifie que, lorsque la demande vise l'établissement d'un barrage sans revanche, c'est-à-dire dont le plan d'eau n'est pas tenu de rester à $0^m,16$ en contre-bas des rives, et lorsque l'usine à créer a une puissance brute supérieure à 100 poncelets, le dossier de l'affaire doit lui être communiqué, accompagné de l'avis du préfet, du rapport des ingénieurs, ainsi que d'une étude sur les conditions de stabilité du barrage à établir, conformément à la circulaire du 15 juin 1897.

241. Ressources financières. — L'appréciation du cours d'eau

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résulte de la situation géographique de l'usine à créer, de la géologie du sol composant le bassin, de la climatologie, des jaugeages, des profils fixant le niveau des eaux après la construction des ouvrages régulateurs et du tracé de la ligne à haute tension (en cas d'un transport de force). Les débouchés ou moyens de vente étant définis, on a ainsi les éléments nécessaires pour fixer le coût de l'aménagement de la rivière et établir la partie financière de l'opération en vue.

Il va de soi que l'usine projetée ne doit, en principe, en rien modifier le régime des eaux d'amont au delà de l'emprise de l'usine, ni empiéter par ses installations sur les propriétés voisines.

L'exposé de l'affaire en vue de la recherche des capitaux nécessaires pour la réaliser doit comporter : 1° les descriptions, calculs et emplacements des ouvrages d'art (barrage, réservoir, canal d'amenée, canal de fuite, bâtiments de l'usine, conduite forcée, chemins d'accès, etc.), des moteurs hydrauliques et des machines électriques en vue de l'industrie que l'on se propose d'exploiter, avec considérations techniques à l'appui justifiant le choix des types adoptés ; 2° un devis estimatif des travaux d'art à effectuer, avec la nature des matériaux entrant dans leur construction et leurs prix de base, ainsi que des machines avec indication de rendement ; 3° des projets de marché pour les maisons, à mettre en concurrence, tant pour l'exécution des travaux d'aménagement de la chute que pour l'installation du matériel producteur d'énergie ; 4° l'évaluation du capital comportant, en outre du devis estimatif ci-dessus, les frais d'acquisition de la chute, les frais d'études, d'achat des terrains pour les bâtiments et l'emplacement des ouvrages d'art, le fonds de roulement ; 5° enfin un projet d'exploitation faisant ressortir le prix de revient de l'énergie et les bénéfices probables de la mise en œuvre de la chute. Ici figurent les frais d'amortissement, d'entretien et d'exploitation proprement dits (§ 236).

Au cas où l'on désirerait constituer une société, l'établissement du capital social doit comporter en outre les frais de constitution de ladite société et de souscription du capital ainsi que la définition des apports.

Les banquiers de la région dauphino-savoisienne, et à leur tête M. Charpenay, dans les vingt premières années de la houille blanche, ont fait preuve d'intelligence, de prescience, de courage, de patriotisme, de devoir social qu'on ne saurait trop reconnaître et rendre hommage. Il a fallu qu'ils affirment leur prospérité pour que des grands établissements de crédit les suivent dans cette voie.

Chacun sait en principe combien est difficile, délicat et laborieux le lancement raisonnable et honnête d'une affaire industrielle, aussi doit-on admettre le rôle fécond et considérable que les banques ont joué dans l'épanouissement industriel de leur région, dont la conséquence a été la créa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion d'une des grandes branches nationales de l'industrie française, appelée à un développement de plus en plus considérable.

Aujourd'hui on estime à près de 500 millions les fonds mis à la disposition des industries de houille blanche, le plus souvent par l'intermédiaire des banques.

Il nous paraît intéressant de consigner ici la combinaison employée par M. Estrade, directeur de la Société méridionale de transport de force (usine Saint-Georges), qui a donné des résultats inespérés et dont l'interprétation peut aider à la réalisation de ce genre d'affaires, qui demandent toujours le concours de gros capitaux.

La Société exploitante de l'usine Saint-Georges (§ 371) a pu en effet limiter ses capitaux à la construction de l'usine génératrice et de la ligne à haute tension, tout le reste ayant été fait aux frais des communes (plus de cent) et des particuliers tributaires du réseau. Par suite de cette combinaison, l'éclairage municipal est assuré gratuitement à raison de 25 lampes à incandescence de 16 bougies par mille habitants, et l'éclairage des particuliers, à forfait le plus possible, au prix de 32 francs la lampe de 16 bougies. Des basculateurs spéciaux, imaginés par M. Estrade, évitent d'avoir chez les consommateurs plus de lampes allumées à la fois que cela n'est prévu par la police d'abonnement.

L'organisation des usines électriques du canton de Zurich est d'un enseignement digne à retenir.

Il s'agit d'une entreprise autonome cantonale, ayant son siège à Zurich, qui construit et exploite des stations centrales lui appartenant, destinées à fournir de l'énergie à bon compte. Elle peut, en outre, participer à la création et à l'exploitation d'autres usines ou encore acheter du courant à des établissements privés. Elle doit subvenir elle-même à ses propres dépenses. Elle a toutefois la faculté de déroger à cette dernière règle, autant que la chose est nécessaire pour développer son exploitation et soutenir la concurrence. Toutes les avances éventuelles que l'entreprise en question reçoit de la caisse de l'État sont remboursables sur les excédents ultérieurs des recettes. Les crédits nécessaires pour la création, l'entretien et l'exploitation des stations centrales sont fournis par le conseil cantonal, lequel fixe l'intérêt payable sur les sommes par lui avancées à un taux correspondant au prix de revient de la fabrication du courant. Les différentes usines sont placées sous la haute surveillance du conseil cantonal, auquel elles soumettent chaque année leur rapport de gestion et leurs comptes.

La recherche des capitaux pour le lancement d'une affaire industrielle est toujours une opération laborieuse, qui crée beaucoup de soucis et demande du temps, de la ténacité, du tact de la part des créateurs, sur-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tout si ces derniers n'ont pas par eux-mêmes une situation qui s'impose aux banquiers ou à l'épargne.

Dès que la personne qui lance une affaire présente une surface industrielle de bon aloi ou une fortune imposante, il lui arrive de réussir assez promptement, soit qu'elle sollicite l'appui et la collaboration de maisons financières, soit qu'elle s'adresse à un consortium d'entrepreneurs, ou simplement qu'elle fasse appel au concours d'amis fortunés, pouvant réunir un capital plus ou moins important, d'après la confiance qu'elles ont dans l'affaire proposée ou dans la personnalité du solliciteur. Cette manière de procéder, qui est assez usitée, permet aussi d'amorcer des affaires de grande envergure en appliquant les premiers capitaux à la constitution d'une société d'études, qui limite ses dépenses aux travaux de recherches et à ceux d'exécution les plus urgents. Ce n'est que plus tard, alors qu'arrivent les grosses dépenses, que l'on fait appel à l'épargne par des émissions confiées à des banques ou maisons financières.

Les entreprises de grande importance sont le plus souvent engagées par de grosses maisons de construction ou des entrepreneurs qui font le capital par leurs propres fournitures, mais qui, une fois l'affaire mise en marche, la transforment en une société anonyme, ce qui leur permet d'écouler leurs actions dans le public, réalisant ainsi un gain calculé à l'avance. On devine facilement que ce procédé ne laisse pas une liberté complète d'allure aux dirigeants de l'entreprise.

Lorsqu'une affaire est de moyenne importance, on peut aboutir en intéressant surtout et principalement les capitaux de la région, en s'adressant à toutes les bourses. Mais il faut savoir attirer, renseigner, intéresser, instruire, inciter le petit actionnaire par un exposé lucide, lui faisant toucher du doigt les profits certains qu'il peut retirer de l'affaire dans un avenir plus ou moins éloigné. Dans ce cas, il est indispensable d'avoir avec soi des personnes de la localité, jouissant d'une bonne réputation en affaires et capables d'en faire. On peut appuyer la présentation de l'entreprise des chiffres d'exploitation d'industries analogues ou identiques, ou de rapports ou opinions favorables émises par des personnes compétentes ou par des experts autorisés et qualifiés. Si le capital, par ce procédé, est en grande partie souscrit, il devient dès lors assez facile de le compléter par l'entremise des banques, dont la confiance dans l'affaire est éveillée par l'intérêt qu'y ont pris les habitants du pays.

Pour les affaires d'une grosse allure, comme les transports d'énergie à grande distance, les lignes de tramways électriques urbaines ou interurbaines, etc., il apparaît naturel de former plusieurs groupes de capitalistes, dans les régions traversées, par l'intermédiaire d'un groupe financier ou syndicat composé de commerçants, d'industriels, d'hommes d'affaires, d'agents ou de représentants de capitalistes, toutes personnes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ayant de l'argent, de l'influence, ou les deux. Il est évident que, dans cette occurrence, le petit actionnaire paie plus cher que quand il est directement un des fondateurs ou des souscripteurs.

Au Congrès des applications de l'électricité de Marseille, des personnalités considérables du monde industriel, principalement MM. Mailloux et Loucheur, ont insisté sur certaines pratiques très utilisées en Amérique et par trop négligées en France. Ce sont d'abord les journaux qui, dans le nouveau monde, s'occupent de plus en plus de renseignements industriels et financiers de toutes sortes, et les journaux techniques qui suivent d'assez près ce qui se passe dans leurs industries. Il y a aussi des publications qui s'occupent spécialement et exclusivement de ces questions, en éveillant l'intérêt du public américain et en formant celui-ci aux questions d'exploitations et de réalisations industrielles.

Puis, c'est le rôle important de l'ingénieur-conseil, dont la conception que l'on a en Amérique est bien différente de celle qu'on se fait en Europe. Là-bas, l'ingénieur-conseil, suivant l'acception la plus générale du mot, sert d'arbitre et de guide ou de directeur des relations, négociations, ententes, marchés, contrats, liquidations, qui ont lieu entre l'acheteur et le vendeur. En Amérique, les services de l'ingénieur-conseil sont utilisés à toutes les périodes ou phases du développement d'un projet ou de sa réalisation industrielle, depuis la conception même du projet jusqu'aux essais de réception de l'installation et même durant l'exploitation. On lui demande surtout de donner son avis au point de vue « affaire financière » et parfois il s'appuie lui-même sur une étude technique préalable, plus ou moins approfondie, faite par un technicien. Si, à la suite de son rapport, on décide de mettre l'affaire au jour, c'est lui qui « fera les devis, les plans, les spécifications, préliminaires et définitifs, qui établira ou approuvera les cahiers des charges, qui surveillera la construction, qui dirigera l'exécution des travaux, qui fera les essais de réception, qui autorisera les paiements, qui contrôlera tout, qui règlera tout, qui décidera tout, de la part de l'acheteur ». Ses devoirs sont ceux d'un technicien doublé d'un homme d'affaires et de conscience. C'est un être neutre, attaché ou affilié à aucune industrie ou à aucun système ou procédé quelconque, d'une probité reconnue. Dans les affaires importantes, on demande à l'ingénieur-conseil d'abord un rapport préliminaire, qui a pour but principal de renseigner et de fixer le ou les promoteurs eux-mêmes sur la valeur et le mérite du projet dans le plus bref délai possible. C'est sur le vu de ce rapport préliminaire que les capitalistes, dont l'appui est recherché, décident ou non de suivre l'affaire plus avant ; alors intervient un rapport définitif qui doit résister à toutes les analyses et critiques pour entraîner les décisions ultimes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIII

LES FORCES HYDRAULIQUES MONDIALES

242. Moyens employés pour établir la puissance des chutes d'eau d'un pays. — Le système qui consiste à multiplier la quantité des eaux tombées sur un massif montagneux par la hauteur dont elles chutent ne représente pas l'énergie réellement utilisable. Il faudrait, pour une certitude complète, connaître les débits minima des cours d'eau et tenir compte des difficultés physiques ou économiques qui sont de nature à rendre impossible l'établissement des installations hydrauliques. On ne pourra évaluer avec quelque exactitude l'importance des forces hydrauliques que lorsque des jaugeages méthodiques nombreux et prolongés auront été effectués et que les rives des cours d'eau auront été dotées de bons nivellements avec repères d'altitude, travail qui de nos jours, en France, est confié au Service des Grandes Forces hydrauliques ressortissant du ministère de l'Agriculture. Ce service a fonctionné et opère encore actuellement dans les Alpes françaises, dans les Pyrénées et le Massif Central, et nous avons fait connaître les moyens employés ainsi que les résultats obtenus (chapitre II) de cet ouvrage. Successivement les travaux de ce service s'étendront aux autres régions de houille blanche de la France, et alors on se trouvera en présence d'éléments certains pour la meilleure et la complète réalisation des richesses hydrauliques de notre pays. Nous avons, d'autre part, et dans le même chapitre, relaté les moyens employés par le Bureau fédéral suisse, pour atteindre le même résultat.

243. Puissance hydraulique de la région des Alpes françaises. — Les Alpes françaises comprennent le massif du mont Blanc, les Alpes Graies, situées entre la vallée de la Tarentaise et celle de la Maurienne, célèbre par le pic de la Grande-Casse, les Alpes Dauphinoises avec les massifs de Belledonne et de la Meije qui encadrent la vallée de la Romanche, et enfin le massif du Pelvoux, qui termine la ligne des grandes altitudes.

Dans la région des Alpes, la configuration des vallées et les facilités offertes à l'industrie ont fait que les grandes usines hydrauliques se sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tout d'abord installées sur la partie moyenne des cours d'eau. Cette situation des usines à des altitudes relativement peu élevées, dans une zone tempérée, et aussi l'alimentation d'été, assurée par de grandes surfaces glaciaires, ont rendu la création de réservoirs beaucoup moins nécessaires. Les besoins toujours plus grands de nouvelles forces hydrauliques conduisent déjà à augmenter et régulariser la puissance des anciennes usines. On est donc conduit dans ces régions à aménager les réservoirs naturels existants ou même à en créer de toutes pièces.

M. Tavernier a évalué la richesse hydraulique des départements des Alpes françaises à 3.000.000 de chevaux pour la force minimum d'étiage et à 15.000.000 pour la force moyenne annuelle. Ce résultat est obtenu en multipliant la pente totale de chaque section de cours d'eau par les débits d'étiage et les débits moyens, défalcation faite des dotations concédées aux grands canaux d'irrigation.

Bergès a indiqué le chiffre de 5.000.000 de chevaux disponibles dans les Alpes, dont les rivières les plus connues sont l'Arc, l'Arve, le Drac, le Doron et la Romanche. Ce sont là évidemment des forces utilisables ; mais l'essentiel serait de connaître la proportion disponible dans des conditions d'art et d'économie déterminées.

Les Alpes françaises constituent incontestablement le réservoir le plus riche de houille blanche, la patrie de la houille blanche, selon la belle expression de M. Audebrand. De nombreuses et puissantes usines y ont été créées ces dernières années, tant pour la distribution de la force et de l'éclairage que pour l'électrochimie et l'électrométallurgie.

L'Arc, l'Arve et l'Isère (rivières torrentielles) possèdent des usines supérieures à 12.000 HP avec des hauteurs de chute ne dépassant pas 100 mètres. Les chutes aménagées de 300, 400, 500 mètres de hauteur et plus y sont déjà en nombre respectable ; quelques-unes d'entre elles atteignent des puissances de 8.000 HP. L'ensemble des forces utilisées à ce jour dans les Alpes dépasse 550.000 HP, et il y a en projet environ 600.000 chevaux, ce qui porterait l'ensemble de ces installations à 1.150.000 chevaux.

M. de la Brosse évalue l'ensemble des forces disponibles pour les quatre départements de la Haute-Savoie, de la Savoie, de l'Isère et des Hautes-Alpes à 1.000.000 de HP à l'étiage et 2.325.000 en eaux moyennes. Comme la superficie de ces quatre départements représente 2.466.560 hectares en nombre rond, on peut donc compter sur 1 cheval par hectare (en eaux moyennes). Ces départements ne représentent que la 215e partie de la surface totale de notre pays, mais ils sont les mieux pourvus en forces hydrauliques. Les évaluations pour les Alpes méridionales sont de 1.200.000 HP à l'étiage et 2.600.000 en eaux moyennes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

244. Région du Massif Central. — Le département du Puy-de-Dôme possède des séries de chutes d'environ 10.000 HP et d'autres de 2.000 à 5.000 parfaitement utilisables, sans grandes retenues, par la simple utilisation de la pente, avec des conduites forcées, à l'instar du massif alpin.

On a estimé que le Massif Central, les Pyrénées, les Vosges et le Jura contiennent des réserves susceptibles de pouvoir fournir 5 millions de HP ; plus strictement on peut compter sur 1 million en basses eaux et 2 millions en eaux moyennes. Les installations réalisées ou en cours de construction dépassent 200.000 chevaux.

245. Région des Pyrénées. — Cette région de notre pays ne possède pas, comme les Alpes françaises ou suisses, des massifs largement étalés susceptibles de recevoir des névés et de donner naissance à des masses glaciaires considérables. Les glaciers de quelque importance n'existent que dans la partie centrale, autour de la Maladetta, les autres glaciers n'étant guère que des traînées de neiges amoncelées sur les flancs des montagnes par les remous des vents. Il en résulte que les puissances hydrauliques pyrénéennes, alimentées par les seules chutes des pluies, ont un régime caractérisé par des variations très irrégulières dont la correction ne peut être effectuée que par un réservoir régulateur ; mais ces réservoirs naturels sont rares, et la difficulté de les établir artificiellement est souvent énorme.

Dans les Pyrénées, le développement des chutes s'est surtout porté sur les hautes chutes des vallées supérieures, le cours moyen étant occupé depuis longtemps par de nombreuses petites industries qui gênent beaucoup la réunion de droits assez étendus pour permettre la création d'usines hydrauliques importantes.

Le profil des vallées, extrêmement raide à leur origine, favorise également la création des hautes chutes à faible débit. En raison de la faible étendue des surfaces glaciaires, les étiages d'été sont aussi accentués et souvent de plus longue durée que les étiages d'hiver. Il en résulte que la création de réservoirs s'impose pour assurer à ces hautes chutes un rendement satisfaisant, d'ailleurs facilitée par l'existence de nombreux lacs dans les hautes vallées aux altitudes voisines de 2.000 mètres. Celles aménagées à ce jour soit pour l'industrie, soit pour les transports de force et surtout pour la traction électrique comportent pour la plupart l'adjonction de réservoirs de haute altitude.

D'après M. Turgan, dans les six départements frontières (Ariège, Aude, Haute-Garonne, Basses-Pyrénées, Hautes-Pyrénées et Pyrénées-Orientales), les usines hydrauliques existantes sur les rivières non navigables ni flottables représentaient, en 1890, une puissance brute de 93.400 HP répartis en 5.728 usines dont la puissance moyenne n'était que de 17, 7HP.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Selon M. Ader, ingénieur des ponts et chaussées, les rivières pyrénéennes (en dehors de celles qui descendent sur le Plateau Central), pourraient fournir 1.200.000 HP correspondant sensiblement à 2.000.000 de HP en eaux moyennes. D'après le même observateur, il y avait, en 1900, 31.837 HP répartis en 90 usines d'une puissance supérieure à 100 HP et 133.500 HP répartis en 33 chutes inférieures à 100 HP, soit en tout 165.337 HP.

Mais depuis de grandes usines hydroélectriques se sont créées dans cette région, notamment l'usine d'Auzat sur le Viedessos, affluent de l'Ariège (20.000 HP), l'usine d'Orlu, actuellement la plus haute chute en France (940 mètres) et destinée à fournir 30.000 HP.

Si, comme plus haut, nous admettons que le chiffre de 165.337 HP représente les 10 0/0 des forces utilisables, avec un coefficient de 45 à 50 0/0 pour celles d'une appropriation facile, on obtient le chiffre de 800.000 HP environ applicable à la région des Pyrénées.

246. Bassin de la Normandie. — Les départements constituant ce bassin ont fait l'objet d'études spéciales, au point de vue de la captation des forces hydrauliques, de la part de M. Henri Bresson, qui a d'ailleurs dressé de remarquables cartes de cette grande région, que l'on peut consulter dans le livre qu'il a publié sur *la Houille verte* (1). Les renseignements qui suivent, concernant le bassin de la Normandie, sont tirés de cet intéressant ouvrage.

Le bassin de l'Orne a 116.275 hectares et un débit moyen (janvier et décembre) de $12^{m3},723$; la Mayenne, 52.774 hectares et $10^{m3},100$; la Rille, 23.245 hectares et $0^{m3},845$, et la Sarthe (dans le département de l'Orne), 71.995 hectares et $4^{m3},321$.

Orne. — Aucun des cours d'eau du département de l'Orne n'est navigable ni flottable ; la chute la plus élevée est de 12 mètres et située sur la Vire, donnant environ 80 HP. Sur la ligne de faîte (de l'est à l'ouest), le versant sud s'incline en pentes relativement douces, tandis que le versant nord tombe brusquement à pic. Les vallées du versant sud sont de nature rocheuse ; c'est dans ce dernier que l'on rencontre les établissements industriels hydrauliques (filatures, clouteries, etc.). La force moyenne utilisable des usines hydrauliques du département de l'Orne est de 10.000 HP, ce chiffre ne tenant pas compte des portions de rivières susceptibles de nouveaux aménagements.

Eure-et-Loir. — La configuration du sol de ce département se prête peu à l'établissement d'usines hydrauliques. Les chutes n'y atteignent pas

(1) *La Houille verte*, par Henri Bresson. Dunod et Pinat, éditeurs, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3 mètres de hauteur. La force moyenne utilisable des usines hydrauliques est évaluée à 4.000 HP.

Sarthe. — Ce département occupe le centre du versant sud du massif montagneux, et l'agriculture l'emporte sur l'industrie proprement dite. Les hauteurs de chute varient entre $0^m,50$ et $1^m,50$, et les puissances y sont parfois de 150 HP. On trouve dans ce département un exemple de transport d'énergie électrique réunissant deux chutes voisines dans une seule et même usine.

La puissance moyenne utilisable s'élève à 14.000 HP, dont 5.400 sur rivières navigables.

Mayenne. — Le bassin de la rivière la Mayenne est formé en grande partie de roches ou de terrains imperméables rendant les crues fréquentes et abondantes. Les hauteurs de chutes varient entre 1 mètre et $3^m,50$. Le gros tribut des forces hydrauliques dans ce département est fourni par les rivières navigables. On y rencontre l'importante usine de Rochefort, qui utilise trois chutes de $2^m,75$ de hauteur sur la partie navigable de la Mayenne ; les trois barrages, qui s'étendent sur 1 kilomètre de distance au plus, produisent une force de 800 HP. Le courant de 2.400 volts qui y est engendré alimente les fours électriques de la Compagnie la Néo-Métallurgie, propriétaire de l'usine de Rochefort. Le nombre de chevaux hydrauliques utilisables dans le département de la Mayenne est de 15.000 à 16.000 HP, dont près de 13.000 HP sur la seule rivière navigable du département de la Mayenne.

Maine-et-Loire. — Après le confluent de la Maine, la Loire débite 450 mètres cubes à la seconde ; la Maine, 75 mètres cubes près d'Angers, et la Mayenne, la Sarthe, le Loir et l'Oudon y versent respectivement 10, 12, 10 et 6 mètres cubes à la seconde (chiffres moyens). Pour tout le département, on trouve 4.500 HP utilisables sur les rivières navigables et 5.000 sur les rivières non navigables ni flottables.

A Cheffes, un barrage établi sur la Sarthe navigable permet d'obtenir 200 HP sous une chute de $1^m,30$.

Manche. — Dans ce département, les rivières sont peu longues, mais les chutes y atteignent des hauteurs de 4 à 5 mètres. Le centre du département est plat ; la région du Bocage constitue la partie accidentée du pays, et on peut facilement y établir des chutes de 12 mètres en réunissant deux ou trois chutes. L'usine hydroélectrique de Mortain utilise une chute de 15 mètres à l'aide d'une conduite forcée. Sur la Vire, à Thorigny, existe un transport de force de $7^{km},500$ à 5.000 volts. La puissance moyenne utilisable des usines hydrauliques est de 11.000 HP, dont la rivière navigable, la Vire, entre pour 600 HP.

Calvados. — Le département du Calvados présente entre l'Eure et la Dive des plateaux crayeux où les affluents des rivières principales sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rares. La plaine de Caen est peu accidentée. Cette région n'offre pas de chutes ; on les rencontre dans le Bocage, région aux roches granitiques. A Thury-Harcourt, sur la rivière l'Orne, le point culminant du département (359 mètres), l'usine hydro-électrique produit du courant à 5.000 volts qui est transporté à 15 kilomètres. Les rivières du département du Calvados représentent 9.500 HP utilisables.

Eure. — Toutes les rivières de ce département sont tributaires de la Seine. Il ne présente que fort peu de ressources hydrauliques ; les basses eaux de l'été et les crues de l'hiver, indépendamment de la faible pente des cours d'eau, en sont les raisons déterminantes.

Des deux barrages avec écluses établis dans le département de l'Eure, celui de Poses est le plus important (§ 363).

L'Eure navigable, qui n'a que 19 kilomètres de longueur dans la traversée du département du même nom, ne compte pas moins de 26 usines hydrauliques. On a pu réaliser sur la Sebec, affluent de la Rille, une chute de 11 mètres, grâce aux coteaux escarpés de Rugles. L'usine hydroélectrique de Saussaie, sur l'Eure, comporte des alternateurs triphasés à 5.600 volts et fournit le courant électrique à plusieurs communes. Dans cette usine, comme moteurs de secours, on a eu recours à des moteurs à gaz pauvre.

Les rivières du département de l'Eure représentent 1.800 HP environ, dont 1.100 sur l'Eure.

247. Évaluation de la richesse de la France en houille blanche. — En 1913, on comptait 620.000 HP aménagés en basses eaux dont 75.000 seulement sur cours d'eau navigables, dont quatre usines de grande importance, et 545.000 sur les cours d'eau dont la force appartient à des particuliers. Cela représentait 15 0/0 des forces disponibles toute l'année. En 1915, la puissance installée dans les Alpes atteignait 718.000 chevaux se décomposant, d'après le Service des Grandes Forces hydrauliques, comme suit :

Bassins de l'Isère : 427.115 HP ; de la Durance, 112.165 HP ; de l'Arve, 59.370 HP ; Cotiers (Var, Argens, Roya), 40.100 HP ; du Rhône, 29.800 HP ; du Guiers, 15.620 HP ; des Dranses, 6.100 HP, de la Drôme et du Lez 470 HP ; du Fier, 26.680. Ces forces se répartissaient de la façon ci-après : force et lumière, 291.000 HP ; métallurgie électrique, 255.000 HP ; électrochimie, 147.000 HP ; traction, 16.900 HP ; diverses industries, 39.000 HP. Soit : 96 usines de 100 à 500 HP, 19 de 500 à 1.000 HP, 43 de 1.000 à 5.000 HP, 19 de 5.000 à 10.000 HP et 28 au-dessus de 10.000 HP, soit, au total, 205 usines.

A l'heure actuelle, on compte, pour la totalité de la France, près de 1.500.000 HP captés, soit environ le septième des forces hydrauliques en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

eaux moyennes que les flancs de nos montagnes recèlent, et dont la moitié au moins pourrait être de facile mise en valeur. En admettant que 1 kilogramme de charbon donne le cheval-heure et que 8.000.000 de chevaux correspondent à 30 milliards de HPH, la richesse hydraulique de la France pourrait un jour balancer largement celle de nos houillères, avec cette différence que cette dernière ne peut aller qu'en s'affaiblissant, alors que la première paraît être de caractère inépuisable.

Avec des chevaux de dix-huit heures, la houille blanche atteindrait une richesse double de celle de la houille noire, soit un mouvement annuel de près de 1.500 millions de francs.

M. de La Brosse, partant de cette considération que les quatre départements de la région des Alpes, cités plus haut, donnent 1.000.000 de HP à l'étiage utilisables pour 24.665 kilomètres carrés, en déduit pour le reste de la France l'évaluation suivante (1) :

1° Départements du sud-est depuis la Drôme jusqu'aux Alpes-Maritimes et les 6 départements de la bordure pyrénéenne (superficie, 63.166 kilomètres carrés), avec un coefficient de 1/2, soit 1.300.000 HP ; 2° 12 départements du centre et 6 de l'est (superficie, 91.000 kilomètres carrés), avec un coefficient de 1/4, soit 900.000 HP ; 3° le reste du territoire (357.000 kilomètres carrés) avec un coefficient de 1/10, soit 1.400.000 HP.

La France entière posséderait ainsi un appareil hydraulique d'étiage de 4.000.000 de HP, et pour le régime moyen 8.000.000 à 9.000.000 de HP.

Des études postérieures plus précises ont fait reconnaître que ces évaluations sont encore inférieures à la réalité. Le service des Grandes Forces hydrauliques a évalué à 4.600.000 HP la force hydraulique en basses eaux et à 9 ou à 10 millions de HP en régime moyen. La houille verte est représentée par une longueur de 13.000 kilomètres de rivières navigables et de canaux de navigation, et on compte 260.000 kilomètres de cours d'eau non navigables, ni flottables, qui constituent le domaine de la houille blanche.

A défaut de recensement exact, on peut compter, avec les installations qui ont surgi sous le coup de fouet de la guerre, pour la France entière, sur près de 800.000 chevaux installés présentant plus de 600 millions de capitaux engagés, et que les projets en cours porteront à près de 900 millions.

Les industries électrochimiques entrent dans ces chiffres pour 14 0/0 environ, les industries électrométallurgiques pour 34 0/0, la traction,

(1) La puissance se répartit ainsi :

Haute-Savoie...	100.000 HP, étiage, et	375.000 HP, eaux moyennes	
Savoie.....	320.000	—	650.000	—
Isère.....	350.000	—	800.000	—
Hautes-Alpes ...	300.000	—	500.000	—
	1.070.000		2.325.000	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'éclairage et la force motrice électriques pour 50 0/0 et les industries diverses pour 2 0/0. On peut donc sans témérité affirmer que, d'ici quelques années, la puissance hydraulique aménagée atteindra 1.500.000 chevaux et le produit de la vente de l'énergie dépassera 100 millions par an.

La statistique officielle de 1912 classait comme suit la puissance normale des machines à vapeur en France.

A. Établissements industriels et agricoles.	3.235.115 HP (1)
B. Chemins de fer et tramways.....	11.083.185
C. Batellerie et navigation fluviale.....	546.330
Ensemble.....	14.864.630 HP

Fournissant 54 milliards de chevaux-heures, alors que les richesses hydrauliques en houille blanche fournissent actuellement 60 milliards de chevaux-heures (2).

Il convient de remarquer que l'appareil à vapeur ne satisfait qu'à un horaire discontinu, que les machines à vapeur ne donnent leur pleine puissance qu'en un petit nombre d'heures par jour, alors que les chutes hydrauliques permettent de faire un service de vingt-quatre heures toute l'année pour les forces d'étiage, et six à huit mois pour les forces moyennes.

248. Évaluation des forces hydrauliques mondiales. — Actuellement, le nombre total de chevaux électriques mondiaux produits à l'aide des chutes hydrauliques est bien près d'atteindre 10 millions de HP (chutes aménagées), contre une disponibilité totale de 75 millions de chevaux. Il est d'ailleurs assez difficile de déterminer ce chiffre avec quelque exactitude, car, outre que les statistiques, dans certains pays, ne sont pas tenues d'une façon bien minutieuse, la création de nouvelles usines hydrauliques se fait avec une telle rapidité qu'un grand nombre échappe au recensement.

Les États-Unis viennent en tête avec 5 millions de chevaux et une réserve disponible de plus de 13 millions, puis la Norvège avec près de 1 million de HP et 18 millions disponibles, suivie de la France et de l'Italie, la première avec 750.000 HP et 6 millions disponibles. La Suède arrive

(1) La statistique officielle pour 1906 a relevé 61.533 établissements employant 79.567 machines à vapeur produisant 2.321.756 chevaux-vapeur. La répartition entre les différentes branches de l'industrie a été établie comme suit : fabrication des tissus et accessoires de vêtements, 20,8 0 /0 ; usines métallurgiques, 18 0 /0 ; industrie des mines et carrières, 15,7 0 /0 ; production de l'électricité, 10,6 0 /0 ; industries alimentaires, 9,6 0 /0 ; industries du bâtiment, 7,2 0 /0 ; agriculture, 6,8 0 /0.

(2) Mais la guerre a amené la destruction de nombre d'établissements dans les régions envahies. D'autre part il s'est créé une foule d'industries privées ou de guerre, depuis novembre 1914.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec 550.000 HP et 675.000 à utiliser ; l'Autriche-Hongrie avec 515.000 et 6.460.000 disponibles.

La Suisse suit avec 450.000 HP et une réserve de 2.500.000. L'Allemagne a 400.000 HP environ installés et en réserve 1.425.000. Puis l'Espagne avec 300.000 HP installés et 5 millions restant à utiliser. La Grande-Bretagne a 100.000 HP environ mis en service avec disponibilité d'environ 950.000 chevaux.

I. Les *forces hydrauliques norvégiennes* sont presque toutes d'appropriation facile en général, situées à peu de distance de la mer, et offrant l'avantage d'avoir un débit sensiblement constant par suite de l'existence de bassins fluviaux très étendus. Les grands froids qui règnent quelquefois à l'intérieur du pays ont peu d'influence sur le minimum du débit qui sert de base au calcul de la puissance des usines (1).

L'aménagement réalisé ou en construction des chutes de Skoriakesfels (105.000 HP), de Kraüger (160.000 HP), de Trollhallen et d'Elenas (330.000 HP), de Schvaelgfos (sur la rivière Tinné), qui fournit l'énergie à l'usine de Nottoden (fabrication des engrais électrolytiques) (67.000 HP), de Rjukanfoss, sur la rivière Mann, et devant alimenter l'usine de Saaheim (195.000 HP), de Boelfos, sur la rivière Nidelven (23.000 HP), de Wamma, sur le Glommen (70.000 HP), de Kykkelsrud (50.000 HP) avec transport à 60.000 volts, donnera une cavalerie formidable de près de 1 million de HP.

L'usine de Vermork (450 mètres de chute) fournit 200.000 HP. L'usine hydroélectrique de Svaelgfos utilise une chute naturelle au moyen d'un barrage de 47 mètres de hauteur. Un canal supérieur d'amenée, d'environ 650 mètres de long, construit la plupart du temps en tunnel, amène une quantité d'eau d'un volume d'environ 1.000 mètres cubes à la seconde à une écluse.

La conduite d'eau alimentant les turbines actuellement en service est constituée par quatre galeries perpendiculaires creusées dans le rocher, et se rejoignant avec le tunnel d'amenée presque horizontal. Devant ces galeries se trouvent les entrées des quatre turbines de 12.000 HP (décrites au chapitre VII), qui sont parmi les plus grandes et les plus puissantes d'Europe, avec celles de Trollhättan.

L'usine la plus importante est celle du fleuve Skien, qui est installée pour fournir 600.000 HP. Un réservoir emmagasine la retenue des eaux du lac Mjösvand, jusqu'à concurrence d'une hauteur de 10 mètres, soit 600 millions de mètres cubes de liquide. La chute totale est de 550 mètres,

(1) D'après M. Holtz, on peut utiliser dans le pays de Norvège, au régime moyen des eaux, 4 millions de chevaux, dont 1.250.000 existant dans la Norvège méridionale. Un cinquième de cette dernière est affecté à la production de l'énergie hydraulique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur laquelle on utilise présentement 220 mètres pour l'alimentation de l'usine centrale fournissant 120.000 HP. Les installations hydrauliques de cette usine commandées aux Établissements Escher Wyss et à la maison Voith, sont les plus puissantes du continent.

Les chutes du Morvé, formées par le fleuve Numedack, sont distribuées sur une longueur de 9 kilomètres du parcours du fleuve représentant une différence de niveau totale de 420 mètres. En régularisant plusieurs lacs, on aurait durant les étiages 40 mètres cubes par seconde et on obtiendrait 163.000 chevaux aux turbines. La dépense d'installation est évaluée à 25 millions, faisant ressortir le cheval-an à l'usine à 150 francs. On transporterait 60.000 chevaux à Christiana.

Pour *la Suède*, les disponibilités sont évaluées à 6.750.000 HP. L'usine de Gullspang a une puissance de 120.000 chevaux ; celle d'Aelfkarleby 45.000 HP et celle de Trölhattan, 150.000 HP. L'usine de Börjus, construite par l'Etat Suédois, comme celles de Trölhattan et d'Aelfkarleby, a une puissance de 50.000 chevaux.

Sur la côte méridionale on trouve les usines électro-sidérurgiques d'Arendal, les usines à nitrates d'expérimentation de la Badische Anilin und Soda Fabrik, à Christiansand, les usines à nickel et d'aluminium près de la même vallée, l'usine à sodium de Vadheim, et plus au nord les usines de carbure, ferro-titianium et ferro-chrome de Meraker.

Parmi les usines destinées à la brillante industrie de l'azote, l'usine de Lienfos fournit 16.900 chevaux ; celle de Tinfos, 15.500 chevaux celle d'Aarlifos, 10.000 chevaux ; celles dites Rjukan I et Rjukan II, respectivement 120.000 et 107.000 chevaux, et celles en projet de Tyn (80.000 chevaux) et de Matre (80.000 chevaux).

Pour obtenir l'énergie nécessaire d'une façon économique à ses usines de produits chimiques (nitrates de chaux, d'ammoniaque, de potasse, de nitrite de soude, biphosphates, acide azotique, etc.), la Société de l'azote a organisé méthodiquement l'aménagement du massif du Gausta, la plus haute montagne du sud de la Norvège (1.884 mètres). Nombre de rivières importantes, telles que la Maana, comportent de nombreuses chutes franchissant d'un bond jusqu'à 100 mètres de hauteur. On estime que l'ensemble des usines hydroélectriques de la Société norvégienne de l'azote atteindra le chiffre énorme de 540.000 chevaux. L'énergie provenant des chutes revient à un prix variant de 28 francs à 56 francs le cheval-an, chiffre qui ne peut être atteint qu'en un pays si particulièrement privilégié.

Par contre les chutes de la Vuolle Ranaskortje (15.000 HP), sur la Torne elf, de Harspranget (46.000 HP), de Stora Sjofallet (11.000 HP), de Porjusfallen (12.000 HP), d'Edforsen et de Porsiforsen (16.000 HP) sur la Pite-elf, de Balforsen (15.000 HP) sur Ume elf, d'Hammarforsen et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de Stadforsen (28.000 et 29.000 HP), sur l'Indals elf, se rencontrent dans des régions éloignées de tout centre important.

L'usine de Trölhättan, située à 44 milles de Gottenburg, possède 8 génératrices de 7.000 kilowatts chacune ; les chutes de Cothemburg sur la rivière Gotha, peuvent fournir 59.000 HP ; quand l'installation sera complètement régularisée, on pourra disposer de 200.000 HP. Les turbines et alternateurs ont une puissance de 12.500 HP unitaire. Les usines électrochimiques d'Albi et de Ringdalem, aménagées avec des chutes respectives de 15m,85 et 22 mètres, fournissent ensemble une puissance de 15.000 HP.

Le gouvernement suédois a décidé d'électrifier, pour utiliser l'énergie des chutes d'eau, toutes les lignes du nord de Stockolm ; il y aura de ce fait 5 stations génératrices et 35 sous-stations, et le réseau comprendra 2.150 kilomètres de lignes.

La Suède est maintenant réunie au Danemark par un câble sous-marin amenant le courant à travers le Oresund, pour l'alimentation des tramways du nord du Seeland, à Hellerup près de Copenhague. Il a une longueur de 5km,400, et il est à trois conducteurs de 70 millimètres carrés de section isolés au papier imprégné, sous plomb et armature en fils d'acier. Il a été essayé à 85.000 volts pour une tension de service de 25.000 volts.

De l'usine hydroélectrique de la Société des Forces motrices à Malmö (Suède) part une ligne à 50.000 volts qui aboutit à la sous-station d'Helsingborg où la tension est abaissée à 25.000 volts. De cette sous-station part un câble souterrain qui est relié au câble sous-marin dans un poste de branchement à Palsjo sur l'Oresund.

II. Les *Etats-Unis* possèdent les plus longues transmissions de force. Une d'elles dépasse 400 kilomètres (Washington Watter Power Co), et de nombreuses installations ont une longueur supérieure à 170 kilomètres. On utilise des tensions de 60.000 à 150.000 volts et plus et les puissances dépassent 100.000 kilowatts.

Le Nouveau Monde a, plus qu'aucun autre pays, développé l'utilisation des richesses hydrauliques ; sur les 32 millions de chevaux consommés par an aux États-Unis, environ 24 millions 400.000 proviennent des machines à vapeur, 6 millions 800.000 de chutes d'eau et 800.000 de moteurs à gaz ou à essence. Sur ce total de 32 millions, 11 millions sont employés électriquement. Tandis que la force totale utilisée double tous les dix ans, la force électrique est plus du double tous les cinq ans.

La superficie des États-Unis est aussi grande que l'Europe entière. La topographie du pays, les dimensions et le caractère des cours d'eau sont au moins aussi variés qu'en Europe. Au point de vue des États, le pays comprend 50 gouvernements souverains et districts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans certains États populeux et de grande superficie il n'y a presque point de forces hydrauliques.

Le Texas, d'une superficie plus grande que la France, n'a comparativement presque pas de forces hydrauliques exploitées ou à exploiter. Il en est de même dans le Dakota du nord. Il y a de grandes étendues de territoires qui n'ont pas encore de moyens de transport modernes (l'Orégon par exemple). Les ressources en charbon sont en train de s'épuiser rapidement. La consommation annuelle dépasse 500 millions de tonnes ; l'anthracite disparaîtra avant la fin du siècle et le prix du charbon augmente d'une façon persistante. Dans chaque État il est formé une commission pour le contrôle des forces hydrauliques, d'après des statuts qui envisagent le droit public de propriété et de contrôle.

Aux États-Unis, on pousse le développement des forces hydrauliques sur les grandes rivières navigables et sur les rivières et portions de rivières susceptibles d'amélioration artificielle en vue de la navigation commerciale.

Au point de vue utilisation, les États de New-York, de la Nouvelle Angleterre, du Mimsotta, du Wisconsin et de la Caroline méridionale détiennent les 88 0/0 du total.

D'après R. Brown, la puissance hydraulique susceptible d'une utilisation définitive serait de 15.000.000 de kilowatts. Actuellement, il y aurait d'installés, 5.000.000 de kilowatts et la force utilisée par des machines à vapeur serait trois fois plus forte.

Sur les forces inutilisées, 5 millions de kilowatts sont sur cours d'eau non navigables et 5 millions sur le domaine public.

D'après le professeur W.-C. Unwin, la puissance totale des chutes du Niagara s'élèverait à 7 millions de HP, et le Mississipi et ses tributaires pourraient en fournir 2 millions. C'est dans le New-England que l'on a jusqu'ici tiré le meilleur parti des chutes d'eau ; dans le Far-West et dans les montagneuses Rocheuses, il y a encore énormément à faire. Dans l'État d'Alabana, on compte 300.000 kilowatts non utilisés ; dans l'État de Washington, 600.000 ; dans l'État de New-York, 250.000 ; dans l'État de Tennessee, 200.000 et dans le Connecticut, 50.000 kilowatts.

Le projet le plus colossal à l'étude est celui de la construction d'une digue sur le Long Sault devant fournir 700.000 HP. Sa réalisation obligerait tous les navires, se rendant des lacs à la mer, à emprunter la voie des canaux ; cette entreprise, si la conférence internationale l'approuve, sera l'une des plus considérables de ce genre au monde.

Le tableau ci-après concerne les grandes installations réalisées, avec des tensions égales ou supérieures à 100.000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NOM ET LIEU DE L'ÉTABLISSEMENT	TENSION (en volts)	MODE DE CONNEXION	FRÉQUENCE	LONGUEUR (en km)	PUISSANCE DES MACHINES en K. V. A.	LIGNES section en mm²	LIGNES nature des conducteurs	ÉCARTEMENT normal DES CONDUCTEURS (en millimètres)	NOMBRE d'éléments DES ISOLATEURS de suspension	NOMBRE DE CIRCUITS	PROTECTION contre LA FOUDRE	MISE en exploitation
Pacific Light and Power C°, Big Creek (Los Angeles)	150 000	étoile	50	450	26 000	6×500	Al	230	9	2	2 fils de terre	1913
Au Sable El. C°, Michigan	140 000	triangle	60	375	9 000	3× 71	Cu	150	10	1	néant	1912
Southern Sierra Pow. C°. Bishop Creek (Los Angeles)	140 000	triangle	60	350	26 000	6×160	Al	230	6	2	néant	1910
Mississipi River Power C°, Keokuk-Iowa	110 000	étoile	25	225	108 000	6×154	Cu	250	7	2	1 fil de terre	1913
Georgia Pow. C°, Tallulah Falls	110 000	étoile	60	145	30 000	6× 68	Cu	165	4 et 5	»	2 fils de terre	1912
Ontario Pow. C°, Canada	110 000	étoile	25	450	78 800	6×107,5 6× 95	Al	180	8	2	2 et 3 fils de terre	1910
Grands Rapides-Mukegon Pow. C°, Michigan.	110 000	triangle	30	80	10 000	3× 3	Cu	165	5	1	néant	1909
Washington Water Pow. C°	110 000	étoile	60	720	26 000	6×135	Al	210	4	2	2 fils de terre	1911
Sierra-San Francisco Pow. C°, Californie	104 000	étoile	60	220	34 000	3×100	Cu	260	5	1	néant	1910
Yadkin River Pow. C°, Caroline du Nord	103 000	étoile	60	240	27 000	6× 54	Cu	200	6	2	1 fil de terre	1912
Great Falls Watter Pow. C°, Montana	102 000	triangle	60	210	21 000	6×100	Cu	200	6	2	4 fils de terre	1909
Southern Pow. C°, Carolines du Nord et du Sud	1 00 00	étoile	60	1 200	100 000	variée	variée	200	7	1	1 fil de terre	1910
Great Western Pow. C°, Californie	100 000	triangle	60	265	40 000	6× 71 6× 83	Cu	250	4 et 5	2	1 fil de terre	1909
Central Colorado Pow. C°, Colorado	100 000	triangle	60	295	16 000	3×126	Cu	250	4	1	2 fils de terre	1909
Shawinigan Water and Pow. C°, Canada	100 000	triangle	60	145	28 000	6×126	Al	170	8	2	2 fils de terre	1911
Common Wealth Power Railway C°	140 000		50	350	15 000							
Menico Nothern Pr. C°	110 000	triangle	60	200	31 200							
Hydro Electric Power Commission et Ontario	110 000		25	240	27 000							
Stanislauss Power et C° Sans Francisco	104 000		60	165	140 000							

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On estime qu'il passe à Niagara Falls en moyenne 25 millions de mètres cubes à l'heure qui pourraient donner lieu à la création de 3 à 5 millions de chevaux utilisables suivant les saisons. Les 9/10 de cette masse d'eau s'échappent par la cataracte canadienne et la frontière américaine passe au milieu de celle-ci. A Ontario, d'après la Commission canadienne de conservation, la puissance installée a été reconnue de 532.266 chevaux (enquête de 1910). Actuellement les usines installées sont capables de fournir les puissances suivantes. Sur la rive américaine : Niagara Falls Power Cº avec 145.000 HP ; Niagara Falls Hydraulic Power Cº avec 150.000 HP. Et sur la rive canadienne : Toronto Niagara Power Cº, avec 125.000 HP ; Canadien Niagara Power Cº, 100.000 HP et l'Ontorio Power Cº avec 225.000 chevaux.

L'installation la plus récente et la plus remarquable est celle de Big Creek à l'altitude de 2.100 mètres. L'énergie est transportée de l'usine génératrice à Los Angelos à la tension de 150.000 volts, soit à la distance de 400 kilomètres. La puissance aménagée est actuellement de 100.000 chevaux, mais l'installation est prévue pour 400.000 chevaux.

L'usine de la Coosa River, à 40 kilomètres de Birmingham, est la première d'une série que fera la Albanna Power Cº. Cette installation, qui est actuellement de 125.000 chevaux, doit aussi être portée à 400.000 chevaux.

L'usine de Keokuk (Iowa), sur le Mississipi, contient 30 turbines de 10.000 chevaux et l'usine de Mount Shaste Power Cº, sur le Petit River (Sacramento), transporte l'énergie à 360 kilomètres ; cette dernière est une des plus grandes usines des États-Unis.

Une usine importante du Brésil est celle de Piraby, où on a installé des turbines Pelton de 20.000 chevaux (1) en utilisant une chute de 375 mètres de hauteur. La puissance installée est de 94.000 chevaux. L'usine de Sao Paulo avec 67.000 chevaux installés, transporte l'énergie à la tension de 88.000 volts. Les unités motrices ont une puissance de 14.500 chevaux, sous une chute de 183 mètres de hauteur.

Il y a en tout actuellement plus de 30 usines employant des tensions égales ou supérieures à 100.000 volts. Toutes sont à courant triphasé, dont 40 0/0 à la fréquence 60 ; 30 0/0 à la fréquence 50 et la plupart des autres à la fréquence 25.

Le Canada, dont la superficie est de 9.700.000 kilomètres carrés, est pourvu de lacs et de cours d'eau qui se continuent presque sans interruption de la chaîne montagneuse de Labrador aux montagnes d'Alaska.

D'après M. C.-H. Mitchell, la répartition par province de l'énergie hydraulique exploitée au Canada est la suivante :

---

(1) Turbines Escher Wyss à axe vertical.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nova-Scottia	21.412 chevaux
New Brunswich	19.390
Québec	520.000
Ontario	789.466
Manitoba	56.730
Alberta	33.305
Britisch Colombia	265.345
Yu Kon	12.000
Divers	545
Total	1.712.192

Les grandes installations hydrauliques de ce pays, en outre des usines installées sur le Niagara, dont les disponibilités sont évaluées à 17 millions de chevaux sont : sur le Saint-Laurent, centrale de 90.000 chevaux (fabrication de l'aluminium) ; sur le Saint-Thimothee, usine de 50.000 kilowatts (transport de force) ; usine sur le Richelieu, 20.000 chevaux (transport de force) ; usine de Shawinigan, 150.000 chevaux (aluminium et carbures) ; usine du Grand-Merc, sur le Saint-Maurice, 30.000 chevaux (fabrication du papier) ; usine sur l'Ottava-River installée pour 84.000 chevaux ; usine sur le canal de Trent, 45.000 chevaux (transport de force) ; usines sur le lac Huron, 56.000 chevaux et le Kakabeka, 15.000 chevaux ; usine de Winnipeg, 22.000 chevaux ; usine de Pinawa Chaunel, 28.200 chevaux (traction électrique) ; l'usine de Stave, 80.000 chevaux sur le Jordan River, etc.

Dans la province de Québec, le gouvernement projette la construction d'une nouvelle digue sur le Saint-Maurice River, qui pourra donner 650.000 chevaux.

Les rapides de Cèdres et ceux de Cascade pourront fournir 500.000 chevaux. La chute du Grand Merc à 19km,5 au-dessus de celle de Shawinigan a une force disponible de 100.000 chevaux. Le Grand Discharge possède de nombreux rapides pouvant fournir plus de 1 million de chevaux et l'Athwapmuchuan, 250.000 chevaux.

Pour la province d'Ontario, M. Aires donne les chiffres suivants, comme forces hydrauliques disponibles : l'Ottava River et ses affluents, 688.000 chevaux ; les affluents du Grand Lac, 446.000 chevaux ; pour les affluents des baies d'Hudson et de James, 1.750.000 chevaux et, pour les fleuves internationaux frontières, 2.045.000 chevaux, soit ensemble 4.929.000 chevaux dont 702.000 sont actuellement en service.

III. L'*Italie*, pauvre en charbon, est un des pays où la houille blanche est le plus mise en valeur ; elle a assisté depuis dix ans à un développement extraordinaire de ses richesses naturelles ; les nombreuses installations hydroélectriques qui utilisent ses cours d'eau en font foi. Les chutes de 10.000 HP et plus s'y rencontrent en assez grand nombre ; Gênes,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

10.000 HP; Paderno, 14.000 HP; Vizzola, 20.000 HP; Lugure, 19.000 HP (chute 360 mètres, 4 réservoirs de 6 millions de mètres cubes construits sur l'Apennin de Parme et Massa, 16 kilomètres de canaux); Caffaro, plus de 10.000 HP installés; Tremonti (11.200 HP) et Piano d'Orte (32.000 HP) sur le Pescara, avec transport à 88.000 volts; Turbigo, sur le Naviglio Grande, 7.500 HP avec centrale thermique à la Stellenza, de 33.800 HP; Campologno, sur la Poschiavino, 60.000 HP avec ligne à 50.000 volts et sous-stations à Lom zzo et Castellenza à 159 kilomètres; usines de Ponta du Preti, de Bousseleno, de Pian Frighera, de Cerés avec usines thermiques à Turin, l'ensemble représentant 36.600 HP; Tivoli, sur l'Amiene, 78.400 chevaux installés; Subiaco, sur l'Amiene, 16.000HP; Arci, 10.800 HP avec centrale thermique de San-Paolo, à Turin, de 25.000 HP; Legna sur la Gasca, en Croatie, 45.000 HP; Robblate, sur l'Adda, 24.000 HP; Sondrio, sur le Mallero, 13.000 HP; Bruzzio, sur la Poschiavino, 38.000 HP; Podesallo, sur le Cismon, 10.000 HP et réseau à 60.000 volts; Malnisio, sur la Cellina, 22.160 HP; Valnerina, 12.000 HP; Volturno-Naples, 12.000 HP, transport à 45.000 volts, etc. Sur l'Areto, on édifie des usines pour une puissance de 56.000 HP. Des installations importantes sont projetées sur la Bormida, l'Orba inférieure, l'Orba supérieure, etc.

La Société électrique Bresciana a édifié les usines de Calvagèse, de Bargho, de Sabbis, de Degnogne, de Covoli, de Gravosoloso, de Mazzuno, de Cedignolo, représentant une puissance de 18.280 chevaux avec une usine thermique à Brescia de 10.000 chevaux. Le réseau comporte 790 kilomètres de lignes desservies à la tension de 40.000 volts.

La Société électrique Milani à Vérone a sur l'Adige une usine de 10.000 chevaux avec centrale thermique de 3.000 chevaux. Le réseau, à 40.000 volts, alimente les provinces de Vérone.

Sur le Poglia, on trouve l'usine d'Isola (24.000 chevaux) et Cadegolo (23.000 chevaux); transport de force à 72.000 volts; retenue de 12 millions de mètres cubes par le lac d'Arno.

Sur le Caffaro, l'usine électrochimique de Ponte (10.000 chevaux). Sur la Tosa, l'usine de Poppiano (10.800 chevaux).

Les usines de Goglio (chute 523 mètres) et de Verampio, sur le Devero ont chacune une puissance de 20.000 chevaux, avec une retenue de 10 millions de mètres cubes sur le Cadelogo.

Nous signalerons comme usines projetées ou en cours d'exécution : dans la province de Sila, une usine de 150.000 chevaux; sur la rivière Turso, une usine de 10.000 chevaux et, sur la rivière Sechio, une usine de 15.000 chevaux.

La Société Dinamo a établi sur la Diveria et le Calvasca, avec une retenue de 5 millions de mètres cubes en utilisant le lac d'Avino, les usines de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Varzo donnant une puissance de 23.000 chevaux. Le réseau est à 45.000 volts.

La ville de Milan a formé sur l'Adda et la Roasco une cavalerie de 30.000 chevaux avec les usines de la Prese, de Grosotto-Terano (20.320 HP) de Mazzo et de Roasco.

Sur l'Adda, on trouve aussi l'usine de Trezzo (11.250 chevaux), sur l'Anza, usine de Piedimaleva (11.000 chevaux).

La régularisation des lacs du Mont-Cenis, où on a opéré une retenue de 6 millions de mètres cubes, a permis de tirer de la rivière Cenischia 11.680 chevaux à l'aide des usines de Novalisa et de Saluvaglio.

La ville de Turin a établi sur la Riparia l'usine de Churnente, d'une puissance de 18.000 chevaux, pour un transport à 50.000 volts.

Les lacs du col de Trente, avec une retenue de 20 millions de mètres cubes, ont donné naissance aux usines de Giauma, de Revera, de Dalmazzo (90.000 HP), d'Alta-Roja (20.000 HP), sur la rivière Roja, fournissant ensemble 76.400 chevaux.

Sur le Velino, deux importantes usines ont été créées ; l'usine électrochimique (carbure) de Papigno de 30.000 chevaux et l'usine de Cölestalle pour un transport à 75.000 volts.

Nous avons à citer aussi les importantes usines hydroélectriques de Montjovet, de Biaschina, Ticinetto et de Brasimone.

Un rapport du ministre de l'Agriculture, de l'Industrie et du Commerce de Rome évalue à 800.000 HP la puissance que l'on peut emprunter aux cours d'eau de l'Italie centrale. Pour l'Italie entière, on compte 5.500.000 HP disponibles, dont 5.000.000 utilisables et 400.000 installés, soit 8 0/0.

Avant peu ce dernier chiffre sera porté à 680.000 chevaux, représentant un emploi de capitaux correspondant à 625 millions de francs. La Lombardie est la province d'Italie qui a le plus développé ses richesses hydrauliques.

D'après M. Perdoni, les débits d'étiage du Tibre, du Nera et du Velino sont respectivement de 202.666, 666.666 et 274.666 mètres cubes et les débits moyens, de 327.200, 1.126 et 343.333 mètres cubes.

Il y a, dans les 58 provinces italiennes, 24.486 chutes d'eau qui ont ensemble une puissance moyenne de 2.500.000 HP, dont 38,37 0/0 dans le nord, 26,06 dans le centre, 30,07 dans le sud, 5,45 en Sicile et 0,07 en Sardaigne. Dans cette estimation ne sont pas comprises les chutes qui pourraient être installées sur les grandes rivières, dont la puissance peut être estimée à 800.000 HP environ, dont 170.000 sont installés. Le Tibre seul peut fournir près de 500.000 HP, dont 90.000 HP sont aménagés.

Grâce à une régularisation rationnelle de l'écoulement des eaux et à l'établissement de barrages appropriés, on a réussi, particulièrement dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'Italie du Nord, à donner satisfaction aux industries aussi bien qu'aux habitants des parties supérieures des bassins des différents fleuves et rivières, lesquels se servent en partie des eaux dans les exploitations agricoles (1).

IV. *Suisse.* — On comptait en Suisse, d'après la statistique officielle de l'année 1906, 176 usines ayant des moteurs produisant l'énergie électrique d'une *façon continue* ou qui étaient utilisées comme secours. Sur ces 176 usines, 114 étaient avec installation uniquement hydraulique, et 62 avec usines thermiques de secours. Ces usines hydroélectriques fournissaient une puissance de 169.000 kilowatts. Un certain nombre d'entre elles se présentent avec des forces de 15.000,20.000 HP et plus.

Une statistique dressée par l'Union des Électriciens suisses donnait pour l'année 1909 les chiffres suivants :

Nombre total des entreprises électriques	675
Réparties comme suit :	
Entreprises produisant elles-mêmes l'énergie	228
» recevant l'énergie en partie.....	64
» recevant toute leur énergie.....	383

La puissance des entreprises hydrauliques correspondait à 111.426 kilowatts ; celle des entreprises thermiques et hydrauliques à 156.612 kilowatts et celle exclusivement thermique à 6.792 kilowatts.

D'après M. Bossard, actuellement, on compte 794 installations de plus de 20 HP représentant 306.148 HP en basses eaux, 478.916 HP en eaux moyennes et 775.550 HP en hautes eaux ; plus 6.055 installations de moins de 20 HP, soit 38.425 HP. La puissance en eaux moyennes de l'ensemble ressort à 517.341 HP. D'après M. Ghezzi, il resterait disponible 884.060 HP en basses eaux ; 1.402.770 HP, neuf mois de l'année et 2.225.600 HP pendant toute l'année, en supposant que l'on crée des réservoirs (par aménagement de lacs) emmagasinant pendant les époques de hautes eaux. Si aux 2.222.500, on ajoute les 306.148 indiqués par M. Bossard, en basses eaux, on obtient 2.532.000 HP disponibles toute l'année. La Suisse utiliserait donc à ce jour 21 0/0 de sa puissance disponible.

Quant aux tensions des transports, la plus grande partie des usines emploient du courant à 7.000 et 10.000 volts, et une certaine quantité font usage de courants à 16.000 et 25.000 volts. Un autre lot, presque aussi important que celui des usines à 7.000 et 10.000 volts, n'use que du courant à 3.000 et 5.000 volts.

---

(1) En Italie la taxe à la charge du producteur est basée sur le nombre d'habitants de la localité où est située l'usine ou desservie par elle. La taxe sur le consommateur est de 6 centimes par kilowatt-heure, d'après les relevés des compteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. Tissot estime que le capital engagé dans ces installations dépasse 250 millions.

Le grand nombre d'installations électriques avec usine génératrice, — au lieu de transports rayonnant à de grandes distances, — s'explique par ce fait que l'utilisation des cours d'eau est réglementée par les lois cantonales, qui sont très différentes d'un canton à l'autre, ce qui a eu souvent pour effet un morcellement et une utilisation peu rationnelle de la force disponible. Puis la plupart ont été créées à une époque où l'on ne connaissait pas les grosses unités hydrauliques et électriques, c'est-à-dire avant l'apparition des usines de Chèvres et Rheinfelden qui ont été les premiers jalons posés dans la nouvelle voie.

Depuis, les usines de la Bezenau et notamment de Brusio (36.000 HP, en 12 unités de 3.000 HP), celles sur le Löntsch et la Biaschina, celles de Genève et d'Augst pour l'alimentation de Bâle et des environs, sont toutes d'une puissance dépassant 20.000 HP chacune, avec réserve à vapeur.

Celles projetées ou en cours de construction : usine de Schupthein sur l'Emme, affluent de l'Aar (chute 130 mètres et 21.000 HP) et réservoir de 5 millions de mètres cubes, usine d'Entlebuch (chute de 58m,50 et 2.600 HP), usine de Ründing (chute de 146 mètres et 72.000 HP et réservoir de 9,9 millions de mètres cubes d'eau) dépassent encore ce chiffre.

La Suisse utilise aujourd'hui près de 600.000 HP dans ses stations centrales, dont 13 0/0 affectés à la traction électrique, 40 0/0 à l'éclairage et 24 0/0 à l'énergie motrice. Pour le canton de Berne, il reste à utiliser les chutes exploitables de l'Oberland, que l'on peut estimer à 50.000 HP. Le Conseil fédéral et le Gouvernement du Tessin se sont mis d'accord pour la concession des chutes d'eau du lac Riton et de Monte Piottino, afin d'appliquer la traction électrique à la ligne du Saint-Gothard, usines actuellement en pleine exploitation.

V. L'*Allemagne* arrive avec 450.000 HP environ, y compris la Prusse, mais on lui attribue près de 1.500.000 HP utilisables. Dans ce pays, la plus haute tension utilisée ne dépasse pas 30.000 volts.

La puissance totale du Rhin en basses eaux, entre Bâle et Vieux Brisach, est estimée à plus de 150.000 HP. On projette de capter cette force, partie en amont de Neuenberg, partie en aval, en créant trois chutes successives en amont et deux en aval. Pour commencer, le projet prévoit la captation d'une partie de la puissance en amont de Neuenberg au moyen de deux usines de 32.000 HP et 33.000 HP.

En 1910, les usines d'électricité ayant un caractère d'intérêt public étaient au nombre de 2.360, représentant une puissance de 1.200.000 kilowatts environ, sur lesquelles les usines hydrauliques entraient pour le chiffre 800.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En 1913, c'est-à-dire dans l'espace de trois ans, le nombre des usines d'électricité atteignait 4.000, avec une puissance de 2.095.666 kilowatts. On peut dire qu'aucun pays n'avait vu un mouvement si considérable se produire en un espace de temps si court.

Au nombre des grandes usines hydroélectriques installées en Allemagne nous avons à citer : les usines de Rheinfelden (30.000 chevaux, chute de $4^{m},50$), de Brême (12.000 chevaux, chute de 5 mètres), de Wilhem (30.000 chevaux, chute de 6 mètres), de Heimbach (8.000 chevaux, chute de $9^{m},50$), etc.

VI. *Autriche.* — Le nombre des usines hydrauliques de ce pays représente environ la moitié de la totalité des usines de force motrice (221 contre 446). M. Otto Mayr évalue les disponibilités de l'empire autrichien à 5 millions de HP, dont 500.000 utilisés ou en voie d'utilisation.

L'aménagement du lac Millstaetter, au moyen de trois usines, donnera à lui seul 84.000 HP. L'une de ces usines, établie sur la rivière Drau, sous une chute de 85 mètres, comportera 12 unités de 5.000 HP ; les deux autres, installées sur la rivière la Liesser, fourniront l'une 6.000 HP, et l'autre 18.000 HP, pour commencer. Celle de 6.000 HP servira surtout à parer aux faiblesses des deux autres usines.

On doit aussi tirer des eaux de la Narenta (chute de 63 mètres) et de son affluent de droite, la Rama (Dalmatie) (chute de 120 mètres), 42.000 HP d'énergie électrique.

On projette une usine de 100.000 HP sur la rivière Gracka pour l'alimentation de Fiume et autres villes.

VII. *Bavière.* — On estime à 300.000 HP la puissance des chutes non encore utilisées. La nouvelle loi en vigueur depuis le 1er janvier 1908 (annulant et remplaçant celle du 28 mars 1852), qui régit l'expropriation en faveur de l'État, des municipalités, etc., pour cause d'utilité publique, est appelée à donner un essor puissant aux entreprises de houille blanche. A ce jour, il y aurait environ 155.000 HP utilisés par des turbines hydrauliques.

On se propose de barrer la vallée de l'Isar, de façon à créer un grand lac dont les eaux seraient amenées au lac de Walchen, puis au lac Kochel, enfin ramenées dans l'Isar près de Wolfartschausen. On obtiendrait de cette manière une puissance de 96.000 HP.

Les chutes que l'on pourrait obtenir sur l'Alg, sur le Walchensée, sur le Reiszbach peuvent être utilisées économiquement ; les rapports officiels évaluent à 45.000 HP et à 56.000 HP les forces que l'on pourrait tirer respectivement de l'Alg et du Walchensée.

D'après le conseiller ministériel Hensel, 246.000 chevaux peuvent être obtenus des chutes situées au sud du Danube, permettant d'économiser 60 millions de francs de charbon par an.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VIII. *Grand-duché de Bade.* — La puissance totale des chutes d'eau est évaluée à 507.557 HP, dont 261.820 pour le Rhin, 24.110 pour le Neckar et 221.620 pour les rivières diverses de la Forêt Noire. Près du cinquième de ces forces est actuellement utilisé.

IX. *Hongrie.* — Énergie hydraulique disponible, 550.000 HP, dont plus de 100.000 HP utilisés.

X. La *Grande-Bretagne* figure actuellement pour 160.000 HP. En Angleterre, on a installé des transports à 60.000 volts avec 1.000 francs de dépense par cheval fourni au consommateur. Dans ce pays, où le charbon est excessivement bon marché et où les chutes sont plutôt rares, la houille blanche ne peut faire qu'une médiocre concurrence à la houille noire. Les disponibilités sont évaluées à environ 950.000 chevaux.

XI. *Espagne.* — On estime à 300.000 HP le nombre de chevaux installés. Les disponibilités de ce pays, d'après M. Carballo, sont de 5 millions de HP, savoir 1.130.000 pour l'Ebre, 900.000 pour le Douro, 750.000 pour le Guadalquivir, 700.000 pour le Tage, 370.000 pour le Guadiana, 750.000 pour le Minho, 190.000 pour le Jucar, 110.000 pour le Ségura, et pour divers, 600.000.

La statistique de l'industrie électrique, pour l'année 1904, publiée par le ministère espagnol de l'Agriculture, de l'Industrie et du Commerce portait les indications ci-après :

Usines alimentant des services publics (lumière, force, traction).....	796 usines	92.2[illegible]4 kw
Usines privées.....	354 —	7.2[illegible]2
Ensemble.....	1.150 usines	99.516 kw

Dans cette quantité il existait :

574 usines hydroélectriques avec une puissance totale de.....		52.816 HP
155 — — avec secours thermiques à vapeur....		34.088
Ensemble.....		87.904 HP

Selon la nature du courant, les usines se partageaient comme suit :

Courant continu.....	684	installations	47.210 kw
Courant monophasé.....	232	—	15.674
Courants biphasés.....	69	—	7.162
Courants triphasés.....	134	—	23.028
Courant mixte.....	31	—	6.442
Totaux.....	1.150	—	99,516 kw

La statistique de juillet 1917 accuse une puissance utilisable de 6 millions de chevaux. En tant qu'usines concédées on compte 888.040 chevaux et 384.297 chevaux installés et utilisés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'Espagne possède plusieurs installations de transports de force, pour des distances variant de 70 à 150 kilomètres et des puissances de 4.000 à 20.000 HP. La tension utilisée est de 30.000 à 50.000 volts (usines de Quintana-Martengalendez, de Prientolana, de Sizeron, de San-Quirico, de Camdemolas). L'usine hydroélectrique de Zamora, qui emploie les eaux torrentueuses du Douro pour fournir le courant électrique à Zamora, Salamanque et Valladolid, fonctionne à 40.000 volts, avec une puissance de 5.000 HP.

La Société la plus importante est la Fuerzas y Rieges qui dispose de 301.700 chevaux dont 35.283 installés. Un transport de 180 kilomètres fonctionne à 140.000 volts.

L'Énergia Electrica Catalana est concessionnaire de 200.000 chevaux dont 30.000 utilisés.

La ville de Bilbao est alimentée en énergie électrique par trois usines hydroélectriques (celle de Leizaran, sur la rivière de même nom, celles de Quintana et de Puentelarra sur l'Ebre), fournissant ensemble 16.000 HP à la tension de 33.000 volts. La longueur totale des conducteurs à haut voltage de ces trois centrales est de 350 kilomètres. Sur le Guadiaro, entre Gaucin et San Pablo, la tension du courant produit par l'usine de Malaga est de 52.000 volts.

La Sociedad hidroelectrica Espanola, qui dispose de 54.000 chevaux de force, a installé une usine hydroélectrique à Molinar d'une puissance de 35.000 HP ; la tension de distribution est de 70.000 volts et l'énergie est transportée à Valence (50 kilomètres), à Alcoy, à Carthagène (160 kilomètres) et à Madrid (240 kilomètres). Les alternateurs fonctionnent à 6.600 volts ; leur puissance individuelle est de 5.625 kilovolts-ampères.

La Sociedad General de Fuerzas hydroelectrica dispose d'une transmission d'énergie électrique à 140.000 volts (42.000 HP) par l'aménagement des chutes de Seros. La distribution d'énergie alimente Barcelone, à 225 kilomètres.

L'usine de Capdella, qui utilise une chute de 800 mètres de hauteur, alimente un transport de force à 60.000 volts.

Les *forces hydrauliques des divers grands Rios de la Catalogne et de l'Aragon* peuvent se diviser en trois groupes :

1° Rios du val d'Aran, descendant vers la France et constituant la Garonne ;

2° Les Rios secondaires de la Catalogne descendant directement des Pyrénées Orientales ou de ses contreforts, vers la Méditerranée ;

3° Les grands Rios des sommets des Pyrénées Orientales et se déversant dans l'Ebre.

Les trois groupes comportent tous des chutes de grande, moyenne et basse altitude.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'une façon générale, aux altitudes dépassant 2.200 à 2.300 mètres, les condensations atmosphériques sont très importantes dans toutes les vallées ouvertes du nord-ouest au sud-est, sur le versant français, et du sud au nord et du sud-ouest au nord-est, sur le versant espagnol.

Elles donnent dans les très bonnes vallées des hauteurs d'eau annuelles utilisables de 3 mètres à 3m,50 et quelquefois 4 mètres dans les hautes vallées bien orientées. Ce régime paraît pouvoir être admis pour toute la haute région centrale comprise depuis le Vignemale à l'ouest jusqu'au Puigmal à l'est. Au delà du Puigmal, vers l'est, le régime général dominant cesse d'être le régime de l'Atlantique et c'est le régime méditerranéen, plus pluvieux que neigeux, analogue à celui de Gênes et des Apennins, qui domine.

Dans l'ensemble, et particulièrement dans les Pyrénées centrales et pour les altitudes au-dessus de 1.500 à 1.600 mètres, si le bassin versant d'une chute comprend plusieurs vallées d'orientations diverses, on peut toujours compter recevoir, comme moyenne, sur la surface totale du bassin versant supérieur, des tombées annuelles utilisables de 1m,60 à 1m,80 de hauteur, utilisables au mieux en créant de vastes réservoirs, capables d'absorber les fontes brusques de neige au printemps et les fontes de grêle et les eaux abondantes d'orages en été. Ces réserves d'ailleurs, selon M. Brilloin, sont techniquement faciles à créer dans les hautes régions, surtout par l'application des nouvelles cuirasses mobiles Decauville.

Les études entreprises permettent d'évaluer l'ensemble des forces hydrauliques financièrement utilisables depuis le Rio Gallego jusqu'à la Méditerranée à 700.000 ou 800.000 chevaux pouvant devenir presque constants à l'aide de réservoirs pratiques.

Les usines installées ou en cours d'exécution sont entre les mains de quatre grandes compagnies, représentant un ensemble de chutes pouvant donner 200.000 HP.

Nous donnons des indications succinctes sur ces diverses installations.

Chule de Pasteral. — Sur le Rio Ter, 160 mètres de chute, entre Sau et le Sellera. Barrage de 18 mètres de hauteur et 80 mètres de largeur à la tête. Réserve constituée par des bassins de montagne et un important réservoir en tête d'un canal, de 17 kilomètres de longueur sur la rive droite du Rio, dont 7 tunnels.

L'usine hydroélectrique pourra fournir 22.000 à 25.000 HP pendant neuf mois et 10 à 12.000 pendant deux à trois mois.

Chutes de l'Esera. — Celle d'amont, dite d'Ell Run, fournira environ 12.000 à 18.000 chevaux.

L'ensemble de la puissance hydraulique peut être évalué à 80.000 HP, rendus constants par les réserves.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chules du Rio Flamisell. — Ces chutes ont 800 mètres et 350 mètres de hauteur représentant, grâce à des réserves régulières, 40.000 chevaux.

Une station thermique compensatrice de 12.000 à 14.000 kilowatts est prévue à Badalone.

Chutes Serl, sur la moyenne Pallaresa. On les estime à 45.000 chevaux de puissance.

XII. *Finlande.* — Près de 11 0/0 de la superficie de ce pays est couverte de lacs « le pays des mille lacs » selon le poète, particulièrement nombreux dans le centre et le sud. La rivière Kuneo, qui se jette dans le golfe de Bothnie, débite 160 mètres cubes en basses eaux et passe à 570 mètres cubes en hautes eaux.

Le lac Nasyaroe a 100 kilomètres de longueur. La chute naturelle de Tammerfos a un débit de 63 mètres cubes en basses eaux et 18 mètres de hauteur.

Le lac Paijanna a 250 kilomètres de longueur. La rivière Kymmene qui le traverse a 180 mètres cubes en basses eaux pour atteindre 400 mètres cubes en hautes eaux. Elle forme dans son parcours quatre grandes chutes naturelles pouvant donner 40.000 HP. La rivière Vuexen a 148 kilomètres de longueur et 480 mètres cubes de débit en basses eaux. Elle franchit 13 chutes naturelles pouvant donner 350.000 HP.

XIII. La *Russie d'Europe* a à peine effleuré sa colossale réserve de richesses hydrauliques (70 à 85.000 HP), car on a evalué les forces dont elle peut disposer à 11.000.000 de HP.

Nous citerons comme installation récente l'usine hydroélectrique de Zeichour sur le Samour, fleuve important du versant nord-est du Caucase à proximité de Bakou. La hauteur de chute est de 100 mètres et la puissance de 25.000 chevaux, réalisée à l'aide de turbines de 5.000 HP chacune. Le transport d'énergie qui s'étend à 180 kilomètres est à la tension de 140.000 volts.

XIV. L'*Alsace-Lorraine* se présente avec une disponibilité de 120.000 HP, dont un quart environ aménagé.

XV. Le *Wurtemberg* entre dans la lice avec une cavalerie utilisable de 58.000 HP, dont 8.700 employés actuellement.

XVI. La *Saxe* s'offre à très peu près dans les mêmes conditions que le Wurtemberg.

XVII. Au *Japon*, dans les parties montagneuses, les rivières sont profondes, étroites, rapides et on y a aménagé près de 200.000 HP.

On estime à 1.000.000 de HP la puissance totale des chutes du Japon. Parmi les chutes en exploitation, nous citerons celle de Kyoto (3.500 kilowatts, chute de 33 mètres avec un canal d'amenée de 11 kilomètres), celle de Tokio sur le Tamowaga (20.000 kilowatts, canalisés à 40.000 volts et envoyés à 40 kilomètres), celle de Ugigawa avec 18.000 kilowatts, trans-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

portés à la tension de 60.000 volts, celle de Hitakagawa qui, sous une chute de 23 mètres, produit du courant à 12.000 volts. Le barrage de retenue de ce dernier offre cette particularité qu'il sert à la fois à l'alimentation d'une conduite forcée de $2^{m},73$ de diamètre, au flottage de trains de bois et à l'irrigation. L'usine hydroélectrique de Osaka produit une énergie de 32.000 kilowatts, transportés à une distance de 60 kilomètres, et celle de Kyoto à 150 kilomètres de Tokio, fournit 100.000 HP.

XVIII. *Indes.* — L'usine hydroélectrique de Jhelum (Cachemire) utilise une chute de 120 mètres avec un débit de 17 mètres cubes, soit 20.000 HP; on y a installé des roues Pelton provenant de la Société Abner Doble, de San-Francisco, et des alternateurs de 1.000 kilowatts. Dans l'État de Mysore, on a aménagé sur la Cavéry deux chutes donnant ensemble 7.900 kilowatts.

La grande usine hydroélectrique de Bombay, qui utilise une chute de 590 mètres, possède 8 turbines tangentielles de 11.000 chevaux chaque.

XIX. *Mexique.* — Nous avons signalé dans l'introduction de cet ouvrage le transport de force de Nexaca, qui utilise les eaux de ce fleuve pour alimenter en énergie électrique la ville de Mexico au moyen d'une ligne triphasée de 270 kilomètres de longueur. Le Mexique possède d'ailleurs d'autres installations importantes à 60.000 volts, parmi lesquelles la chute du Duero, dans le Michoacan, qui fournit 8.000 HP, transportés à 177 kilomètres.

XX. Le *Chili*, qui présente une région très favorable à l'établissement d'usines hydroélectriques et qui peut être classé comme un des pays les plus riches en houille blanche, n'a encore que quelques stations centrales, telles que les usines du Loa (2.500 HP), de Lota (4.000 HP), de Valparaiso (5.000 HP), de Cachapoal (15.000 HP, 40.000 volts), de Loja (10.000 HP, 40.000 volts).

L'usine de Chuquimata, établie sur la côte Chilienne à Tocopilla, alimente un transport d'énergie de 30.000 kilowatts à la tension de 110.000 volts, en courant triphasé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIV

LÉGISLATION ET RÉGLEMENTATION DES COURS D'EAU

I. — LÉGISLATION FRANÇAISE

249. Régime antérieur des cours non navigables ni flottables. — Avant la promulgation de la loi du 8 avril 1898, à défaut de loi spéciale, la jurisprudence s'appuyait sur l'article 103 de la loi du 3 frimaire an VII, sur les articles 538, 561, 563, 644, 645, 713 et 714 du Code civil, et sur les lois du 29 avril 1845 et du 11 juillet 1847.

L'article 561 du Code civil attribue aux propriétaires riverains les îles et atterrissements, impliquant ainsi qu'ils sont l'accessoire du lit dont ils ont été formés, et que celui-ci, par voie de conséquence, ne saurait appartenir qu'aux riverains.

L'article 563 spécifie que le terrain abandonné par les eaux, cessant d'être chose commune, devient un bien vacant et sans maître, appartenant, à ce titre, à l'État, par application de l'article 713, et dont l'État propriétaire dispose pour indemniser les propriétaires envahis par la nouvelle direction de l'eau.

L'article 644 permet au riverain d'utiliser l'eau simplement à son passage et à charge de la rendre, à la sortie de son fonds, à son cours ordinaire, si elle traverse son héritage. De là l'ingérence de l'Administration pour dire que la force motrice du cours d'eau n'appartient à personne et qu'elle peut la concéder à qui bon lui semble sans avoir à tenir compte des prétendus droits des riverains, surtout s'ils ne les ont pas déjà utilisés. Ainsi la force motrice de l'eau est considérée comme *res nullius*.

L'article 645 donne aux tribunaux, en cas de contestation, le pouvoir de concilier les intérêts de l'agriculture avec le respect dû à la propriété, sauf à observer les règlements particuliers et locaux sur le cours et l'usage des eaux.

D'après l'article 714, le lit du cours d'eau ne rentrerait pas dans la catégorie des choses non susceptibles d'appropriation privée. C'est la jurisprudence formulée par la cour de cassation dans plusieurs de ses

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

arrêts. D'autre part, nombre de cours d'appel ont déclaré que les riverains étaient propriétaires des eaux courantes et de leur lit, ou que les riverains étaient propriétaires du lit et les eaux *res nullius*.

Le droit d'usage reconnu aux riverains par l'article 644 du Code civil ne pouvait être utilement exercé que si les bénéficiaires avaient la faculté de conduire l'eau sur leurs terres éloignées. La loi de 1845 a remédié à cette situation en spécifiant que « tout propriétaire qui voudra se servir, pour l'irrigation de ses propriétés, des eaux naturelles ou artificielles dont il a droit de disposer, pourra obtenir le passage de ces eaux sur les fonds intermédiaires, à charge d'une juste et préalable indemnité... »

Il s'agit donc bien ici de l'établissement d'une servitude sur un fonds au profit d'un autre fonds, par voie d'expropriation forcée. Mais, en dépit des termes formels de l'article 2 de ladite loi : « les propriétaires des fonds inférieurs devront recevoir les eaux... », la servitude d'écoulement est controversée et la jurisprudence paraît plutôt favorable à l'opinion contraire, d'après laquelle les juges auraient un pouvoir souverain pour apprécier si le fonds servant doit recevoir ou non l'écoulement de l'eau ayant servi à l'irrigation. De même que le droit d'usage reconnu aux riverains par l'article 644 du Code civil ne pouvait être utilement exercé que si les bénéficiaires avaient la faculté de conduire l'eau sur leurs terres éloignées, de même cette servitude d'aqueduc et d'écoulement aurait été destinée à rester inutilisable, si elle n'avait été complétée par la servitude d'appui. La loi du 11 juillet 1847 est venue compléter sur ce point, pour l'irrigation des propriétés, la loi de 1845. Mais l'article 1er de cette loi, qui accordait le droit d'appui sur la propriété du riverain opposé pour l'établissement des ouvrages d'art, nécessaires à la prise d'eau, a soulevé les mêmes controverses que pour l'écoulement de l'eau. Le tribunal a le même pouvoir d'appréciation touchant l'opportunité de l'établissement du barrage.

L'on conçoit aisément que des solutions si dissemblables aient donné lieu à des controverses, à des discussions et à des chicanes inépuisables.

Le législateur, pour mettre fin à de tels litiges, si nuisibles à l'*industrie des forces hydrauliques*, est enfin intervenu en promulguant la loi du 8 avril 1898, inscrite dans le Code rural.

La loi de 1898 établit nettement que le lit de la rivière appartient au riverain. Le sol de la rivière s'ajoute à ses terres pour le calcul de l'impôt foncier et, si le cours d'eau est artificiellement détourné, les terrains qu'empruntent le nouveau lit ne cessant pas d'appartenir à son propriétaire, celui-ci ne subit pas d'expropriation ; il subit seulement une servitude d'aqueduc et il doit être indemnisé de ce dommage par le juge de paix, après expertise.

Quant à l'eau, comme dans le système de la jurisprudence avant 1898, elle reste une chose commune et cela résulte implicitement de l'article 2

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la loi de 1898. Sous ce rapport, il faut donc s'en tenir à l'article 644 du Code civil, qui règle les droits de chaque propriétaire sur l'eau de la rivière qui borde ou traverse son héritage. Mais cet article distingue entre deux sortes de riverains : ceux dont la propriété borde une eau courante et ceux dont cette eau traverse l'héritage ; le premier a évidemment droit à moins d'eau que le second et, en outre, la quantité d'eau à laquelle a droit chaque propriétaire est proportionnelle à l'étendue des terres qu'il possède. Le possesseur des deux rives peut utiliser à toutes fins l'eau qui traverse son fonds et non seulement en vue d'irriguer ses terres, mais par exemple à l'effet d'appuyer un barrage sur les deux rives pour utiliser la force motrice de l'eau. C'est dans ce sens que la jurisprudence a interprété l'article 644 en étendant naturellement cette interprétation au bénéfice du propriétaire d'une seule rive. C'est d'ailleurs grâce à elle que l'industrie hydroélectrique a pu naître et prospérer (1). Le droit de riveraineté entraîne celui de l'usage de l'eau à la guise du riverain, dans les limites de l'article 644 précité, à savoir de rendre l'eau à son cours ordinaire à la sortie de son fonds, après en avoir usé sans nuire à l'exercice des droits des coriverains d'amont et d'aval.

Pour résumer, nous dirons donc que l'eau des rivières non navigables ni flottables, tout en étant chose commune, est et reste à la disposition des seuls riverains qui, propriétaires du lit depuis la loi de 1898, peuvent en interdire l'accès à quiconque, même à l'État, la propriété du lit entraînant celle de la pente.

Il ressort de ces considérations que le riverain tient, de l'article 644 et de la loi de 1898, le droit incontestable d'utiliser à son profit la force hydraulique des cours d'eau non navigables ni flottables sur lesquels l'État n'a qu'un droit de police.

250. Droits des riverains sur les cours d'eau non navigables et non flottables. — Ces droits sont définis par les articles 1 à 7 de la loi du 8 avril 1898. L'article deuxième est ainsi conçu : « Les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou traverse leurs héritages que dans les limites déterminées par la loi. Ils sont tenus de se conformer, dans l'exercice de ce droit, aux dispositions des règlements et des autres décisions émanées de l'Administration. » L'article troisième ajoute : « *Le lit des cours d'eau non navigables et non flottables appartient aux propriétaires des deux rives.* Si les deux rives appartiennent à plusieurs propriétaires, *chacun d'eux a la propriété de la moitié du lit* suivant une ligne que l'on suppose tracée au milieu du cours d'eau, sauf titres ou prescrip-

(1) *La Législation des eaux et les cours d'eau non navigables ni flottables*, G. Tochon, avocat à la cour d'appel de Paris, 1908. J. Dangon, éditeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions contraires ; chaque riverain a le droit de prendre dans les parties du lit qui lui appartient *tous les produits naturels et d'en extraire de la vase, du sable et des pierres*, à la condition de ne pas modifier le régime des eaux et d'en exécuter le curage conformément aux règles établies par le chapitre III du présent titre. » L'article 4 dit que : « Lorsque le lit d'un cours d'eau est abandonné, soit naturellement, soit par suite de travaux légalement exécutés, chaque riverain en reprend la libre disposition suivant les limites déterminées par l'article précédent. » Enfin l'article 5 abroge l'ancien article 503 du Code civil, en disposant que les propriétaires des fonds sur lesquels vient à passer le nouveau cours de la voie d'eau *n'ont point droit comme indemnité à l'ancien lit, et peuvent seulement prendre les mesures nécessaires pour rétablir le cours primitif des eaux.*

L'article 6 spécifie que lorsque, par suite des travaux légalement ordonnés, il y a lieu d'élargir le lit ou d'en ouvrir un nouveau, les propriétaires des terrains occupés ont droit à une indemnité à titre de servitude de passage. Les contestations et le règlement des indemnités sont jugés en premier ressort par le juge de paix du canton. Enfin l'article 7 dit que la propriété des alluvions, relais, atterrissements, îles et îlots est et demeure régie par les dispositions des articles 556, 557, 559, 561 et 562 du Code civil.

251. Réglementation des cours d'eau. — L'Administration a toujours le droit de régler l'usage de l'eau détournée d'un cours d'eau, quel qu'il soit ; à part ce droit, le propriétaire du lit, de l'étang ou de la dérivation est maître chez lui. L'administration exerce son contrôle par des mesures générales et des mesures individuelles. Les préfets sont compétents pour statuer sur les cours d'eau en tout ce qui concerne leur élargissement et leur curage (décret du 25 mars 1852, confirmé par celui du 13 avril 1861) ; ils peuvent ordonner la restitution au lit du cours d'eau de tous les terrains compris dans leur largeur normale, mais ils ne seraient plus compétents s'il était nécessaire de s'emparer, contre le gré des propriétaires, d'une portion des terrains riverains. L'Administration devrait alors recourir à l'expropriation pour cause d'utilité publique. Les préfets peuvent ordonner le recepage des arbres, des buissons, et la réparation des berges.

Les conseils de préfecture règlent les contestations auxquelles peut donner lieu le curage ; ils décident, par exemple, si le riverain doit procéder au curage en amont ou en aval de sa propriété. Ils sont encore compétents pour statuer sur les indemnités réclamées à raison des dommages que le curage cause aux propriétés riveraines, au cas où les travaux sont ordonnés par l'Administration.

En cas de construction de digues à élever dans les fleuves non navigables ni flottables, la nécessité en est constatée par le Gouvernement et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la dépense supportée par les protégés en proportion de leur intérêt aux travaux, à moins que le Gouvernement croie utile d'accorder des secours sur les fonds publics (art. 33, loi du 16 septembre 1807).

La loi du 6 octobre 1791 et l'article du Code pénal punissent d'amende et même de prison les propriétaires d'usines qui, par la trop grande élévation des eaux, inondent les propriétés riveraines. Pour que l'établissement de l'usine ou de la prise d'eau constituât une contravention, il faut que le cours d'eau sur lequel elle se trouve ait été l'objet d'un règlement d'eau spécial par l'autorité compétente et prohibant expressément toutes constructions dans les limites du lit des eaux.

La poursuite des délits et contraventions commis sur les cours d'eau non navigables ni flottables est portée devant les tribunaux de police municipale ou correctionnelle.

La loi de 1898 maintient l'article 644 du Code civil. Elle admet que le propriétaire d'une seule rive peut, aussi bien que celui dont le fonds est traversé par la rivière, se servir de son droit d'usage non seulement en vue de l'irrigation, mais aussi en vue d'une utilisation industrielle. D'autre part, on a admis en pratique la cessibilité de ce droit d'usage et la possibilité de le séparer de la propriété du fonds. Pour certains travaux, le riverain peut agir sans rien demander à l'Administration. Pour d'autres, au contraire, il est contraint de lui demander une autorisation, en particulier les ouvrages destinés à l'établissement d'une prise d'eau en vue d'actionner une usine. L'autorité compétente pour accorder les autorisations est le préfet.

D'après la loi de 1898, le chef de l'État est seul compétent pour édicter des règlements généraux et le préfet peut seul accorder des autorisations individuelles. Quant aux maires, ils ne peuvent user des pouvoirs de réglementation que leur confère l'article 16 de la loi de 1898 qu'en cas de péril urgent et pour faire face à ce péril.

Dans tous les cas, lorsque l'Administration autorise une installation sur les cours d'eau non navigables ni flottables, les droits des tiers sont et demeurent réservés, puisqu'elle n'a pas à se préoccuper des intérêts privés lorsqu'elle autorise les travaux.

Les tiers lésés peuvent porter leurs doléances devant les tribunaux civils.

252. De la jouissance des eaux. — La jouissance des eaux par les riverains peut être l'objet de conventions ou règlements particuliers qui comprennent non seulement les contrats formels, mais encore les titres, les questions de prescription, etc. Ainsi les usiniers ont la faculté, d'un commun accord, de régler entre eux le volume et la distribution des eaux, et, en cas de désaccord, c'est le tribunal, par application de l'article 645

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du Code civil, qui a mission de répartir le plus équitablement possible les eaux entre les riverains, en tenant compte de leur volume et de leur plus ou moins grande utilité, de la nature et de l'importance des besoins auxquels elles doivent être affectées, ainsi que de la longueur et de l'état des riverainetés respectives.

Pour savoir qui est propriétaire des biefs des canaux de dérivation, il est indispensable d'examiner le caractère du bief ou du canal litigieux. Par l'examen des titres ou des circonstances de fait et de lieu, on arrivera à connaître si on est en présence d'un cours d'eau naturel ou artificiel. Le plus souvent, l'œuvre de l'homme se détermine par la largeur et la profondeur uniformes de l'ouvrage, par des alignements rectilignes, par de la terre placée sur les bords et en forme de talus. Au cas où le bief ne résulte pas d'un travail artificiel, cet ouvrage ne peut être considéré comme étant la propriété de l'usinier. Au cas où le bief a été creusé de main d'homme, il faut encore déterminer si le maître de l'usine s'en sert à un titre qui puisse l'autoriser à en user d'une façon exclusive, fait qui se présente quand l'usinier jouit du bief du canal comme propriétaire et quand il a sur le cours d'eau un droit de servitude ayant pour objet l'alimentation de son usine, tandis que la propriété appartient aux riverains. La nature du droit de l'usinier sur le bief du canal est établie par les titres ou par des faits de possession légale. Les règles sont les mêmes pour la propriété des francs bords des canaux d'amenée.

Le droit d'usage de l'article 644 du Code civil est purement facultatif et on ne peut prescrire contre lui. Les règlements locaux édictés pour une région ou pour une portion du cours d'une rivière par l'Administration sont au-dessus de l'appréciation du juge. Ils s'imposent dès que les formes ont été observées.

Pour obtenir un règlement d'eau, il faut que le bénéficiaire ait la possibilité matérielle de jouir de l'eau qui devra lui être attribuée et que l'eau qui reste à sa disposition soit suffisante à son usage. Le règlement d'eau est un véritable jugement que rend le juge, en vertu de l'article 645, en statuant selon l'équité et en conciliant les intérêts de l'agriculture avec le respect dû à la propriété.

On admet qu'un propriétaire, qui a acquis par prescription trentenaire un droit de prise d'eau et une servitude d'aqueduc, peut changer la destination des eaux dans son fonds et s'en servir pour alimenter une usine. Le droit du propriétaire de l'usine sur les eaux alimentaires contenues dans les canaux et biefs l'autorise à y faire tous les travaux nécessaires pour empêcher la perte et la filtration des eaux ; il est autorisé à déposer sur les rives le produit du curage et les vases qui en proviennent.

En dehors des travaux collectifs d'endiguement, et là où l'administration ne juge pas utile de les entreprendre, les propriétaires riverains ont le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

droit d'exécuter, sur les bords des cours d'eau, des digues, des fascinages et des pilotis.

Le curage, — qui a pour but de rétablir ou de maintenir le libre cours des eaux, — doit être effectué à vif fond et à francs bords, ou autrement dit à vieux fond et à vieux bords. Les frais occasionnés par le curage et l'entretien des ouvrages sont supportés par les riverains dans la mesure de leur intérêt, lequel s'apprécie par la situation de l'usine sur le cours d'eau et non d'après la valeur locative de l'établissement. Chaque riverain ou usinier peut faire opérer le curage le long de ses propriétés, pourvu qu'il n'entrave pas le libre cours des eaux et n'empiète pas sur le terrain d'autrui. Le riverain peut même effectuer les travaux de curage au delà de sa propriété. Les frais en sont à sa charge et les produits du curage appartiennent à celui aux frais de qui est faite l'opération.

La personne qui établit une usine ou une prise d'eau sur une rivière ou un ruisseau non navigable ni flottable, sans en avoir obtenu la permission, ne s'expose à aucune poursuite devant les juges de police ni à aucune répression personnelle. Elle court seulement le risque de voir son entreprise supprimée comme empêchant le libre cours des eaux.

253. Autorisations d'usines hydrauliques. — Les instructions des demandes en autorisation de prises d'eau sur les cours d'eau non navigables ni flottables sont tracées par les instructions organiques ministérielles, en date des 19 thermidor an VI, 28 octobre 1841, 23 octobre 1851, 26 décembre 1884, et par décret du 1er août 1905, dont nous donnons une analyse plus loin. La circulaire du 23 octobre 1851 était accompagnée d'un programme pour la rédaction des pièces nécessaires à l'instruction des règlements d'eau et de sept modèles qui avaient trait : les deux premiers, aux enquêtes à ouvrir (première et deuxième enquêtes) ; le troisième et le quatrième, à la visite des lieux ; le cinquième et le sixième, aux projets de règlement, et le septième, au procès-verbal de récolement des travaux.

La circulaire du 26 décembre 1884 a apporté une modification aux modèles 5 et 6.

Les travaux que nécessite l'utilisation des eaux doivent être régulièrement autorisés par l'Administration, que les lois des 22 décembre 1789, janvier 1790, 12-20 août 1790 et 28 septembre-6 octobre 1791 chargent de veiller à la conservation des rivières, au libre écoulement des eaux, ainsi qu'à leur répartition dans l'intérêt général.

Le riverain dont le fond borde un cours d'eau peut y établir une usine en en obtenant l'autorisation nécessaire. Il le pourra encore quand il aura acquis par titre ou par prescription le droit d'usage du riverain situé en face de lui.

Les usines établies ou à établir sur des cours d'eau n'ont d'existence

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

légale que si la construction ou l'exploitation en a été permise par l'autorité compétente. Le préfet a le droit d'autoriser les établissements à créer et de régulariser ceux existant sur les cours d'eau non navigables et non flottables (décret du 25 mars 1852).

L'autorisation administrative est nécessaire lorsqu'on fait subir aux établissements un changement tel que le régime du cours d'eau en puisse être modifié.

Le décret du 1er août 1905 vise les articles 12, 41 et 43 de la loi du 8 avril 1898, sous la forme d'un règlement d'administration publique, ayant pour objet de déterminer la forme de l'instruction qui doit précéder les arrêtés des préfets relatifs aux autorisations de passage sur les rivières non navigables.

Il importe surtout de remarquer que ce décret comporte, sur la circulaire ministérielle du 28 octobre 1841, deux modifications intéressantes, savoir : 1° la suppression de la première enquête, remplacée par la visite de l'ingénieur, et 2° la nécessité, pour l'Administration, de consulter le ministre de l'Agriculture, lorsque la chute projetée devra avoir, en moyenne, une puissance supérieure à 100 poncelets.

Les articles 1 à 3 du décret ci-avant visent la *forme des demandes*. L'article 1er stipule que les demandes concernant les objets ci-après doivent être adressées au préfet, sur papier timbré : *a*) établissement d'ouvrages intéressant le régime ou le mode d'écoulement des eaux ; *b*) régularisation de l'existence des usines et ouvrages établis sans permission et n'ayant pas de titre légal ; *c*) révocation ou modification des permissions précédemment accordées (cours d'eau non navigables et non flottables) ; *d*) prises d'eau au moyen de machines lorsqu'il est constaté, qu'eu égard au volume des cours d'eau, elles n'auront pas pour effet d'en altérer le régime ; *e*) autorisations qui ne peuvent être accordées que par décret.

L'article 2 dit que, lorsqu'il s'agit d'une première autorisation, la demande doit énoncer d'une manière distincte : les noms des cours d'eau et de la commune sur lesquels les ouvrages doivent être établis, les noms des établissements hydrauliques placés immédiatement en amont et en aval, l'usage auquel l'entreprise est destinée, les changements présumés que l'exécution des travaux doit apporter au niveau et au régime des eaux, soit en amont, soit en aval, enfin la durée probable des travaux sur les cours d'eau non navigables ni flottables ; quand il est question d'un barrage comportant la submersion des rives en amont, la demande doit être accompagnée d'un projet complet du barrage, ainsi que d'un mémoire justifiant les dispositions projetées, en faisant connaître le mode de fonctionnement de l'ouvrage. Dans tous les cas, le permissionnaire doit, en outre, justifier qu'il a la libre disposition du sol sur lequel les ouvrages

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seront implantés, et notamment celle des rives dans les cas où un barrage doit être établi.

L'article 3 indique que, s'il s'agit de modifier ou de régulariser un établissement préexistant, le propriétaire doit fournir, autant que possible, outre les renseignements ci-dessus mentionnés, une copie des titres en vertu desquels cet établissement existe.

Les articles 4 à 15 ont trait à l'*instruction des demandes*. Le préfet transmet la demande à l'ingénieur en chef compétent et celui-cila fait parvenir à l'ingénieur ordinaire, qui procède à la visite des lieux. Si les services d'ingénieurs de plusieurs départements sont intéressés, les préfets désignent celui à qui sera confiée l'affaire ; en cas de désaccord, le ministre désigne d'office (art. 4).

L'ingénieur ordinaire donne avis de sa visite aux maires des communes intéressées, lesquels annoncent la visite au moyen d'affiches posées au lieu ordinaire d'affichage des actes administratifs et ensuite publiées à son de trompe ou de caisse, formalités qui doivent être remplies au moins huit jours avant la date fixée pour la visite de l'ingénieur. De plus, ce dernier prévient directement le pétitionnaire, les présidents des syndicats s'il en existe pour le cours d'eau, les mariniers les plus expérimentés s'il s'agit d'une rivière navigable ou flottable, et toutes autres personnes dont la présence lui paraît utile et nécessaire (art. 5).

Lors de sa visite, l'ingénieur ordinaire dresse un procès-verbal séance tenante, dont il donne lecture aux personnes présentes, qui sont invitées à le signer et à y insérer sommairement leurs observations, si elles le jugent convenable. Dans ce procès-verbal sont indiqués les repères que l'ingénieur a adoptés, les renseignements qu'il a recueillis, les résultats des expériences qu'il a faites et les conventions amiables qui auraient pu intervenir entre les intéressés (art. 6).

Les formalités prescrites par les articles 5 et 6 ne sont pas applicables aux demandes de prises d'eau par machines visées à l'article 1er du présent décret, ainsi qu'aux cours d'eau non navigables ni flottables, lorsque les ouvrages projetés ne comportent pas l'établissement de barrages et lorsque le préfet juge qu'ils ne sont pas de nature à modifier profondément le régime des eaux (art. 7).

L'article 8 mentionne le rapport à dresser par l'ingénieur ordinaire, lequel est transmis à l'ingénieur en chef. Dans ce rapport, celui-là discute les oppositions et motive ses propositions relatives aux conditions techniques à imposer au pétitionnaire ; s'il conclut à l'autorisation, il joint à son rapport un projet de règlement, un plan et des nivellements.

Le rapport et toutes les pièces de l'instruction sont envoyés, avec avis, par l'ingénieur en chef au préfet.

Ce dernier, dès lors, ordonne, par un arrêté, l'ouverture d'une enquête.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il indique que toutes les pièces de l'instruction sont déposées à la mairie de la commune où les travaux doivent être exécutés. Un registre destiné à recevoir les observations des intéressés est ouvert à ladite mairie. Si l'entreprise s'étend en dehors du territoire de la commune, l'arrêté désigne les autres communes dans lesquelles l'enquête doit être ouverte et aux mairies desquelles il sera déposé un dossier avec registre spécial (art. 9).

Cet arrêté préfectoral fixe le jour de l'ouverture de l'enquête, qui a une durée de quinze jours, et il est annoncé dans les mêmes formes que celles de la visite de l'ingénieur. L'accomplissement de ces formalités est certifié par les maires des communes où elles sont prescrites (art. 10).

A l'expiration du délai, les maires des communes transmettent les registres, avec leur avis motivé, au préfet, qui consulte les ingénieurs sur les résultats de l'enquête. Si celle-ci a porté sur plusieurs départements, les résultats en sont centralisés par le préfet du département où se trouve le siège principal de l'établissement (art. 11).

Si, d'après les résultats de l'enquête, les ingénieurs apportent à leurs premières dispositions quelque changement de nature à provoquer de nouvelles oppositions, il est procédé à une nouvelle enquête de quinze jours (art. 12).

Quand d'autres services publics sont intéressés à l'établissement, à la modification ou à la suppression de l'ouvrage, les chefs de ces services sont consultés, et, si l'ouvrage est compris dans la catégorie des travaux mixtes, il est procédé à l'instruction suivant les règles édictées par les lois et décrets sur la matière. Dans le cas où l'affaire est portée devant la Commission mixte, la délibération prise par cette Commission est notifiée au préfet, s'il est compétent pour statuer (art. 13).

Enfin, après l'accomplissement de ces formalités, le préfet statue, si l'affaire est de sa compétence.

S'il s'agit d'un barrage comportant la submersion des rives en amont et si la chute projetée a une puissance supérieure à 100 poncelets, il en est référé au ministre de l'Agriculture, au préalable.

En cas de rejet de la demande, le préfet notifie immédiatement sa décision motivée au pétitionnaire.

Si l'autorisation doit être accordée par décret, le préfet transmet le dossier avec ses propositions au ministre compétent (art. 14).

Sur les cours d'eau non navigables ni flottables, le préfet ne peut ouvrir l'instruction en revision d'un règlement existant qu'avec l'assentiment du ministre de l'Agriculture.

Le *récolement des travaux* est défini par l'article 16. A l'expiration du délai fixé par l'acte d'autorisation pour l'exécution des travaux, l'ingénieur ordinaire procède à la vérification de ceux-ci et rédige un procès-verbal de récolement en présence du pétitionnaire, des maires et des inté-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ressés, convoqués à cet effet dans les formes établies par l'article 5 du décret. Le préfet, si les travaux sont exécutés conformément aux indications de l'autorisation, prononce la réception ; sinon, il invite le pétitionnaire à régulariser sa situation. Dans le cas où les travaux sont de nature à causer des dommages, le pétitionnaire est mis en demeure d'avoir à y remédier dans un délai déterminé ; si cette injonction reste sans effet, le préfet prend les mesures nécessaires pour faire cesser le dommage et prononcer, s'il y a lieu, le retrait de l'autorisation.

Sur les cours d'eau non navigables ni flottables, lorsqu'il s'agit des entreprises visées au paragraphe 2 de l'article 14, toutes les fois que les travaux exécutés ne seront pas conformes aux conditions de l'autorisation, le préfet devra soumettre le procès-verbal de récolement au ministre de l'Agriculture, sauf, en cas d'urgence, à prendre des mesures comme celles spécifiées ci-avant.

Les articles 17 à 20 concernent des *dispositions diverses* ayant trait : 1° au retrait d'autorisation par application des articles 14 et 15 de la loi du 8 avril 1898 ; dans ce cas, il est statué dans les formes établies par les articles 9, 10, 11, 12, 13 et 14 du présent décret, et l'enquête s'ouvre sur les propositions formulées par les ingénieurs ; 2° au règlement d'office d'établissements existants non réglementés par le préfet, et cela soit sur la plainte des intéressés, soit sur la proposition des ingénieurs, après en avoir donné avis au propriétaire. Les règlements d'office sont d'ailleurs soumis aux mêmes formalités que les demandes présentées par les particuliers.

Les dispositions du décret que nous venons d'analyser ne sont pas applicables aux autorisations d'établissements temporaires.

Lorsque le projet d'établissement a rapport aux rivières navigables et flottables, le préfet, après l'instruction, prend un arrêté qui décide l'admission ou le rejet de la demande dont il est adressé ampliation au ministre, conformément à la circulaire ministérielle du 27 juillet 1852. En cas de rejet, le pétitionnaire peut en appeler devant le ministre des Travaux publics. L'arrêté qui prononce l'admission peut être soumis au Conseil d'État (sauf si l'établissement a un caractère temporaire et provisoire), et il est statué, après avis du Conseil d'État, par un décret gouvernemental.

D'après le projet de loi voté par la Chambre des députés (16 juillet 1909), les usines hydrauliques occupant le domaine public seraient divisées en usines autorisées et en usines concédées. La première catégorie concernerait les usines qui disposent d'une puissance brute en étiage d'au plus 200 kilowatts et qui n'ont pas pour objet principal le commerce de l'énergie. Toutes les autres usines seraient concédées.

Les usines autorisées continueraient à être régies par les lois et règle-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ments actuellement en vigueur. Tout en restant essentiellement précaires et révocables, les autorisations qui constituent leur titre ne seraient, en aucun cas, valables pour une durée supérieure à cinquante années. En ce qui concerne les usines actuellement existantes, le délai de cinquante ans courrait à partir de la promulgation de la présente loi.

Les usines concédées feraient l'objet d'une concession de durée déterminée, accordée au nom de l'État par un décret rendu en forme de règlement d'administration publique. Une loi ne serait nécessaire que lorsque les travaux d'appropriation de la force comporteraient le détournement des eaux de leur lit sur une longueur de 20 kilomètres, mesurée sur ce lit ou que la puissance brute dont l'usine pourra disposer dépasserait 15.000 kilowatts.

La concession investirait le titulaire, pour l'exécution des travaux définis au cahier des charges joint à l'autorisation, de tous les droits que les lois et règlements confèrent à l'administration en matière de travaux publics ; en particulier les usines concédées auraient le droit d'occuper les propriétés privées nécessaires à l'appui des ouvrages de retenue ainsi qu'à l'établissement des canaux souterrains d'adduction et de fuite, conformément aux dispositions des projets régulièrement approuvés par l'administration ; s'il y avait lieu à expropriation, il y serait procédé conformément à la loi du 3 mai 1841, au nom de l'État et aux frais du concessionnaire.

Enfin toutes les usines actuellement existantes, qui ont été autorisées à titre précaire et révocable, et qui disposent d'une puissance brute en étiage supérieure à 200 kilowatts ou qui ont pour objet principal le commerce d'énergie, seraient, dans un délai de cinq ans, à partir de la promulgation de la présente loi, placées sous le régime des usines concédées.

Le projet de loi que nous venons d'analyser est donné *in extenso* au paragraphe 256.

En ce qui concerne les établissements sur les cours d'eau non navigables ni flottables, l'autorisation indique qu'il doit être placé près de l'usine, en un point désigné par l'ingénieur, un repère définitif et invariable dont le zéro indique seul le niveau légal de la retenue ; ledit repère doit toujours être accessible aux fonctionnaires publics ou aux intéressés. Dès que les eaux dépassent le niveau de la retenue, le permissionnaire doit lever ses vannes de décharge. L'acte d'autorisation fixe l'emplacement du déversoir, la longueur de ce déversoir, la hauteur et le dérasement de sa crête, soit en contre-bas du repère, soit suivant le plan de pente de l'eau retenue au niveau légal. Ces dispositions sont relatives au vannage de décharge pour que les vannes puissent être facilement levées au-dessus des plus hautes eaux. Enfin l'acte peut contenir des conditions spéciales motivées par l'état des lieux, par la nature du cours d'eau et du mécanisme hydraulique, l'encaissement et la rapidité plus ou moins grande des eaux. Le per-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

missionnaire doit se conformer à tous les règlements existants ou futurs sur la police des eaux, le mode de distribution et le partage des eaux, et les travaux, exécutés sous la surveillance des ingénieurs des ponts et chaussées, doivent être terminés dans un délai fixé. A l'expiration dudit délai, l'ingénieur rédige un procès-verbal de récolement aux frais du permissionnaire ; dans le cas d'un partage d'eau entre l'agriculture et l'industrie, les ingénieurs chargés d'une semblable étude doivent rechercher la solution la plus avantageuse au point de vue de l'intérêt général.

Si les eaux sont domaniales, le chiffre de la redevance est déterminé dans l'arrêté du préfet.

Le permissionnaire est tenu d'effectuer le curage à vif fond du bief de l'usine dans toute l'étendue du remous, toutes les fois que la nécessité s'en fait sentir ou qu'il en est requis par l'autorité administrative.

Si les travaux exécutés sont conformes aux dispositions prescrites, l'ingénieur propose la réception, et une expédition du procès-verbal de récolement reste déposée à la mairie de la commune de laquelle dépend le lieu de l'installation, aux termes du décret du 10 mai 1854. Les ingénieurs et les agents sous leurs ordres ont droit à l'allocation de frais de voyage et de séjour, lorsqu'ils procèdent, en dehors des limites de la commune de leur résidence, aux opérations de nivellement et de récolement. Il en est de même pour les vérifications ultérieures relatives aux points d'eau et aux ouvrages régulateurs, mais alors seulement si cette vérification a lieu à la demande d'un intéressé. Les états de frais sont réglés par le préfet et recouvrés comme en matière de contributions directes.

Les recours dirigés soit contre l'acte de l'Administration, soit contre les effets qu'entraîne sa mise en exécution, ont lieu par la voie contentieuse au Conseil d'État ou par la voie purement administrative, dont le chef hiérarchique est le ministre des Travaux publics.

L'Administration, se basant sur les exigences de l'intérêt public, s'attribue le droit de modifier et de révoquer au besoin les autorisations existantes, et les tiers intéressés peuvent provoquer la révision, le changement ou le retrait de l'autorisation. Dans l'exercice de son droit, l'Administration ne serait empêchée ni par une possession immémoriale ni par l'origine du titre sur lequel cet état de chose repose.

En résumé, la première chose que doit faire un industriel qui veut s'établir sur un cours d'eau est de s'assurer le consentement de tous les riverains dont les droits pourraient se trouver compromis soit par le remous du barrage, soit par les dérivations usinières projetées. Il lui faut acquérir, en outre, bien entendu, les terrains nécessaires pour l'installation de l'usine. Il lui faut aussi — puisqu'il ne peut invoquer les servitudes des lois des 29 avril 1845 et 14 juillet 1847 [par lesquelles les riverains peuvent conduire sur les fonds non riverains les eaux d'irrigation dont ils ont le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

droit de disposer, en obtenant, moyennant indemnité, le passage desdites eaux à travers les fonds intermédiaires (services d'aqueducs), et aussi acquérir la faculté, toujours pour l'arrosage, d'appuyer sur la propriété du riverain opposé les ouvrages nécessaires à leur prise d'eau] — se procurer à l'amiable le droit de faire passer ses dérivations sur le terrain d'autrui et d'appuyer son barrage sur la rive opposée à la sienne (appuis de barrages). Il doit également obtenir le consentement des propriétaires supérieurs dont les fonds pourront se trouver submergés par la retenue de son barrage. Enfin il lui faut traiter avec tous les riverains auxquels le remous et la dérivation vont enlever en tout ou en partie le droit d'usage de l'eau, et pour cela, se faire céder par eux ou leurs droits de riveraineté ou les terrains mêmes auxquels ces droits se trouvent attachés.

L'instruction des demandes de services d'aqueducs, d'appuis de barrages pour les eaux d'irrigation, se fait dans les mêmes formes que celle de la réglementation des usines. La retenue peut être permanente ou intermittente ; dans ce dernier cas, le niveau légal de la retenue est remplacé par celui de la crête du barrage, qui limite les hausses réservées, et les vannes doivent être disposées à l'instar de celles des usines hydrauliques.

Les voies de recours offertes aux intéressés par les arrêtés des préfets sont d'ordre gracieux et d'ordre contentieux. Dans le premier cas, il faut que le plaignant se trouve en présence d'une faute de l'Administration, et c'est le chef de l'État, fonctionnant au regard du préfet comme une sorte de tribunal du second degré, qui statue par décret, en s'éclairant de l'avis du Conseil d'État. Le recours gracieux existe sans préjudice du recours contentieux pour excès de pouvoir. Hors le cas de l'intérêt général où l'hygiène et la sécurité sont en jeu, ou dans l'hypothèse d'une faute du permissionnaire, l'autorisation ne peut être retirée sans indemnité.

Ainsi donne lieu à indemnité le retrait de l'autorisation, qui serait la conséquence d'une dérivation de la rivière, en amont des travaux autorisés, le retrait de l'autorisation qui serait ordonné par suite des nouveaux travaux autorisés sur la rivière, au profit d'une collectivité ou d'un particulier, la modification d'une autorisation pour les mêmes causes et enfin toute modification de même origine qui serait apportée à une usine fondée en titre. C'est le conseil de préfecture qui fixe l'indemnité ; mais, si les travaux exécutés l'ont été à la suite d'une expropriation, la procédure doit être suivie devant le jury de la loi de 1841.

La *circulaire ministérielle du 3 juillet* 1908 apporte quelques explications complémentaires, relativement à l'application du décret du 1er août 1905, lesquelles nous résumons ci-après.

Dans ce document, le ministre de l'Agriculture rappelle aux préfets, qu'en vertu du décret du 1er août 1905, tous les arrêtés d'autorisation relatifs à des usines d'une puissance supérieure à 100 poncelets doivent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lui être soumis *sans exception*, avant d'être approuvés par l'autorité préfectorale. De plus, le ministre doit être avisé des demandes d'autorisation d'usines importantes dès qu'elles sont présentées aux préfets. Dans ces conditions, les ingénieurs du service hydraulique sont dans l'obligation d'adresser au ministre, dès l'instruction de l'affaire : une copie de la demande en autorisation d'usine, un extrait de la carte d'état-major indiquant l'emplacement de la prise d'eau, de la dérivation et de l'usine projetées, une note (tirée des éléments mêmes fournis par le pétitionnaire) donnant la section de rivière comprise dans le remous du barrage et celle située en aval du canal de fuite où le régime des eaux sera sensiblement modifié par l'exploitation de l'usine, les entreprises d'utilité publique (canaux d'irrigation et de navigation, usines servant à la marche des services publics, etc.) dont le fonctionnement pourrait être modifié par l'établissement projeté.

L'instruction ouverte dans les conditions prévues par le décret du 1er août 1905, dès qu'elle est terminée, doit être soumise à l'examen du ministre avant que le projet de règlement d'eau soit revêtu de l'approbation préfectorale.

Enfin le ministre appelle d'une façon toute particulière l'attention de l'Administration et des ingénieurs du service hydraulique sur ce point qu'ils doivent, pour les usines hydrauliques de grande puissance, interdire de la manière la plus absolue l'exécution de tous travaux empiétant sur le lit d'un cours d'eau non navigable ni flottable ou intéressant son régime, jusqu'au moment où ces travaux auront été régulièrement autorisés. Même lorsque les ouvrages en construction ne peuvent avoir aucune influence sur le régime ou le mode d'écoulement des eaux, le ministre demande à être mis au courant de ces travaux et à être renseigné sur leur état d'avancement et leur destination présumée.

Le besoin d'une exécution rapide des travaux pour les besoins de l'armement a fait sortir un projet de décret (janvier 1918) qui a pour objet d'une part de reformer l'ordonnance du 13 février 1834 et le décret du 1er août 1905 et d'autre part de réduire au minimum toutes les formalités relatives à l'instruction des demandes d'établissement d'usines hydro-électriques sur les cours d'eau domaniaux, en imposant des délais de rigueur à tous les échelons de la procédure de l'instruction. Le lecteur trouvera au (§ 259) le résumé de cet intéressant projet de décret.

254. Obligations des riverains et des usiniers. — Nous trouvons ces obligations formulées dans le *Règlement d'administration publique* édicté en vue de l'application de la loi du 8 avril 1898.

L'article 1er a trait au *recepage des arbres*, buissons et souches formant saillie, prescrit aux riverains. Les articles 2 et 3 assujettissent les riverains

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à recevoir sur leurs terrains les *produits des curages et à livrer passage aux agents de l'Administration* préposés à la surveillance des cours d'eau ainsi qu'aux entrepreneurs et ouvriers chargés du curage. Le droit de passage doit s'exercer autant que possible, en suivant la rive des cours d'eau. L'article 4 a pour but d'indiquer de la façon la plus générale quels sont *les travaux dont l'exécution est subordonnée à une autorisation préalable.* Toutes les fois qu'un travail quelconque, permanent ou temporaire, est susceptible d'avoir une influence, soit sur le régime, soit sur l'écoulement des eaux, il ne doit être entrepris qu'après avoir été auparavant autorisé par l'Administration.

L'article 5 vise les *travaux dans le lit des cours d'eau* qui intéressent nécessairement l'écoulement des eaux, et qui, à ce titre, ne peuvent être exécutés qu'après avoir été autorisés, qu'il s'agisse de barrages, d'épis ou même de simples terrassements ou de plantations. Le préfet est compétent pour accorder les autorisations nécessaires, d'après l'accomplissement des formalités prescrites par le décret du 1er août 1905. L'article 5 s'applique aussi aux travaux qui, sans être complètement dans le lit, empiètent sur les limites naturelles du cours d'eau. Quand il ne s'agit que de réparations à des ouvrages précédemment autorisés, l'autorisation n'est pas exigible ; elle ne le devient que s'il s'agit de modifications et même de simples réparations, si les ouvrages remis en état n'avaient pas été précédemment autorisés.

L'article 6 apporte une nouvelle exception au principe qui subordonne à une autorisation préalable l'exécution d'un travail quelconque dans le lit d'un cours d'eau. Cette tolérance concerne les *extractions de vase, de sable et de pierres par les riverains.* L'Administration fixe les conditions générales auxquelles est soumis l'exercice de ce droit en vue d'assurer le libre écoulement des eaux, de sauvegarder la salubrité et de préserver les ouvrages publics, tels que ponts, digues, travaux de défense et d'alimentation de canaux, etc.

Les arrêtés préfectoraux indiquent que dans un délai de deux mois le préfet doit faire connaître au pétitionnaire si l'ouvrage projeté intéresse ou non le régime ou l'écoulement des eaux. Dans le cas de la négative, ou si dans le délai de deux mois il n'a pas reçu de réponse, le pétitionnaire peut exécuter l'ouvrage sans autre formalité.

L'article 7 concerne les *ouvrages au-dessus des cours d'eau ou les joignant ;* il prescrit, pour leur établissement, des formalités que l'Administration a été amenée par l'expérience à adopter, tant dans l'intérêt général que dans celui des riverains. A cet égard, la circulaire du 17 juillet 1900 a été abrogée en ce qui concerne les ouvrages joignant le lit, car dans l'intérêt même des riverains, le ministre estime qu'il est préférable de ne pas maintenir un régime de liberté absolue. Les riverains doivent donc sou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mettre à l'Administration, avant leur exécution, les dispositions qu'ils se proposent d'adopter. L'arrêté à prendre, si l'ouvrage doit faire l'objet d'une autorisation, est rendu, après enquête, dans les conditions prévues par le décret précité.

L'article 8 est relatif *aux prises et déversements d'eau*. L'autorisation pour ces ouvrages n'est pas exigible, toutes les fois que le débit du cours d'eau n'est pas modifié d'une manière appréciable par l'établissement desdits ouvrages. Mais l'autorisation préalable est indispensable quand les prises et déversements d'eau intéressent l'écoulement des eaux, que les ouvrages soient faits directement ou indirectement dans le cours d'eau et même s'ils ne devaient être que temporaires. Les non-riverains, sauf ceux auxquels des titres ont, par exception, conféré des droits sur les eaux, ne peuvent pratiquer de dérivations sur les rivières non navigables ni flottables qu'en vertu d'une déclaration d'utilité publique. D'autre part, les déversements susceptibles d'être autorisés par l'application du présent article ne concernant que des déversements d'eaux propres, ne rentrent pas dans la catégorie de ceux qui sont interdits par l'article 12 ci-après.

L'article 9 a trait aux *obligations des usiniers et des usagers des barrages en ce qui concerne l'écoulement des eaux*.

Pour toutes les usines réglementées ou non, il est : 1° interdit de placer aucune hausse sur les déversoirs et les vannes des usines, à l'effet d'éviter que les usiniers ne puissent surélever, à l'insu de l'administration, le niveau de leurs retenues ; 2° les usiniers sont rendus responsables de la surélévation des eaux, tant que les vannes de décharge ne sont pas levées à toute hauteur ; 3° la vidange des retenues ou lâchures ne doit avoir lieu, pour les usines comportant des retenues qui emmagasinent un volume considérable, qu'en prenant toutes les précautions nécessaires pour éviter une inondation à l'aval. Enfin l'obligation d'entretenir en bon état les ouvrages sujets à réglementation, vise tout particulièrement les barrages-réservoirs.

Pour les usines non pourvues de titres réglementaires les eaux ne doivent pas dépasser le dessus du déversoir ou de la vanne de décharge la moins élevée, s'il n'existe pas de déversoir. Les barrages non autorisés ne peuvent être tolérés, lorsqu'ils ne remplissent pas les conditions précédentes, que s'ils sont construits de façon à être emportés par la première crue. Enfin les usiniers et les usagers des usines non réglementées ne sont responsables de la surélévation des eaux, soit qu'elle provienne du défaut de manœuvre de leurs vannes, soit qu'elle résulte de la trop grande hauteur du déversoir ou de l'insuffisance des ouvrages de décharge.

La responsabilité pénale, s'il s'agit d'usines réglementées, n'existe que lorsque la manœuvre des vannes n'a pas été faite en temps utile et l'usinier ne peut qu'être rendu civilement responsable vis-à-vis des tiers en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cas de dommages résultant de dispositions défectueuses des ouvrages fixés par l'Administration.

ART. 10. — Il prescrit aux usiniers et aux usagers de barrages *l'obligation de tenir leurs vannes ouvertes, pour l'exécution et la réception des travaux de curage*, aux jours et heures fixés par les arrêtés préfectoraux.

ART. 11. — Cet article impose aux usiniers et aux usagers des prises, indépendamment des obligations qui peuvent résulter pour eux des règlements généraux de répartition des eaux entre l'agriculture et l'industrie et de leurs règlements particuliers, l'observation de diverses prescriptions relativement à *la transmission des eaux*. Ces prescriptions visent la protection de la salubrité publique, l'alimentation en eau des populations d'aval, l'abreuvement de leurs bestiaux et la satisfaction de leurs besoins domestiques.

L'Administration, dans ses règlements d'eau individuels, pour sauvegarder ces intérêts, introduit des mesures spéciales, quand il s'agit de prises importantes ou d'usines établies sur des cours d'eau à faible débit où la marche par éclusées est normale. Pour les grandes usines hydroélectriques comportant des dérivations de plusieurs kilomètres, l'Administration manifeste plus spécialement son intervention, en attribuant aux intérêts agricoles et industriels de toute la partie du cours d'eau un caractère « d'intérêt général », par application des termes de la loi des 12-20 août 1790.

ART. 12. — Cet article a pour but d'interdire diverses opérations qui pourraient avoir, soit directement, soit indirectement, une influence nuisible sur les cours d'eau ; il vise aussi les dépôts, et d'une manière générale les *déversements* quels qu'ils soient qui pourraient gêner l'écoulement des eaux, la salubrité publique et la conservation du poisson. L'Administration a l'obligation de veiller à ce que la qualité des eaux ne soit altérée et que leur nature et leur tempérament ne soient modifiées de façon à rendre leur utilisation impossible.

Quant aux égouts, qui ont manifestement pour objet des déversements rentrant dans la catégorie de ceux qui sont interdits, ils ne peuvent en principe être exécutés qu'en vertu d'une déclaration d'utilité publique. Cependant lorsque les égouts, par leur composition et leur volume, ne sont pas de nature à influer, à une époque quelconque de l'année, d'une manière sensible sur la qualité des eaux des cours d'eau où ils sont effectués, ils peuvent être assimilés aux écoulements d'eaux propres et réglementés dans les mêmes conditions.

ART. 13. — Cet article est relatif aux *gardes-rivières*, qui peuvent être institués lorsque l'ensemble des intéressés ou seulement un certain nombre d'entre eux ont pris l'engagement d'assurer le paiement de leur traitement. Les départements et les communes peuvent d'ailleurs, s'ils le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jugent convenable, accorder des subventions pour aider les intéressés à faire face à cette dépense.

ART. 14. — L'avant-dernier article du règlement de police concerne la *répression des contraventions*. Le tribunal compétent est généralement le tribunal de simple police ; cependant l'infraction commise peut, dans certains cas, être poursuivie devant le tribunal correctionnel, notamment si elle rentre dans l'un des cas prévus par les articles 457 du Code pénal et 15 de la loi des 28 septembre-6 octobre 1791. Si, par exemple, un usinier cause des dommages par suite de la hauteur excessive de son déversoir, par suite du défaut ou de l'insuffisance de levée de ses vannes de décharge, s'il transmet ses eaux d'une manière nuisible ou altère directement ou indirectement leur qualité. Indépendamment de l'action répressive devant les tribunaux de police pour infraction aux règlements sur la police des eaux, des poursuites devant le conseil de préfecture peuvent être exercées si les faits délictueux constituent des contraventions de grande voirie (dommages causés par une inondation à des routes nationales, à des canaux de navigation, à des chemins de fer, à des travaux d'endiguement, etc.). Les tribunaux ont dans leur attribution de juger l'opportunité de la démolition des ouvrages nuisibles par les soins de l'Administration et aux frais des contrevenants.

Les taxes pour le recouvrement des dépenses sont recouvrées comme en matière de contributions directes.

Les arrêtés préfectoraux portent que les contraventions sont constatées au moyen de procès-verbaux dressés par les gardes-rivières, dûment assermentés et commissionnés par les sous-préfets, ou par tout autre agent de l'autorité ayant qualité à cet effet. Les procès-verbaux sont affirmés dans les trois jours de leur date devant le maire ou le juge de paix, soit de la résidence de l'agent, soit du lieu de contravention. Ils sont enregistrés dans un délai de quatre jours après l'affirmation et déférés aux juridictions compétentes. Copie de chaque procès-verbal est remise, par l'agent qui l'a dressé, au maire de la commune et notifié par celui-ci au contrevenant avec sommation, s'il y a lieu, de faire cesser immédiatement le dommage.

ART. 15. — Cet article dernier prescrit la *publication* et l'*affichage* du règlement de police, sous insertion au *Bulletin des actes administratifs* et charge l'ingénieur en chef, les sous-préfets et les maires d'en surveiller l'exécution (1).

255. Analyse du projet de loi ministériel des 15 Janvier 1904-

(1) Nous ne donnons pas l'analyse de la circulaire ministérielle du 1er juin 1906, ainsi que le modèle d'arrêté préfectoral qui la complète, par la raison que ces documents sont implicitement contenus dans l'analyse du règlement d'administration ci-dessus.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

12 Juin 1906.— Les cours d'eau flottables ou navigables font en France partie du domaine de l'État, et un riverain ne peut y établir un récepteur hydraulique quelconque que s'il en obtient l'autorisation, autorisation d'ailleurs précaire et révocable, le plus souvent sans indemnité (1). Pour les cours d'eau non flottables et non navigables, le riverain n'a à demander de permission à l'État que s'il modifie le cours du lit, et une fois qu'il l'a obtenue, celle-ci est pratiquement irrévocable. Il peut donc faire toutes installations qu'il juge utiles, sous la réserve des droits des tiers.

D'après la loi de 1898, que nous avons exposée, il est certain que le lit des cours d'eau non navigables ni flottables appartient aujourd'hui aux riverains. Les usines peuvent se constituer en se conformant aux articles 644 et 645 du Code civil et à la loi du 8 avril 1898, si leur créateur peut à l'amiable réunir entre ses mains les droits réclamés par l'Administration préfectorale, pour donner son autorisation de police générale ; on voit donc que la loi de 1898 n'a rien innové et, par suite, rien statué.

D'autre part, elle est muette sur les droits que l'on cherche à attribuer aux industriels de houille blanche pour les préserver des obstacles créés par la résistance ou l'inertie des riverains, dans l'intérêt du développement des forces hydrauliques, c'est-à-dire de l'augmentation de la richesse en général.

Le Congrès de la Houille blanche, qui eut lieu à Grenoble en septembre 1902, montra la nécessité d'apporter certaines modifications à la législation existante, en raison de la gravité des intérêts et de l'importance des besoins correspondant au développement considérable pris par l'industrie hydroélectrique, grâce au transport électrique de l'énergie des chutes d'eau.

De nombreux projets y furent examinés et discutés. Par la suite, à la Société d'études législatives de Paris, à la Société des ingénieurs civils, au Congrès des entrepreneurs des travaux publics, au Congrès de Toulouse, et dans quantité de chambres de commerce, la question fit l'objet de nombreuses discussions.

Le ministre de l'Agriculture, qui a dans ses attributions les cours d'eau non navigables ni flottables, sur lesquels sont situées la presque totalité des chutes d'eau de montagne, estimant que toutes les opinions avaient eu le temps de se manifester, institua une Commission, composée des auteurs des principaux systèmes préconisés en vue de l'utilisation des forces hydrauliques, de représentants de l'industrie hydroélectrique, de jurisconsultes, d'ingénieurs et de membres de la Société nationale d'Agriculture de France. Cette Commission a élaboré le projet de loi que nous allons analyser succinctement.

(1) Voir (§ 236) le projet de loi voté par la Chambre des députés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce projet comporte vingt-deux articles. Il crée ou laisse subsister les quatre genres d'usines hydrauliques suivantes :

a) Usines privées ordinaires, telles qu'elles existent aujourd'hui et telles qu'elles pourront continuer à être établies ;

b) Usines privées privilégiées, créées par la loi nouvelle ;

c) Usines d'utilité publique autonomes, également de création nouvelle ;

d) Usines publiques du type ancien formant partie intégrante d'entreprises, bénéficiant des dispositions de la loi nouvelle.

L'exposé des motifs dit : « La liberté de l'industrie serait sauvegardée et les intérêts industriels recevraient la même consécration et la même prérogative que celles que les intérêts agricoles avaient reçues dès longtemps. Ces derniers ne seraient pas sacrifiés, même en présence des intérêts industriels ; tout le jeu des restitutions en nature, des réserves et des indemnités en est un sûr garant. Les intérêts spéciaux des riverains seraient protégés comme ils le sont actuellement, sauf la conversion, en certains cas, de leurs droits en indemnités, et cela vis-à-vis des usines publiques comme des usines privées. Il serait pourvu aux intérêts généraux et à ceux des services publics par toutes les réserves et les droits de réquisition que nous signalons plus loin. Enfin, l'intérêt du public consommateur de l'énergie aurait cette garantie que la distribution de force à l'industrie serait rangée explicitement, par une disposition générale, dans les entreprises susceptibles d'être organisées en services publics, et que la concurrence faite par les usines d'utilité publique au bloc des usines privées empêcherait les prix de coalition de s'établir... »

Usines hydrauliques privées privilégiées. — La loi nouvelle veut que cette catégorie d'usines qu'elle crée, tout en étant propriété absolue de l'ayant droit, soit autorisée par un décret rendu en Conseil d'État.

Pour obtenir la permission, le demandeur devra être possesseur des terrains nécessaires à l'emplacement de l'usine, d'une des rives de l'emplacement du barrage projeté et des droits appartenant aux riverains sur le cinquième au moins de la longueur des rives dans la section intéressée. L'autorisation serait donnée sous la réserve des droits des tiers, droits qui, comme nous l'avons dit, pourront, en certains cas, être transformés en indemnités. La loi prévoit des réserves pour ce qui concerne l'irrigation et les nécessités de services publics.

Les usines bénéficieraient de l'application des lois de 1845 et 1847 pour les servitudes d'aqueducs et d'appuis de barrage, et elles pourraient imposer, à des conditions déterminées, aux terres riveraines, la submersion occasionnée par la retenue du barrage.

Les tribunaux civils statueraient soit sur les restitutions d'eau en nature, soit sur les indemnités à accorder.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Seraient compétents pour obtenir l'autorisation : un particulier, une société ou une association syndicale des riverains, ces derniers pouvant céder leurs droits, une fois la chute juriquediment constituée, à titre temporaire ou définitif.

Usines hydrauliques d'utilité publique autonomes. — Ces usines seraient soumises à la déclaration d'utilité publique spéciale, au moyen d'une loi, et à un acte de concession, par décret du Conseil d'État. Seraient compétents pour la concession avec faculté de rétrocession aux départements : les communes et les syndicats de communes.

L'expropriation serait déclarée d'office pour les terrains nécessaires à l'établissement de l'usine.

A l'expiration de la concession, l'établissement ferait retour à l'État, sans indemnité.

L'expression autonome, appliquée à cette catégorie d'usines que la nouvelle loi crée, s'explique en ce sens que, quoique ces usines seraient placées sous la puissance administrative, leur service propre ne serait pas forcément lié au service public qu'elles auraient mission d'assurer, l'affectation de l'énergie de l'usine hydraulique pouvant trouver d'autres débouchés que celui primitif en vue duquel elle s'est établie. Son caractère d'autonomie réside surtout dans la qualité que la loi lui accorde : à savoir d'être à la fois fournisseur des services publics (chemins de fer, tramways, distributions publiques de lumière, de force) et de l'industrie privée. L'usine hydraulique revêtirait ainsi un caractère essentiellement mixte.

L'usine d'utilité publique jouirait des mêmes privilèges que l'usine privée au point de vue de la création de la chute, et des mêmes servitudes (servitudes de passage, d'aqueduc, d'appui de barrage, d'occupation du lit et de submersion des rives), sauf indemnité. Si, lors de la déclaration d'utilité publique, des riverains avaient des droits exercés contraires à l'établissement et au fonctionnement de l'usine, la nouvelle loi les abolit avec indemnité.

Travaux d'amélioration du régime des cours d'eau. — Les travaux jugés nécessaires pour régulariser le débit des grandes chutes (réservoirs, barrages, etc.) pourront être effectués par des associations syndicales libres ou autorisées, lorsque plusieurs usines occupent le lit du cours d'eau. Dans le cas d'associations autorisées, celles-ci auront le droit de réclamer une indemnité de plus-value aux propriétaires de terrains et usines ne faisant pas partie de l'association et ayant profité directement des améliorations apportées au régime du cours d'eau.

Le règlement d'administration publique, qui complètera la loi, vise : 1° les pièces à joindre à la demande en vue de la création d'une usine hydraulique privée dont les fondateurs estiment avoir besoin de pouvoirs de contrainte et de servitudes, ainsi que les règles à suivre pour constater

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le dépôt de la demande et en fixer la date, — un constat d'huissier pourrait remplacer le récépissé en cas de refus ; — 2° le mode de constatation de l'exécution des travaux dans le délai fixé à l'article 3 de la loi (*Autorisation donnée par décret en Conseil d'Etat. Pouvoirs de l'Administration dans cette autorisation. Usines privées*) et les formes dans lesquelles ce délai pourra être provoqué en cas de retard résultant de force majeure ; 3° le mode de notification et d'instruction des demandes en concurrence d'usines privées, les délais dans lesquels les modifications apportées aux demandes en cours d'instruction pourront être prises en considération pour l'exercice de droits de préférence ; 4° le mode de constatation de la prescription prévue aux derniers paragraphes de l'article 6 (*Réserves en faveur des entreprises d'utilité publique et réquisitions en faveur des services publics, délais, usines privées*) ; 5° les formes des enquêtes auxquelles serait soumise la modification de l'affectation de l'énergie des usines publiques par application de l'article 14 (*Raison d'être des usines déclarées d'utilité publique ; leur autonomie vis-à-vis des services publics et leur caractère mixte ; conditions de leur création*) ; 6° les formes dans lesquelles les intéressés seraient admis à faire valoir leurs titres aux indemnités prévues par l'article 17 (*Situation des riverains vis-à-vis de l'usine déclarée d'utilité publique*).

Ce règlement d'administration publique n'empêchera pas la rédaction d'un cahier des charges-type pour les concessions d'usines d'utilité publique autonomes, prévues à l'article 13 (*Forme et régime général de la concession imposée aux usines d'utilité publique autonomes*).

En résumé, le projet de loi que nous venons d'analyser laisse l'industriel libre d'user de l'ancien régime ou de recourir à la nouvelle législation, qui donne le pouvoir d'expropriation au concessionnaire de la chute.

Les usiniers qui voudront bénéficier des dispositions du régime proposé s'adresseront soit aux *usines privées* dites privilégiées, soit aux usines *d'utilité publique* ou autonomes.

Les services d'aqueducs et d'appuis de barrage sont analogues à ceux établis en faveur de l'agriculture (lois de 1845 et 1847). Enfin les industriels pourront imposer aux terres riveraines la submersion, dans certaines conditions provenant de la retenue du barrage.

La demande en permission d'établir une usine (usine privilégiée) n'est plus adressée au préfet, mais au Conseil d'État, et les usines d'utilité publique sont soumises aux formalités administratives de la concession.

Projet de loi ministériel du 12 juin 1906. — Le projet de loi que nous venons d'analyser a été repris à nouveau le 12 juin 1906 par le ministre de l'Agriculture, dans les mêmes termes et renvoyé à une commission spéciale. Le texte élaboré par cette commission n'apporte au projet de loi que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des modifications de détail qui ont fait l'objet d'un rapport déposé à la Chambre le 21 février 1908, que nous relatons ci-après.

Dans sa première rédaction, le projet du Gouvernement fixait à un cinquième la fraction des droits de riveraineté que le demandeur devait posséder ; elle est maintenant portée à un tiers, « sans tenir compte, pour le calcul de ce tiers, des parties appartenant au domaine public de l'État, des départements et des communes ».

Pour l'article 3, il est spécifié que le Conseil d'État statue comme bien fondé des oppositions. Article 4 : la nouvelle rédaction dit que la priorité serait accordée au demandeur qui justifierait « d'une fraction des droits appartenant aux riverains, plus importante que celle dont dispose aucun de ces riverains ».

Pour donner plus d'élasticité au texte de l'article 6 et permettre à l'Administration, au lieu d'exercer sa réquisition dans les conditions y stipulées, de conclure simplement avec l'industriel un contrat de fournitures d'énergie à des prix avantageux pour les services publics, le nouveau projet porte le paragraphe additif suivant : « L'Administration pourra renoncer à tout ou partie de son droit de réquisition moyennant la fourniture à prix réduit, *d'accord avec l'usinier*, de l'énergie nécessaire à des services publics. Les modifications au droit de réquisition et le traité de fourniture seront approuvés par un décret, rendu en Conseil d'État, sur le rapport du ministre de l'Agriculture et des ministres aux départements desquels ressortissent les services intéressés.

Remarquons que le législateur compte entourer l'exercice du droit de réquisition, accordé à l'Administration, de toutes sortes de précautions ; il est limité à dix ans et devra être autorisé « *par un décret motivé, rendu en Conseil d'Etat sur le rapport du ministre de l'Agriculture et des ministres aux départements desquels ressortissent les services intéressés* ». Il est entendu, ajoute le rapporteur, que le droit de réquisition ne s'étend pas aux machines à vapeur de secours installées par l'usinier pour subvenir aux défaillances possibles des machines hydroélectriques.

Les paragraphes 4, 5, 6, 7 de l'article 9 sont supprimés (les droits conférés par ces paragraphes étant inscrits dans la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie électrique) ; la nouvelle rédaction étend simplement à l'industriel d'une usine privilégiée le bénéfice des servitudes de l'article 12, paragraphe 3, de la loi de 1906.

Relativement à l'article 10, le nouveau projet stipule que le propriétaire des fonds grevés des servitudes d'aqueduc et d'appuis de barrage a le droit d'exiger de l'industriel l'achat des terrains submergés *quels qu'ils soient*. En outre il donne à l'industriel, pour les *canaux souterrains*, la même faculté que pour les canaux à ciel ouvert. A l'énumération de l'article 22, après l'État, les départements et les communes, la nouvelle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rédaction ajoute « les personnes qui pourraient être liées avec elles par un acte de concession ».

Dans sa conclusion, le rapporteur appelle l'attention de l'Administration sur deux points : 1° la tendance du Conseil d'État à déclasser des cours d'eau navigables, parce qu'on n'y pratique plus, en fait, ni la navigation ni le flottage, tendance dont les effets sont désastreux pour le domaine public ; 2° l'urgence qu'il y aurait pour les collectivités d'utiliser au plus tôt la faculté qui leur est donnée d'installer des usines publiques autonomes, afin de prévenir tout accaparement de l'énergie électrique et d'assurer, dès maintenant, aux services publics une part raisonnable des richesses hydrauliques renfermées dans les rivières non navigables, ni flottables. M. Lebrun, le rapporteur de la loi, préconise pour cela l'institution de commissions régionales où seraient représentés l'État, le service des Ponts et Chaussées, ceux de l'Hydraulique agricole et des Eaux et Forêts, les conseils généraux, les sociétés d'agriculture. Ces commissions instituées sur place veilleraient à assurer, dès que le besoin s'en ferait sentir, l'alimentation des services publics de la région (1).

256. Projet de loi sur les usines du domaine public. — La Chambre des députés, dans sa séance du 16 juillet 1909, a adopté la loi suivante :

TITRE Ier. — *Classification des usines.*

« ART. 1er. — Les usines hydrauliques, établies sur les cours d'eau et canaux du domaine public, se divisent en usines autorisées et en usines concédées.

« ART. 2. — Sont classées comme usines autorisées, les usines qui disposent d'une puissance brute en étiage d'au plus 200 kilowatts, et qui n'ont pas pour objet principal le commerce de l'énergie.

« Toutes les autres usines sont concédées. »

TITRE II. — *Usines autorisées.*

« ART. 3. — Les usines autorisées continuent à être régies par les lois

(1) Les Lois et décrets parus depuis cette époque sont les suivants :
Loi du 9 avril 1908 sur les cours d'eau non navigables.
Loi du 21 avril 1906 sur la protection des sites classés.
La circulaire ministérielle du 1er juin 1906 sur la police des rivières non navigables ni flottables.
La circulaire complémentaire du 1er mai 1907.
Le décret du 13 juillet 1906 sur les redevances pour les concessions et prises d'eau.
Loi du 8 avril 1910 fixant la détermination des cours d'eau du domaine fluvial.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et règlements actuellement en vigueur. Tout en restant essentiellement précaires et révocables, les autorisations qui constituent leur titre ne sont, en aucun cas, valables pour une durée supérieure à cinquante ans.

« A l'expiration de ce délai, si l'autorisation n'est pas renouvelée, le permissionnaire est tenu, au choix de l'Administration, soit de rétablir les lieux dans l'état primitif, soit d'abandonner à l'État, sans indemnité, ceux de ses ouvrages qui sont établis sur le domaine public fluvial.

« ART. 4. — En ce qui concerne les usines actuellement existantes, le délai de cinquante ans fixé à l'article précédent courra à partir de la promulgation de la présente loi.

« ART. 5. — Les usines autorisées peuvent être exceptionnellement admises à vendre au public leurs excédents d'énergie ou leurs résidus d'exploitation. Les conditions de l'autorisation sont déterminées dans chaque cas par un arrêté du ministre des Travaux publics. »

TITRE III. — *Usines concédées.*

« ART. 6. — La force motrice destinée à alimenter les usines concédées fait l'objet d'une durée déterminée avec cahier des charges conforme à un ou plusieurs types approuvés par décret rendu en Conseil d'État, sauf les dérogations ou modifications qui seraient expressément spécifiées dans l'acte de concession.

« La concession est accordée au nom de l'État par un décret rendu en forme de règlement d'administration publique. Une loi est nécessaire lorsque les travaux d'appropriation de la force comportent le détournement des eaux de leur lit naturel sur une longueur de 20 kilomètres, mesurée suivant ce lit, ou que la puissance brute dont l'usine pourra disposer à l'étiage dépassera 15.000 kilowatts.

« Les modifications apportées ultérieurement à l'emploi et à la répartition de la force hydraulique sont autorisées par décret rendu en Conseil d'État après enquête.

« Ces dispositions ne s'appliquent pas aux usines qui font partie intégrante d'entreprises déclarées d'utilité publique, et pour lesquelles un modèle de règlement spécial sera arrêté par décret rendu en Conseil d'État.

« ART. 7. — La concession investit le titulaire pour l'exécution des travaux définis au cahier des charges, et pour ces travaux seulement, de tous les droits que les lois et règlements confèrent à l'Administration en matière de travaux publics. Le concessionnaire demeure en même temps soumis à toutes les obligations qui dérivent pour l'Administration de ces lois et règlements.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« S'il y a lieu à expropriation, il y est procédé conformément à la loi du 3 mai 1841, au nom de l'État et aux frais du concessionnaire.

« ART. 8. — Les usines concédées ont le droit d'occuper les propriétés privées nécessaires à l'appui des ouvrages de retenue ainsi qu'à l'établissement des canaux souterrains d'adduction et de fuite, conformément aux dispositions des projets régulièrement approuvés par l'Administration.

« L'exercice de ces servitudes doit être précédé d'une notification directe aux intéressés et d'une enquête spéciale dans chacune des communes où doivent être établis les ouvrages précités.

« Les indemnités qui pourraient être dues de ce chef sont réglées en premier ressort par le tribunal civil ; s'il y a expertise, le tribunal peut ne nommer qu'un seul expert.

« ART. 9. — Le cahier des charges des usines concédées détermine notamment :

« 1° La destination de l'usine ;

« 2° La durée de la concession ;

« 3° Les ouvrages, terrains, bâtiments et engins de toute nature constituant les dépendances immobilières de la concession ;

« 4° Le règlement d'eau de l'usine et, en particulier, les mesures intéressant la navigation ou le flottage, la protection contre les inondations, la salubrité publique, l'alimentation des populations riveraines, les nécessités de l'irrigation, la conservation et la libre circulation du poisson, la protection des paysages ;

« 5° Le montant de la redevance due à l'État pour la prise d'eau et, s'il y a lieu, la contribution afférente à l'utilisation des ouvrages déjà établis par l'État dans l'intérêt de la navigation ou du flottage, ainsi que les autres conditions financières de la concession ;

« 6° Le montant du cautionnement ;

« 7° Les tarifs maxima à percevoir pour la vente au public de l'énergie ;

« 8° Les réserves en eau ou en force stipulées au profit des services publics, ainsi que les conditions auxquelles elles devront être mises à la disposition de ces services ;

« 9° Les conditions dans lesquelles devra pouvoir être exercé le rachat par l'autorité concédante ;

« 10° Et d'une manière générale les droits et obligations du concessionnaire, tant pendant la durée de la concession qu'à son expiration ;

« ART. 10. — Les ouvrages, terrains, bâtiments et engins de toute nature, déterminés au cahier des charges comme constituant les dépendances immobilières de la concession, font partie du domaine public ; ils sont assimilés aux ouvrages de la grande voirie, notamment au point de vue de la répression des contraventions. Les contraventions sont passibles d'une amende de 16 à 300 francs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« ART. 11. — Au moment où la concession prend fin, l'État entre gratuitement, et par le fait même, en possession des dépendances du domaine public telles qu'elles sont définies à l'article précédent.

« ART. 12. — Les usines qui font partie intégrante d'entreprises d'utilité publique, et les usines concédées qui n'ont pas pour objet principal le commerce de l'énergie, peuvent, à toute époque, vendre et employer leurs excédents d'énergie et leurs résidus d'exploitation aux conditions fixées par un décret rendu en Conseil d'État sur le rapport du ministre des Travaux publics.

« ART. 13. — Les usines actuellement existantes, qui ont été autorisées à titre précaire et révocable, et qui disposent d'une puissance brute en étiage supérieure à 200 kilowatts ou qui ont pour objet principal le commerce de l'énergie, seront, dans un délai de cinq ans, à partir de la promulgation de la présente loi, placées sous le régime des usines concédées.

« Toutefois, la concession leur sera toujours accordée par décret. »

TITRE IV. — *Dispositions générales.*

« ART. 14. — Les cours d'eau ou parties de cours d'eau, ainsi que les canaux du domaine public, auxquels s'applique la présente loi, sont :

« 1° Ceux qui figurent au tableau annexé à l'ordonnance du 10 juillet 1835, en tenant compte des modifications apportées à ce tableau par les décrets postérieurs de classement et de déclassement ;

« 2° Ceux qui sont entrés dans le domaine public à la suite de l'exécution de travaux déclarés d'utilité publique ou d'actes de rachat.

« Les cours d'eau, portions de cours d'eau et canaux ainsi définis, ne pourront être distraits du domaine public qu'en vertu d'une loi.

« Toutes actions en reconnaissance de droits acquis sur les cours d'eau compris au paragraphe 1 ci-dessus, devront, à peine de forclusion, être introduites dans le délai d'un an à partir de la promulgation de la présente loi.

« ART. 15. — Les redevances domaniales, à imposer aux usines autorisées, sont établies conformément à l'article 44 de la loi du 8 avril 1898 et aux règlements rendus ou à rendre en exécution de cet article. Ces règlements devront déterminer les conditions spéciales auxquelles seront fixées les redevances applicables aux usines établies sur les canaux du domaine public.

« ART. 16. — Des règlements d'administration rendus sur le rapport du ministre des Travaux publics détermineront :

« 1° Le modèle du règlement d'eau pour les usines autorisées ;

« 2° Le texte du cahier des charges type des usines concédées ;

« 3° La forme de l'instruction des projets et de leur approbation ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« 4° Les formes des différentes enquêtes relatives à l'autorisation ou à la concession des usines, à l'établissement des servitudes spéciales d'appui et de passage ;

« 5° L'organisation du contrôle des usines concédées, contrôle dont les frais sont à la charge des concessionnaires ;

« 6° Les conditions générales de mise en vente des excédents d'énergie et des résidus d'exploitation dans les cas prévus aux articles 5 et 12 ;

« 7° Et, en général, toutes les mesures nécessaires à l'application de la présente loi.

« ART. 17. — Les dispositions de la présente loi ne s'appliquent pas aux usines ayant une existence légale.

« ART. 18. — Sont abrogées toutes les dispositions de loi ou de règlement contraires à la présente loi. »

Le Sénat, dans sa séance du 20 novembre 1913, discutant le projet ci-avant, en seconde lecture a apporté les modifications ci-après :

Art. 6. — Une loi de concession est nécessaire dès que le détournement des eaux de leur lit naturel atteint une longueur de 10 kilomètres et que la puissance brute de l'usine à l'étiage, dépasse 5.000 kilowatts.

Art. 8. — En cas d'expertise, il y est procédé conformément aux articles 303, 304 et 305 du code de procédure civile.

Art. 11. — Dans les cinq ans qui précèdent l'expiration de la concession, il peut être procédé, par décret rendu en Conseil d'État, à l'institution d'une concession nouvelle. Le concessionnaire actuel a un droit de préférence à conditions équivalentes. Si, deux ans avant l'expiration, aucune concession nouvelle n'a été instituée, l'État peut accorder la prorogation de la concession pour une nouvelle durée de dix ans.

Art. 14. — Deux ou plusieurs départements ou communes pourront être demandeurs pour une exploitation en commun, soit entre départements, soit entre communes, soit entre départements et communes.

Art. 16. — A toute époque, une contribution peut être réclamée dans les formes déterminées par la loi du 16 septembre 1807 aux usines autorisées ou concédées tant pour l'établissement que pour l'entretien des barrages ou autres ouvrages établis ou à établir et dont les dites usines retireraient un avantage.

Dérivation à l'étranger de l'énergie électrique. — Le projet de loi voté par le Sénat, mais non encore promulgué, analysé dans le paragraphe ci-avant, a, par son article 17, inséré la clause du transport de l'énergie électrique à l'étranger. Cet article 17 spécifie que « la dérivation à l'étranger de l'énergie électrique produite en France par des usines hydrauliques établies sur les cours d'eau appartenant au domaine public est interdite sous réserve des traités internationaux. Par exception, un décret rendu en Conseil d'État pourra autoriser pour une durée de vingt ans au maximum, mais renouvelable, le transport de la force électrique à l'étranger ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

257. Loi de finances du 28 septembre 1916 (1). — Elle autorise la participation de l'État à l'établissement sur les cours d'eau des deux catégories d'usines hydrauliques appelées à vendre de l'énergie et devant faire l'objet d'une concession de travaux publics par application de la loi du 27 juillet 1910 (art. 13 de la loi de finances). Cette disposition a été complétée par l'article 4 de la loi du 29 juin 1917 indiquant la participation de l'État à toute création d'usine intéressant la défense nationale.

258. Projet de loi sur les cours d'eau navigables et non navigables (juillet 1917). — Il a pour but l'utilisation de l'énergie des cours d'eau, la distinction entre les rivières navigables et flottables et celles qui n'ont pas ces caractères perd ici non seulement son caractère mais devient une gêne. L'exploitation de l'énergie des cours d'eau domaniaux est d'ailleurs contrariée par les principes mêmes qui dominent l'administration du domaine public, que l'on caractérise par les expressions suggestives : *instabilité* et *perpétuité* des entreprises.

L'exploitation de l'énergie des rivières non domaniales se heurte à des questions de droit d'usage des eaux qui ont trop souvent fait le jeu de spéculations parfois stériles et malsaines, préjudiciables pour les exploitants et l'intérêt général.

La nouvelle législation envisage les dispositions permettant d'une part de porter remède aux inconvénients que nous venons de signaler et d'autre part d'assurer la mise en valeur de l'énergie des eaux dans les conditions techniques et économiques les plus conformes à l'intérêt général.

Son but est d'instituer un régime complet d'aménagement et d'exploitation des forces hydrauliques. Ce n'est plus d'après l'importance et la nature juridique des cours d'eau que le rôle de l'autorité publique est déterminée, c'est d'après l'importance et la destination de la force aménagée. Au point de vue du régime, la loi établit l'unité de direction, quelle que soit la nature du cours d'eau, par la création d'un service nouveau avec à sa tête un sous-secrétaire d'État spécial rattaché à la présidence du Conseil des ministres (1).

---

(1) Pour les usines intéressant la Défense nationale, la guerre a permis l'application d'une réglementation nouvelle concernant les réquisitions et la simplification des formalités d'occupation des propriétés privées pour l'exécution des travaux déclarés d'utilité publique avec urgence (loi du 28 mai 1915) commentée par la circulaire du Ministre de la Guerre, du 4 mai 1916.

Le Ministre de l'armement et des munitions a été chargé par le décret du 22 décembre 1916 de l'aménagement et de l'utilisation des forces hydrauliques des cours d'eau non navigables, ni flottables. Un service spécial, chargé d'assurer l'exécution du décret, a été rattaché à l'organisation générale de la production.

L'administration de l'hydraulique agricole de laquelle dépendent les cours d'eau non navigables, continua à relever du ministre de l'agriculture. Le service de la navigation et de l'entretien des rivières domaniales reste intégralement sous la direction du ministre des travaux publics.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les dispositions principales de la nouvelle loi sont les suivantes :

a) Toute utilisation de l'énergie hydraulique est désormais subordonnée à une intervention de la puissance publique. Sous le régime actuel, les concessions ou autorisations accordées par l'administration sur les dépendances du domaine public ne comportent aucun transport puisque la domanialité publique est exclusive de tous droits réels. La concession d'exploitation de la force hydraulique, l'autorisation, désormais nécessaire d'utiliser l'énergie de tout cours d'eau, doivent conserver ou revêtir le caractère d'actes d'autorité qui appartient présentement aux concessions de prises d'eau, aux concessions de permis de ch s e, etc. ;

b) Les conditions de concession ou d'autorisation sont différentes suivant l'importance de l'énergie aménagée ; suivant l'objet, le régime de la concession s'applique à toutes les entreprises qui ont pour but le fonctionnement des services publics ; suivant la force aménagée il s'applique aux entreprises dont la puissance dépasse 500 kilowatts. Toutes les autres entreprises restent soumises au régime de l'autorisation. Les concessions sont stipulées au nom de l'État, comme le sont aujourd'hui les conditions imposées en retour des permissions des concessions d'occupation du domaine public. Dans l'octroi des autorisations aussi bien que des concessions, il sera tenu compte des plans généraux d'aménagement par vallée et par bassin. Il a semblé ainsi indispensable de prévoir et d'organiser conformément à des plans d'ensemble l'exploitation générale des forces hydrauliques, par un examen comparatif des besoins de l'agriculture, des services publics et des entreprises ind strielles et cela à l'effet d'éviter le gaspillage et le mauvais emploi des forces hydrauliques qui se peuvent tirer d'une vallée ou même d'une région.

c) Les concessions seules, à raison de leur importance ou de leur objet, bénéficient d'un ensemble de prérogatives ordinairement réservées aux travaux publics, et dont la plupart sont étendues à l'exploitation minière par la loi de 1910. Des servitudes administratives spéciales sont instituées en faveur des concessionnaires, elles leur procureront le plus souvent toutes les facilités nécessaires à l'installation de leurs usines.

Le recours à l'expropriation n'est cependant accordé qu'après déclaration d'utilité publique, laquelle n'aurait raison d'être accordée que si l'intérêt économique de la nation le justifie. Donc la loi consacre ce principe, qu'il est d'intérêt national que l'énergie des chutes d'eau soit mise en valeur au même titre que les minéraux que le sol renferme.

La loi tient compte d'une manière complète des usages antérieurs que les riverains ont pu faire des droits que le code civil leur accorde sur les rivières non navigables. Les droits non exercés sont eux-mêmes pris en considération. Cette clause est l'équivalence de la redevance tréfoncière des mines. La redevance de riveraineté des chutes variera suivant la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mesure dans laquelle les riverains conserveront la faculté d'irriguer leurs propriétés, si le cahier des charges, exige, à cet effet, le maintien dans le cours d'eau d'un débit suffisant.

En outre des indemnités aux voisins pour les droits qui peuvent être lésés et du paiement d'une redevance de riveraineté, le concessionnaire d'énergie hydraulique est tenu de payer une redevance fiscale proportionnelle à la force utilisée (droit de statistique) et une redevance contractuelle déterminée par un cahier des charges (1). Cette dernière varie suivant l'usage qui doit être fait de l'énergie aménagée. S'il s'agit d'entreprises ayant pour objet le commerce de la force, l'État participera directement aux bénéfices ; s'il s'agit d'entreprises qui utilisent elles-mêmes la force aménagée, la participation aux bénéfices est remplacée par une stipulation de redevance proportionnelle au nombre de kilowatts-heures produits. Les redevances des deux types peuvent d'ailleurs se cumuler.

Les modalités diverses dont les redevances sont susceptibles, leur progressité, leur revision périodique, les sanctions contre l'inobservation des conventions et des règlements, et d'une manière générale, tous les détails des clauses et conditions à insérer dans les actes de concession font l'objet de commentaires particuliers dans la rédaction des articles. L'État se réserve, en tout temps, le droit de rachat à charge d'indemnité compensatrice ; ce en vue de ménager les intérêts supérieurs des collectivités nationales, départementales ou communales.

d) Les redevances contractuelles seront déterminées en tenant compte des fournitures d'eau et d'énergie en nature qui seront exigées au profit, soit des services publics de l'État, des départements ou des communes, soit des associations syndicales ou des collectivités agricoles. Les réserves en énergie n'offriront pas moins d'intérêt en assurant le développement des irrigations et assainissements par voie de pompages ainsi que celui des multiples emplois de l'électricité en agriculture ;

e) Le régime de l'autorisation, applicable aux exploitations de faible importance, non destinées à l'alimentation des services publics, quand il s'appliquera aux eaux domaniales, ne diffère de l'État antérieur que de ce que la durée est limitée à soixante-quinze ans, d'ailleurs renouvelable et de ce que la taxe de statistique lui est applicable sans préjudice des redevances actuellement existantes.

Lorsque le régime d'autorisation vise les cours d'eau non navigables, les autorisations d'exploitation s'ajoutent aux règlements d'eau ; elles

(1) Les industriels feront ainsi l'économie des frais considérables que leur occasionnaient les exigences abusives des riverains, qui prenaient en effet pour base des indemnités à réclamer non pas le préjudice qu'ils subissaient par le fait des installations empiétant sur leur domaine, mais le profit que les industriels escomptaient de ces installations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont temporaires et taxées comme les précédentes ; elles restent soumises aux conditions de suppression prévues par la loi du 8 avril 1908 sur le régime des eaux.

f) Les dispositions transitoires destinées à assurer, sans créer de choquantes inégalités, le respect des situations acquises ont en la matière, une très grande importance. Elles conserveront leur effet pendant de nombreuses années.

Ainsi le patrimoine des exploitants aura le caractère d'un droit temporaire ressemblant moins à la propriété qu'à l'emphytéose au terme convenu, soixante-quinze ans ; les installations hydrauliques feront retour à l'État qui pourra, soit les concéder ou les autoriser à nouveau, soit les exploiter directement par les moyens de la régie simple ou intéressée, soit en exiger la suppression s'il s'agit de simple autorisation.

En ce qui concerne les entreprises existantes, on conserve la perpétuité pour les exploitations d'importance très réduite, qui ne dépassent pas 50 kilowatts, et pour les chutes supérieures à 50 kilowatts, à quelque catégorie qu'elles appartiennent, la perpétuité est abolie. Mais on les maintient pendant soixante-quinze ans sous le régime actuel, échappant ainsi à toute redevance, sauf le droit de statistique, et à l'expiration de ce terme, les installations hydrauliques de ces entreprises deviennent la propriété de l'État moyennant une indemnité qui ne pourra dépasser le quart de leur valeur.

259. Décret du Ministre des Travaux publics et des Transports réformant l'ordonnance du 13 février 1834 et le décret du 1er août 1905 (Octobre 1917). — Depuis 1914, l'établissement d'usines hydrauliques destinées à assurer le fonctionnement des services publics sur les cours d'eau du domaine public peut, en vertu d'une jurisprudence acceptée par le Conseil d'État, donner lieu à concession de travaux publics. Le décret susvisé a pour but de réduire au minimum toutes les formalités relatives à l'instruction des demandes d'établissement d'usines hydrauliques sur les cours d'eau domaniaux et d'imposer à tous les degrés des délais pour l'étude et la solution des affaires de ce genre.

Art. 2. — Les demandes d'établissement d'usines hydroélectriques sur les fleuves et rivières du domaine public doivent être adressées au Ministre des Travaux publics et des Transports.

Art. 4. — Cet article donne l'énumération des plans, mémoires descriptifs, devis, tarifs maximum de la vente de l'énergie électrique devant accompagner la demande.

Art. 5. — Dans les huit jours qui suivent l'enregistrement de la demande le ministre transmet celle-ci à l'ingénieur en chef des forces hydrauliques dans le ou les départements intéressés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Art. 6. — L'ingénieur en chef fait connaître son avis motivé au ministre, qui décide s'il y a lieu de suivre ou d'abandonner.

Art. 7. — Si le ministre décide de suivre l'affaire, le demandeur est invité par l'ingénieur en chef à fournir les dossiers nécessaires aux conférences avec les services intéressés et aux enquêtes, et s'il y a lieu, les dessins des installations à établir sur le domaine public. Le pétitionnaire a un délai de deux mois pour faire le nécessaire.

Les services intéressés (1) doivent faire connaître leurs observations au plus tard dans le mois qui suit la clôture de l'enquête. L'ingénieur en chef envoie au ministre des Travaux publics et des Transports ses propositions motivant la prise en considération et la mise à l'enquête.

Art. 8. — Le ministre susvisé décide, s'il y a lieu, la mise à l'enquête.

Art. 9. — Le préfet après entente avec l'ingénieur en chef fixe la date de l'ouverture de l'enquête et en nomme les membres. Cet arrêté est affiché dans toutes les communes riveraines du cours d'eau, depuis la limite du remous jusqu'à l'extrémité aval du canal de fuite.

Art. 10. — La Commission d'enquête comporte trois membres au moins et sept au plus, choisis parmi les principaux agriculteurs et industriels de la région.

Art. 11. — Huit jours au plus tard après la date de l'ouverture de l'enquête, l'ingénieur en chef fait procéder à la visite des lieux. Il doit être préalablement fait la publicité nécessaire par les soins des maires des communes.

Art. 12. — L'ingénieur procède à la visite des lieux en présence des maires ou de leurs représentants et des intéressés ou de leurs mandataires, et il dresse procès-verbal de ladite visite.

Art. 13. — Le projet, ainsi que les registres destinés à recevoir les observations auxquelles peut donner lieu l'entreprise projetée, restent déposés pendant quinze jours à la mairie de chaque commune.

Art. 14. — Dans les dix jours qui suivent l'expiration du délai de quinze jours ci-dessus fixé, la Commission d'enquête se réunit sur la convocation du préfet. Elle donne son avis et procès-verbal en est dressé. Huit jours après la clôture de ce procès-verbal le Président adresse le dossier au préfet qui le transmet immédiatement à l'ingénieur en chef.

Art. 15. — Les conseils généraux des départements où la prise est faite doivent donner leur avis dans le délai de un mois à compter du jour où ils auront été consultés. Les procès-verbaux des communes intéressées par le projet doivent être adressés au préfet dans le délai de un mois à dater de

(1) Services de la navigation et des inondations hydrauliques, des améliorations agricoles et pastorales, des forêts et de la pêche, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la communication du dossier, faute de quoi, la ou les communes seront considérées comme acquiesçantes au projet présenté.

Art. 17. — Dans le délai de deux mois, à compter de la clôture de l'enquête, l'ingénieur en chef transmet au préfet le dossier avec son rapport.

Art. 18. — Dans le délai de huit jours, le préfet transmet le dossier au ministre des Travaux publics et des Transports avec son avis.

Art. 19. — Après consultation du Conseil supérieur des Travaux publics et l'avis du ministre des Finances, la déclaration d'utilité publique est prononcée, et s'il y a lieu, la concession accordée par une loi, s'il s'agit de travaux visés au premier alinéa de l'article 1er de la loi du 27 juillet 1870, ou par un décret rendu en conseil d'État, si les travaux projetés rentrent dans la catégorie de ceux qui sont visés au deuxième alinéa de l'article 1er de ladite loi.

Art. 20. — Les demandes concernant les travaux désignés aux articles 41 et 43 de la loi du 8 avril 1898 qui ne rentreraient pas dans la catégorie des grands travaux publics visés par l'article 1er de la loi du 27 juillet 1870 sont adressées au préfet qui en informe dans un délai de huit jours le ministre des Travaux publics et des Transports. Elles sont établies conformément aux articles 3 et 4 du présent décret. Et le préfet, dans la huitaine, transmet la demande à l'ingénieur en chef des forces hydrauliques. Celui-ci transmet immédiatement la demande à l'ingénieur ordinaire, qui ouvre, s'il y a lieu, les conférences avec les services intéressés et procède dans le mois qui suit, à la visite des lieux, comme il est dit aux articles 11 et 12 du présent décret. Les communes ont un mois, à compter de la communication qui leur a été faite, pour le renvoi des pièces au préfet. Un mois au plus après la visite des lieux, les ingénieurs closent les conférences avec les services intéressés et huit jours au plus après la clôture des conférences, l'ingénieur ordinaire adresse à l'ingénieur en chef son rapport. Si celui-ci est favorable, l'ingénieur ordinaire y joint un projet de règlement. Dans le délai de huit jours, l'ingénieur en chef transmet au préfet et huit jours après, au plus tard, le préfet envoie le dossier au ministre des Travaux publics et des Transports, avec son avis.

Le ministre des Travaux publics et des Transports, après avoir consulté le Conseil supérieur des Travaux publics et sur l'avis du ministre des Finances, adresse le dossier au Conseil d'État. L'autorisation est accordée par décret, conformément à l'article 43 de la loi du 8 avril 1898.

II. — LÉGISLATIONS ÉTRANGÈRES

260. — Dans ces dernières années, il s'est dessiné un mouvement assez intense chez toutes les nations depuis que l'on s'est aperçu de la valeur incomparable des forces hydrauliques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On sent une mainmise de plus en plus accentuée par les États sur ces richesses nouvelles. Le monopole d'État apparaît en certains cas, mais son vrai rôle consiste plutôt dans son droit d'intensifier la mise en valeur des chutes d'eau soit pour ses services publics, soit pour l'industrie privée, et empêcher le gaspillage et le monopole entre les mains de certains groupes privés.

Législation anglaise. — L'Angleterre a gardé le principe traditionnel de propriété privée à tous les cours d'eau au delà du point atteint par le flux et le reflux de la marée. L'eau courante, quoique réputée *publici juris*, est susceptible d'appropriations individuelles par l'effet d'une occupation actuelle. Tout riverain a le droit de tirer parti du cours d'eau, soit que les deux rives lui appartiennent, soit qu'elles appartiennent à des propriétaires différents. Le *waler course* autorise son titulaire à détourner une partie de l'eau pour irriguer ses propriétés ou actionner une usine.

La Couronne n'a des droits que sur les cours d'eau navigables recouverts et baignés par le flot et sur les estuaires et bras de mer. Sur les autres cours d'eau, il peut y avoir, outre les droits précités, un droit de navigation au profit du public, provenant d'un usage immémorial ou d'un acte du Parlement.

L'État n'a pratiquement rien fait pour réglementer l'appropriation des cours d'eau en vue de l'utilisation de la force hydraulique et les atteintes aux droits acquis des propriétaires riverains.

Législation autrichienne. — Loi d'Empire du 30 mai 1869 et diverses autres lois qui l'ont suivie. Les eaux soumises au domaine public s'étendent à toutes les eaux courantes.

Ce n'est qu'exceptionnellement que les droits privés sont reconnus. Dans ce cas, le riverain peut détourner l'eau d'un cours d'eau, à condition de la rendre à son lit primitif ; il doit respecter le droit similaire des autres usagers et tenir compte des considérations d'ordre public en vertu desquelles l'eau est indispensable. L'expropriation pour cause d'industrie privée est inscrite dans la loi.

Au point de vue du choix du concessionnaire, entre plusieurs projets en concurrence, la préférence est donnée à celui le plus important au point de vue économique. La durée de la concession est de soixante ans pour les particuliers et quatre-vingt-dix ans pour l'État, les provinces ou les communes avec facilité de renouvellement.

Législation italienne. — La rapidité avec laquelle l'industrie des hautes chutes d'eau s'est développée en Italie s'explique par le manque de combustible minéral : en effet, tandis que ce pays en consomme aujourd'hui pour plus de 6 millions de tonnes par an, il n'en produit guère plus de 30.000 tonnes, et elle doit exporter annuellement 150 millions de francs en numéraire pour combler ce déficit. D'autre part, l'État est venu en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aide à la jeune industrie en faisant voter la loi vraiment providentielle qui oblige les propriétaires d'un terrain découvert à laisser les conduites électriques le traverser et qui détermine la procédure à suivre pour s'accorder sur les indemnités à payer.

En Italie, les cours d'eau font partie du domaine public. Les Royales Constitutions, le Code Albertin de 1838 et le Code civil italien de 1865 ont successivement consacré ce principe. L'article 598 italien établit le droit d'aqueduc sur les propriétés des tiers pour les usages agricoles et industriels. L'indemnité de base est la valeur réelle augmentée de un cinquième. La loi du 10 août 1884 établit le *canone* (redevance) et la durée des concessions, qui sont d'ailleurs renouvelables indéfiniment. Le décret-règlement du 26 novembre 1893 attribue la concession par préférence au premier demandeur, sauf le cas d'intérêt public.

Le projet de loi relatif aux dérivations d'eau présenté le 6 mars 1907 au Sénat dispose dans son article 2 que le Gouvernement peut, sur l'avis favorable de la commission centrale permanente chargée d'examiner les concessions d'eau, se réserver tout cours d'eau pour une durée maximum de quinze années. Cette réserve suspend les demandes émanées des particuliers, mais elle ne fait pas obstacle à la concession de dérivation si le concessionnaire s'oblige à fournir au prix courant l'énergie nécessaire aux services, en faveur desquels l'État avait réservé son droit.

Des concessions perpétuelles peuvent être accordées par une loi et les concessions temporaires le sont par décret royal ou par arrêté préfectoral. Cette dernière n'excède pas trente ans avec droit de renouvellement.

Les fleuves et torrents font partie du domaine public et le Code civil n'accorde un droit d'usage que sur les eaux courantes non comprises dans cette désignation. Les listes d'eaux publiques dressées en vertu de la loi du 10 août 1884, du règlement du 26 novembre 1893 et la loi du 25 juillet 1904 y classent non seulement les fleuves et torrents, mais les affluents directs qui leur apportent une notable contribution d'eau.

La part de la propriété riveraine se trouve fort restreinte. La procédure est réglée par décrets royaux du 11 juin 1899 et 28 janvier 1909 créant une commission chargée de l'examen préventif des demandes de dérivation d'eau et une commission pour les réserves hydrauliques dans l'intérêt des chemins de fer.

La loi du 12 juillet 1908 augmente la durée de concession. La loi du 7 juin 1894 réglemente le transport de force.

Législation suisse. — Sauf quatre cantons (Glaris, Zoug, Neuchâtel et Bâle-Ville) les autres admettent en faveur de l'État la présomption de propriété des cours d'eau et quelques-uns même lui attribuent toutes les forces hydrauliques. Les quatre cantons ci-avant admettent plus ou moins au profit des riverains la propriété des cours d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La loi Bernoise admet la concession à durée illimitée en faveur des communes ou en faveur des sociétés dont les parts sont exclusivement possédées par l'État ou les communes. Dans les autres cas, la durée est de cinquante ans avec deux renouvellements de vingt-cinq ans. La loi fédérale fixe à quatre-vingts années la durée de concession.

La loi fédérale suisse du 22 décembre 1916 assure la prépondérance de l'intérêt général sur les intérêts privés dans l'aménagement des forces hydrauliques.

Elle témoigne d'une tendance marquée, selon M. G. Tochon, à la centralisation de tous les services s'occupant des eaux et à la mise à la disposition de la collectivité des réserves d'énergie contenues dans les rivières et les torrents. L'autorité détient le droit de contrôle et de réglementation pour la meilleure utilisation des forces hydrauliques.

Au point de vue spécial de l'électrification des chemins de fer, il est déterminé des réserves auxquelles il n'est autorisé de toucher qu'à des conditions précaires et révocables. Le ministre dispose en toute autorité des forces hydrauliques.

Pour les dérivations d'eau et d'énergie électrique à l'étranger, la loi reconnaît le principe d'une indemnité au profit de la collectivité du lieu de la dérivation. Parmi les demandeurs en concession, on choisit les projets qui servent le mieux l'intérêt public en même temps que la meilleure utilisation des cours d'eau. L'usinier ne peut être dépossédé de sa concession que pour motif d'utilité publique et moyennant indemnité. La redevance annuelle et les taxes ne peuvent excéder au total 3 francs par cheval théorique.

La loi institue un Conseil supérieur qui connaît de l'étude de chaque affaire et dont l'intervention a un rôle des plus prépondérants.

L'article 1er pose le principe général : la Confédération exerce la haute surveillance sur l'utilisation des forces hydrauliques des cours d'eau publics ou privés.

Le Conseil fédéral édicte les dispositions propres à assurer et développer l'utilisation des forces hydrauliques. La Confédération a donc le droit de contrôle et de réglementation sur les cours d'eau qui résulte de la teneur de l'article 5. Pour les sections de cours d'eau touchant à la frontière nationale, il est créé un régime spécial ; c'est à la Confédération qu'il appartient de constituer les droits d'utilisation ou d'autoriser la communauté qui en dispose à les mettre en valeur elle-même.

Le Conseil fédéral peut décréter la régularisation du niveau et de l'écoulement des lacs ainsi que la création de bassins d'accumulation, en répartissant d'office la dépense entre la Confédération et les divers cantons. Toute cette réglementation s'applique aux cours d'eau publics. Pour les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cours d'eau privés, la Confédération accorde l'expropriation de la force si le canton s'y oppose et d'une manière générale la Confédération exerce vis-à vis des cours d'eau privés le même droit de réglementation que vis-à vis des cours d'eau publics.

L'autorité compétente pour accorder la concession est celle qui a le droit de disposer de la force hydraulique (Canton ou Confédération) ; il ne peut y avoir dépossession, sauf pour cause d'utilité publique et moyennant indemnité.

La redevance annuelle et les taxes ne peuvent excéder, au total, 6 francs par cheval théorique. La durée de la concession ne peut excéder quatre-vingt-cinq ans ; elle peut être renouvelable, avec ou sans retour à fin de concession.

La Suisse a complété sa législation par une loi destinée à protéger ses forces hydrauliques contre leur exportation à l'étranger, sous forme d'énergie électrique, qui, comme l'on sait, peut se transporter à des distances considérables.

L'article 1er stipule que toute dérivation à l'étranger d'énergie électrique ne peut avoir lieu sans l'autorisation du Conseil fédéral ; l'article 3 explique que cette autorisation ne peut d'ailleurs être donnée que si la force hydraulique visée n'a pas son emploi en Suisse, et la durée de la concession ne peut excéder vingt-six ans. Enfin, le Conseil fédéral a le droit, à tout instant, de retirer ladite autorisation moyennant indemnité, et c'est le tribunal fédéral qui juge les contestations dans le cas de discussion de la valeur de l'indemnité.

Législation allemande. — Chez cette nation, il existe deux catégories de pays : ceux où domine le principe de propriété des eaux qui sont les plus nombreux et les plus importants et ceux où domine le principe de publicité. Ce dernier déclare eaux publiques (où il n'existe aucun droit privé) les eaux de tous les cours d'eau dignes de ce nom. Le tréfonds appartient jusqu'à la ligne médiane au propriétaire de la rive, lequel a le droit d'en user comme il veut. Mais il ne peut faire usage de l'eau que dans la mesure où il ne porte aucun préjudice au droit similaire des riverains inférieurs. L'État exerce un contrôle dans l'intérêt commun des usagers, et les contestations qui peuvent surgir ressortissent en général à la juridiction administrative. L'autorité de police peut interdire dans l'intérêt des autres riverains toute utilisation qui n'est pas légalement justifiée.

L'établissement des usines hydrauliques est soumis à la formalité de la concession, accordée par l'autorité compétente.

Législation portugaise. — Le propriétaire d'un fonds traversé par l'eau courante a le droit de modifier ou de déplacer le lit au plafond du cours d'eau, à la condition de ne pas nuire aux propriétés situées en amont et de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne pas changer en aval le point de sortie de l'eau non employée. Chaque riverain a le droit d'user de l'eau pour une quantité proportionnelle à l'étendue et aux besoins de ses propriétés.

Législation norvégienne. — Un projet de loi gouvernemental qui est actuellement en discussion tend d'une manière générale à empêcher les capitalistes étrangers de s'approprier, dans une mesure par trop grande, des forces naturelles du pays.

Aux termes de la loi du 4 août 1911, les concessions d'eau sont accordées pour quarante ans au moins et quatre-vingts ans au plus. Ce laps de temps expiré, la propriété concédée fait retour à l'État. Le droit de retour porte également sur l'usine centrale et avec son outillage et ses accessoires. Les concessions sont accordées par décret royal, et l'autorisation du storting doit être obtenue s'il s'agit de grandes régularisations ou de gros intérêts opposés en jeu. Elles sont données de préférence aux syndicats de propriétaires de chutes d'eau. Elles comportent le droit d'expropriation.

La loi du 18 septembre 1909 fixe que, sans l'agrément du ministère compétent, le concessionnaire ne pourra passer aucun contrat ayant pour objet la majoration artificielle des prix de vente de l'énergie électrique dans le pays, et il ne pourra non plus vendre du courant à un pays étranger. Le concessionnaire devra s'engager à fournir, le cas échéant, à la municipalité intéressée, 5 0/0 de l'énergie qu'il produira.

Législation suédoise. — Tout riverain a le droit de s'approprier l'eau qui se trouve sur son fonds, d'y établir une usine, à la condition de ne pas nuire à autrui. La loi autorise l'appui de barrage, avec indemnité, ainsi que le droit d'usage du barrage pour le riverain qui souffre la servitude sans l'utiliser. Si un barrage menace une propriété d'inondation ou de manque d'eau dans des conditions telles que le dommage qui en résulte n'est pas comparable à l'utilité des ouvrages qui le produisent, ces ouvrages peuvent être construits moyennant une indemnité de la pleine valeur de la propriété et de moitié en sus. Certaines rivières sont soumises à un droit public sur une partie de leur largeur pour la navigation, le flottage et le passage des poissons. Le droit des riverains comme stipulé ci-avant serait appelé à être modifié et à être remplacé par des dispositions spéciales destinées à sauvegarder l'intérêt public. Un projet de loi à l'étude aurait pour but d'accorder à l'Administration le droit de réunir en un seul établissement une série de chutes, appartenant à plusieurs propriétaires, lorsqu'il y aurait un intérêt économique justifié à décider cette réunion.

Les fleuves sont propriété du domaine public. Les utilisations spéciales doivent être l'objet d'une autorisation ou concession administrative sans préjudice des droits des tiers et sous réserve des droits des particuliers. Les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

autorisations sont sujettes à expropriation forcée pour cause d'utilité publique.

La concession comprend celle des terrains du domaine public nécessaire pour l'établissement des travaux de captation, des canaux et aqueducs.

La loi de 1900 sur les installations électriques a créé la servitude de passage pour les lignes aériennes pour le transport de l'énergie électrique.

Législation espagnole. — Loi du 13 juin 1879. Le riverain a le droit d'utiliser les eaux des rivières qui coulent sur son fonds, mais l'excédent de ces eaux rentre dans le domaine public, et alors leur usage est soumis au régime de concession perpétuelle.

Législation russe. — Les riverains jouissent des cours d'eau de manière à ne pas se nuire les uns les autres. La loi n'exige pas l'appui de barrage. Tout propriétaire peut exiger de ses voisins, placés en aval, que, par des constructions ou barrages, ils n'élèvent pas le niveau de l'eau au point d'inonder ses terres ou d'arrêter son usine.

Législation danoise. — Les riverains peuvent se servir de l'eau courante pour l'irrigation, à condition de rendre l'eau à son cours naturel sans passer chez autrui. Chacun d'eux a droit à la moitié de l'eau. Mais l'Administration peut modifier cette proportion du consentement du propriétaire opposé et autoriser cet usage au profit d'autres propriétaires que les riverains. Le droit d'appui de barrage sur la rive opposée peut être demandé à l'Administration. Toutes les questions de droit sont du domaine des tribunaux.

Les utilisations spéciales doivent être l'objet d'une autorisation ou concession administrative sans préjudice des droits des tiers et sous réserve des droits des particuliers. Les autorisations sont sujettes à expropriation forcée pour cause d'utilité publique. La concession comprend celle des terrains du domaine public nécessaire pour l'établissement des travaux de captation des canaux et des aqueducs.

La loi de 1900 sur les installations électriques a créé la servitude de passage pour les lignes aériennes pour le transport de l'énergie électrique.

Loi hongroise. — La loi du 23 juin 1885 dispose que la rive et le lit des eaux sont la propriété des riverains pour tous les cours d'eau, navigables et flottables ou non. Les riverains ont le droit d'usage sur l'eau ; mais, pour le mettre à profit, ils doivent en obtenir la concession de l'Administration.

Législation bavaroise. — Les rivières servant à la navigation ou au flottage sont la propriété publique de l'État. Les autres sont des eaux privées placées en principe sous le régime de la propriété des riverains. La loi du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

13 août 1910 admet un droit d'expropriation pour les non-propriétaires en vue de certains buts d'utilité publique. L'article 157 admet qu'un cours d'eau privé non utilisé par les ayants droit, après mise en demeure avec délai déterminé, revient propriété publique.

Législation prussienne. — La loi de 1913 maintient l'idée de propriété des riverains sur les cours d'eau de deuxième et troisième ordre, mais elle admet en même temps que l'État peut donner sur ces cours d'eau des concessions en vue de l'utilisation des forces hydrauliques, tout en ménageant autant que possible tous les droits existants. Les cours d'eau du premier ordre sont les cours d'eau navigables, qui appartiennent à l'État ; les cours de deuxième ordre, ce sont les cours d'eau non navigables présentant de l'intérêt au point de vue des forces hydrauliques ; les cours d'eau de troisième ordre sont ceux qui ne sont pas classés dans les deux premières catégories ; sur ces deux dernières catégories, la propriété appartient en principe aux riverains.

La concession peut être donnée sans que l'entreprise ait à poursuivre un but d'utilité publique. De préférence la concession est donnée aux projets présentant le plus d'intérêt au point de vue de l'utilité publique et économique.

Législation du grand-duché de Bade. — Même législation que pour la Bavière, mais en attribuant aux communes la propriété des cours d'eau naturels non publics.

Législation canadienne. — L'article 400 du Code civil canadien reproduit les dispositions de l'article 538 du Code civil français, rangeant dans le domaine public les rivières navigables ou flottables. Pour les autres rivières, les riverains ont la propriété du lit et des berges et le droit à l'usage des eaux. Partout où est admis un droit de riveraineté, ce système exclut toute concession et toute limitation de durée de droits.

Ce système a cela d'avantageux qu'il peut écarter l'arbitraire administratif sur les points où il paraîtrait dangereux et ainsi donner à l'industrie privée la sécurité, la stabilité dont elle a besoin.

Législation des Etats-Unis. — L'approbation du Congrès fédéral (États de l'est) est réservée pour tout établissement à faire dans le lit des cours d'eau navigables. Dans les états de l'ouest, c'est, en général, le droit de concession qui a prévalu.

Les concessions sont à durée fixe.

Législation de l'Etat de Californie. — Les lois du 8 avril 1911 et du 2 juin 1912 (1) régissent la matière. L'État concède toute utilisation d'eau

(1) Le système de concession aux États-Unis a arrêté d'une façon très fâcheuse le développement des forces hydrauliques sur les cours d'eau susceptibles de concession, comme n'offrant pas à l'industrie la stabilité pour les capitaux considérables nécessaires à la création des grandes usines hydrauliques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont on n'a pas encore pris possession sous les systèmes antérieurs. Le concessionnaire doit respecter les installations existantes et indemniser les riverains n'ayant pas fait usage de leurs droits.

La durée des concessions est de quarante années.

Législation badoise. — Même législation que la Prusse. Dans les actes de concessions, il est stipulé des restrictions en faveur de l'agriculture, de la navigation, du flottage et de la pêche.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XV

ÉTUDES D'USINES

AVANT-PROJETS D'USINES HYDROÉLECTRIQUES

261. Rôle des usines hydroélectriques dans la Défense Nationale. — L'utilisation des chutes d'eau pour la Défense Nationale, en présence des besoins énormes des services d'approvisionnement des armées, en munitions notamment, a apporté à l'industrie de guerre un appoint tel qu'elle a pu balancer le manque de charbon qui provenait de nos charbonnages du Nord occupés par l'ennemi et nos importations de houille westphalienne.

Toute l'énergie disponible dans nos usines hydroélectriques, en dehors des besoins d'énergie des services publics et des fabrications indispensables à la vie nationale, a été absorbée. En outre des usines se sont considérablement agrandies et il s'en est créé de toutes pièces.

Certaines usines ont transformé leur équipement en vue de la fabrication de produits réclamés par l'administration de la guerre.

D'autres ont utilisé directement la pression provenant des chutes pour l'actionnement de puissantes presses faisant l'emboutissage des obus.

Un plan de mise en valeur de chutes d'eau dans les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central élaboré et mis à exécution a porté sur une puissance de 50.000 à 60.000 chevaux maximum.

Certaines installations qui avaient été interrompues pendant la guerre, ont été reprises et le gouvernement est venu puissamment en aide aux industriels non seulement en leur facilitant l'approvisionnement des matériaux dont ils avaient besoin, de la main-d'œuvre de prisonniers de guerre, mais encore en mettant à leur disposition les ressources pécuniaires nécessaires sous forme d'avances remboursables par annuités après la cessation des hostilités.

On peut dire aujourd'hui que la plupart de nos gros torrents ont été mobilisés pour la Défense de la Patrie. Maintenant que la victoire a terrassé nos ennemis, nos torrents vont reporter leur activité dévorante

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du temps de guerre soit à continuer la fabrication d'engins de guerre destinée à rendre plus forte que jamais la France avertie, soit à continuer les fabrications de temps de paix pour lesquelles elles étaient créées, soit à alimenter de nouvelles industries suggérées par l'esprit de la victoire économique, de façon à donner, par l'union de toutes les forces, une vitalité formidable à une nouvelle France pour la porter à des destinées de prospérité insoupçonnées sans la guerre.

Naturellement le four électrique devait jouer un rôle considérable dans nos fabrications de guerre, qui comme l'on sait est surtout utilisé dans les usines hydroélectriques ; ainsi l'armement de guerre a fait appel à nos gîtes de houille blanche pour donner naissance à la production des projectiles sans charbon.

A l'usine d'Auzat (§ 410) on a transformé complètement l'équipement du temps d'avant-guerre en vue de l'obtention de produits explosifs chlorates.

L'usine de Soulom (§ 394) a disposé de ses 10.500 chevaux de puissance pour l'alimentation d'une usine de produits chimiques fabriquant de l'acide nitrique synthétique.

La préparation de la fonte par la réduction électrique des minerais est d'une application courante à l'usine hydroélectrique de Livet (§ 349). On utilise des fours de 4.500 chevaux avec récupération de la chaleur des gaz.

La préparation du fer électrolytique permet déjà de fabriquer des tuyaux et des tôles qui se traduisent par une résistance élevée, un allongement considérable et une grande perméabilité. L'électrométallurgie a multiplié ses fabrications d'aciers de ferro-alliages, de l'aluminium, du magnésium et l'électrochimie a donné lieu à des découvertes nouvelles du plus haut intérêt. Le sodium est fabriqué maintenant en partant du chlorure de sodium ; l'hydrolithe est tiré du calcium ; la préparation des persulfates d'ammonium, des chromates, de la céruse, des ferro-cyanures, du potassium, du phosphore, des sels de baryte a fait dans toutes ces branches de la chimie d'importants progrès. La potasse électrolytique, les permanganates, les oxydes de zinc peuvent se préparer facilement avec un emploi rationnel des basses températures.

Le procédé Keller de fontes synthétiques qui a permis d'obtenir, par fusion électrique recarburante et épuratrice des tournures d'acier, la fonte peu carburée extra-résistante, nécessaire à la fabrication des projectiles, a été utilisé en grand par l'administration de la Guerre. Sous cette impulsion, l'usine hydroélectrique de Livet sur la Romanche (§ 349) s'est agrandie d'une façon remarquable, car la puissance totale de cette usine atteint maintenant près de 35.000 chevaux.

La Compagnie des Forges et Aciéries électriques Paul Girod avec ses sept usines, dont l'usine principale est à Ugine, par suite de sa con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tribution à la fabrication des engins de guerre, a porté le chiffre de la puissance de ses usines à 45.000 chevaux. Les quatre usines hydroélectriques de Venthon et de Queige sur le Doron de Beaufort, de Bionnay et de Saint-Gervais sur le Bonnant ont leur énergie électrique concentrée à l'usine de Ugine au moyen de lignes à haute tension.

L'usine de ferro-alliages comporte 20 tours électriques Girod et elle alimente de ses produits les aciéries françaises et un nombre important d'aciéries des pays alliés. L'ancienne installation a été considérablement agrandie avec la création de la Compagnie des Forges et Aciéries électriques Paul Girod, par l'établissement de laminoirs, de forges, d'ateliers

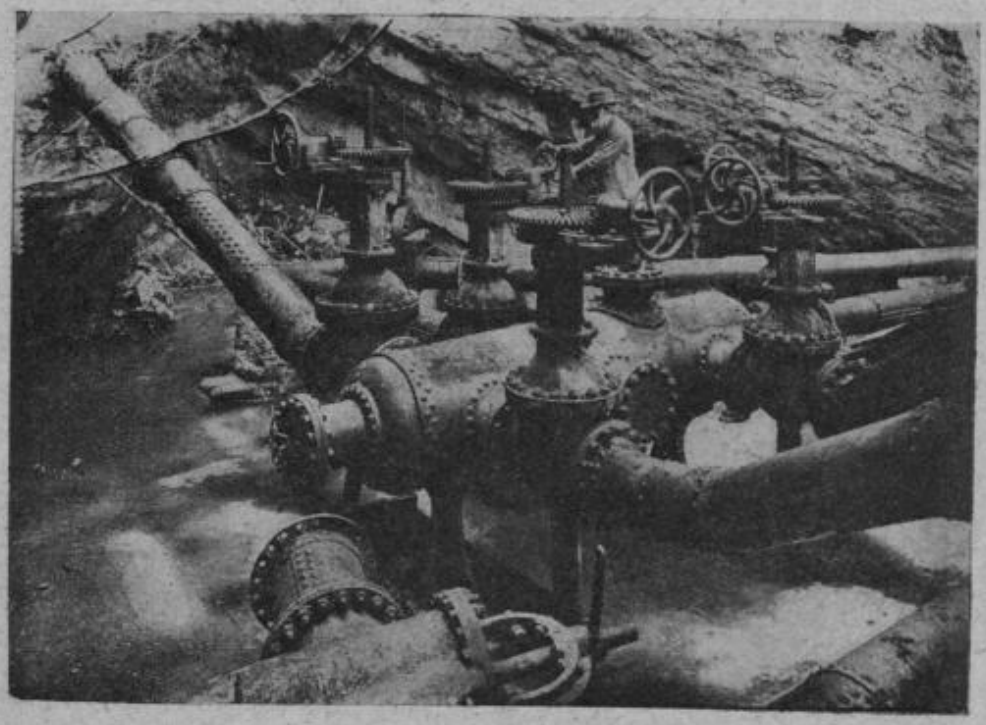


FIG. 721. — Usines de Lancey. Canalisations de haute pression.

d'usinage, de traitements thermiques, de moulages d'acier et d'importants ateliers de fabrication d'obus de guerre. Dans cette nouvelle partie de l'aciérie, huit fours à acier pouvant fournir des coulées de 25 tonnes fonctionnent nuit et jour. Les diverses fabrications ont été développées au point d'atteindre un tonnage journalier décuple de celui d'avant-guerre, et les installations nouvelles se poursuivent encore.

De plus il a été créé à Épierre (Savoie) un atelier spécial pour l'emboutissage d'obus de petits calibres.

Près de 5.000 ouvriers ou ouvrières sont maintenant occupés dans les établissements Paul Girod, dont la fondation ne remonte pas à moins de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dix ans. On peut dire qu'ils occupent le premier rang en France dans l'électrosidérurgie.

Les usines de Lancey, avec le concours des aciéries et forges de Firminy (*fig.* 716 à 722), ont créé de toutes pièces des ateliers métallurgiques employant près de 10.000 ouvriers à la fabrication des obus de guerre

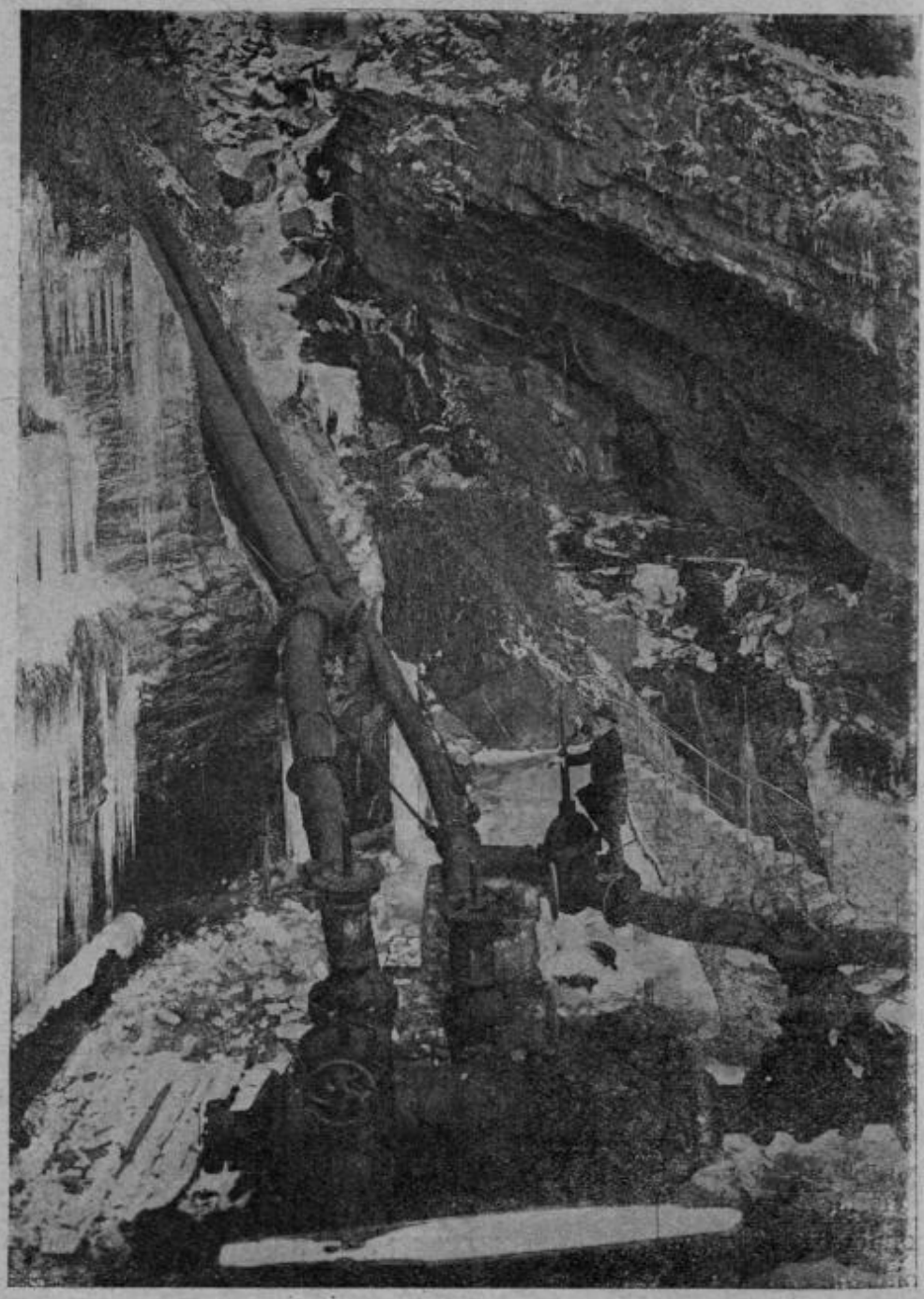


FIG. 722. — Usines de Lancey. Arrivée à l'usine des canalisations à haute pression.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de divers calibres. L'eau sous-pression de 50 kilogrammes agit directe-

FIG. 723. — Entrepôt d'aciers, Usines Bergès.

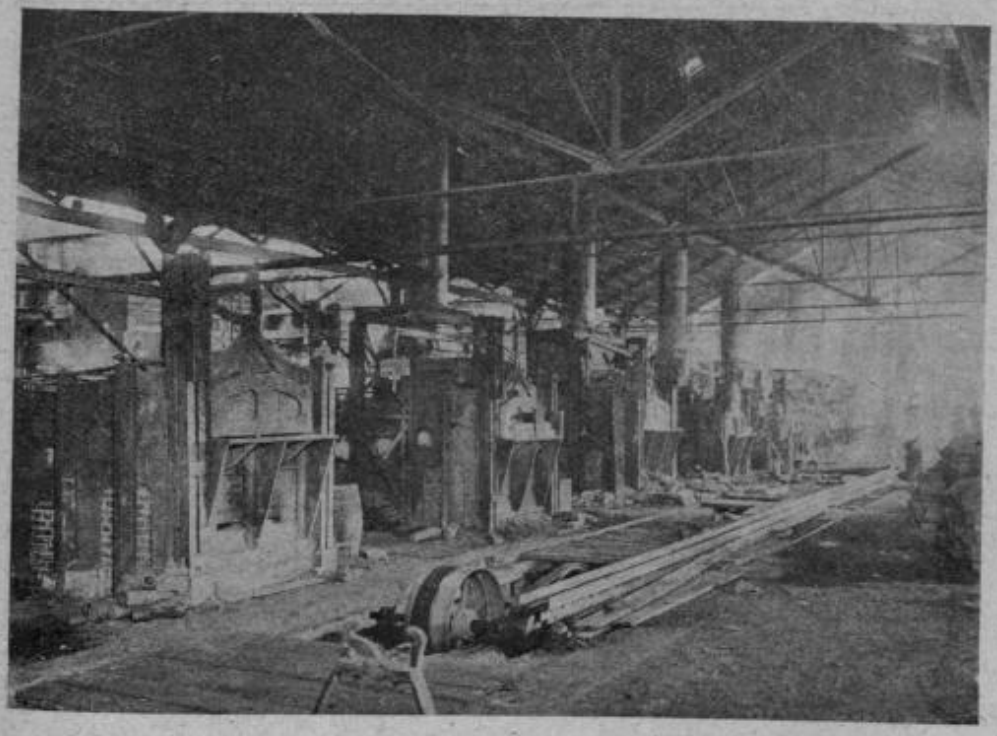


FIG. 724. — Batterie de fours à réchauffer.

ment sur des presses hydrauliques verticales de 1.000 tonnes. A cet effet

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une nouvelle installation thermique à vapeur de 2.500 chevaux a été

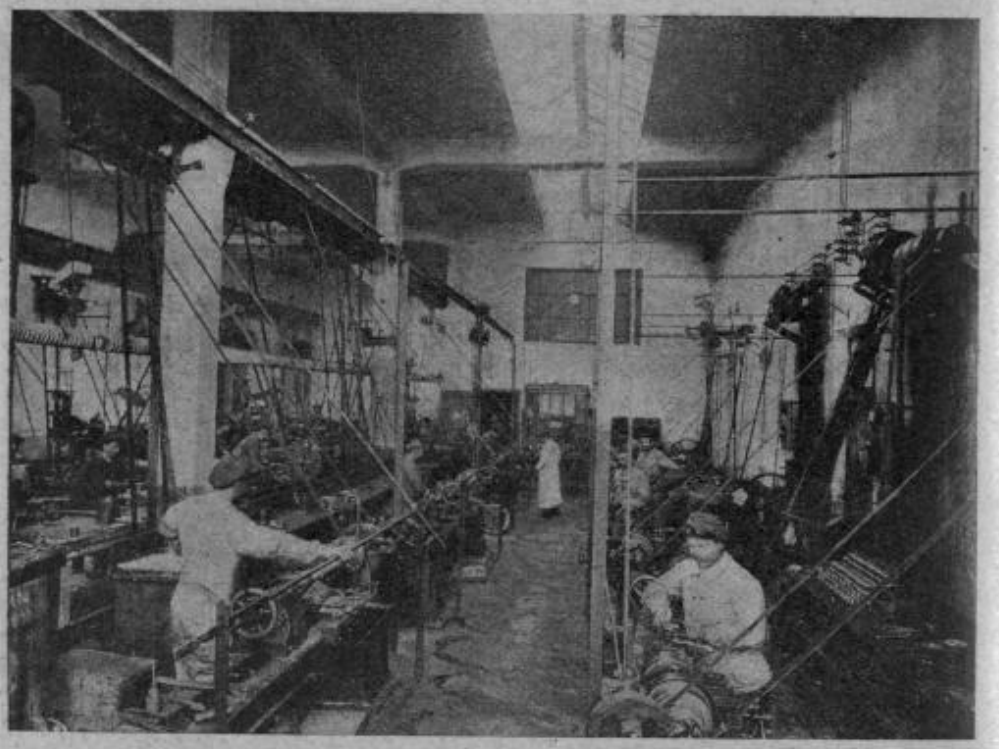


FIG. 725. — Atelier d'outillage.

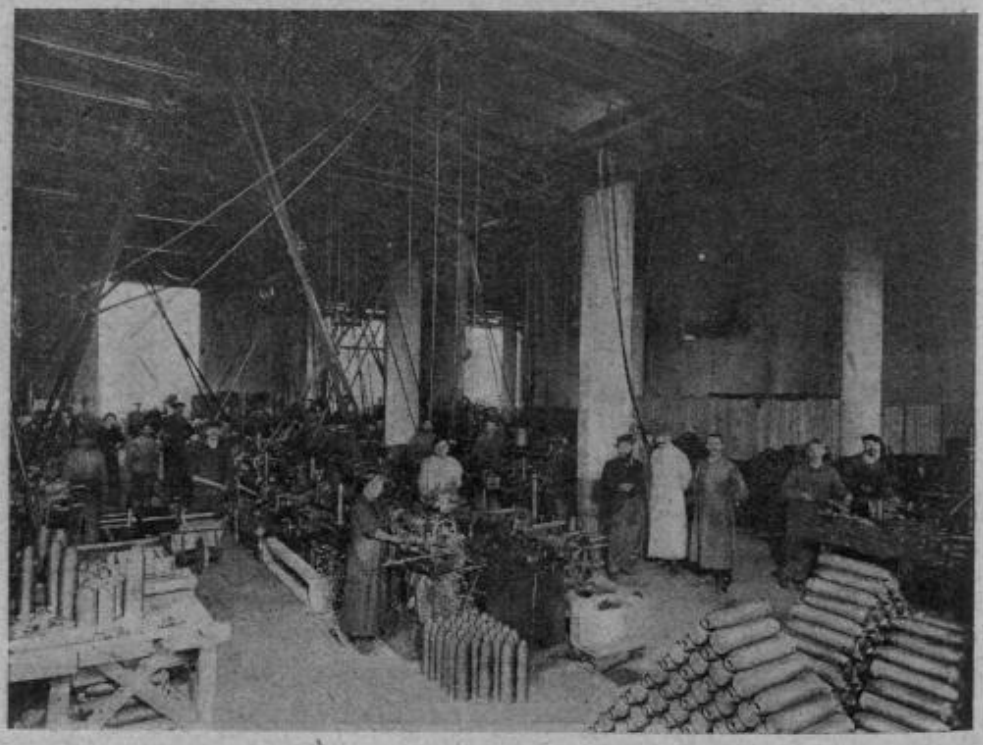


FIG. 726. — Tours de finition des obus.

adjointe à l'usine hydroélectrique. L'usine électro-métallurgique de Bri-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gnoud, en collaboration aussi avec les aciéries et forges de Firminy, a pris un important développement ; le nombre de fours est actuellement de 14, et la puissance de l'usine qui était de 6.000 chevaux avant

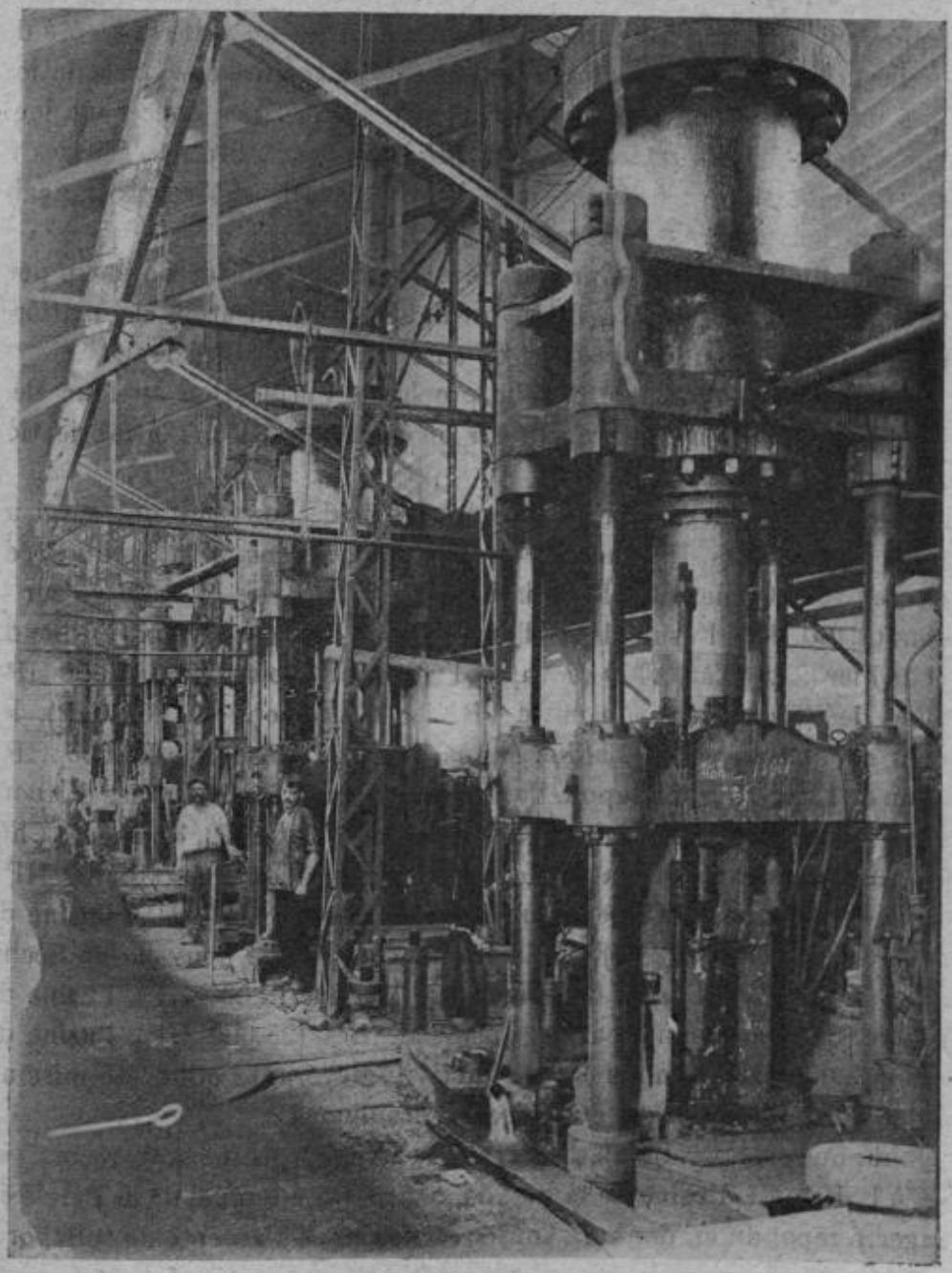


Fig. 727. — Fabrication des obus. Ateliers des presses verticales (Usines Bergès).

guerre a été portée à 14.000 chevaux. Une usine modèle de blanchiment de coton pour le service des poudres a été créée de toutes pièces ; la production journalière de coton à nitrer est de plus de 12 tonnes. Cet établissement occupe 1.300 ouvriers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le pays noir du bassin houiller de Saint-Étienne, où l'on compte tant d'établissements métallurgiques, les aciéries de Saint-Chamond qui y occupent la première place ont porté, sous le coup de fouet de la guerre, au paroxysme leur production. Notre fameux canon de 400, dont l'obus est plus puissant que celui du 420 allemand, règne en maître, à côté des tourelles, des blindages et autres produits de cette grandiose installation.

Les usines hydroélectriques du centre ont contribué avec tous leurs éléments eux-mêmes intensifiés à la prodigieuse vitalité des aciéries de Saint-Chamond, dont presque toute l'activité de la sidérurgie française dépend de cette grande entreprise.

La métallurgie du zinc a pris un développement considérable. On peut traiter les minerais sans grillage préalable et l'utilisation de matières peu riches avec le minimum strict de charbon (usine d'Epierre).

Des essais ont démontré comme prochaine l'utilisation au four électrique des minerais de cuivre sulfurés ou oxydés, ainsi que la fabrication du nickel par l'électrolyse.

Des usines inachevées ont été terminées et de nouvelles ont surgi un peu de toutes parts. L'usine de Fond de France, dans la vallée du Bréda avec ses 10.000 chevaux, les usines du Cartillard, de la Ferrière sur le Bréda (4.400 HP), l'usine d'Arvillard avec ses 11.000 chevaux, l'usine du Val de Fier (25.000 à 30.000 chevaux), l'usine de la Goule Noire (5.000 HP), l'usine de l'Escancière, l'usine de Rivier d'Allemont (15.000 HP), les usines de Fontan et du Largue sur la Durance (ensemble 20.000 HP), l'usine de Lance, sur le Lignon, l'usine de Chevenoz sur la Dranse d'Abondance, l'usine de Tencin dans le Grésivaudan (3.000 HP), l'usine de Château Arnoux, sur la Durance (25.000 HP), l'usine du Poet (15.000 HP), l'usine de Beaumont-Monteux sur la Basse Isère (28.500 HP), l'usine de Pont-de-Claix (10.000 HP) sur la Romanche, l'usine nouvelle de Séchilienne (3.000 HP), l'usine d'Avrieux sur Modane (8.000 HP), l'usine de Truyère, dans le massif central, l'usine de Bès (25.000 HP), l'usine de Sélune (2.000 HP) témoignent de l'activité dévorante qui a été mise au service du développement des forces hydrauliques.

Qu'il nous soit permis d'adresser notre salut respectueux et reconnaissant à la Femme d'usine de la grande guerre qui, à l'appel de la Patrie en danger, a répondu en donnant toutes ses forces et a accepté de collaborer à des travaux si rudes pour ses bras fragiles. Plus de 1 million de femmes françaises de toutes les conditions sociales ont ainsi compris la nécessité du travail à l'arrière du front de bataille, en transformant la sublime devise « Vaincre ou Mourir » en celle qui pouvait plus efficacement s'appliquer à leur ardent désir de sauver la vie de la Nation « Travailler ou Mourir ». En cette guerre, qui a tout transformé, qui a vu tant de bouleversements, de changements dans les idées et les conceptions, le spec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tacle de la femme au travail du fer restera comme un des plus extraordinaires et des plus consolants. L'humanité, reconnaissante du grand nombre de vies combattantes qu'elles ont protégées, inscrira la gloire immortelle qu'elles se sont acquise.

Il est à prévoir que les nouvelles installations verront, au moins pendant quelque temps, leurs frais d'aménagement croître en raison de l'augmentation du loyer de l'argent et du coût de la main-d'œuvre. Mais, étant donnés les hauts prix qu'atteignent et qu'atteindront les charbons, l'énergie hydraulique continuera, comme par le passé, à être la moins coûteuse.

Déjà certains établissements industriels importants, qui, jusqu'ici, ne consommaient que de la houille ont commencé à utiliser les chutes d'eau en montagne. Ainsi en ont fait les aciéries de Firminy en utilisant l'énergie électrique de l'usine de Riouperoux sur la Romanche. Cette puissante firme se propose en outre d'édifier une importante usine hydroélectrique dans le Massif Central.

La Société métallurgique ds Pamiers dispose d'une contribution dépassant 10.000 chevaux répartie en sept usines hydroélectriques installées sur des affluents ds l'Ariège. La Société métallurgique de Peñarroya crée d'importantes usines hydroélectriques, entre autres celle de Saint-Lary en cours d'installation.

Puis ne verrons-nous pas nombre d'industries du Nord et de l'Est, qui devront être réédifiées, s'installer dans les Alpes et les Pyrénées, en raison des avantages qu'elles pourront y trouver.

I. — ÉTUDE D'UNE USINE HYDROÉLECTRIQUE AVEC TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Chute nette : 150 mètres. — Puissance installée : 14.000 HP.
Tension : 30.000 volts.

I. — Aménagements hydrauliques.

262. *Bases du projet.* — La rivière à aménager en vue de la création de l'usine hydraulique est d'allure torrentielle.

Nous prévoyons donc une réserve d'eau pour parer aux époques de faiblesse de débit. En outre, pour assurer une régularisation plus sûre et augmenter en même temps le rendement économique de l'installation, il est adjoint à l'usine hydraulique une réserve thermique à vapeur.

Le transport de force électrique s'étendant à une distance de 70 kilomètres de l'usine génératrice, la tension adoptée est de 30.000 volts en courant triphasé.

Débit du cours d'eau. — Les hauteurs de pluie du bassin versant qui a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une superficie de 32.000 hectares, donnent une moyenne (pour l'année) de 0,630. En prenant 0,50 pour le coefficient d'absorption annuel (chiffre moyen), on obtient pour le débit de la rivière :

$$0{,}630 \times 320.000.000 \times 0{,}50 = 100.000.000 \text{ mètres cubes en nombre rond.}$$

Par suite le débit moyen peut être estimé à :

$$\frac{100.000.000}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 3{,}16 \text{ mètres cubes à la seconde.}$$

Quant au débit minimum, on peut le fixer comme suit en adoptant le chiffre de 5 litres par kilomètre carré, alors on a :

$$300 \times 5 = 1.500 \text{ litres à la seconde.}$$

Le débit en temps de crue peut atteindre 170 mètres cubes, soit 54 fois le débit moyen.

Nous supposons une rivière, pour nous mettre dans le cas le plus général, non encore étudiée par le Service des Grandes Forces hydrauliques, où à défaut on peut consulter les données recueillies par le Service des Ponts et Chaussées.

Nous admettrons donc que l'on aura relevé à très peu près des chiffres concordants avec ceux que nous venons d'indiquer.

En outre, nous estimons qu'il convient de procéder à un contrôle à

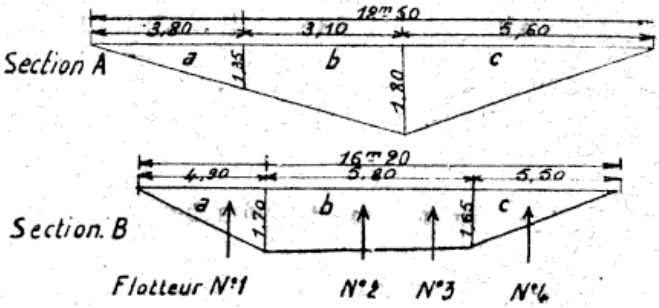


FIG. 728.

l'aide de jaugeages effectués, par exemple au moyen de flotteurs de surface, en opérant dans deux sections de la rivière.

Soient (*fig.* 728) ces deux sections. On a relevé par exemple les vitesses suivantes :

Flotteur n° 1 = 0m,32 ; flotteur n° 2 = 0m,34 et flotteur n° 3 = 0m,40.

Les vitesses à adopter étant les 0,8 des vitesses à la surface, on aura : flotteur n° 1 = 0m,25 ; flotteur n° 2 = 0m,27 ; flotteur n° 3 = 0m,32.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les débits seront par suite respectivement, dans les deux sections, ceux-ci après :

SECTION A :

$a = 2{,}56 \times 0{,}25 = 0^{m3},640$
$b = 5{,}04 \times 0{,}27 = 1^{m3},360$ } $3^{m3},780$
$c = 5{,}58 \times 0{,}32 = 1^{m3},780$

SECTION B :

$a = 4{,}16 \times 0{,}25 = 1^{m3},040$
$b = 4{,}53 \times 0{,}27 = 1^{m3},220$ } $5^{m3},415$
$c = 9{,}86 \times 0{,}32 = 3^{m3},155$

Moyenne :

$$\frac{3{,}780 + 5.415}{2} = 4^{m3},597$$

L'opération du jaugeage étant supposée faite en période de gros débit (mois de novembre), le chiffre de $3^{m3},160$ peut donc être considéré comme bon.

Comme il nous est indispensable, pour pouvoir évaluer la capacité de la réserve de la retenue, de connaître les débits mensuels, à défaut de renseignements administratifs, on peut les évaluer comme suit, d'après les hauteurs moyennes de pluie mensuelles et les coefficients d'absorption correspondant à chacun de ces mois, selon le tableau ci-après :

MOIS	HAUTEUR DE PLUIE moyenne	COEFFICIENT D'ABSORPTION	DÉBITS MOYENS en mètres cubes par seconde	DÉBITS MENSUELS en mètres cubes	OBSERVATION
Janvier	21 m/m	0,65	1,69	4.370.000	
Février	33	0,65	2,65	6.850.000	
Mars	48	0,50	2,96	7.650.000	
Avril	64	0,50	3,96	10.230.000	
Mai	67	0,50	4,15	10.700.000	
Juin	67	0,20	1,66	4.300.000	
Juillet	55	0,20	1,36	3.500.000	
Août	65	0,20	1,61	4.200.000	
Septembre	35	0,65	2,80	7.250.000	
Octobre	74	0,65	5,90	15.200.000	
Novembre	56	0,65	4,597	11.923.000	
Décembre	46	0,65	3,701	9.600.000	
	629	Moyen 0,50	Moyenne 3,160		

263. *Capacité du réservoir de retenue.* — La hauteur de chute brute que nous pouvons déterminer au moyen d'un canal d'amenée de 9 kilomètres de longueur est de 154 mètres. La perte due par le fait de ce dernier auquel nous donnons une pente de 0,0005 par mètre est de $4^m,50$. Il reste donc disponible $149^m,50$. Si nous nous fixons une puissance de 14.000 chevaux de 11 heures, utilisables toute l'année avant les turbines, le débit nécessaire pour assurer une telle puissance est :

$$Q = \frac{14.000 \times 75}{149{,}50 \times 1.000} = 7 \text{ mètres cubes par seconde en nombre rond.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite, pour 27 jours par mois de 11 heures et pour 14.000 HP, la quantité d'eau à débiter mensuellement est :

$$7 \times 3.600 \times 27 \times 11 = 7.485.000 \text{ mètres cubes.}$$

Nous prévoyons une installation thermique de 3.000 HP effectifs à utiliser en ligne et fonctionnant 3 à 4 mois de l'année ; son équivalent en eau a pour valeur :

$$\frac{7.485.000 \times 3.000 \times 100}{14.000 \times 80} = 2.000.000 \text{ mètres cubes en nombre rond.}$$

Nous avons à compenser le manque d'eau de certains mois par le jeu de la réserve d'eau emmagasinée et quand celle-ci sera insuffisante nous pourrons faire appel à l'usine de secours à vapeur.

Le tableau suivant montre la régulation ainsi obtenue :

MOIS	DÉBIT de LA RIVIÈRE en mètres cubes	DÉBIT à ASSURER en mètres cubes	SIGNE DE L'ÉCHANGE	EAU FOURNIE par LE RÉSERVOIR en mètres cubes	EAU RESTANT au RÉSERVOIR en mètres cubes	OBSERVATION
Janvier	4.370.000	7.485.000	+	3.115.000	4.185.000	
Février	6.850.000	»	+	635.000	3.550.000	
Mars	7.650.000	»	+	165.000	3.715.000	
Avril	10.230.000	»	—	2.745.000	6.460.000	
Mai	10.700.000	»	—	3.215.000	7.300.000	Le canal de décharge agit.
Juin	4.300.000	»	+	1.860.000	5.875.000	
			+	1.325.000		Fournie par usine à vapeur
Juillet	3.500.000	»	+	1.860.000	3.750.000	
			+	2.125.000		*idem*
Août	4.200.000	»	+	1.860.000	2.325.000	
			+	1.425.000		*idem*
Septembre	7.250.000	»	+	235.000	2.090.000	
Octobre	15.200.000	»	—	7.715.000	7.300.000	Le canal de décharge agit.
Novembre	11.923.000	»	—	4.438.000	7.300.000	
Décembre	9.600.000	»	—	2.115.000	7.300.000	

Comme le montre le tableau, le réservoir ne descend jamais au-dessous de 2.090.000 mètres cubes environ ; or en mettant la prise d'eau à 15 mètres au-dessous du seuil, la quantité d'eau laissée est de 2.628.500 mètres cubes.

La (*fig.* 729) représente les profils en travers n^{os} 0, 1, 2, 3, 4 et 5 pris le long du bassin de retenue, le profil n° 0 étant celui correspondant à l'emplacement du barrage.

Les superficies respectives de ces profils sont les suivantes :

Profil n° 0 = 5.005 mètres cubes ; profil n° 1 = 5.810 mètres cubes ; profil n° 2 = 2.880 mètres cubes ; profil n° 3 = 910 mètres cubes ; profil n° 4 = 975 mètres cubes ; profil n° 5 = 534 mètres cubes et profil n° 6 = 164 mètres cubes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si nous portons en abscisses des longueurs représentant les distances entre les dits profils et en ordonnées les superficies de ces mêmes profils

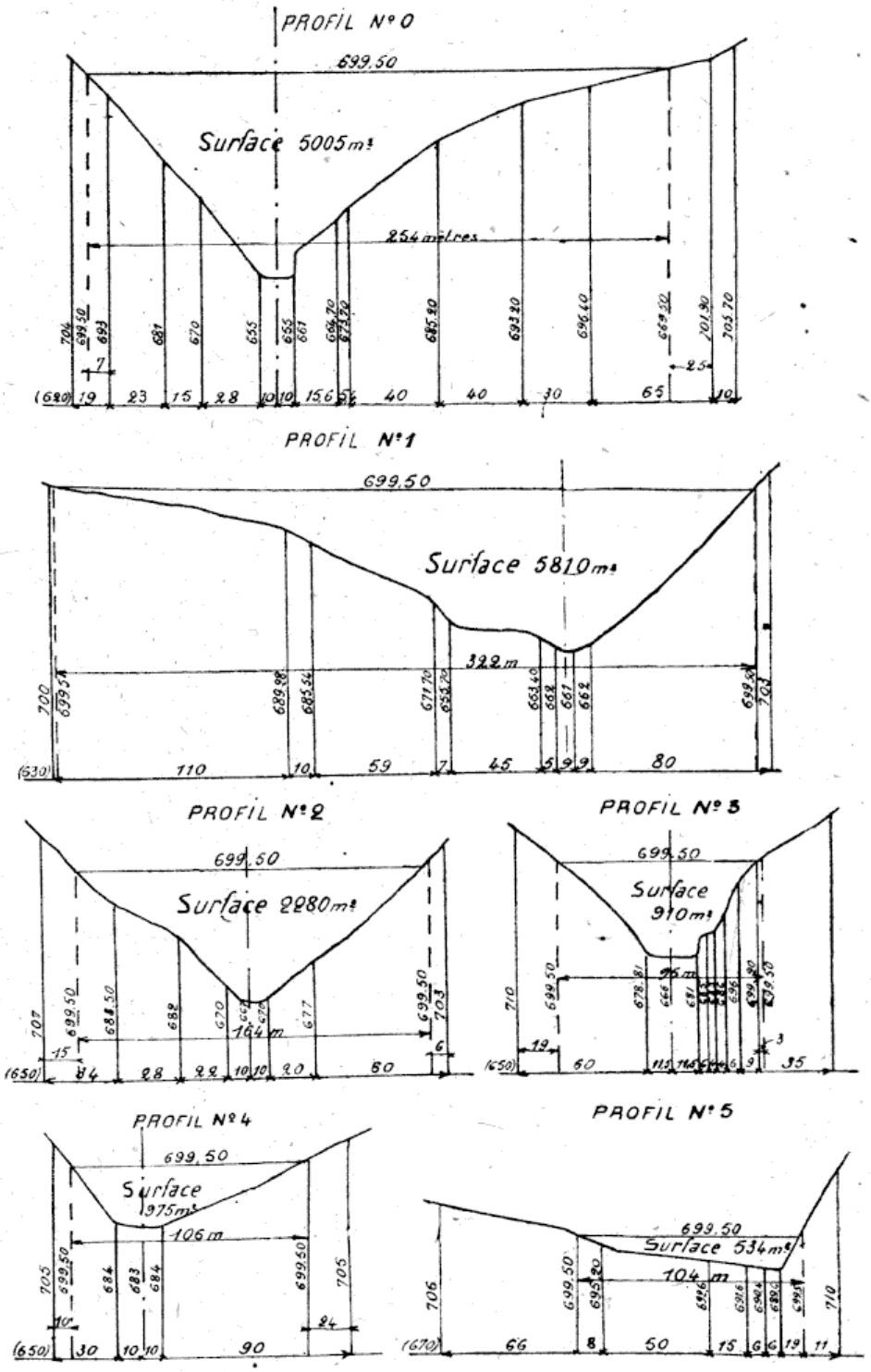


FIG. 729.

(*fig.* 725), nous aurons le moyen de déterminer le volume total de l'eau que peut emmagasiner le réservoir.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On aura par suite :

$$V = 470\,\frac{(5.810 + 5.005)}{2} + 600\,\frac{(5.810 + 2.880)}{2} + 530\,\frac{(2.880 + 910)}{2}$$
$$+ 450\,\frac{(910 + 975)}{2} + 620\,\frac{(534 + 975)}{2} + 890\,\frac{(534 + 164)}{2} = 7.352.630\ m^3$$

Si nous nous reportons aux profils en travers (*fig.* 730) n° 0, n° 1, n° 2, n° 3, n° 4 et n° 5 du bassin de retenue, les sections disponibles sont respectivement : 2.600, 3.650, 1.880, 820, 950 et 460 mètres carrés.

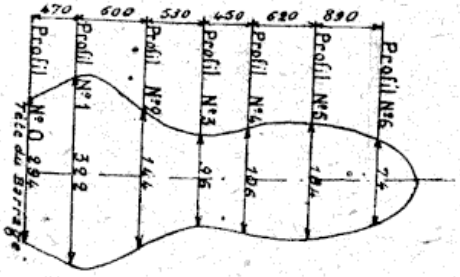


FIG. 730.

Le volume V disponible est donc représenté par :

$$V = \frac{470}{2}(3.650 + 2.600) + \frac{600}{2}(3.650 + 1.880)$$
$$+ \frac{530}{2}(1880 + 820) + \frac{450}{2}(820 + 950) + \frac{620}{2}$$
$$(950 + 450) = 4.671.500 \text{ mètres cubes.}$$

Il y a donc lieu de laisser au réservoir une quantité d'eau égale à :

$$7.300.000 - 4.671.500 = 2.628.500.$$

qui confirme les prévisions du tableau précédent.

264. BARRAGE. — *Stabilité.* — Cet ouvrage est prévu pour 48 mètres de hauteur et 241 mètres de longueur au sommet.

Nous adoptons un profil triangulaire (*fig.* 731) avec parement vertical à l'amont.

La poussée Q de l'eau appliquée au tiers inférieur de la hauteur a pour valeur :

$$Q = \frac{1.000 \times H^2}{2} = \frac{1.000 \times 48 \times 48}{2} = 1.150.000 \text{ kg.}$$

Le mouvement M de renversement dû à la poussée de l'eau par rapport à l'arête A, qui doit faire équilibre au poids P de la maçonnerie a pour expression :

$$M = \frac{1.150.000 \times 48}{3} = 18.400.000 \text{ km.}$$

En prenant la densité de la maçonnerie égale à 2.200 et en admettant un coefficient de sécurité égal à 2, on a :

$$18.400.000 = \frac{S \times 2,200 \times x}{2},$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S, section ABC, x distance du centre de gravité à l'arête A.

On trouve :

$$S = \frac{AB \times H}{2}; \; x = \frac{2\,AB}{3}.$$

Alors :

$$18.400.000 \times 2 = \frac{H}{2} \times AB \times 2.200 \times \frac{2\,AB}{3};$$

ou :

$$18.400.000 = \frac{48 \times 2.200 \times 2 \times \overline{AB}^2}{12};$$

et :

$$AB = \sqrt[2]{\frac{18.400.000 \times 12}{48 \times 2.200 \times 2}} = \sqrt[2]{1.045} = 32^m,50$$

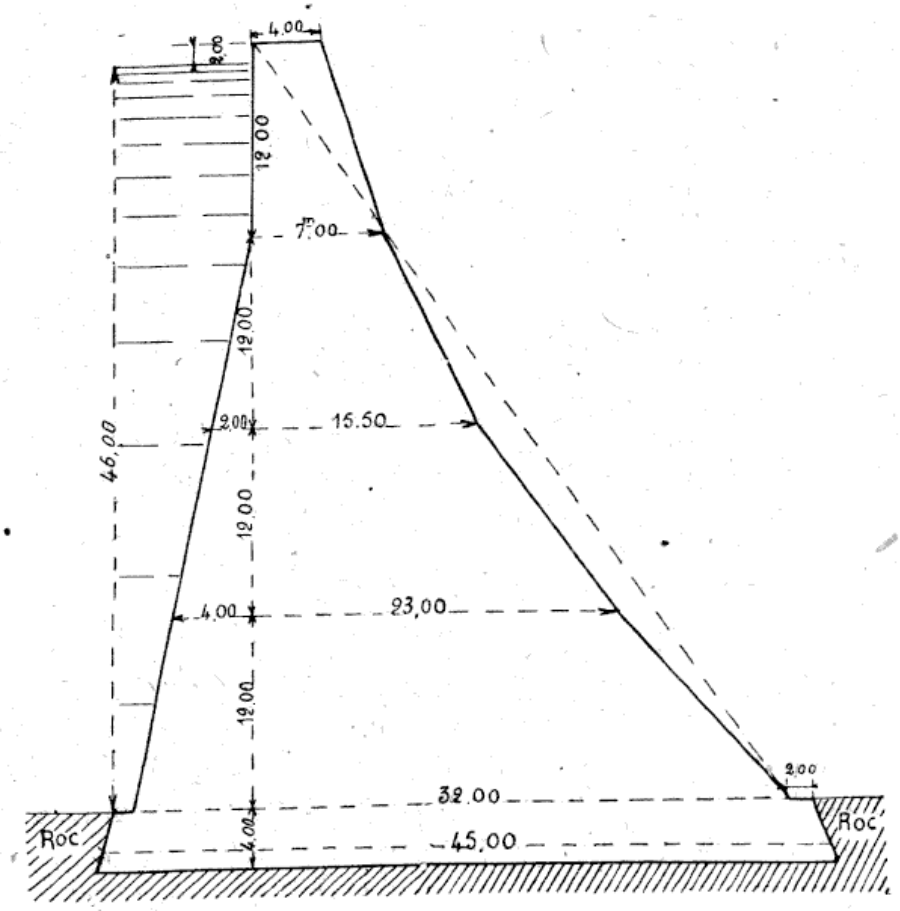


FIG. 731.

Cube de maçonnerie. — Suivant l'épure donnant le tracé, nous décomposons le profil en travers n° 0 en 9 tranches correspondant chacune à une section moyenne du profil du barrage. Ces tranches ont respec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tivement pour hauteurs, longueurs et volumes les chiffres suivants :

Tranche n° 1.....	9m,50	25m	1.300 mètres cubes	
— n° 2.....	20	23	3.650	—
— n° 3.....	31,50	15	5.550	—
— n° 4.....	44,50	28	23.500	—
— n° 5.....	52	20	20.640	—
— n° 6.....	43,50	20,40	17.400	—
— n° 7.....	28,50	40	12.120	—
— n° 8.....	12,50	40	5.400	—
— n° 9.....	9,50	30	2.150	—

Le cube total ressort donc à 92.000 mètres cubes en chiffres ronds.

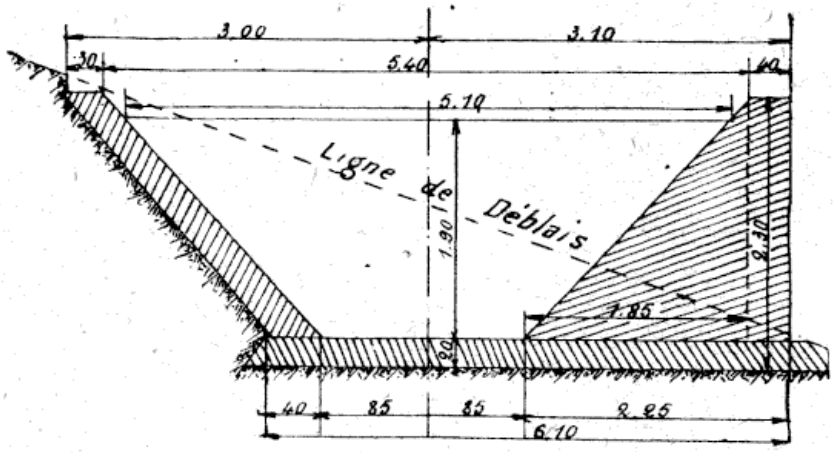


FIG. 732.

265. *Canal d'amenée.* — Ainsi qu'il a été dit plus haut, cet ouvrage a 9 kilomètres de longueur sans plafond et 500 mètres de longueur foncés en tunnel, avec une pente de 0m,0005 par mètre. La (*fig.* 732) représente la section de la partie du canal à ciel ouvert.

Pour le calcul de celle-ci nous posons :

$$S = \frac{\pi D^2}{8}\,;\; p = \frac{\pi D}{2}\,;\; R = \frac{D}{4}\,;$$

D diamètre de la section, en la supposant circulaire, S section, p périmètre mouillé et R le rayon moyen. Nous prenons pour valeur de la vitesse moyenne, U = 0m,80 et pour le débit : Q = 6 mètres cubes.

Nous avons :

$$U^2 = 2.500\ R \times I,\ 4$$

d'où :

$$\frac{Q^2}{2.500} = \frac{s^3}{p} \times I = \frac{\frac{\pi^3 D^6}{8^3}}{\frac{\pi D}{2}} \times I.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'où :

$$D^5 = \frac{256\ Q^2}{2.500 \times \pi^2 \times I} = \frac{256 \times 36}{2.500 \times 9,9 \times 0,0005};$$

et

$$D = \sqrt[5]{738} = 3^m,80;$$

on a alors :

$$R = \frac{3,80}{4} = 0,95$$

Et la section du trapèze a pour valeur :

$$S = \frac{Q}{U} = \frac{6}{0,80} = 7^{m2},50.$$

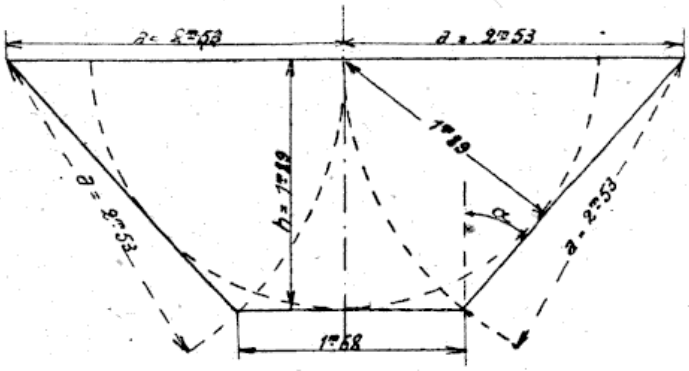


FIG. 733.

Nous prenons la section trapézoïdale de meilleure utilisation dans lequel on a : $h = a \cos \alpha$ et $h = 2\ R = 1^m,90$ (*fig.* 733).

Il nous reste à vérifier si ces conditions vérifient bien les calculs ci-avant :

Alors :

$$S = \frac{5,06 + 1,68}{2} \times 1,90 = 6^{m2},40;$$

$$p = 5,06 + 1,68 = 6,74;\ R = \frac{s}{p} = \frac{6,40}{6,14} = 0,95$$

et

$$U = \frac{6}{6,40} = 0^m,93.$$

Nous sommes donc dans des conditions acceptables. La partie du canal en souterrain sera établie selon les dimensions et la forme indiquées par la (*fig.* 724).

D'autre part le canal à ciel ouvert a à franchir une vallée de 43 mètres de profondeur sur 280 mètres de longueur qui nécessite l'établissement d'un siphon métallique représenté par la (*fig.* 735).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour calculer le diamètre du tuyau, qui doit débiter 6 mètres cubes à la seconde, nous admettons une perte de charge de $\frac{1}{100}$ et nous voyons que la demi-longueur de la canalisation est de 138 mètres.

Nous avons donc :

$$Q = 6 \text{ mètres cubes}; \; J = \frac{43}{100} = 0{,}43 ;$$

$$L = 138 \text{ mètres}.$$

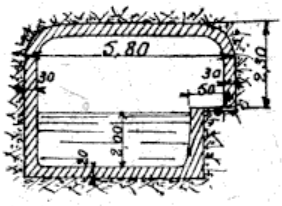
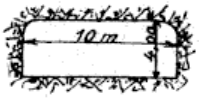


FIG. 734.



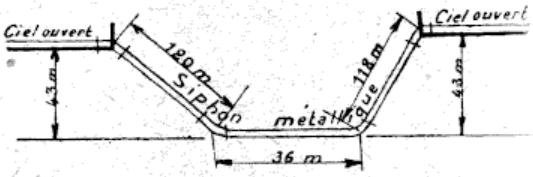


FIG. 735.

Alors :

$$D = \frac{(0{,}0025 \times L \times Q^2)^{\frac{1}{5}}}{J} = \frac{(0{,}0025 \times 138 \times 36)^{\frac{1}{5}}}{0{,}43} = (28{,}7)^{\frac{1}{5}}$$

$$\text{Log. } D = \log. \frac{28{,}7}{5} = 0{,}2914 \text{ et } D = 1^{m},95.$$

266. *Galerie de dérivation.* — Pour l'établissement du barrage, il est nécessaire de mettre à sec la rivière et de détourner ses eaux. A cet effet nous prévoyons la construction d'une galerie souterraine, laquelle servira, une fois le barrage construit, de galerie de décharge pour l'évacuation des eaux de crues, évitant ainsi d'établir un déversoir de surface, disposition qui a l'avantage de favoriser la conservation et l'entretien du barrage en maçonnerie.

Cette galerie est calculée pour évacuer 170 mètres cubes à la seconde : elle devra donc débiter 170 — 6 = 164 mètres cubes (6 mètres cubes, débit du canal d'amenée), ce qui représente une section de $\frac{164}{4} = 41$ mètres carrés, la vitesse adoptée étant de 4 mètres, en raison du peu de temps que durent les crues et de la nature du roc. Les vannes commandant cette galerie, au nombre de 3, seront mues électriquement. La pression sur chaque vanne sera de 42.000 kilogrammes environ par mètre carré de surface, soit au total une pression de 42.000 × 41 = 1.722.000 kilogrammes. On les établira pour supporter chacune 650 tonnes.

Chambre de mise en charge. — La (*fig.* 736) représente schématiquement la disposition adoptée. Le canal d'amenée déverse dans deux com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

partiments identiques, de 15 mètres de longueur sur 20 mètres de largeur et 3 mètres de profondeur.

267. *Conduites forcées.* — La (*fig.* 737) montre schématiquement la disposition de l'installation des tuyauteries sous pression. La longueur développée d'une conduite peut être prise de 350 mètres.

Dans ce cas nous avons :

$Q = 6$ mètres cubes; $L = 350$ mètres; J, perte de charge $= \frac{2}{100}$

$= \frac{2 \times 150}{100} = 3$ mètres, la hauteur de chute étant de 150 mètres.

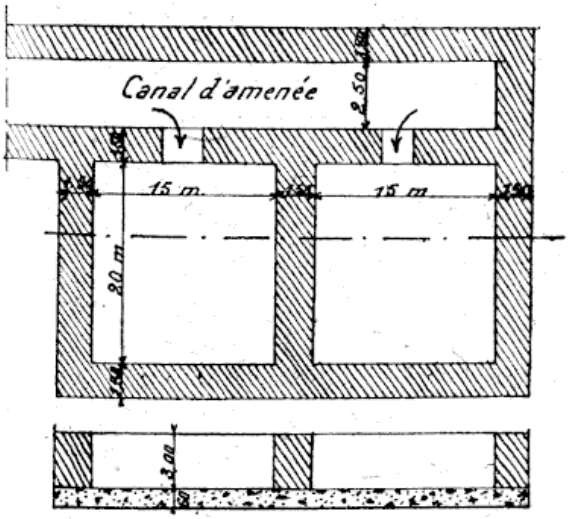


FIG. 736.

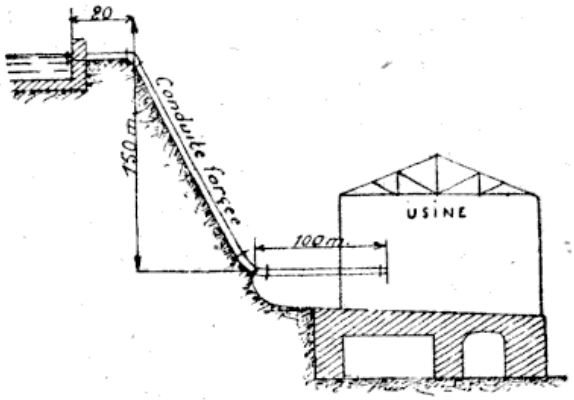


FIG. 737.

Comme première approximation on a :

$$D = \frac{(0{,}0025 \times 350 \times 36)^{\frac{1}{5}}}{J} = \frac{(0{,}0025 \times 350 \times 36)^{\frac{1}{5}}}{3} = (31{,}50)^{\frac{1}{5}}$$

$$\text{Log. } D = \log. \frac{31{,}50}{5} = 0{,}204 \text{ et } D = 1^{m},21.$$

D'après la formule de Darcy, on obtiendrait :

$$D = \sqrt[5]{6{,}4846\ b_1 \times \frac{Q^2}{J}}, \text{ avec } b_1 = 0{,}000253 + \frac{0{,}00001294}{2{,}40} = 0{,}0002583$$

d'où :

$$D = \sqrt[5]{6{,}4846 \times 0{,}0002583 \times \frac{36}{0{,}0085}}$$

avec :

$$J = \frac{3}{350} = 0{,}0085.$$

Donc :

$$D = 1^{m},47, \qquad \text{soit } D = 1^{m},50.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous décomposons la conduite en deux files constituées par des tuyaux en acier de 1 mètre de diamètre correspondant à la moitié de la section totale.

II. — Coût des travaux de captage.

268. *Barrage.* — Maçonnerie de moellons ordinaire avec moitié de chaux hydraulique en fondation et en élévation (350 kilogrammes de ciment), prix 16 francs le mètre cube ; faces du barrage, moellons tétués par assisses réglées à joints réguliers, 27 francs le mètre cube ; parements en maçonnerie de pierre de taille granitique, 55 francs le mètre cube ; maçonnerie de moellons pour têtes des aqueducs cintrés du barrage, puits de prise, 45 francs le mètre cube soit prix moyen égale 20 francs le mètre cube.

Maçonnerie ordinaire 92.000 mètres cubes à 20 francs.....	1.840.000 fr.
Enduit en ciment Portland de 4 centimètres épaisseur 5.000^{m2} à 4 francs.....	20.000 —
Déblais de fouilles, fondations, décapements dans le roc à 4 fr. le mètre cube = 60.000 × 4.....	240.000 —
Parements de maçonneries, taille des parements, lits, joints pour face aval du barrage (supplément) 5.000 mètres carrés à 2 francs.....	10.000 —
TOTAL.....	2.092.000 fr.
Divers	
Passerelle métallique de 90 mètres de longueur sur 4 mètres de largeur.....	15.000 fr.
— maçonnerie de chaux hydraulique pour mur de protection du barrage.....	10.000 —
— vannes de décharge sur le barrage.....	15.000 —
— échelle à poisson.....	10.000 —
— puits de prise d'eau et mur de garde du barrage.....	50.000 —
TOTAL GÉNÉRAL.....	2.205.000 fr.

Chemin d'accès. — Pour ce chemin, qui a une longueur de 9 kilomètres, nous tablons sur le prix de revient à l'État des chemins vicinaux, soit 9 kilomètres à 12.000 francs = 108.000 francs.

269. *Canal d'amenée.* — 1° Canal à ciel ouvert.

$$\text{Déblai dans le roc : } \frac{6{,}10 \times 2{,}30}{2} = 7 \text{ mètres cubes.}$$

Maçonnerie de chaux hydraulique :

$$2{,}10 \times 0{,}40 + \frac{1{,}85 \times 2{,}10}{2} = 2^{m3},78$$

$$0{,}30 \times 2{,}70 \ldots\ldots = 0\ ,81$$

$$\text{Ensemble} \ldots\ldots \quad 3^{m3},59$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Radier en béton de chaux hydraulique : $6^m,10 \times 0^m,20 = 1^{m3},20$.

Prix du mètre courant :

Fouille dans le roc ou autre terrain, charge, décharge (moyenne 2 fr. 50 le mètre cube) = $2^{m3},78$ à 2 fr. 50	7 fr.
Maçonnerie de chaux hydraulique $3^{m3},59$ à 14 francs	50 —
Radier $1^{m3},20$ à 20	24 —
Ensemble	81 fr.

2° Galerie en tunnel :

Déblai dans le roc au mètre courant :

$$5^m,60 \times 2^m,20 + 5^m,80 \times 2^m,30 = 25^{m3},66$$

Revêtement en ciment et garnissage :

$$4^m,10 \times 0,30 \times 2 + 5,50 \times 0^m,30 + 3^m,60 \times 0^m,20 = 4^{m3},14$$

Déblai dans le roc en souterrain compris toute sujétion, $25^m,66$ à 12 francs	307 fr. 90
Chappe en béton de chaux hydraulique, $4^m,14$ à 20 francs	82 fr. 80
Ensemble	390 fr. 90

3° Siphon :

Diamètre intérieur des tuyaux = $1^m,50$. Longueur, 276 mètres.

Soit 1.108 kg × 2 × 276 = 611.600 kg à 0 fr. 55	336.388 fr.
Massifs d'ancrages, soupapes, clapets automatiques	30.000 —
TOTAL	366.388 fr.

Ensemble

8.724 mètres à ciel ouvert à 81 francs	706.664 fr.
500 — en galerie à 390 fr. 70	195.350 —
276 — en siphon	336.388 —
TOTAL	1.238.402 fr.

4° Galerie de dérivation :

Le cube de déblai dans le roc est par mètre courant 41 mètres cubes et pour 350 mètres = 14.350 mètres cubes.

Coût :

Déblai 14.350 mètres cubes à 12 francs	172.200 fr.
Vannes et treuils	15.000 —
Maison de garde	10.000 —
TOTAL	197.200 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

5° Chambre de mise en charge. — En nous reportant à la (*fig.* 731), on voit que le cube de maçonnerie s'établit comme suit :

$$(34{,}50 \times 3 + 20 \times 3)\ 3 + 23 \times 34{,}50 \times 60 + 2{,}50 \times 1{,}50 \times 3 = 978^{m3}$$

Et les déblais :

$$27^{m} \times 34^{m},50 \times 3^{m},60 = 3.653 \text{ mètres cubes.}$$

Coût :

978 mètres cubes maçonnerie de chaux hydraulique à 20 fr. = 19.560 fr.

Déblais dans le roc pour la fouille, 3.653 mètres cubes à 2 fr. 50.	9.132 fr.
Vannes de prise d'eau, crépines, toiles métalliques, échelles de visite, barrières, siphons de vidange, cheminée d'équilibre, etc.	25.000
TOTAL.....	53.692 fr.

270. *Conduites forcées.*

2 Files de tuyaux de 1 mètre de diamètre pesant 552 kilos au mètre courant soit 700 mètres × 552 k. × 0 fr. 55 posés.....	212.500 fr.
Clapets automatiques, joints, massifs d'ancrage.....	35.000
TOTAL.....	247.500 fr.

RÉCAPITULATION

Barrage et ouvrages accessoires.....	2.205.000 fr.
Chemin d'accès.....	108.000
Canal d'amenée.....	1.238.402
Galerie de dérivation.....	197.200
Chambre de mise en charge.....	53.692
Conduites forcées.....	247.500
Ensemble.....	4.049.794 fr.

$$\text{Soit par cheval installé} = \frac{4.049.794}{14.000} = 290 \text{ francs.}$$

Avec droits de riveraineté, de passage et d'implantation : 330 à 350 francs.

III. — Usine generatrice (*fig.* 738).

L'installation comporte 4 groupes turbo-alternateurs de 3.000 chevaux chacun et 2 groupes semblables de 1.500 chevaux, dont un de réserve, fonctionnant sous la tension de 3.000 volts et à la fréquence 50 périodes par seconde. Deux groupes turbo-dynamos de 300 chevaux utiles fournissent le courant d'excitation à la tension de 240 volts. Les bâtiments

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constituant l'usine génératrice sont au nombre de quatre, savoir : celui des machines, de 60 mètres de longueur sur 30 mètres de large ; celui des transformateurs, magasins, ateliers, laboratoire de 60 mètres sur 12 mètres ; celui pour les bureaux et logements du personnel et le bâtiment pour la direction.

Le courant triphasé à 3.000 volts fourni par les alternateurs est survolté à 30.000 volts par 6 transformateurs de 1.500 kilowatts utiles, à isolement à bain d'huile et refroidissement artificiel.

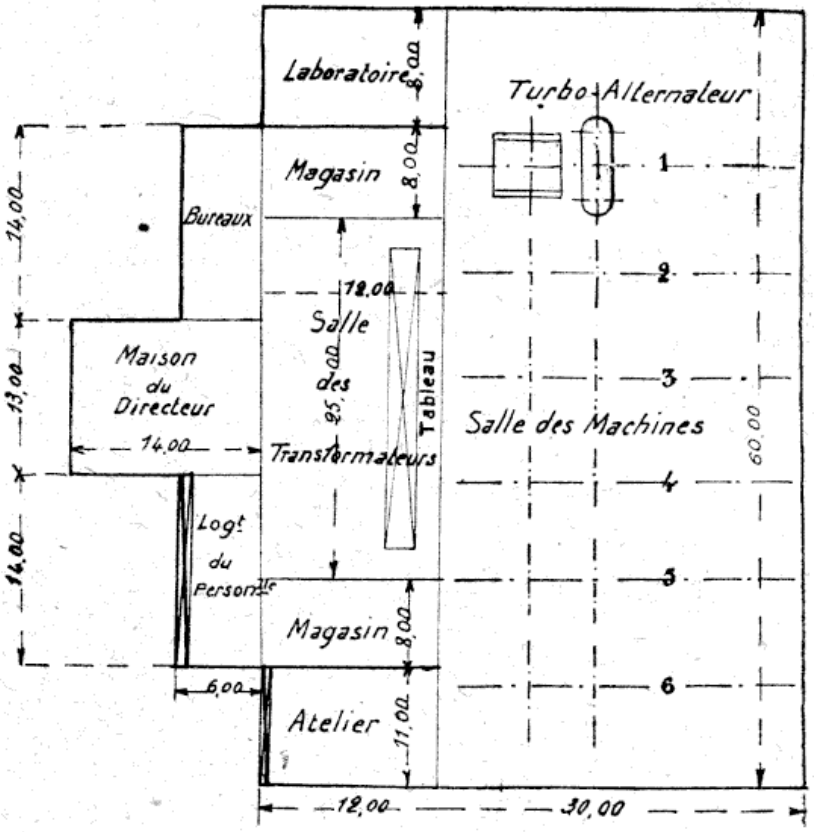


FIG. 738.

Le tableau de distribution est divisé en trois parties : en haut, sont les panneaux d'excitation et ceux des alternateurs (basse tension) ; au milieu, sont les panneaux de couplage des alternateurs, des interrupteurs primaires des transformateurs (moyenne tension) et enfin, en bas, enfermés dans des niches en maçonnerie, la haute tension, départ des lignes, interrupteurs à cornes, etc.

Coût de l'installation.

1° *Matériel hydraulique.*

4 turbines principales de 3.000 HP sous 150 mètres de chute, turbines horizontales à injections partielles ; régulateurs automa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiques et régulateurs à main; appareils de réglage de la pression aux vannes; vannes d'arrêt et de décharge, manomètres, tachymètres, tuyauteries et accessoires à 45.000 francs.....	180.000 fr.
2 turbines de 1.500 HP avec tous accessoires à 27.000 francs....	54.000
2 turbines de 300 HP pour les excitatrices à 6.000 francs.....	12.000
1 pont roulant de 15 tonnes.....	15.000
Montage de la partie hydraulique	22.000
2° *Matériel électrique.*	
4 alternateurs, 3.000 H utiles, tension 3.000 volts, à 90.000 fr..	360.000
2 alternateurs 1.500 HP utiles à 50.000 francs.....	100.000 fr.
Ces prix comprennent la mise en place des machines.	
2 dynamos de 300 HP utiles à 15.000 francs.....	30.000
6 transformateurs $\frac{3.000}{30.000}$ volts et 15.000 kilowatts à 45.000 francs.	270.000
Tableau de distribution.....	100 000
Câblage divers dans l'usine, montage et accessoires.....	50.000
Outillage divers, atelier et magasins.....	40.000
3° *Bâtiments.*	
Bâtiment salle des machines, 1.800 mètres carrés à 120 francs..	216.000
— pour les transformateurs, etc., 840 mètres carrés à 100 fr.	84.000
— des bureaux et logements du personnel 120^{m2} à 120 fr.	14.400
— pour la direction 200 mètres carrés à 130 francs.....	26.000
TOTAL GÉNÉRAL.....	1.573.000 fr.

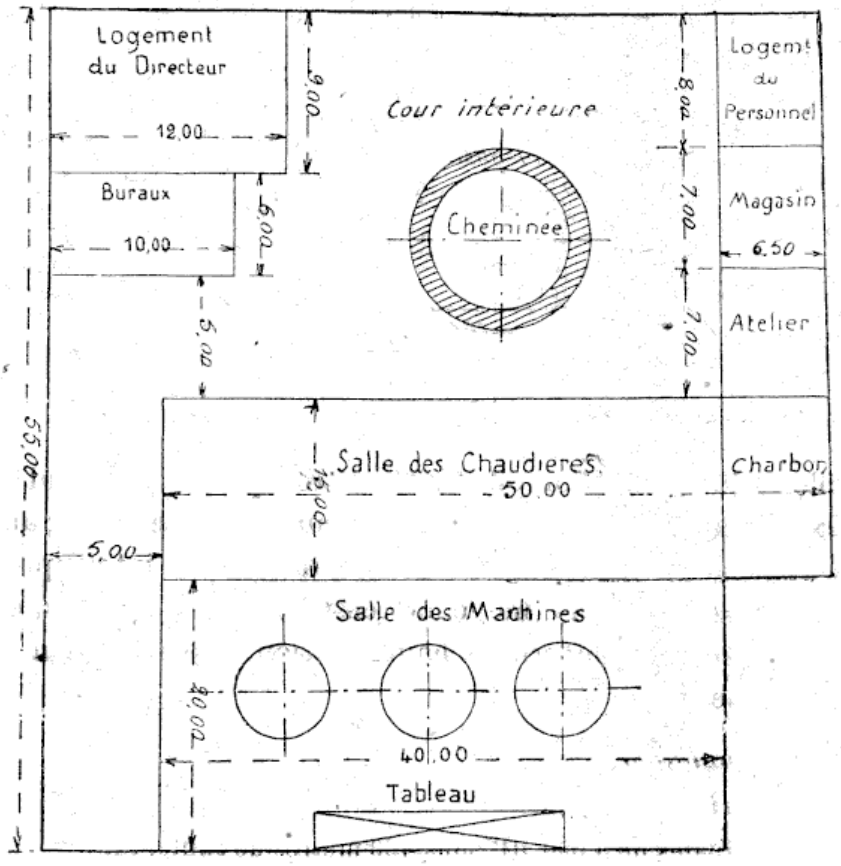


FIG. 739.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IV. — Usine de secours à vapeur (*fig.* 739).

272. Cette installation comporte trois groupes turbo-alternateurs à courant triphasé, 3.000 volts, 50 périodes et de 1.000 chevaux chacun ; trois groupes transformateurs élèvent la tension à 30.000 volts pour la marche en parallèle avec l'usine génératrice hydraulique.

En tablant sur une consommation de 8 kilogrammes de vapeur par cheval utile, il faut compter sur une vaporisation de 24.000 kilogrammes à l'heure. Les chaudières multitubulaires vaporisant facilement 16 kilogrammes de vapeur par mètre carré de surface de chauffe, il faut donc prévoir une surface de chauffe de 1.500 mètres carrés, représentés par 7 chaudières de 220 mètres carrés.

DEVIS DE L'USINE THERMIQUE

3 Turbines à vapeur de 1.000 HP, 12 kg de pression à 80.000 fr.	240.000 fr.
Fondations des dites turbines	40.000
3 Alternateurs 3.000 volts, 1.000 HP, à 40.000 francs	120.000
7 Chaudières tubulaires de 220^{m2} à 12.000	84.000
Massifs des chaudières	35.000
Tuyauterie des turbines et d'alimentation	45.000
1 Pont roulant de 15 tonnes	15.000
2 Machines à vapeur verticales de 100 HP pour les excitatrices.	20.000
2 Dynamos excitatrices, 240 volts	12.000
1 Tableau de distribution comprenant : 3 panneaux d'excitatrices, 3 panneaux de couplage d'alternateurs et 3 panneaux pour les transformateurs survolteurs	50.000
3 Transformateurs triphasés de 1.000 HP utiles à 20.000 francs.	60.000
Câblage, pompes, accessoires divers	20.000
Atelier de réparation et magasin	25.000
Parafoudres et limiteurs, montage de l'usine	55.000
Local des machines = 800 mètres carrés à 80 francs	64.000
— des chaudières, 750 — à 40 —	30.000
— logements, 172 — à 120 —	21.000
— ateliers, bureaux, 172 — à 100 —	17.200
Cheminée d'usine (25^{m} hr)	30.000
Terrain	mémoire
TOTAL GÉNÉRAL	983.200 fr.

V. — Ligne de transport d'énergie électrique.

Nous avons déjà mentionné que le transport d'énergie avait lieu à la tension de 30.000 volts et en courant triphasé.

273. *Calcul de la ligne.* — 1° *Conducteurs.* — Les différents tronçons indiqués schématiquement sur la (*fig.* 740) donnent en faisant le produit des chevaux transportés par les distances les chiffres suivants :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1er	Tronçon A à B (11.000 HP)	= 11 × 26	= 286		
2e	— B à C (10.000 »)	= 10 × 21	= 210		
3e	— C à D (7.000 »)	= 7 × 2,5	= 17,5		591
4e	— D à E (5.000 »)	= 5 × 14,5	= 72,5		
5e	— C à F (1.000 »)	= 1 × 5	= 5		

Si on s'impose une perte d'énergie maximum de 5 0/0, on calcule chaque tronçon proportionnellement au produit de la puissance transportée par le nombre de kilomètres qu'il représente.

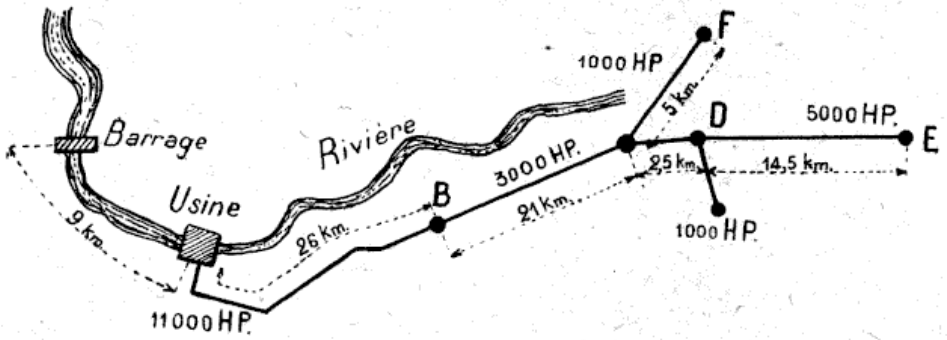


FIG. 740.

On a donc pour le 1er tronçon : perte ..... $\frac{5}{100} \times \frac{286}{591} = 2{,}42\ 0/0$

— 2e — — ..... $\frac{5}{100} \times \frac{210}{591} = 1{,}77\ 0/0$

— 3e — — ..... $\frac{5}{100} \times \frac{17{,}5}{591} = 0{,}15\ 0/0$

— 4e — — ..... $\frac{5}{100} \times \frac{72{,}5}{591} = 0{,}61\ 0/0$

— 5e — — ..... $\frac{5}{100} \times \frac{5}{591} = 0{,}42\ 0/0$

Soient : E eff. la tension entre fils = 30.000 volts, I eff. le courant dans chaque conducteur de la ligne et $\cos \varphi = 0{,}85$, W la puissance aux bornes, l la longueur d'un fil de ligne, p la perte consentie et S la section d'un conducteur en millimètres carrés.

Pour déterminer la section du fil nous appliquons la formule :

$$S = \frac{100}{57} \times \frac{W \times l}{E^2\ \text{eff.} \cos^2 \varphi \times p} = 1{,}75 \frac{W \times l}{E^2\ \text{eff.} \times \cos^2 \varphi \times p}.$$

Pour le premier tronçon on a donc :

$$S = 1{,}75 \times \frac{8.250.000\ \text{watts} \times 26.000}{30.000^2 \times 0{,}85^2 \times 2{,}42}, \text{ d'où : } S = 230\ \text{mm}^2.$$

Nous composons la section au moyen de trois fils de 78mm2,5 chacun

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(10 millimètres de diamètre), qui pèse 699 kilogrammes au kilomètre, soit pour les trois conducteurs disposés en quantité $699 \times 3 = 2.097$ kilogrammes, et pour les trois phases, $2.097 \times 3 = 6.291$ kilogrammes au kilomètre.

Par suite le premier tronçon donnera lieu à un poids de cuivre égal à $26 \times 6.291 = 163.566$ kilogrammes.

L'intensité I du courant $= \dfrac{8.250.000}{30.000 \times 0,85} = 324$ ampères. Et la densité de courant $= \dfrac{324}{235,5} = 1,36$ ampère par millimètre carré.

En opérant de la même façon, on trouve :

2e	tronçon, poids du cuivre	=	132.000	kilogr.
3e	—	—	= 13.500	—
4e	—	—	= 91.000	—
5e	—	—	= 31.500	—

Soit ensemble 423.000 kilogrammes en nombre rond.

2° *Poteaux.* — Nous adoptons les poteaux représentés par la figure, savoir par kilomètre de ligne :

15 poteaux de 10 mètres de hauteur, 7 de 12 mètres, 2 de 14 mètres et 2 de 16 mètres, soit un poteau tous les 40 mètres environ.

3° *Station à l'arrivée.* — Nous avons vu que l'on disposait de 14.000 chevaux bruts avant les turbines. En prenant les chiffres usuels de rendement, savoir : turbo-alternateurs, 0,80 ; transformateurs au départ, 0,97 ; ligne, 0,95, le rendement total aux bornes des transformateurs à l'arrivée est par suite :

$$\varepsilon = 0,80 \times 0,97 \times 0,95 = 0,74 \text{ en nombre rond.}$$

La puissance réelle est donc :

$$14.000 \times 0,74 = 10.360 \text{ chevaux de 11 heures.}$$

Il faudra donc disposer de 7.500 kilowatts avec des rapports de $\dfrac{110}{30.000}$, $\dfrac{240}{30.000}$ ou $\dfrac{500}{30.000}$.

274. *Coût de l'installation.* — La longueur simple de la ligne est de 69 kilomètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

432 tonnes de cuivre à 2.500 francs	1.080.000 fr.
$26 \times 69 = 1.794$ poteaux, prix moyen 80 francs	143.520
$235 \times 69 = 16.115$ isolateurs triple cloche à 4 francs	64.460
Pose de la ligne, 150 francs le kilom., soit $9 \times 69 \times 150$ fr.	93.150
Consoles en fer, contrefiches, parafoudres	20.000
Interrupteurs haute tension, filets, prises de terre, plaques	20.000
Indemnités pour plantation de supports sur propriétés privées	15.000
Déplacements de supports, élagage, fausses manœuvres et imprévu	20.000
ENSEMBLE	1.456.130 fr.
Transformateurs à l'arrivée, 7.500 kw, compris tout l'appareillage à haute tension	250.000 fr.
Bâtiments pour lesdits	50.000
TOTAL GÉNÉRAL	1.756.130 fr.

Frais d'études et achat de riverainetés.

Frais d'études, de déplacements et divers	150.000 fr.
Achat de riveraineté et de terrains pour emplacements des ouvrages d'art et de l'usine	600.000
TOTAL	750.000 fr.

Récapitulation des dépenses.

Travaux de captation hydrauliques	4.049.794 fr.
Usine génératrice	1.573.000
Usine à vapeur de secours	983.200
Ligne de transport d'énergie électrique	1.756.130
Frais d'études, achat de riverainetés et de terrains	750.000
ENSEMBLE	9.112.124 fr.

$$\text{Coût du cheval utilisable} = \frac{9.112.124}{10.000} = 911^{f},21$$

$$\text{Coût du cheval installé} = \frac{9.112.124}{14.000} = 650 \text{ francs.}$$

VI. — Étude financière.

275. DÉPENSES D'EXPLOITATION.

1° *Amortissements.* — Nous adoptons comme taux, les chiffres suivants : barrage, galerie de dérivation : quarante ans ; chemins d'accès, maison de garde, canal d'amenée, chambre d'eau, bâtiments divers : trente ans ; siphon, conduites forcées : vingt ans ; machines et appareils de l'usine hydroélectrique, de l'usine à vapeur, ligne électrique : quinze ans.

Barrage	$\frac{2.205.000}{40}$	= 55.625 fr.
Chemin d'accès	$\frac{108.000}{30}$	= 3.600 —
Galerie de dérivation	$\frac{197.200}{40}$	= 4.930 —

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Canal d'amenée	$\frac{872.014}{30}$	=	29.067 —
Siphon	$\frac{366.388}{20}$	=	18.320 —
Chambre d'eau	$\frac{53.692}{30}$	=	1.790 —
Conduites forcées	$\frac{247.500}{20}$	=	12.375 —
Machines, usine hydroélectrique	$\frac{1.232.600}{15}$	=	82.173 —
Bâtiments —	$\frac{340.400}{30}$	=	11.346 —
Machines, usine à vapeur	$\frac{821.000}{15}$	=	75.000 —
Bâtiments —	$\frac{162.200}{30}$	=	5.406 —
Appareillage et cuivre de la ligne	$\frac{1.671.130}{15}$	=	111.408 —
Bâtiment des transformateurs	$\frac{50\ 000}{30}$	=	1.666 —
TOTAL			412.706 fr.

2° *Personnel. Main-d'œuvre.*

Usine hydroélectrique	35.000 fr.	175.000
Usine thermique	20.000 —	
Ligne de transport et sous-station	55.000 —	
Direction. — Administration	65.000 —	
3° Frais de bureau, redevances, impôts et divers		40.000

4° *Frais d'entretien.*

Barrage, usine, canal d'amenée	50.000 fr.	191.000
Huile, graisse, chiffons, lampes, etc.	10.000 —	
Charbon pour l'usine thermique	81.000 —	
Huile, graisse, chiffons, lampes, etc.	10.000 —	
Ligne de transport	40.000 —	
5° Intérêts du capital 6 0/0		546.720
TOTAL		1.365.426 fr.

276. RECETTES.

Le cheval-an de 11 heures peut être vendu à un prix moyen de 200 francs.

Soit $10.000 \times 200 = 2.000.000$ de francs	2.000.000 fr.
DIFFÉRENCE OU BÉNÉFICE	634.574 fr.

Le rendement de l'affaire ressort dans ces conditions à 13 0/0 du capital, compris intérêt à 6 0/0.

Ce rendement peut être amélioré en utilisant l'usine à vapeur la nuit et par des contrats permettant une augmentation du prix du cheval-an,

Il est possible alors de faire arriver le rendement au chiffre de 17 à 18 0/0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — PROJET D'USINE HYDROÉLECTRIQUE AU MOYEN D'UN BARRAGE FIXE ET D'UNE PRISE D'EAU DANS LA DURANCE A SISTERON

Usine hydraulique de Fontbéton et usine hydroélectrique des Bons-Enfants.

277. Caractéristique des aménagements hydrauliques (Voir planche XI, *fig.* 1 à 8). — Cette installation, en outre de son utilité comme puissance d'énergie électrique, présente les avantages suivants : régularisation du régime de la Durance en aval de Sisteron, relèvement du débit du cours d'eau en été et enfin contribution au développement de l'agriculture locale par une importante dérivation d'eau d'arrosage.

La concession demandée par notre collègue et ami M. Justin Blanc s'étend du confluent du torrent de Beynon (où la Société des forces motrices de la Haute-Durance rend les eaux) au confluent du Jabron (au lieu dit les « Bons-Enfants », commune d'Entrepierre).

L'aménagement hydraulique comporte comme ouvrages principaux : un barrage-réservoir en maçonnerie, une prise d'eau, une usine hydraulique (dite de Fontbéton), pour les usages agricoles, un canal d'amenée, une conduite forcée et une usine génératrice hydroélectrique (dite des Bons-Enfants).

L'usine de Fontbéton peut fournir une chute de $5^{m},50$ et celle des Bons Enfants utiliser une pression hydraulique de $60^{m},50$ environ entre les plans d'eau à l'aval du canal d'amenée et au bief aval de la Durance.

Le remous des eaux provoqué par le barrage se manifeste jusqu'à 14 kilomètres en amont de cet ouvrage, un peu en aval du canal de fuite de Beynon, couvrant une étendue de 800 hectares de superficie.

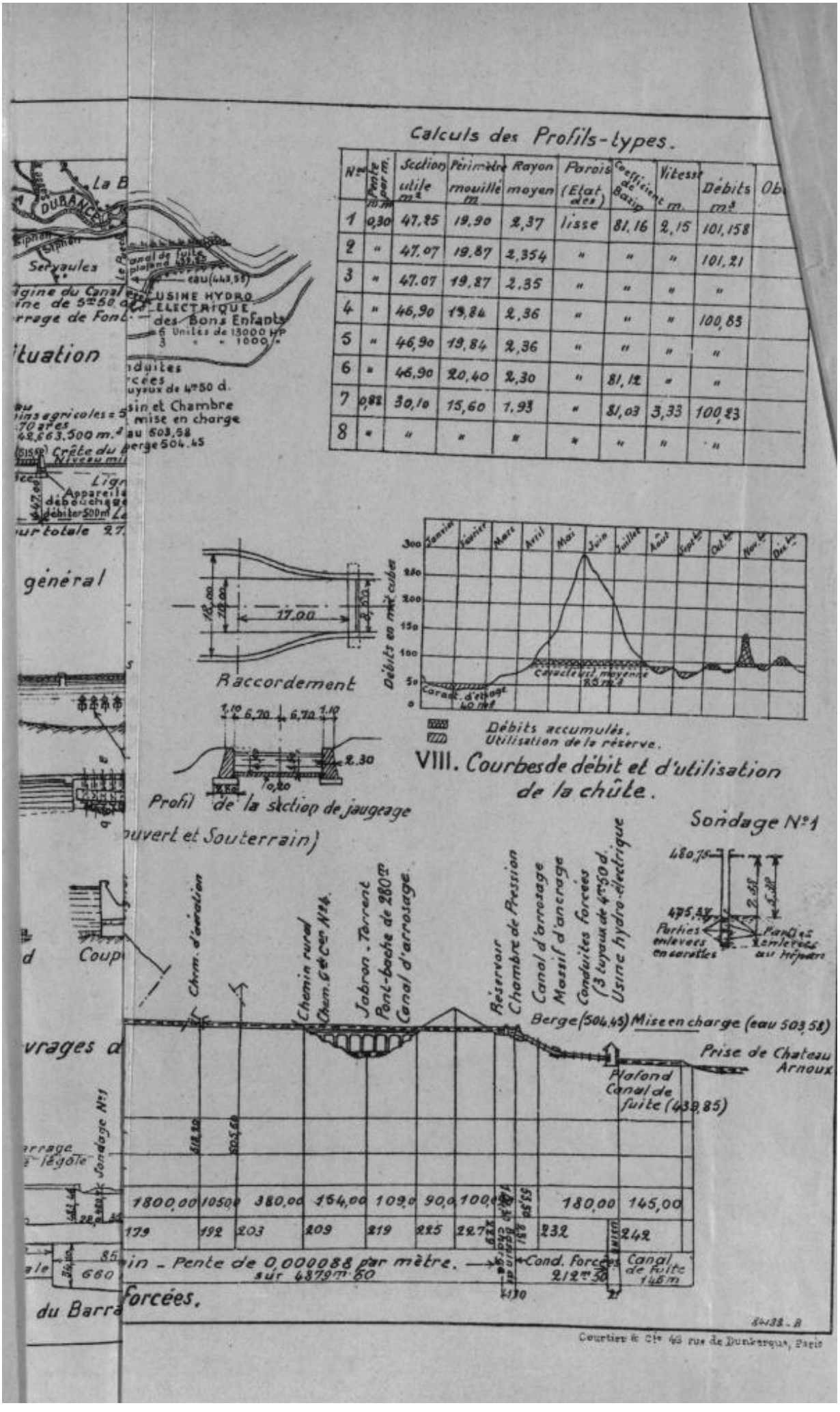
Sur cette réserve, une tranche de $5^{m},50$, représentant un emmagasinement de 42 millions et demi de mètres cubes d'eau est destinée à améliorer le régime de la Durance et à alimenter les canaux d'irrigation de la région, aux époques de pénurie d'eau.

278. *Barrage-réservoir.* — La (*fig.* 8, planche XI), montre le jeu de la crue de printemps de la Durance, pendant la fonte des neiges (maximum vers le 1er juin) et de la crue d'automne (maximum vers le 10 novembre), que les affluents d'aval influencent peu. Le barrage projeté ne devant en aucun cas apporter une aggravation quelconque au régime des crues d'aval, le débit fourni par ses vannes s'établit comme suit : 1° lorsque celles-ci évacueront un débit supérieur à celui instantané de la rivière, cet écoulement devra se produire sans détermination de crue dangereuse ; 2° lorsque le débit instantané atteindra à l'aval la valeur de crue dange-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

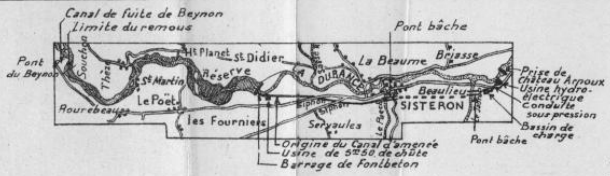
Calculs des Profils-types.

N°	Pente par m.	Section utile m²	Périmètre mouillé m	Rayon moyen	Parois (Etat des)	Coefficient de Bazin	Vitesse m.	Débits m³	Ob
1	0,30	47,25	19,90	2,37	lisse	81,16	2,15	101,158	
2	"	47,07	19,87	2,354	"	"	"	101,21	
3	"	47,07	19,27	2,35	"	"	"	"	
4	"	46,90	19,84	2,36	"	"	"	100,83	
5	"	46,90	19,84	2,36	"	"	"	"	
6	"	46,90	20,40	2,30	"	81,12	"	"	
7	0,82	30,10	15,60	1,93	"	81,03	3,33	100,23	
8	"	"	"	"	"	"	"	"	



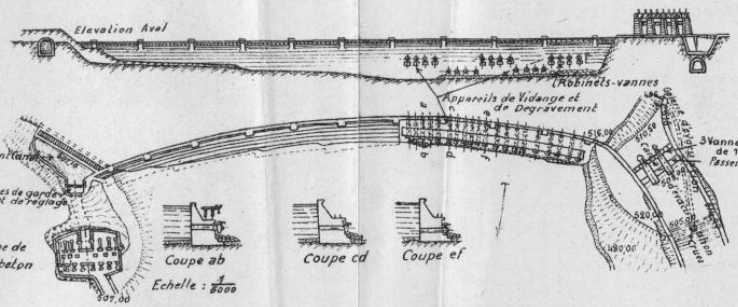
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PROJET D'USINES HYDRO-ELECTRIQUES DE FONBETON ET DES BONS-ENFANTS SUR LA DURANCE

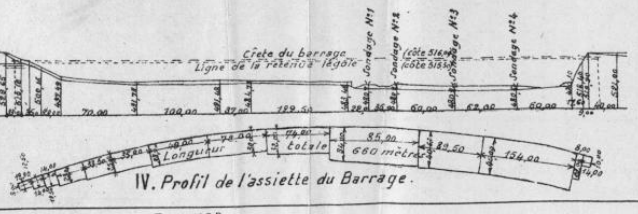


I _ Plan de Situation Echelle: 1/200.000

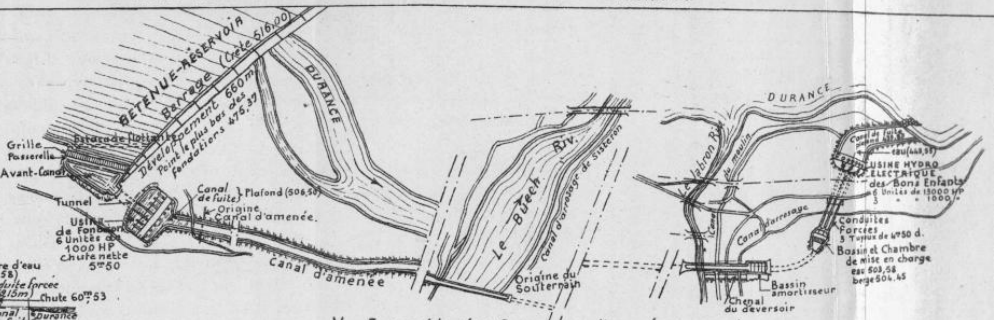
II _ Profil en long général



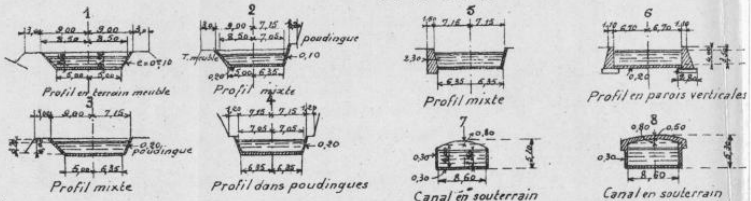
III _ Barrage et Ouvrages d'evacuation de crues.



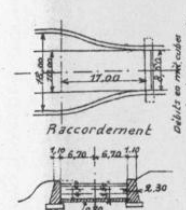
IV. Profil de l'assiette du Barrage.

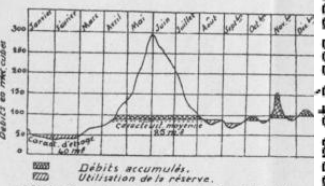


V. Ensemble des Ouvrages d'amménagement de la chûte



VI. Profils-types du Canal d'amenée (Ciel ouvert et Souterrain)

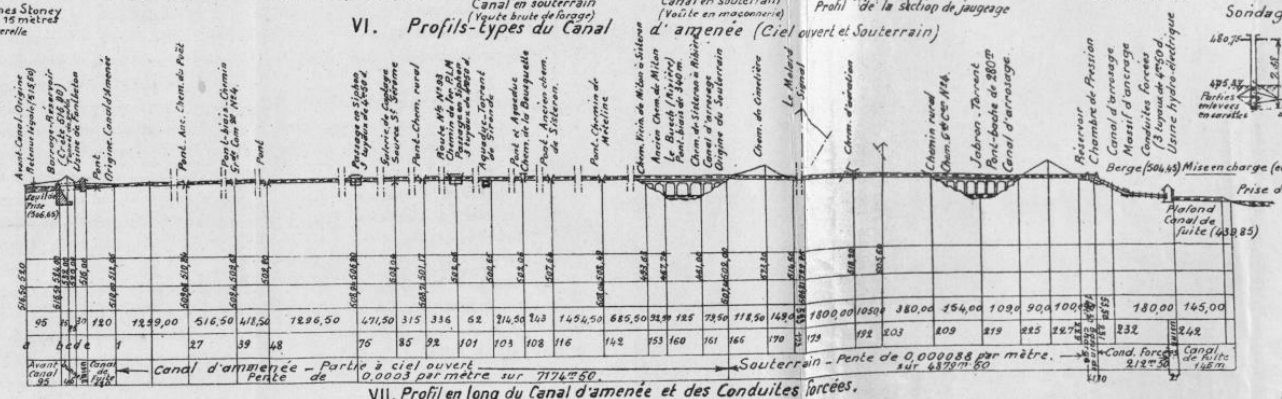




VIII. Courbes de débit et d'utilisation de la chûte.

Calculs des Profils-Types.

N°	Profil	Section utile m²	Périmètre mouillé m	Rayon moyen	Parois	Coefficient de Bazin	Vitesse m.	Débits m³	Obs.ns
1	0,30	47,25	19,90	2,37	lisse	81,16	2,15	101,158	
2	"	47,07	19,87	2,354	"	"	"	101,21	
3	"	47,07	19,87	2,35	"	"	"	"	
4	"	46,90	19,84	2,36	"	"	"	100,83	
5	"	46,90	19,84	2,36	"	"	"	"	
6	"	46,90	20,40	2,30	"	81,12	"	"	
7	0,82	30,10	15,60	1,93	"	81,03	3,33	100,23	
8	"	"	"	"	"	"	"	"	



VII. Profil en long du Canal d'amenée et des Conduites forcées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DUNOD & PINAT, Éditeurs, 47 et 49 quai des grands-Augustins, Paris

Courtier & Cie 49 rue de Dunkerque, Paris

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

reuse, les vannes ne devront laisser passer que ce débit, tout en conservant la réserve intacte.

Nous verrons plus loin que le système ingénieux de dégravement adopté, qui utilise la crue de printemps, permet de satisfaire à ces conditions, étant donné que les crues de printemps ne déterminent pas d'inondations.

Le débit minimum de la Durance à Sisteron est de 15 mètres cubes pendant 61 jours, de 15 à 50 mètres cubes pendant 40 jours, 50 à 90 mètres cubes pendant 91 jours et supérieur à 90 mètres cubes pendant 172 jours. Le débit maximum de 90 mètres cubes est celui adopté pour le calcul du canal de dérivation et la puissance de l'usine génératrice.

L'emplacement du barrage a été choisi dans une partie resserrée entre deux collines rocheuses au lieu dit « Fontbéton », dont la direction est telle qu'il a fallu donner en plan un rayon de courbure de 1 kilomètre, facilitant la dilatation de l'ouvrage. On observera que c'est là un minimum pour un ouvrage de cette importance dont l'arc a 660 mètres de longueur.

La hauteur totale du mur du barrage est de 50 mètres et son épaisseur, au pied, de $47^{m},40$, sa largeur au sommet de 3 mètres. La crête de l'ouvrage est à la cote 516 et la retenue légale à la cote 515,50.

Le volume d'eau retenu par le barrage est de 124.112.000 mètres cubes et le cube de la réserve devant régulariser le débit est de 42.663.500 mètres cubes.

Toute la cuvette rive gauche se trouve formée de schistes imperméables ainsi que la rive droite, sauf en un point de cette dernière, à la partie supérieure, où on trouve des poudingues ou conglomérat de graviers cimentés naturellement entre eux. Aucune fuite importante n'est donc pas susceptible de se produire.

Les travaux provisoires en vue de l'édification du barrage proprement dit comportent un barrage-batardeau et deux canaux pour la dérivation des eaux de la Durance, de 30 mètres carrés de section, suffisants pour l'évacuation des crues.

Pour donner une étanchéité relative au bief, la surface de la retenue provisoire sera fréquemment saupoudrée d'argile pulvérisée à l'effet de colmater le fond de la cuvette, ce qui laissera libre d'eau l'emplacement des fouilles à exécuter en aval, principalement pour les ancrages (*fig.* 4, planche XI) du mur du barrage définitif. Ces travaux seront exécutés pendant l'étiage d'hiver, soit d'octobre à mars. Les canaux dont il est parlé ci-avant pouvant débiter ensemble 250 mètres cubes sont donc largement suffisants puisque pendant l'époque d'étiage le débit ne dépasse pas 60 mètres cubes.

Pendant les crues, on pourra exécuter les fouilles et les maçonneries au-dessus des hautes eaux jusqu'à ce qu'on puisse reprendre les travaux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A la cote 500,	—	14	—	310	W = 2 ,60
—	—	15	—	250	W = 2 ,75
—	—	16	—	650	W = 1 ,08
A la cote 495,	—	17	—	320	W = 2 ,80

La vitesse de marche des graviers s'accélère donc à mesure que le niveau s'abaisse ; l'on peut ainsi concevoir qu'une chasse prolongée de 48 heures, après la vidange de la réserve, peut opérer un nettoyage complet des dépôts de graviers.

En résumé, la méthode envisagée consiste à vider le réservoir de la retenue dès l'annonce d'une crue importante, de façon que les eaux ne trouvent plus dans l'étendue du bief que des sections telles que la vitesse de l'eau au fond y soit partout supérieure à $0^m,60$.

Pour évaluer le temps nécessaire pour le remplissage du réservoir, en supposant le débit de la rivière égal à 250 mètres cubes à la seconde, et étant donné qu'il suffit de 50 mètres cubes pour l'alimentation des usines, on voit que l'on dispose de 200 mètres cubes, soit 720.000 mètres cubes à l'heure.

Admettons que le volume approximatif compris entre les robinets-vannes et la cote (515,50), soit de 96.000.000 mètres cubes, il faudra pour obtenir le niveau (510), la réserve agricole étant de 42.000.000 de mètres cubes :

$$\frac{96\,000.000 - 42.000.000}{720.000} = 75 \text{ heures.}$$

Pour déterminer le temps de chômage de l'usine nécessaire pour opérer le dégravement il y a lieu d'abord de ne pas tenir compte du temps employé à la vidange de la réserve agricole, par la raison que l'usine fonctionnera tant que le niveau de l'eau n'aura pas baissé au-dessous de la cote (510).

La durée de chômage est par suite donnée par la sommation des opérations ci-après :

Vidange du réservoir calculée à.....	15 heures
Temps nécessaire au dégravement calculé à.....	48 —
Temps nécessaire au remplissage calculé à.....	75 —
ENSEMBLE.....	138 heures

Temps parfaitement admissible car il est inférieur à la durée normale des chômages d'usines annuels.

Il est intéressant de se rendre compte de la dépense à laquelle peut donner lieu l'opération du dégravement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'usine génératrice représentant une consommation de 45.000 kilowatts-heures, on a pour la durée du chômage :

$$45.000 \times 138 \text{ heures} = 6.210.000 \text{ kilowatts-heures.}$$

qui, à raison de 0 fr. 20 le kilowatt-heure, donnent 124.200 francs.

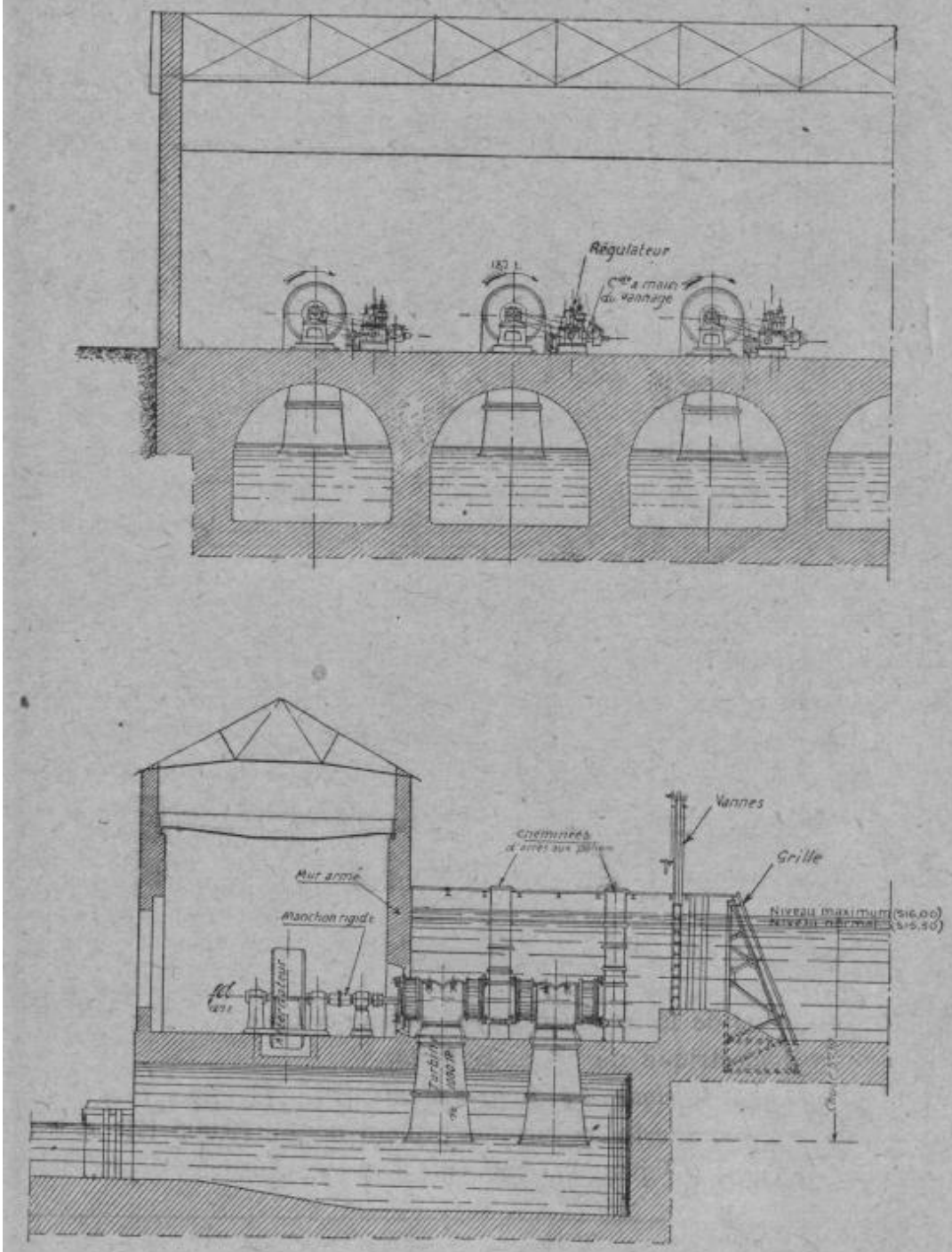


FIG. 742. — Usine de Fontbeton. — Élévations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en rivière au moment de la deuxième campagne d'hiver. C'est alors que l'on procédera à la pose des robinets-vannes de fond destinés à l'évacuation des crues, et de cette façon poursuivre sans interruption l'exécution du mur-barrage dont le cube de maçonnerie représente 371.672 mètres cubes et des autres ouvrages d'adduction.

279. *Canal d'amenée.* — Cet ouvrage (Planche XI, *fig.* 5 et 7) a une longueur totale de 12.054 mètres dont 4.879 mètres en souterrain. La côte du radier est de (505,38) à l'extrémité aval. Le canal est presque entièrement creusé, pour les parties à ciel ouvert, dans les poudingues pléistocènes très durs et un revêtement en ciment armé de $0^m,10$ d'épaisseur lui assurera une étanchéité parfaite.

La pente du canal est prévue à $0^m,30$ par kilomètre dans les parties à ciel ouvert et à $0^m,88$ par kilomètre dans les ouvrages d'art et dans la partie en tunnel. La voie ferrée de Marseille à Grenoble est traversée au moyen d'un siphon constitué par trois tubes métalliques de $4^m,50$ de diamètre, ainsi que les traversées des routes nationales n^{os} 85 et 93. Deux aqueducs sont jetés au-dessus des torrents du Buech et du Jabron, le premier ayant une longueur de 340 mètres et le second 280 mètres.

La section du canal est de 45 mètres carrés pour un débit de 100 mètres cubes.

La (*fig.* 6, planche XI), montre les différents profils adoptés tant pour les parties à ciel ouvert que pour celles en souterrain.

280. *Chambre de mise en charge.* — Le radier du canal d'amenée à l'extrémité aval est à la cote (505,38), constituant le niveau de l'eau dans la chambre de mise en charge, laquelle comporte une grille et trois vannes d'isolement des conduites forcées.

A 50 mètres en avant de la chambre de pression est disposée une chambre dont le trop plein se déverse dans un bassin amortisseur de 5 mètres de profondeur creusé dans une ancienne carrière de pierres de calcaire très dur. Ouverte du côté du torrent du Jabron, les eaux de cette chambre seront conduites par l'échancrure dans un chenal de 100 mètres de longueur environ.

281. *Conduites forcées.* — Le niveau de l'eau dans la chambre de mise en charge étant à la cote 505,38, et le canal de fuite de l'usine génératrice étant à la cote 444,75, la hauteur de chute brute est donc de $60^m,53$, utilisée au moyen de trois conduites métalliques de $4^m,50$ de diamètre ayant une épaisseur maximum de 38 à 40 millimètres. La longueur de chacun des tuyaux est de $212^m,50$. Celle du canal de fuite est de 145 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

282. Dégravement des apports solides de la Durance. — Le système adopté pour l'évacuation des apports des crues comporte deux opérations réalisées simultanément, savoir : dévasement par des robinets-vannes disposés dans le corps du barrage et dégravement partiel à l'amont sous l'appel des vannes et du canal de décharge et enlèvement des graviers par procédé mécanique.

Les robinets-vannes, au nombre de 20, de 2m,50 de diamètre (*fig.* 3, planche XI) sont disposés par groupes de quatre ; les deux groupes extrêmes, représentant 8 robinets, sont installés à 22 mètres au-dessous

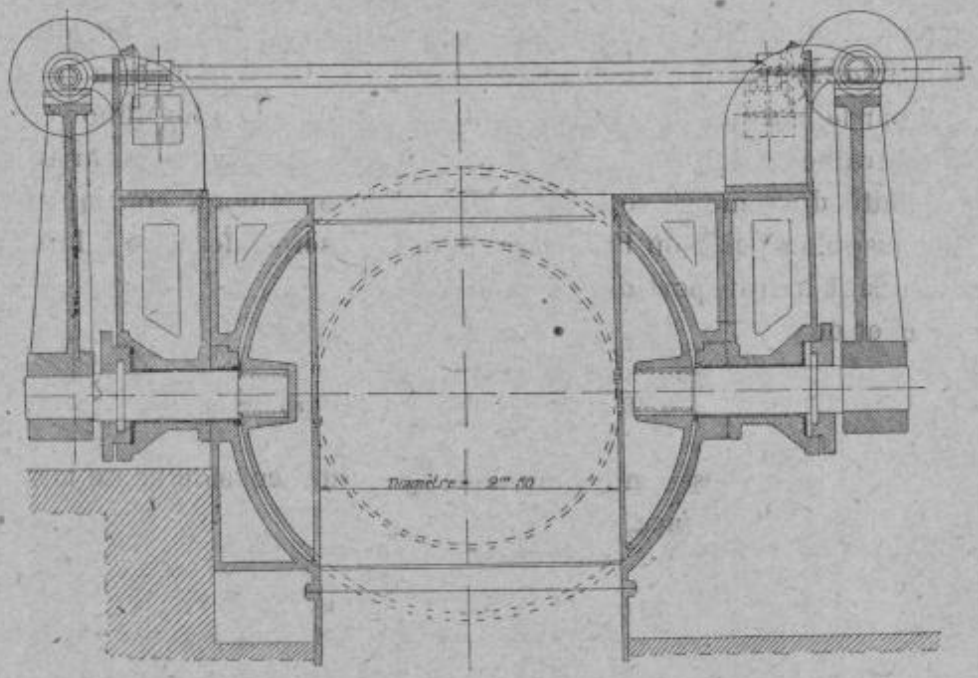


FIG. 741.

de la crête, les deux groupes adjacents, à 31 mètres et enfin le groupe central, aussi à 31 mètres. Leur emplacement est prévu du côté opposé à la prise d'eau, à l'effet de rejeter les graviers le plus loin possible de cette dernière, et la disposition en gradins a pour objectif d'éviter la création dans le barrage d'un plan horizontal de moindre résistance. Ces robinets-vannes contribuent en outre à la stabilité de l'ouvrage par l'adjonction de 1.500.000 kilogrammes de maçonneries que nécessite leur installation. Constitués par un corps sphérique (*fig.* 741) contenant une lentille de même forme disposée de façon à pouvoir évoluer de 90°, ces robinets-vannes présentent à l'écoulement un orifice en prolongement de celui du tuyau adducteur et ils ne peuvent laisser passer entre la lentille et son enveloppe que du sable ou du gravier très fin sans aucun inconvénient pour leur fonctionnement. Un cercle en fonte scellé dans la paroi du barrage autour du tuyau adducteur sert de siège à un capot d'isolement, en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cas de réparation d'un robinet, dont l'enlèvement est opéré à l'aide d'une grue roulante de 20 tonnes.

La manœuvre des robinets peut s'opérer soit à la main à l'aide d'un volant, soit au moyen d'un moteur électrique ; dans ce dernier cas la fermeture ou l'ouverture n'exigent que vingt minutes chacune.

L'emploi des robinets a été préféré à celui de vannes Stoney installées dans le barrage même, par la raison que ces dernières avec une hauteur de 18 mètres seraient peu faciles à manœuvrer et présenteraient l'inconvénient de couper le corps du barrage.

Les débits des crues en amont du barrage étant de 1.000 mètres cubes, on pourra toujours, à l'aide de l'ouverture des robinets-vannes qui sont susceptibles d'évacuer 2.000 mètres cubes, conserver dans le réservoir formé par le barrage un niveau sensiblement constant. Les limons seront alors entraînés grâce à la vitesse du courant et les graviers, arrivant à l'extrémité du remous, soit à 14 kilomètres en amont, continueront à rouler jusqu'au point où la vitesse de fond W sera inférieure à la vitesse déterminant le transport des dits graviers.

En effet on a :

$$W = 0{,}60 \text{ par seconde pour les graviers.}$$

Appelons v la vitesse moyenne dans la section considérée de la nappe et V la vitesse à la surface, on a :

$$W = 0{,}75\, v ; \quad W = 0{,}60\, V \quad \text{et} \quad v = 0{,}80\, V.$$

Le tableau suivant fournit les valeurs de v et W pour différentes sections mouillées jusqu'aux cotes de retenue (515^{m},50) et (510 mètres).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NUMÉROS des PROFILS	DISTANCES cumulées DES PROFILS à partir du canal de fuite de Beynon	SECTIONS MOUILLÉES par une crue de 2 mètres aux retenues		SECTION de la réserve agricole	VITESSES DU COURANT avec charge d'eau aux côtes			
					515,50		510,00	
		515,50	510,00		moyenne v	au fond w	moyenne v	au fond w
	m.	m²	m²	m²	m.	m.	m.	m.
1	»	420	420	»	2,38	1,78	2,38	1,78
2	300	286	241,2	44,8	3,58	2,68	4,15	3,12
3	600	439,8	322,4	117,48	2,41	1,81	3,10	2,32
4	900	572,3	406,4	165,87	1,75	1,31	2,45	1,84
5	1 200	612,6	368,4	244,20	1,62	1,22	2,68	2,01
6	1 500	947,7	362,5	585,29	1,05	0,79	2,69	2,02
7	1 800	930,0	448,4	481,95	1,07	0,79	2,22	1,67
8	2 400	2 170,5	945,8	1 244,70	0,44	0,33	1,05	0,79
9	3 200	3 027,8	1 132,8	1 895,00	0,36	0,27	0,88	0,66
10	4 000	5 131,0	2 037,2	3 093,75	0,18	0,14	0,49	0,37
11	4 600	3 457,1	1 394,6	2 062,50	0,29	0,22	0,73	0,36
12	5 440	3 752,5	2 030,9	1 721,50	0,27	0,21	0,49	0,23
13	6 700	5 288,4	2 222,2	3 066,20	0,18	0,14	0,48	0,48
14	7 500	6 029,6	3 297,6	2 732,12	0,16	0,12	0,30	0,18
15	7 700	3 229,3	4 560,1	1 669,25	0,30	0,23	0,64	0,08
16	8 100	6 486,4	4 107,1	2 382,87	0,14	0,11	0,24	0,09
17	8 860	13 653,8	9 535,6	4 118,12	0,07	0,05	0,10	0,11
18	9 740	12 188,9	8 163,9	4 025,00	0,08	0,06	0,12	0,05
19	10 620	12 286,9	9 666,7	4 620,00	0,08	0,06	0,14	0,05
20	11 120	20 092,3	13 497,0	6 095,37	0,05	0,04	0,07	0,08
21	11 920	18 321,8	13 656,5	4 665,37	0,06	0,05	0,07	0,06
22	12 240	13 651,2	9 945,6	3 705,52	0,07	0,05	0,10	—
23	13 040	18 105,3	12 764,8	5 340,10	0,06	0,05	0,08	
Barrage	—	—	—	—	—	—	—	

Ainsi pour un appel des robinets-vannes de 1.000 mètres cubes, les graviers de la crue seront poussés jusqu'en aval du profil 7, c'est-à-dire à 2.000 mètres au moins en aval du canal de fuite de Beynon, limite du remous quand le réservoir de retenue est plein. Et si on prolonge l'appel au moyen des vannes en abaissant le plan d'eau de retenue de la cote (515,50) à la cote (510) il se produit un affouillement énergique du lit de la Durance en amont du torrent de Beynon et en aval jusqu'au profil 7, et les graviers appelés jusqu'au profil 9, soit à 3.200 mètres du canal de fuite de Beynon.

Lorsque les 42 millions de mètres cubes de la réserve agricole seront épuisés, le niveau de la retenue sera à la côte (510). Alors l'extrémité du remous sera reporté à 1.896 mètres en aval et l'appel des robinets-vannes déterminera, en amont du nouveau remous, une vitesse supérieure à la vitesse d'équilibre et par suite les graviers seront entraînés plus loin en aval jusqu'au delà du profil 9, où la vitesse de fond est de $0^{m},66$.

En continuant à abaisser le plan d'eau on voit que :

A la cote 505, au profil 11 où la section est de 326^{m2} $W = 2^{m},80$
— — 12 — 380 $W = 2,10$
— — 13 — 595 $W = 1,20$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En admettant que cette opération ait lieu tous les cinq ans (1), la dépense annuelle revient à 25.000 francs environ.

283. Fonctionnement des usines de Fontbeton et des Bons-Enfants. — Immédiatement à l'aval du barrage est installée *l'usine de Fontbeton*. Son emplacement et sa disposition sont donnés (pl. XI, *fig.* 3 et 5) et 1 s (*fig.* 742 et 743). Elle comporte six turbines de 1.000 HP cha-

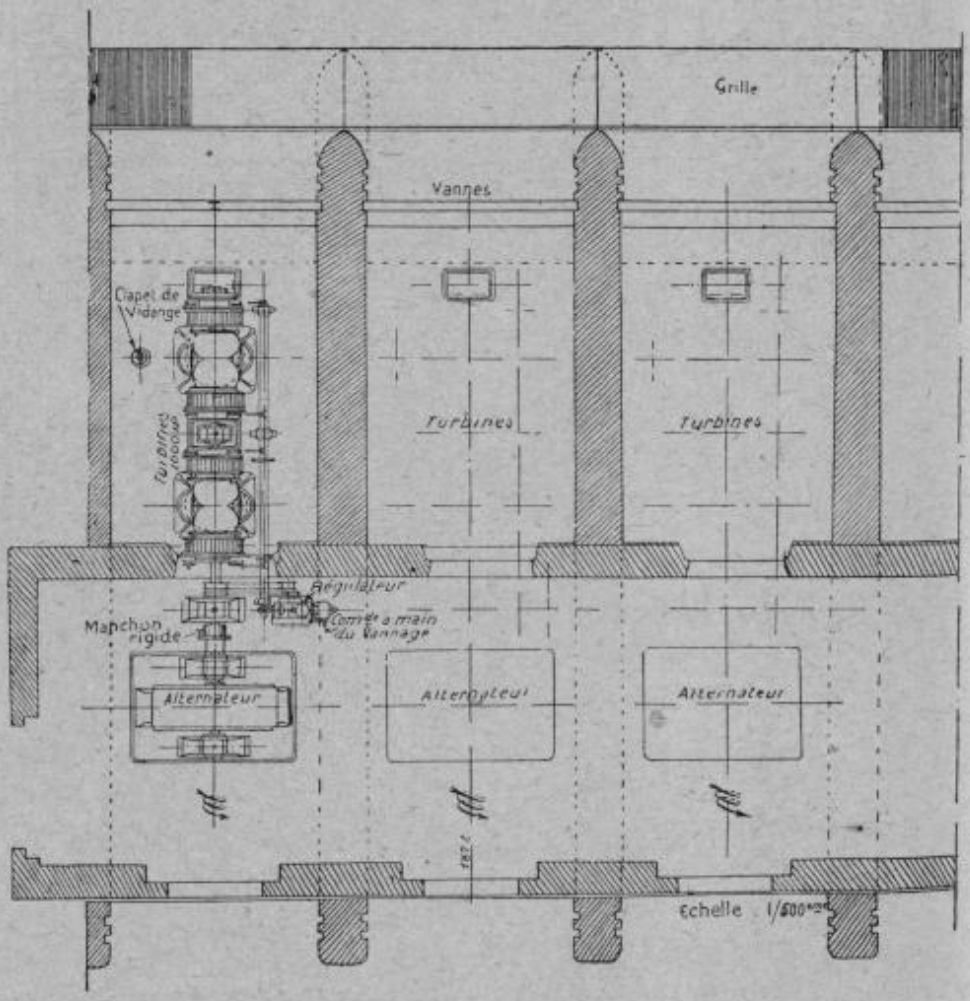


FIG. 743. — Usine de Fontbeton. — Plan.

cune ; son canal de fuite constitue la naissance du canal d'amenée de l'usine hydroélectrique des Bons-Enfants.

L'*usine hydroélectrique des Bons-Enfants* (Pl. XI, *fig.* 5 et 7 et *fig.* 744 et 745) comporte six turbines principales de 13.000 HP et trois turbines de 1.000 HP pour l'actionnement des excitatrices.

1. M. l'ingénieur Wilhem estime que le débit solide de la Durance, en graviers, à Rousset, est de 197.000 mètres cubes, soit pour 5 ans moins de 1 million de mètres cubes, équivalant à environ 1 0/0 de la capacité du réservoir de Fontbeton.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

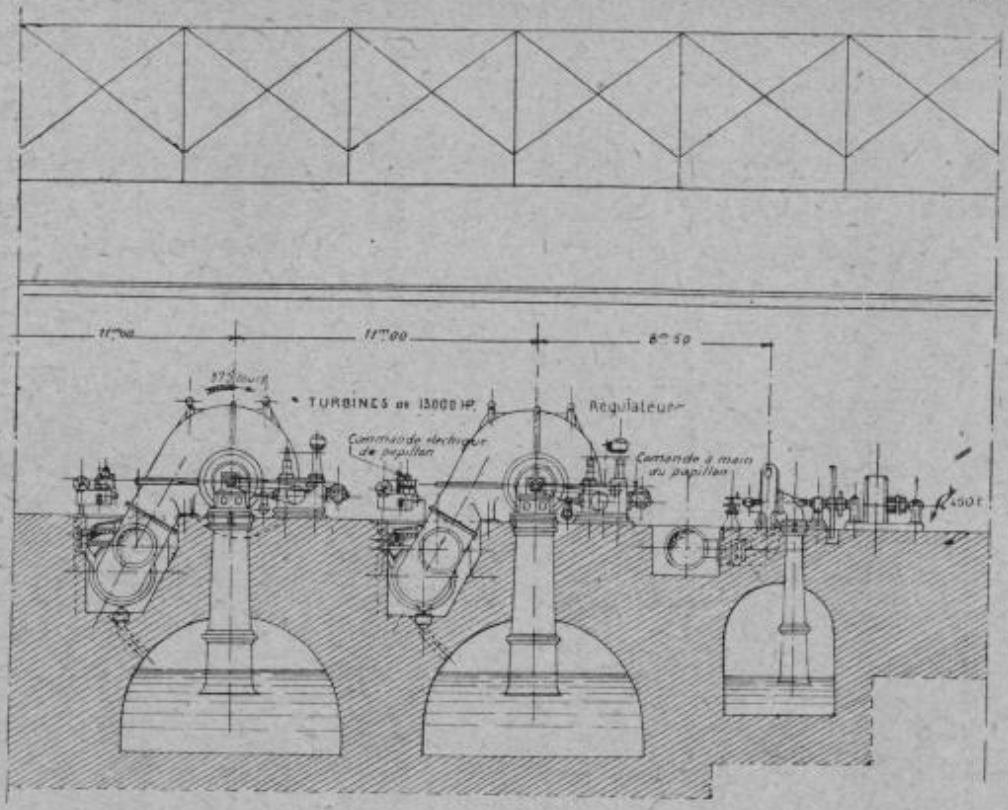


FIG. 744. — Usine des Bons-Enfants. Élévation.

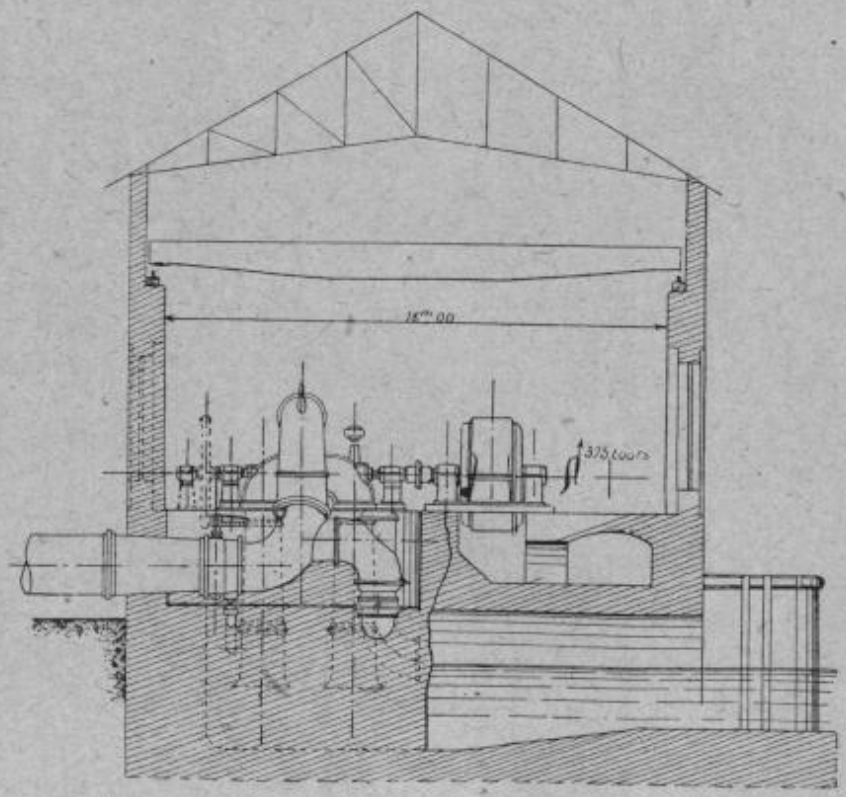


FIG. 745. — Usine des Bons-Enfants. Élévation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le matériel des deux usines pourra produire une puissance totale de 87.800 HP, dont 7.300 par l'usine de Fontbéton et 80.500 par l'usine des Bons-Enfants.

En nous reportant aux courbes de débit et de l'utilisation des eaux (*fig.* 8, pl. XI), on voit que le nombre de chevaux disponibles est pendant :

3 jours			60.000 × 3 =	2.592.000	chevaux-heures
71 —			50.000 × 71 =	51.120.000	—
5 —			55.000 × 5 =	3.960.000	—
11 —			65.000 × 11 =	10.296.000	—
12 —			75.000 × 12 =	12.960.000	—
141 —			90.000 × 141 =	182.736.000	—
28 —	$\frac{24 \times 60}{100}$	×	80.000 × 28 =	32.256.000	—
36 —			88.000 × 36 =	35.481.600	—
49 —			90.000 × 49 =	63.564.000	—
9 —			70.000 × 9 =	9.072.000	—
365 jours			Ensemble.....	404.037.600	chevaux-heures.

Soit en kilowatts :

$$404.037.600 \times 0,736 = 297.371.573 \text{ kwh.}$$

Le chômage pendant six jours pleins donne lieu à une diminution de 7.760.000 ; il reste donc disponible 289.595.673 kilowatts-heures.

On peut de ce fait utiliser 30.000.000 kilowatts-heures en courant de pointes pour l'éclairage, soit de la chute du jour à minuit, le reste employé selon les besoins d'utilisation divers (force motrice, électro-chimie, électro-métallurgie, etc.).

284. Projet financier. Évaluation du capital.

Coûts du barrage-réservoir, du canal d'amenée et de l'usine hydro-électrique des Bons-Enfants [Voir spécification au paragr. V (Devis)].	27.000.000 fr.
Frais d'études et de constitution de la Société	4.050.000
Intérêts du capital pendant le cours de la construction	2.987.500
Primes et fonds de roulement	662.500
Montant du capital	36.000.000 fr.

Ce capital peut être créé comme suit :

20.000 actions de 500 francs	10.000.000 fr.
52.000 obligations de 500 francs, émises à 475 francs, remboursables en 50 ans	26.000.000
Somme égale	36.000.000 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En tablant sur une durée d'exploitation de 80 ans, on peut en répartir les diverses périodes comme suit :

1re Période :	Construction	4 ans
2e —	Période de pleine exploitation	5 —
3e —	Amortissement des obligations	50 —
4e —	Amortissement des actions	21 —
	Ensemble	80 ans

Nous avons vu que l'usine au moment de sa pleine exploitation peut disposer de 290.000.000 de kilowatts-heures.

Dans la région, le courant permanent se vend à des prix variant, en *temps normal*, de 0 fr. 023 à 0 fr. 039, le courant de pointes 0 fr. 038 à 0 fr. 056 et les résidus 0 fr. 018 le kilowatt-heure.

En tablant sur les prix respectifs de 0 fr. 03 et de 0 fr. 012, on obtient :

30.000.000 kwh à 0f,03	900.000 fr.
260.000.000 kwh à 0f,012	3.120.000
Total	4.020.000 fr.

On peut alors établir les résultats de l'exploitation annuelle pendant la troisième période comme il suit :

Recettes	4.000.000 fr.	
Dépenses :		
Frais d'exploitation		330.000 fr.
Intérêts et amortissements des obligations 5,477 0/0		1.424.202
Amortissement 10 0/0 sur la valeur du matériel		450.000
Amortissement 1 0/0 sur les travaux d'art		180.000
Frais d'administration		50.000
Ensemble		2.434.202 fr.
Bénéfices : 4.000.000 — 2.434.000 = 1.560.000 fr.		
Répartition :		
5 0/0, réserve légale	78.000 fr.	
Intérêts à 5 0/0 sur 10.000.000 fr. (actions)	500.000	
10 0/0 au Conseil d'administration	156.000	
Superdividende et réserves	826.000	
Total égal	1.560.000 fr.	

Au point de vue des frais d'exploitation nous rappellerons que les usines de la Brillanne et de Ventavon respectivement de 12.000 et 25.000 chevaux de puissance se présentent avec des dépenses égales d'exploitation qui sont les suivantes :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Personnel : 15 hommes y compris le chef de service	40.000 fr.
Réparations du matériel hydroélectrique	30.000
Graissage	10.000
Entretien du canal et de la prise	15.000
Entretien des bâtiments	5.000
	100.000 fr.
Frais divers, accidents, grosses réparations, etc.	100.000
TOTAL	200.000 fr.

Nous pouvons donc exceptionnellement établir les frais d'exploitation de l'usine des Bons-Enfants de la façon suivante :

Personnel : 18 hommes	45.000 fr.
Entretien du matériel hydroélectrique	35.000
Graissage	15.000
Entretien des bâtiments	5.000
Entretien du barrage et du canal	20.000
ENSEMBLE	120.000 fr.
Soit en doublant : 240.000	240.000 fr.
Si nous ajoutons les dépenses spéciales ci-après :	
Dégravement	60.000
Entretien du matériel de dragage	10.000
Entretien des enrochements en rivière du barrage	20.000
On obtient la somme de	330.000 fr.

que nous avons fait figurer dans l'exposé financier.

285. Devis général. — Les prix qui sont fixés ci-après sont ceux qui devaient être pratiqués à la veille de la guerre. Nous les conservons, tels quels, la majoration qu'ils devraient supporter actuellement ne pouvant être déterminée d'une façon précise.

Les maçonneries sont prévues pour supporter une pression de 7 kilogrammes par centimètre carré, soit 1/10 de l'effort devant produire la rupture, couramment obtenu par un pilonnage mécanique fait à la main, pilonnage qui d'ailleurs permet de supprimer la tôle d'étanchéité sur la surface amont du barrage.

Les matériaux propres à la construction se trouvent sur place et tirés de bancs de graviers faciles à exploiter.

1° PRIX UNITAIRES

Déblais de graviers, jusqu'à 6m,50 de profondeur.	Le mètre cube.	4 fr.
Déblais de poudingues au pic et à la mine.	—	8 à 9 fr.
Déblais de terres de toute nature.	—	3 à 5
Déblais de schiste au pic et à la mine.	—	8 à 10
Ces prix comprennent toute sujestion et transport à une distance de 300 mètres.		
Maçonnerie de béton de ciment à prise lente.	—	20
Tôles d'acier de 3 millimètres pour garnitures.	Le kilo	0 fr. 50
Enrochements.	Le mètre cube	15 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Barrage-réservoir

Déblais de graviers	50.000 m. c. à 4 fr.	200.000 fr.
Déblais de poudingues	2.500 — à 8 —	20.000
Déblais de terre	44.000 — à 3 —	132.000
Déblais de schistes	15.000 — à 8 —	120.000
Maçonnerie de béton de ciment	371.672 — à 20 —	7.435.240
Tôles de garniture	560.000 k. à 0 fr.50	280.000
Enrochements en aval du barrage et sous les robinets-vannes	6.600 m. c. à 15 fr.	99.000
Barrage-batardeau provisoire	54.000 — à 4 —	216.000
Canaux d'évacuation des crues provisoires	18.000 — à 8 —	144.000
Vannes de prise d'eau provisoires	2 à 15.000 —	30.000
Total		9.698.240 fr.

3° Robinets-vannes pour l'évacuation des graviers

Robinet sphérique en fonte de 2m,50 d'orifice manœuvrable à la main ou au moteur avec mécanisme de commande par double secteur à vis sans fin et engrenages (poids 47.000 kilogrammes).

Tuyaux en tôle de 25 mètres de longueur, 2m,50 de diamètre, 8 millimètres d'épaisseur. Poids 18.000 kilos.
Siège en fonte pour capots, 1.000 kilos.
Ensemble, 66.000 kilos. 45.500
Emballage et transport 2.500 } 48.000 fr.

Soit 20 robinets-vannes à 48.000 fr	960.000 fr.
20 Moteurs de 20 HP à 1.750 fr	35.000
1 Grue roulante de 20 tonnes	30.000
2 Capots de rechange à 2.500 fr	5.000
Passerelle pour le mécanisme	12.000
Montage de l'ensemble du matériel	40.000
Ensemble	1.082.000 fr.

4° Usine de Fontebon

Déblais de terre	1.000 m. c. à 4 fr.	4.000 fr.
Déblais de poudingue	2.000 — à 9 —	18.000
Déblais de schistes	1.000 — à 9 —	9.000
Fondations en béton de ciment	600 — à 20 —	12.000
Murs de revêtement du réservoir de mise en charge et du bassin de fuite.	576 — à 15 —	8.640
Radiers des bassins	400 — à 20 —	8.000
Ensemble		59.640 fr.

5° Avant canal (prise d'eau)

Déblais de toute nature	12.500 m. c. à 5 fr.	62.500 fr.
Murs de revêtement	2.500 — à 20 —	50.000
Grille de 9 m. de hauteur et 100 m. longueur		30.000
Passerelle de manœuvre		10.000
Estacade flottante		5.000
Ensemble		162.900 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

6° Tunnel de garde (prise d'eau)

Déblai de schiste 5.000 à 10 fr.	50.000 fr.
Revêtement en béton de ciment armé de $0^m,10$ épaisseur 2.000 m. c. à 10 fr.	20.000
Vannes de garde et de réglage, 2 à 7.500 fr.	15.000
Ensemble	247.900 fr.

7° Canal d'amenée (a ciel ouvert)

Déblai sur une longueur de $7.174^m,50 = 473.517$ m. c. à 5 fr.	2.367.585 fr.
Maçonnerie ordinaire à la chaux du Teil 15.600 m. c. à 15 fr.	234.000
Revêtement en ciment armé de $0^m,10$ d'épaisseur sur une section de 22 m^2 par mètre courant, 157.839 m^2 à 10 fr.	1.578.390
Passages :	
En siphon de la route nationale n° 285, 3 tuyaux de $4^m,50$	55.000.
En siphon — — n° 93 et de la voie ferrée	90.000
Du chemin de grande communication n° 4	18.000
De 7 chemins vicinaux par des ponceaux de 4 mètres 7 à 8.000 fr.	56.000
Du torrent de Gironde (aqueduc)	3.500
Du ravin de Bousquettes	3.000
Du Bouesch, pont-canal sur 340 m. à 1.200 fr.	408.000
Du Jabron, pont-canal sur 280 m. à 1.200 fr.	336.000
Ensemble	5.149.175 fr

8° Canal d'amenée (souterrain)

1° *Tunnel*

Déblai de toute nature (4.046 mètres de longueur et 48 mètres carrés de section) 194.208 m^3 à 12 fr.	2.330.496 fr.
Voûte en maçonnerie sur 3.000 m. longueur 3.000 m^3 à 160 fr.	480.000
Revêtement en béton de ciment armé, 67.163 m^2 à 10 fr.	671.636
Cheminées d'aération, 2 à 2.500 fr.	5.000
Murs de tête du souterrain 2 à 4.000 fr.	8.000
Vannes de fermeture et de réglage 2 à 15.000 fr.	30.000

2° *Tunnel*

Déblais sur une longueur de 190 mètres, 9.120 m. c. à 12 fr.	109.440
Revêtement en béton de ciment armé 3.154 m^2 à 10 fr.	31.540
Murs de tête du souterrain, 2 à 4.000 fr.	8.000
Ensemble	3.574.112 fr.

9° Déversoir et bassin amortisseur

Déversoir de 150 mètres de développement	40.000 fr.
Aménagement du bassin (ancienne carrière)	8.000
Chenal de déversement	25.000
Ensemble	73.000 fr

10° Bassin et chambres de mise en charge

Déblai de rocher 2.800 m. c. à 10 fr.	28.000 fr.
Radiers du bassin et des chambres 560 m^2 à 10 fr.	5.600
Mur de soutènement des parois, 150 m. c. à 22 fr.	3.300
Massif de tête des conduites sous pression 3.500 m. c. à 22 fr.	77.000
Grille de 25 mètres de longueur	10.000
Vannes de distribution et accessoires 3 à 8.000	24.000
Chemins d'accès	2.000
Ensemble	149.900 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

11° Conduites sous pression

Déblais pour les fondations des massifs d'ancrage 6.000 m. c. à 9 fr.	54.000 fr.
Massifs en béton de ciment, 9.000 m. c. à 20 fr.	180.000
Trois tuyaux en tôle d'acier de 4m,50 de diamètre, 3.460.000 kilos à 0 fr. 52	1.799.200
Ensemble	2.033.200 fr.

12° Usine des Bons-Enfants (usine génératrice)

Fondations. Déblais (usine, bassin et canal de fuite) 34.640 m. c. à 8 fr.	277.120 fr.
Massifs des turbines et des machines électriques 5.800 m. c. à 20 fr.	116.000
Radier du bassin et du canal de fuite 5.500m2 à 5 fr.	275.000
Revêtement des talus du canal de fuite 700m2 à 15 fr.	10.500
Musoir du canal de fuite en pavés 250m2 à 15 fr.	3.750
Digues en terre perrayées 4.000m2 à 5 fr.	20.000
Enrochement du fuyant 600 t. à 12 fr.	7.200
Bâtiments de l'usine 1.600m2 à 150 fr.	240.000
6 Turbines de 13.000 HP et accessoires	700.000
3 Turbines de 1.000 HP et accessoires	700.000
Partie électrique correspondant à la puissance des turbines. Ensemble	900.000
Ensemble	2.372.070

13° Divers

Bâtiments pour le personnel	26.000 fr.
Épuisement des fouilles	100.000
Matériel de dragage	154.463
Achat de terrains. Indemnités	1.660.000
Ensemble	1.940.463 fr.

Récapitulation

Barrage réservoir	9.698.240 fr.
Robinets vannes	1.082.000
Usine de Fontbéton	59.640
Prise d'eau (avant-canal)	162.900
— (tunnel de garde)	85.000
Canal d'amenée (à ciel ouvert)	5.149.475
— — (souterrain)	3.574.112
Déversoir et bassin amortisseur	73.000
Bassin et chambres de mise en charge	149.900
Conduites sous pression	2.033.200
Usine des Bons-Enfants	2.372.070
Divers	1.940.463
Imprévus	620.000
Total	27.000.000 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — PROJET D'AMÉNAGEMENT DES DRANSES (Haute-Savoie) (1)

286. *Régime et débits de la rivière.* — Les trois chutes étudiées sont toutes trois situées sur la Dranse principale, qui se déverse dans le lac Léman, entre Thonon et Amphion-les-Bains.

Le régime de cette rivière est parfaitement connu : les basses eaux ont lieu de décembre à la mi-février ; les eaux moyennes, de la mi-février à la mi-juin et de la mi-août à décembre et les grandes eaux, de la mi-juin à la mi-août.

La Dranse, à Bioge, a un débit de $12^{mc},5$ à la seconde pendant 165 jours par an ; entre $12^{mc},5$ et $4^{mc},950$ pendant 170 jours et se maintient à $4^{mc},950$ pendant 30 jours.

La Dranse, à la Beaume, a un débit de $4^{mc},750$ pendant 169 jours ; entre $4^{mc},750$ et $2^{mc},980$ pendant 170 jours et un peu moins de $2^{mc},980$ pendant 30 jours.

287. *Puissance des chutes étudiées.* — La chute supérieure a son barrage projeté à Jotty (Planche XII), et son déversoir au confluent des Dranses d'Abondance et de Morzine ; la hauteur de chute utile étant de $87^{m},50$, la puissance maximum sur l'arbre des turbines (eaux moyennes) est de 4.550 chevaux pendant 285 jours et la puissance minimum (étiage) de 2.895 HP, durant 80 jours.

La chute moyenne a son barrage projeté à Bioge, et son déversoir au pont de la Douceur ; la hauteur de chute étant de 91 mètres, la puissance maximum est de 9.800 HP et la puissance minimum de 5.105 HP.

La chute inférieure a son barrage projeté au déversoir de la chute moyenne, et son déversoir en amont de Vongy ; la hauteur de chute étant de 28 mètres, la puissance maximum est de 3.020 HP et la puissance minimum de 1.570 HP.

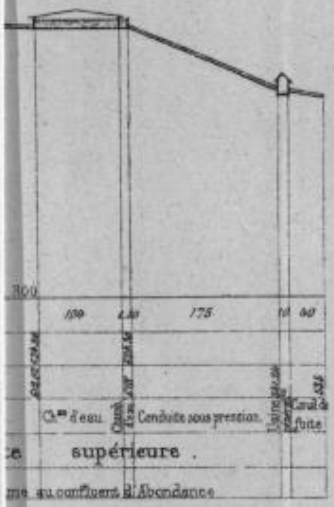
Les trois chutes ensemble peuvent donner environ 17.370 HP en chevaux moyens et 9.570 HP d'étiage.

288. *Régularisation du régime de la rivière.* — Il est possible de régulariser d'une façon économique le débit alimentant les trois chutes par l'établissement d'une réserve hydraulique en amont de la chute supérieure. Le mur du barrage réservoir qui serait à édifier dans un endroit très resserré du lit de la rivière ne serait pas coûteux de construction et les droits de riverainetés, peu élevés en raison de l'escarpement des rives et de l'alti-

(1) Ce projet avait été présenté par l'auteur avant les constructions de l'usine hydro-électrique de Bonnevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 2



du barrage

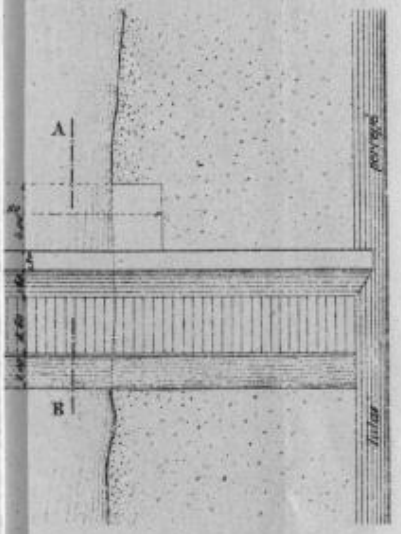
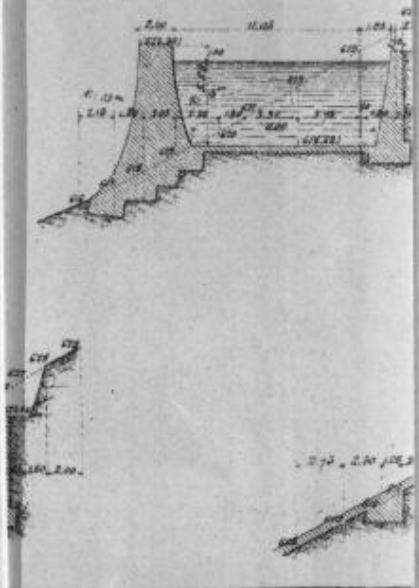


Fig. 18. Profil N° 3

(voir fig. 7)

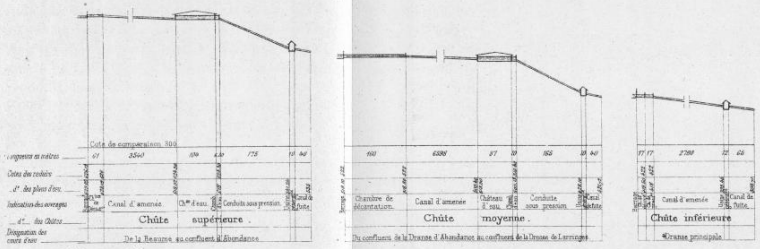


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PROJET D'AMÉNAGEMENT DE LA RIVIÈRE LA DRANSE

Fig. 1. Schéma du bassin des Dranses

Fig. 2. Schéma des gradins de chûtes



Chûte supérieure

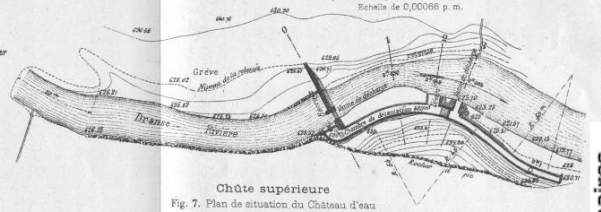
Fig. 3. Plan de situation des lieux

Echelle : 1/30.000

Chûte supérieure

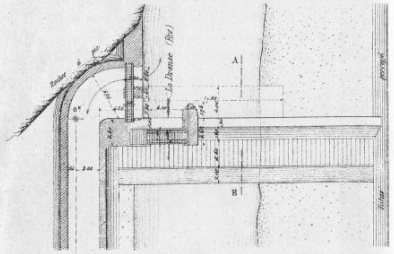
Fig. 4. Plan général de la prise d'eau

Echelle de 0,00066 p. m.



Chûte supérieure

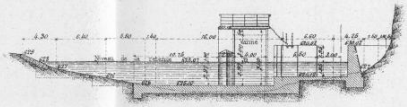
Fig. 5. Prise d'eau. — Détails du barrage



Chûte supérieure

Fig. 6. Prise d'eau. — Détails du barrage

Profil N° 0 (Voir fig. 4)



Chûte supérieure

Fig. 7. Plan de situation du Château d'eau

Echelle de 0,00066 p. m.

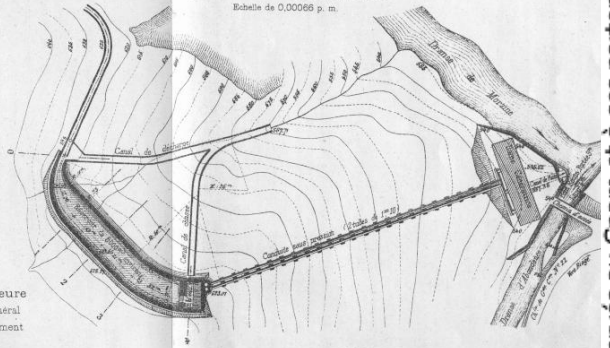


Fig. 11. Profil N° 1

(voir fig. 4)

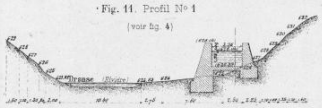


Fig. 12. Profil N° 2

(voir fig. 4)

Chûte supérieure

Fig. 8. Conduite forcée

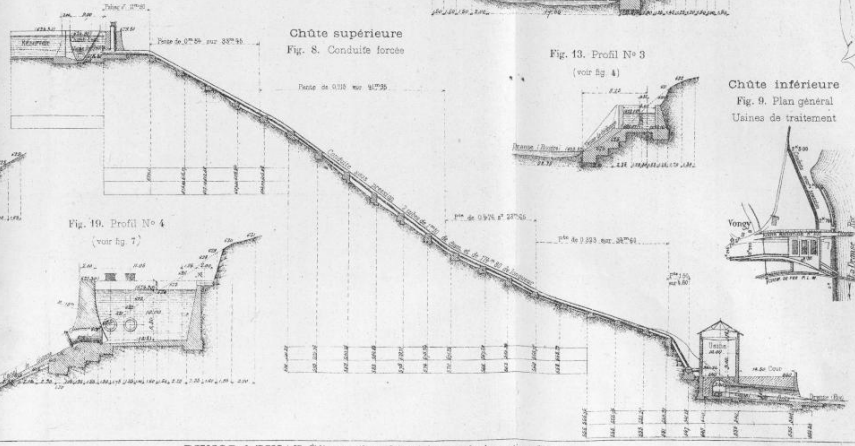


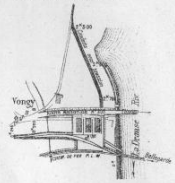
Fig. 13. Profil N° 3

(voir fig. 4)

Chûte inférieure

Fig. 9. Plan général

Usines de traitement



Chûte inférieure

Fig. 10. Usines de traitement et voies de raccordement au P. L. M.

Echelle de 0,0006 p. m.

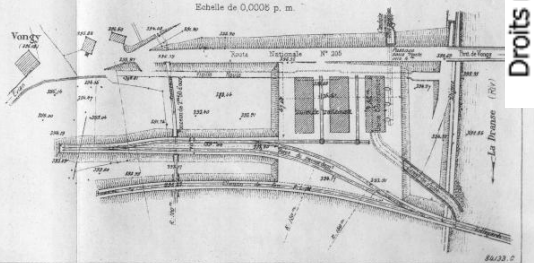


Fig. 14. Coupe suivant A B

(voir fig. 5)

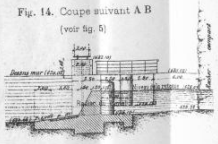


Fig. 16. Profil N° 1

(voir fig. 7)

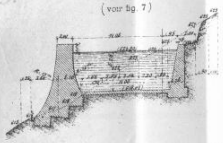


Fig. 15. Profil N° 0

(voir fig. 7)

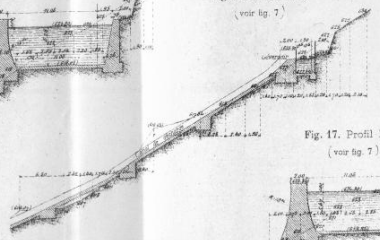


Fig. 18. Profil N° 3

(voir fig. 7)

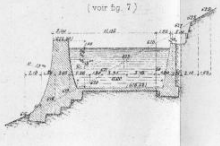


Fig. 19. Profil N° 4

(voir fig. 7)

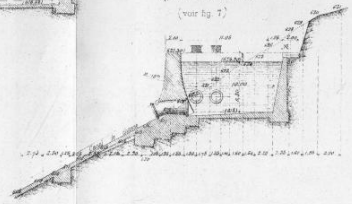
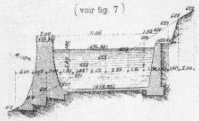


Fig. 17. Profil N° 2

(voir fig. 7)



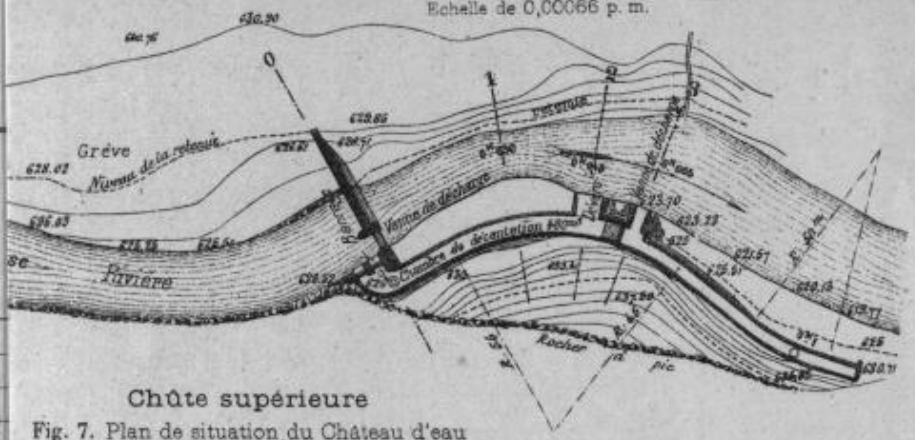
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DUNOD & PINAT, Éditeurs, 47 et 49 quai des grands-Augustins, Paris

Chûte supérieure

Fig. 4. Plan général de la prise d'eau

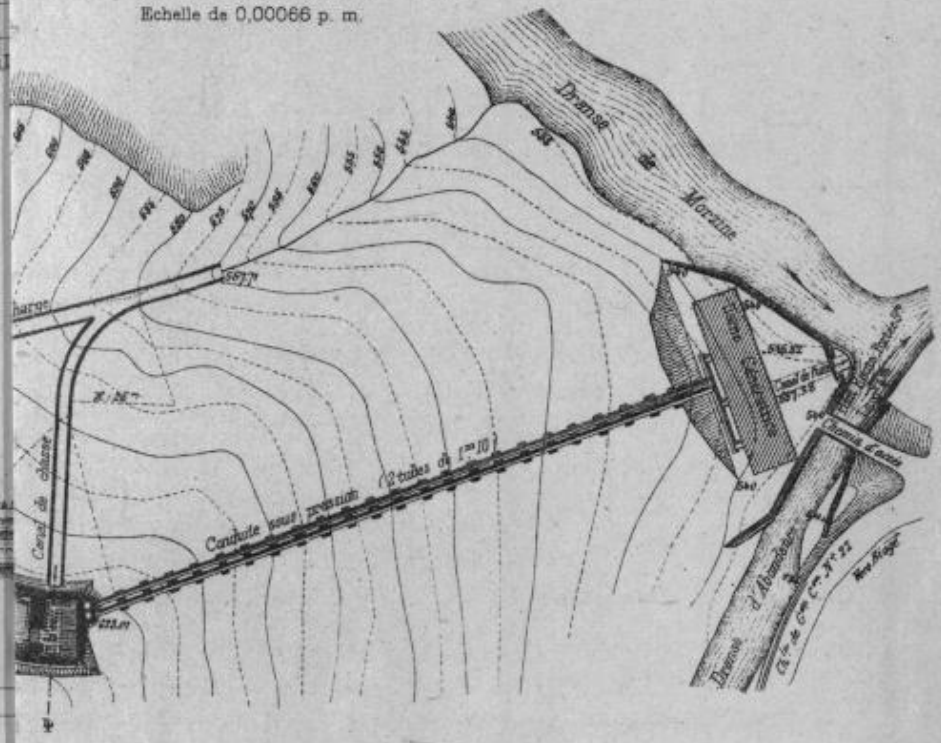
Echelle de 0,00066 p. m.



Chûte supérieure

Fig. 7. Plan de situation du Château d'eau

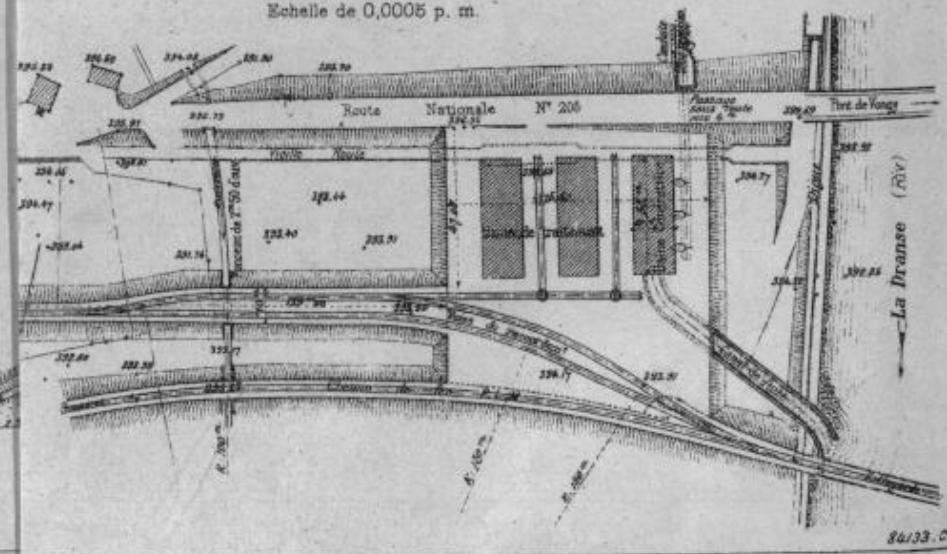
Echelle de 0,00066 p. m.



Chûte inférieure

Fig. 10. Usines de traitement et voies de raccordement au P. L. M.

Echelle de 0,0005 p. m.



84/33. C

Courtier & Cie, 43, rue de Dunkerque, Paris

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tude des terrains. On pourrait ainsi emmagasiner entre les lieux dits « Le Pont du Diable » et « Le Pont des Gyss » une réserve de 4 millions de mètres cubes. De cette façon le débit aux basses eaux pourrait être augmenté de 1.800 litres à la seconde : alors la puissance minimum de l'ensemble des chutes atteindrait 13.000 HP. Avec une réserve thermique de 2.000 HP, on serait assuré d'une puissance minimum de 15.000 HP. En eaux moyennes, la puissance s'élèverait à 24.000 HP environ.

289. *Chutes supplémentaires.* — La partie supérieure de la Dranse de rzineMo se prête facilement à l'aménagement d'une quatrième chute sous une dénivellation d'environ 160 mètres, régularisable avec peu de dépenses, par le jeu d'une réserve naturelle, le lac de Montriond. De ce fait on pourrait capter une nouvelle force hydraulique de 10.000 HP environ. Enfin il serait possible aussi d'aménager économiquement une cinquième chute sous 32 mètres de hauteur, sur la Dranse d'Abondance, permettant d'utiliser une puissance de 1.000 HP.

L'ensemble des cinq chutes porterait ainsi la puissance minimum utilisable à 25.000 HP et la puissance maximum à 35.000 HP.

290. *Coût des travaux pour les trois chutes étudiées.* — Le coût de l'aménagement hydraulique des trois chutes étudiées se divise comme suit :

TRAVAUX D'ART

(*Prix d'avant guerre*)

Chute supérieure (C)	1.125.000 fr.	4.325.000 fr.
— moyenne (B)	2.300.000 »	
— inférieure (A)	900.000 »	

MATÉRIEL HYDRAULIQUE

Chute (C)	137.000 fr.	447.000 fr.
— (B)	192.000 »	
— (A)	118.000 »	
Ensemble		4.772.000 fr.

Le prix de revient du cheval hydraulique sur l'arbre des turbines revient ainsi à 280 francs pour la puissance maximum et à 498 francs pour la puissance minimum, soit en moyenne 390 francs.

Au point de vue de l'utilisation industrielle de la force motrice des chutes, il a été envisagé trois solutions.

291. *Création d'une grande usine mixte électrométallurgique et électrochimique.* — La situation des chutes a paru particulièrement propice à l'établissement d'une Usine spécialisée à la fabrication des aciers titanes, des aciers spéciaux et des nitrates.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La puissance correspondant aux 9.570 HP constants (régime de la rivière non régularisée) serait absorbée pour la fabrication des aciers et la puissance correspondant au régime périodique, soit 7.800 HP appliquée à la production de nitrates.

La production prévue serait : 12.000 tonnes par an d'aciers titanes, 3.000 tonnes d'aciers fins et 3.000 tonnes de nitrates.

L'écoulement de ces produits ne peut donner lieu à aucune hésitation.

Les dépenses d'installation d'une pareille usine ont été évaluées comme suit :

Aménagement hydraulique des trois chutes (voir plus haut)	4.772.000 fr.
Matériel électrique (alternateurs, transformateurs, etc.).....	477.000 »
Fours électriques, appareils de manutention, cornues, matériel de forge et de confection, laminoirs, presses hydrauliques, enfourneuses électriques, matériel de fabrication, de transport, etc.....	1.030.000 »
Ensemble.....	6.279.000 fr.

Avec les droits de riverainetés et les frais d'études, fonds de roulement, frais de constitution de la société exploitante, il faudrait compter sur un capital d'environ 9 millions pour réaliser cette entreprise.

Les dépenses de fabrication sont estimées comme suit :

a) Pour les 12.000 tonnes d'aciers titanes.....	2.633.000 fr.
b) Pour les 3.000 tonnes d'aciers fins.....	1.085.000 »
c) Pour les 3.000 tonnes de nitrates.....	340.000 »
Ensemble.....	4.058.000 fr.

Les recettes se traduisent comme suit :

a) 12.000 tonnes à 4.000 francs.....	4.800.000 fr.
b) 3.000 tonnes à 1.000 francs.....	3.000.000 »
c) 3.000 tonnes à 250 francs.....	850.000 »
Ensemble.....	8.650.000 fr.

Le bénéfice net ressortirait à environ 2 millions, qui permettraient de rémunérer largement le capital à engager.

292. *Création d'une usine de transport d'énergie électrique et d'une usine électrochimique.* — On a envisagé une autre solution, plus immédiatement réalisable, ayant en vue la vente du courant électrique au moyen d'un transport d'énergie dans la région de Lyon et de Saint-Étienne et l'établissement d'une usine électrochimique pour l'utilisation des chevaux périodiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans cette hypothèse les dépenses d'installation se chiffrent comme suit :

Aménagement hydraulique des chutes (comme plus haut)...	4.772.000 fr.
Usine génératrice (matériel électrique).....	620.000 »
Usine électrochimique.....	535.000 »
Ligne de transport d'énergie électrique.....	1.919.000 »
Usine thermique de secours.....	500.000 »
Ensemble.....	8.346.000 fr.

soit un capital d'environ 10 millions.

Les recettes se traduiraient comme ci-après :

Éclairage, force motrice, tramways, etc. :	
30.200.000 kw.-h. (période de début).....	4.150.000 fr.
Électrochimie : 14.720.000 kw.-h.....	736.000 »
	4.886.000 fr.
Les frais d'exploitation et les frais généraux ont été évalués à	3.683.000 fr.
Il resterait donc comme bénéfice net.....	1.203.000 fr.

soit du 12 0/0.

Les lignes de tramways en Haute-Savoie pouvant être alimentées par la ligne de transport d'énergie projetée sont les suivantes :

Ligne Annecy-Saint-Julien : 40 kilomètres ;

Ligne Annecy-Seyssel : 40 kilomètres ;

Ligne Lugrin-Évian-Douvaine et Hermance : 43 kilomètres.

Ces trois lignes représentent une consommation de plus de 3 millions de kilowatts au prix de 0 fr. 06 le kilowatt-heure.

Un deuxième réseau, en préparation, aura 100 kilomètres de longueur.

293. *Création d'une verrerie électrique.* — Au lieu d'installer une usine électrochimique au pied des chutes, comme il est spécifié ci-avant, on pourrait alimenter par la ligne de transport une verrerie électrique à créer, à environ 48 kilomètres du pied des chutes.

En effet, il existe de puissants gisements de silice sur le versant nord du mont Salève, à proximité du futur tramway d'Annecy à Saint-Julien, gisements qui n'ont pu être exploités jusqu'ici faute de moyens de transports économiques. L'exploitation de ces gisements peut avoir lieu à ciel ouvert ou par galeries. Cette verrerie exigerait pour son fonctionnement une puissance de 2.500 à 3.000 kilowatts aux bornes des fours. La dépense d'installation, en se basant sur une production journalière de 8.000 à 9.000 kilogrammes de verre fournis par trois fours de fusion et trois fours à recuire, s'élèverait à environ 750.000 francs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

294. Usine hydroélectrique de la Bridoire. — Nous complétons ce chapitre par la présentation d'une usine installée pour les besoins de la guerre et appartenant à la Société Générale de force et de lumière.

L'intérêt qu'offre cette installation réside surtout dans la partie électrique réalisée par les célèbres établissements Schneider et Cie et qui constitue un type des plus récents et des plus complets dans cet ordre de choses.

L'Usine de la Bridoire comporte, au point de vue hydraulique, 4 turbines Piccard-Pictet de 2.000 chevaux chaque, à axe horizontal, attaquant directement par manchon d'accouplement un alternateur de 1.700 K. V. A., 4.000 volts, 50 périodes, tournant à 428 tours à la minute.

Le bâtiment principal comprend essentiellement la salle des machines dans laquelle sont installés, en plus des groupes générateurs et des groupes d'excitation, les pupitres de commande et les panneaux de contrôle. A ce bâtiment en est accolé un autre qui renferme les transformateurs et le poste de distribution.

Les caractéristiques de l'aménagement électrique sont les suivantes.

Le service des alternateurs est assuré par deux groupes d'excitatrices de chacun 120 kilowatts à 500 tours-minute sous 115 volts, chacun de ces groupes étant capable de fournir l'excitation des quatre alternateurs précités.

Entre les massifs de fondation des alternateurs, au sous-sol, et le mur voisin du bâtiment principal, on a disposé quatre caissons, en fers profilés, comprenant chacun l'appareillage d'un alternateur et au-dessus de chaque caisson, mais dans la salle des machines, se trouve le pupitre correspondant portant les leviers et les volants de commande mécanique à distance des divers appareils.

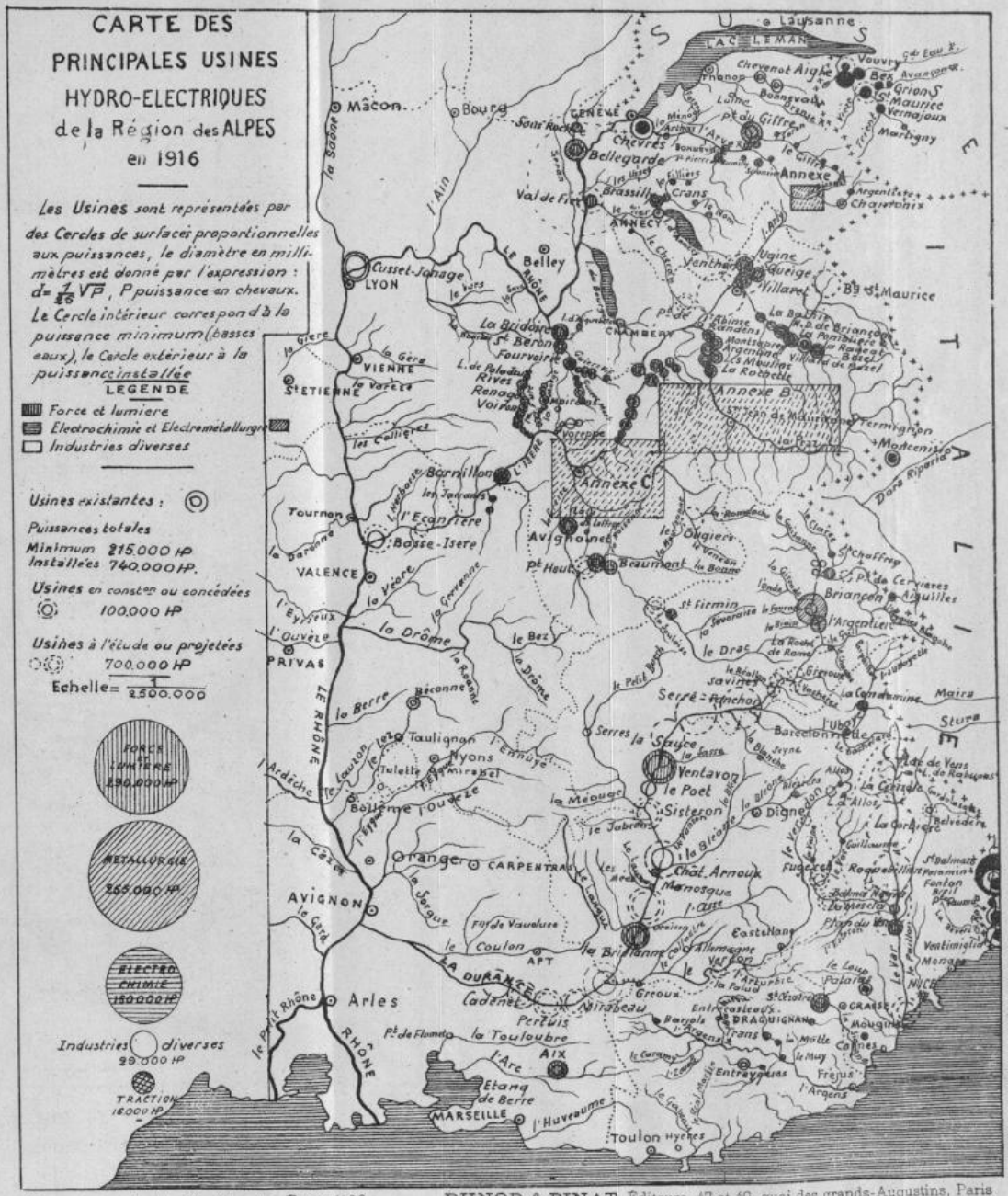
Le rez-de-chaussée du bâtiment annexé est occupé principalement par deux jeux de barres omnibus à 4.000 volts disposés dans un châssis léger en fers profilés portant également les appareils de sectionnement à 4.000 volts des alternateurs et des transformateurs, ces derniers au nombre de quatre et de 1.700 K. V. A. chaque.

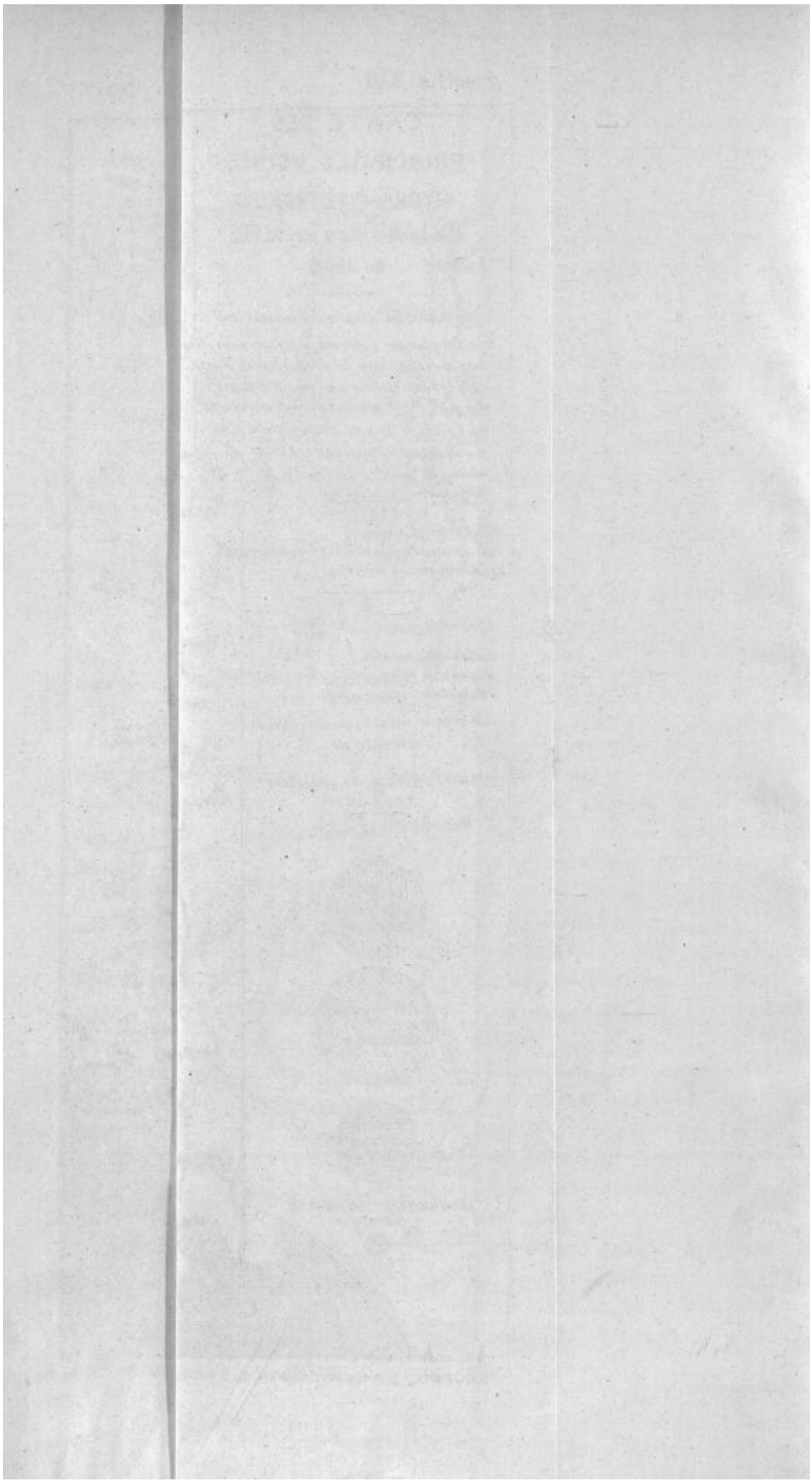
Le second étage du bâtiment annexé, le premier étant occupé par les transformateurs, contient l'appareillage à 45.000 volts (devant être porté plus tard à 60.000 volts). Actuellement il n'existe que deux départs de lignes. Toutes les canalisations à 45.000 volts sont formées de tubes de laiton portés par des isolateurs coniques en porcelaine ayant tous satisfaits à l'essai diélectrique sous 100.000 volts.

Les (*fig.* 746 à 752) permettent de se rendre compte de tous les détails de l'installation électrique dont le fonctionnement a donné entière satisfaction à la Société Générale de force et de lumière, depuis la mise en marche de la Centrale, soit depuis mars 1917.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Planche XIII

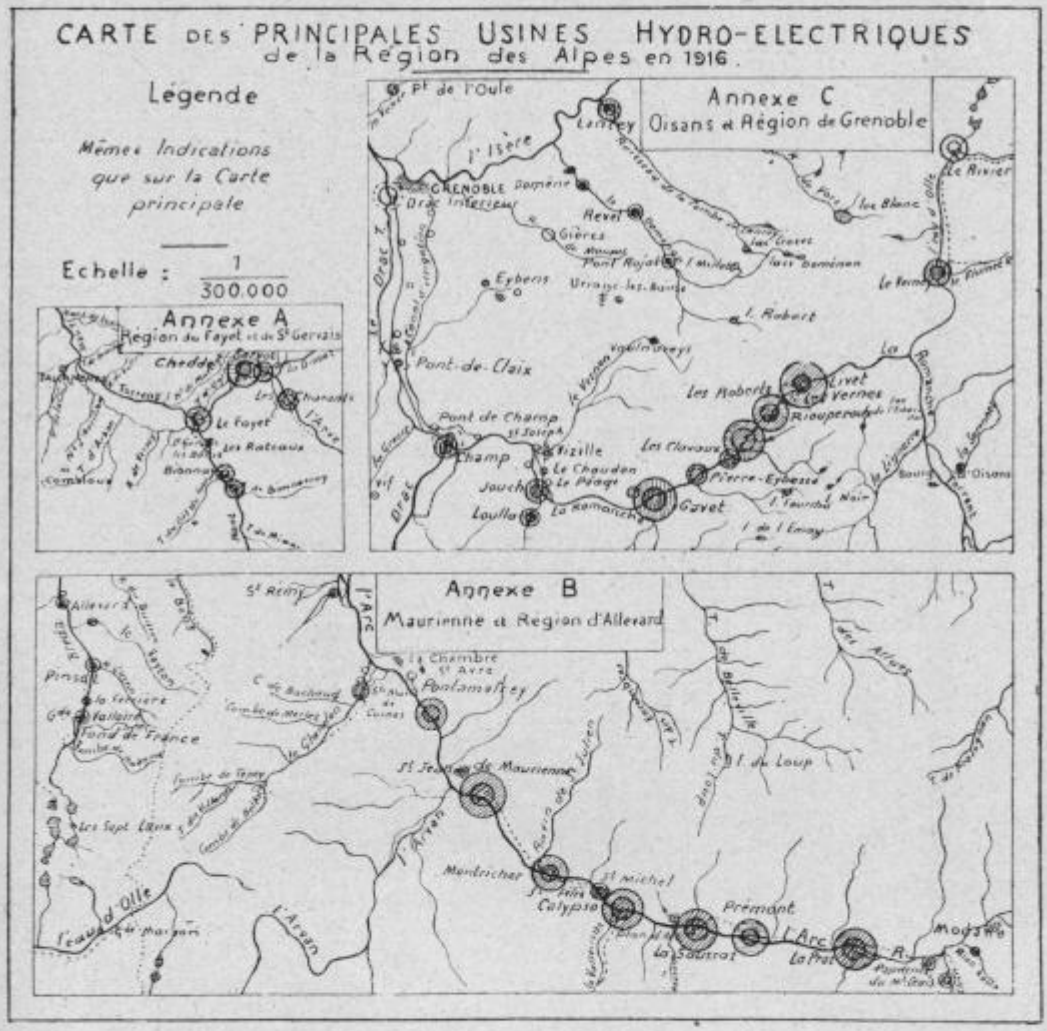

CARTE DES
PRINCIPALES USINES
HYDRO-ELECTRIQUES
de la Région des ALPES
en 1916
Les Usines sont représentées par des Cercles de surfaces proportionnelles aux puissances, le diamètre en millimètres est donné par l'expression : d = 1/10 √P , P puissance en chevaux.
Le Cercle intérieur correspond à la puissance minimum (basses eaux), le Cercle extérieur à la puissance installée
LEGENDE
Force et lumiere
Electrochimie et Electrometallurgie
Industries diverses
Usines existantes :
Puissances totales
Minimum 215.000 HP
Installées 740.000 HP.
Usines en construction ou concédées
100.000 HP
Usines à l'étude ou projetées
700.000 HP
Echelle = 1/2500.000
FORCE LUMIERE 290.000 HP
METALLURGIE 265.000 HP
ELECTRO CHIMIE 180.000 HP
Industries diverses 90.000 HP
TRACTION 16.000 HP
SUISSE
ITALIE
LAC LEMAN
Lausanne
Mâcon
Bourg
GENEVE
Chevres
Bellegarde
Annecy
Annemasse
Cusset-Jonage
LYON
St Etienne
VIENNE
Bonneville
Cluses
Sallanches
Chamonix
Bg St Maurice
Martigny
Grion S
St Maurice
Vernayaz
Vouvry
Bex
Aigle
Chevenoz
Thonon
Evian
Annecy
Aix les Bains
CHAMBERY
Modane
Bourg St Maurice
Montceniss
Fermignon
Annecy
Annemasse
Annecy
Annecy
Annecy

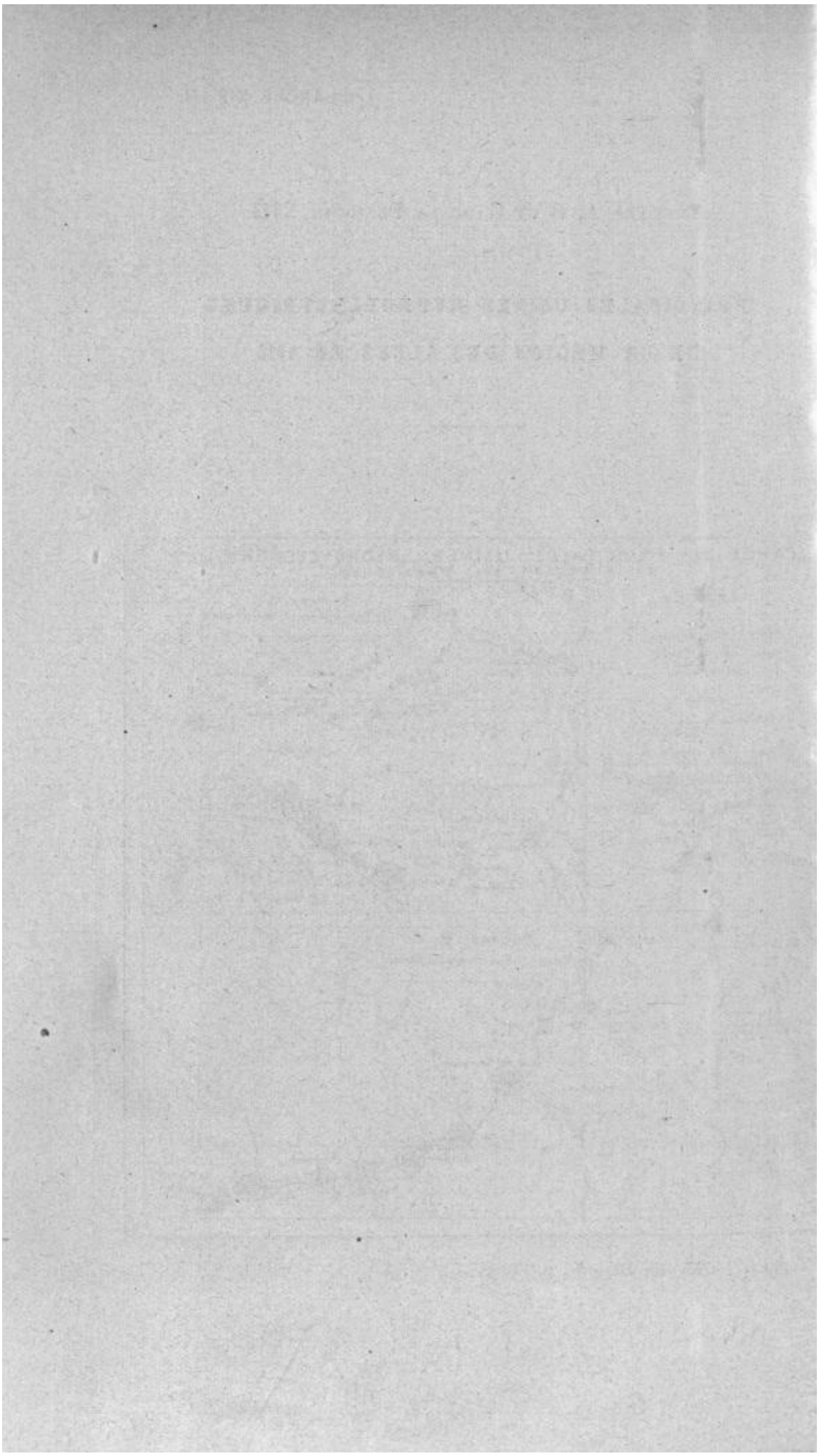


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ANNEXES A, B ET C DE LA PLANCHE XIII

PRINCIPALES USINES HYDROÉLECTRIQUES DE LA RÉGION DES ALPES EN 1916


CARTE DES PRINCIPALES USINES HYDRO-ELECTRIQUES
de la Région des Alpes en 1916.
Légende
Mêmes Indications que sur la Carte principale
Echelle : 1/300.000
Annexe A
Région du Fayet et de St Gervais
Annexe C
Oisans et Région de Grenoble
Annexe B
Maurienne et Région d'Allevard
GRENOBLE
Pont-de-Claix
Champ
Gavet
Pierre-Eybesse
Les Clavaux
Les Roberts
Rioupéroux
Livet
Les Vernes
Le Fayet
Chedde
Les Rateaux
Pont de Champ
St Joseph
Le Chaudan
Le Péage
Jarrie
Vizille
Oisans
Le Rivier
Les Blancs
Le Freney
Prémont
St Jean de Maurienne
St Michel
Montricher
Calypso
La Saussaz
Modane
Pontamafrey
La Chambre
St Avre
St Remy
Allevard
Pinsot
Les Sept Laux
l'Eau d'Olle
l'Arvan
l'Arc
Les Arlaux
Le Bourg d'Oisans
Le Verney
Le Torrent Noir
Le Lignare
Le Romanche
Le Drac
Le Drac Inférieur
Le Vénéon
Le Bonrieu
Le Gua
Le Bens
Le Bourg
Le Rif Brac
Le Torrent de Livet
Le Torrent de Ferrand
Le Torrent de Bonnenuit
Le Torrent de Bramefarine
Le Torrent de Bonnenuit
Le Torrent de Bramefarine
Le Torrent de Bonnenuit
Le Torrent de Bramefarine



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

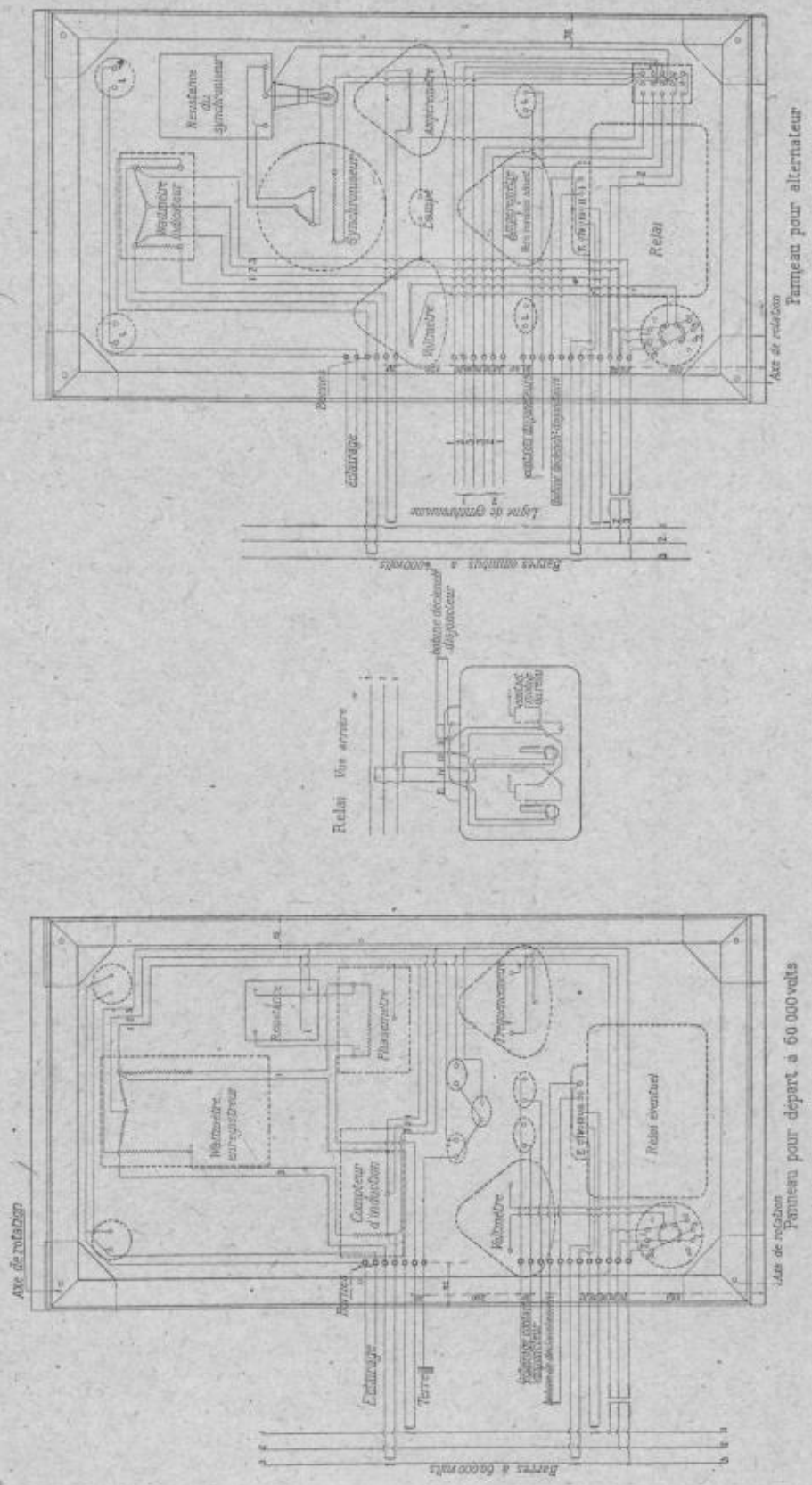


FIG. 746. — Usine hydroélectrique de la Bridoire. — Panneaux des appareils de mesure (alternateur).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

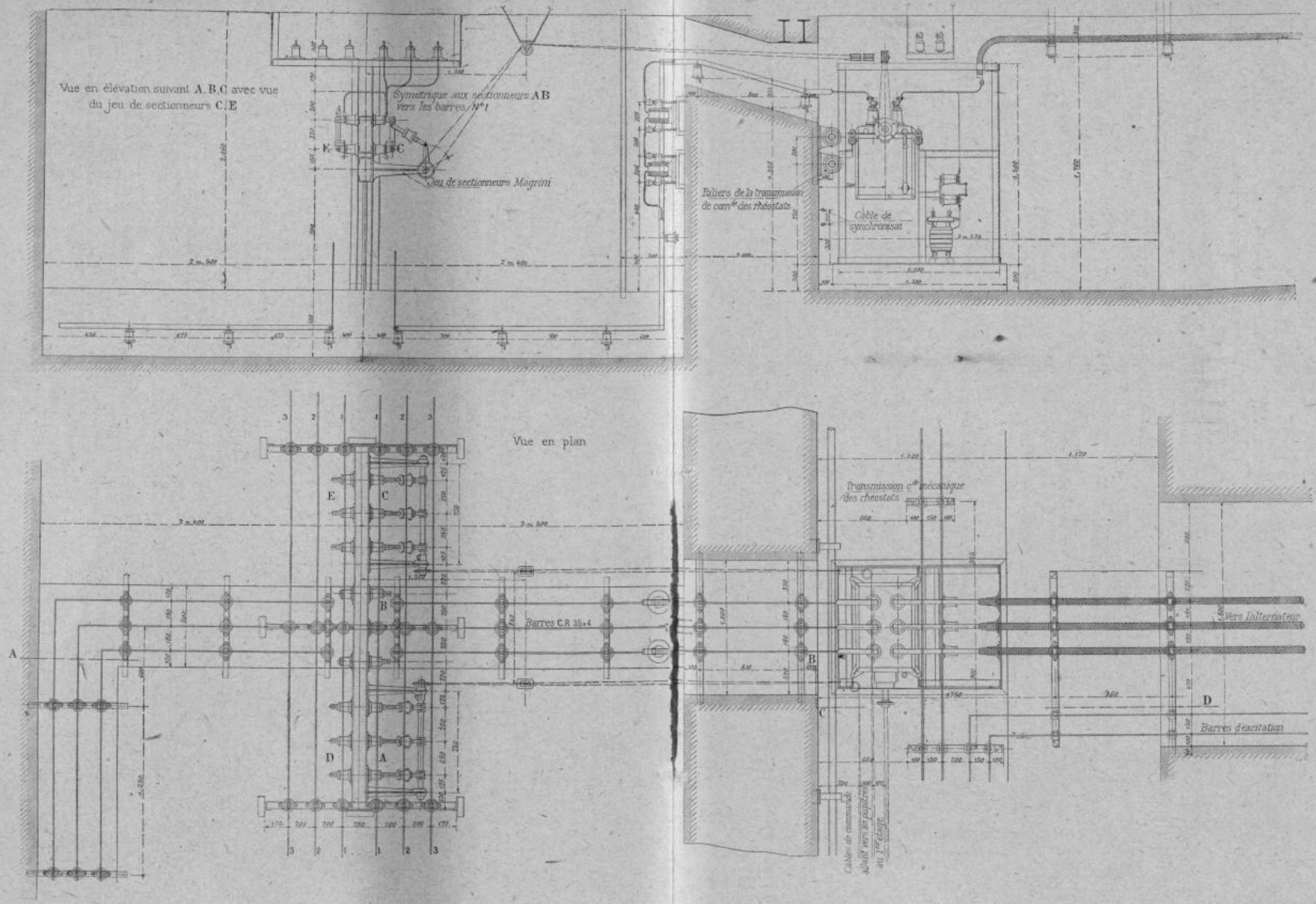


FIG. 747. — Usine hydroélectrique de la Bridoire. — Ensemble d'un caisson d'alternateur. — Sectionneurs tripolaires et barres à 4000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

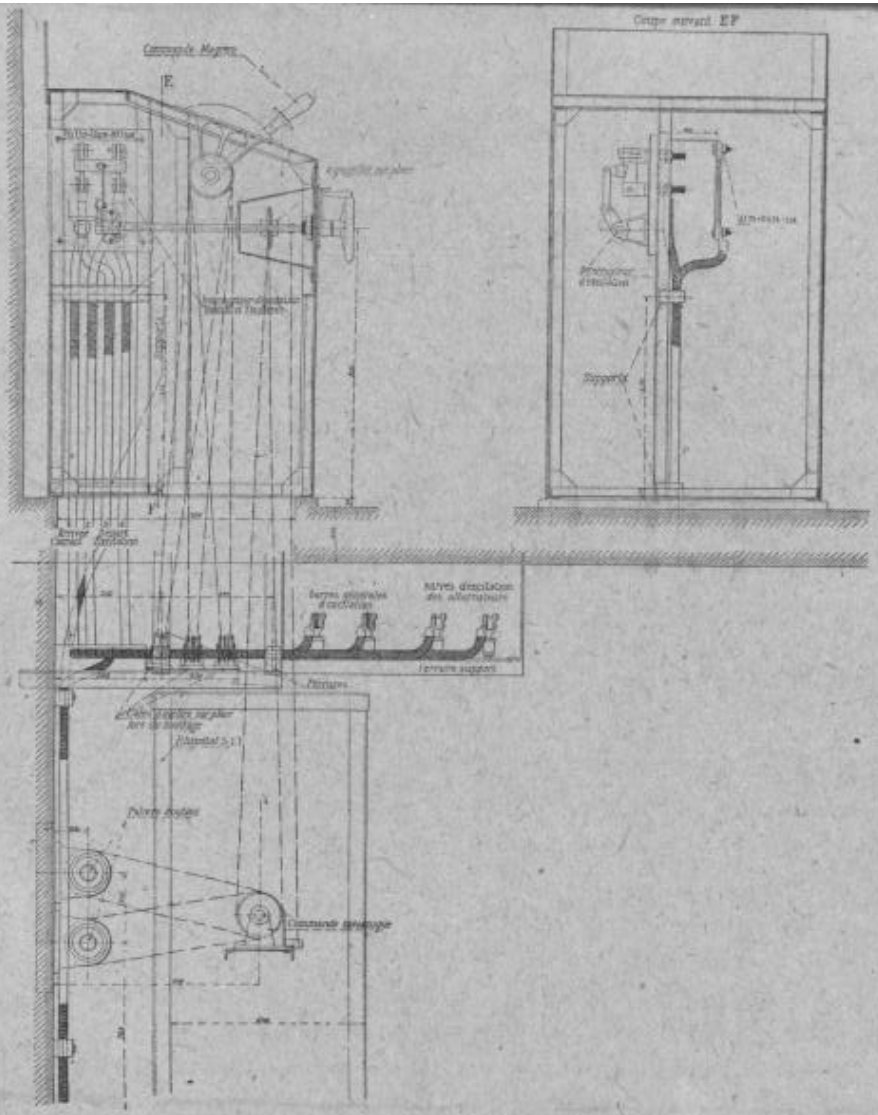


FIG. 748. — Usine hydroélectrique de la Bridoire. — Ensemble du pupitre et commande du rhéostat de champ d'alternateur.

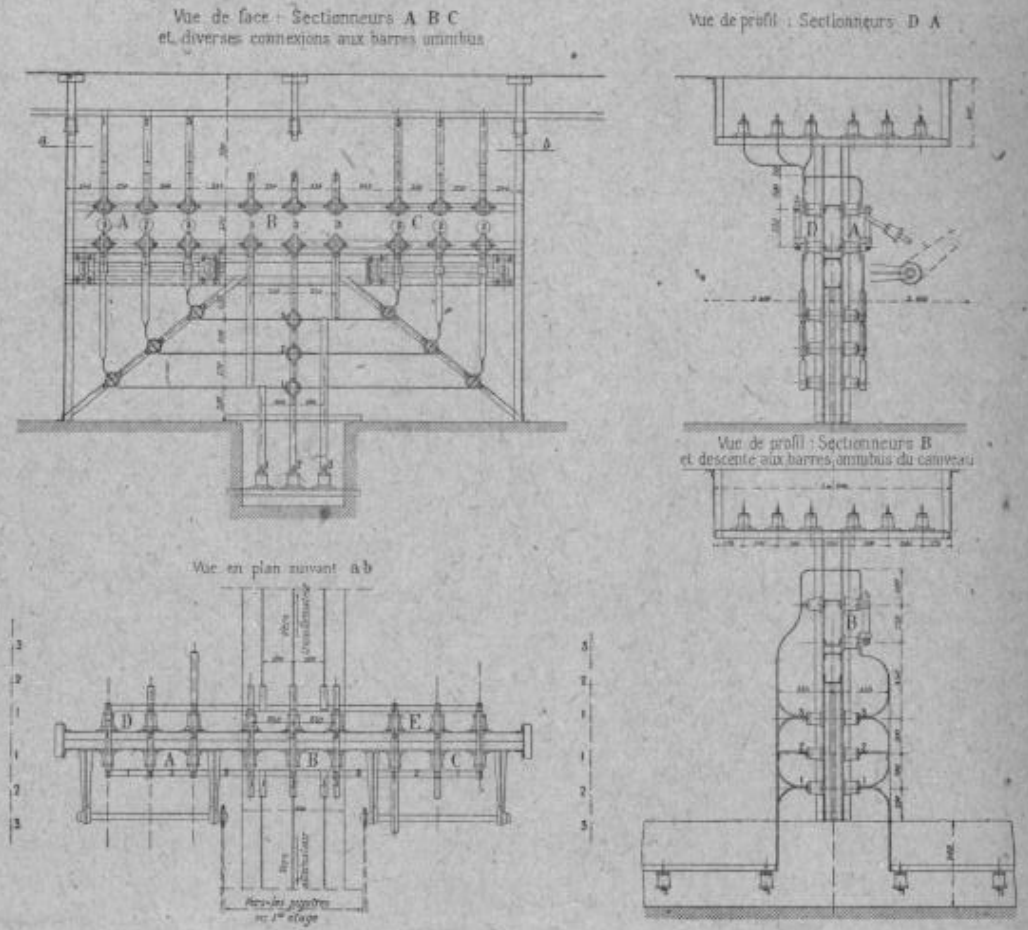


FIG. 749. — Usine hydroélectrique de la Bridoire. — Sectionneurs tripolaires et barres à 4000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

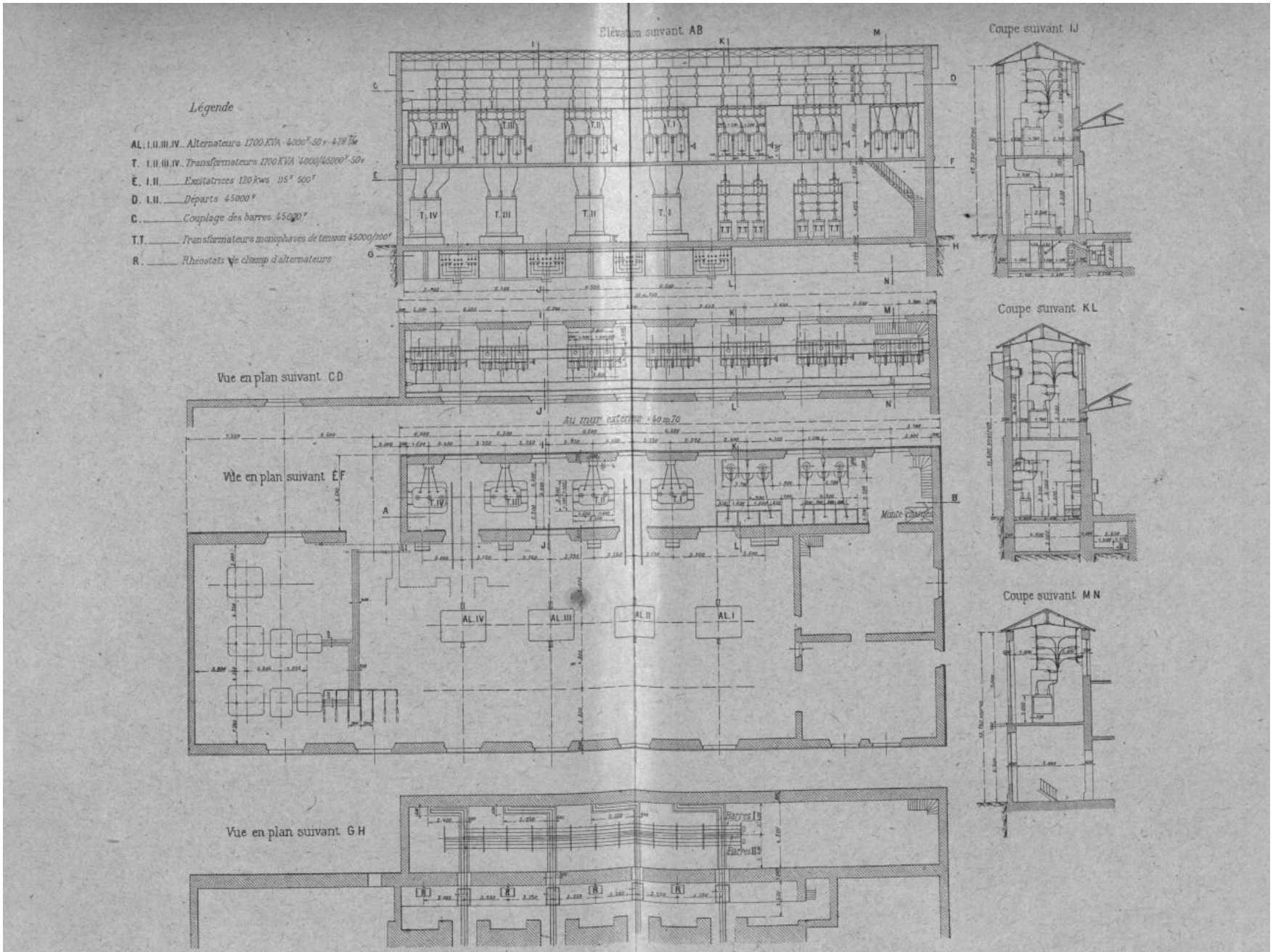
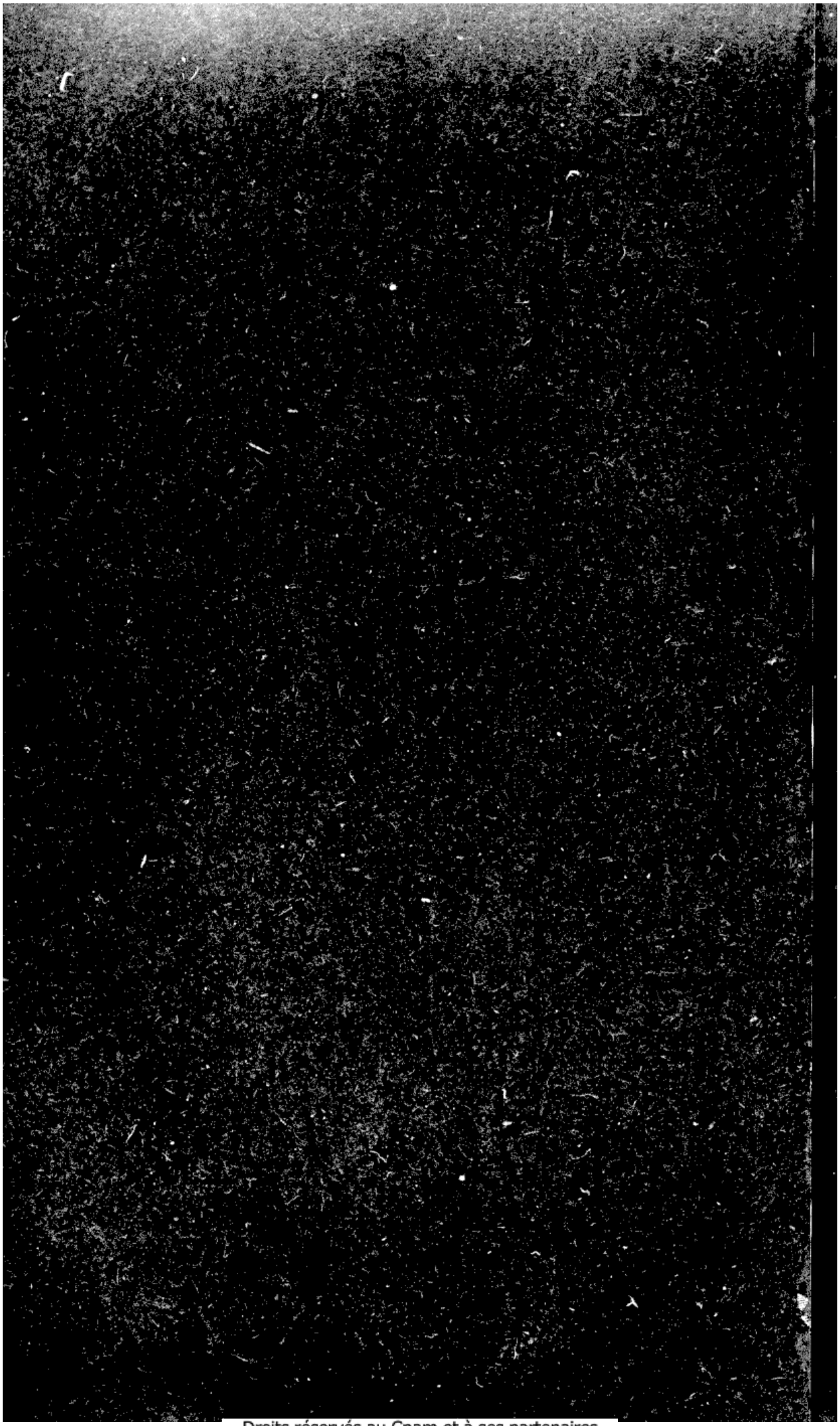


Fig. 752. — Usine hydroélectrique de la Bridoire. — Ensemble de l'installation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ERRATA

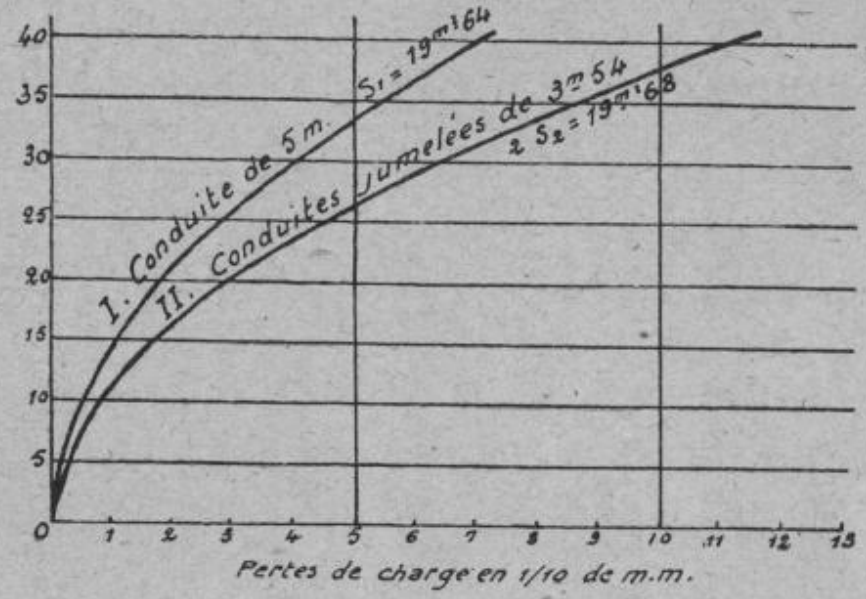


FIG. 194 (Page 358).

FIG. 196. — Page 364. — Lire sur le cliché :

à la vanne au lieu de *à la come*.

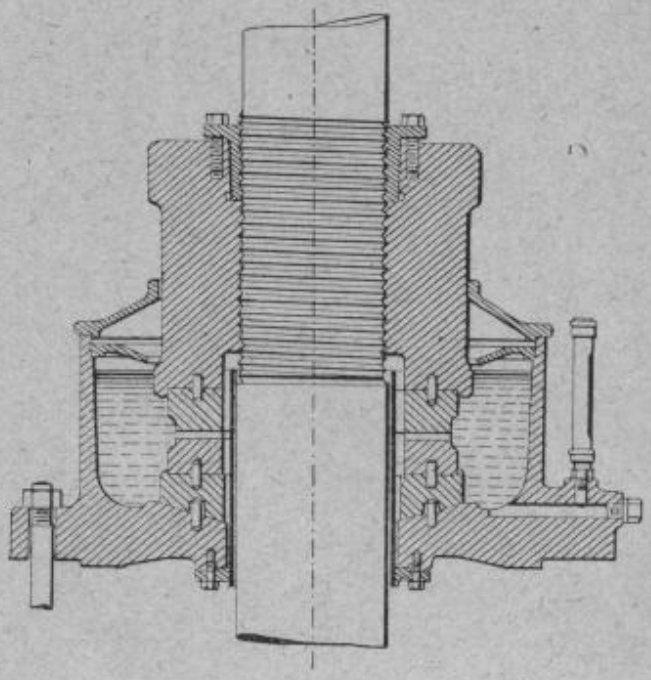
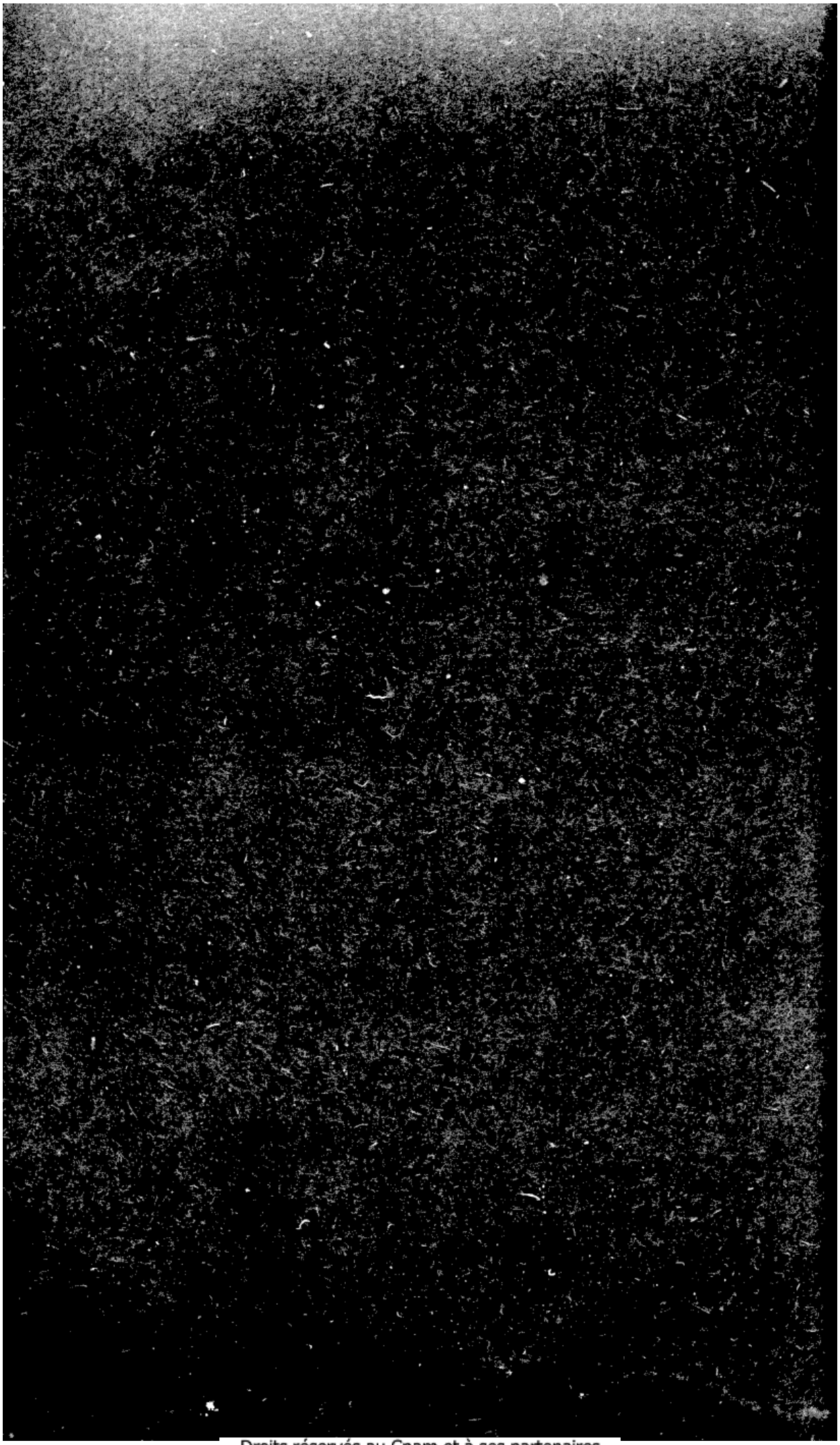


FIG. 504 *bis*. — Page 721.

Coupe d'un pivot annulaire. — Type supérieur Singrün.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES MATIÈRES

TOME I

CRÉATION ET AMÉNAGEMENT DES CHUTES D'EAU ET DES USINES HYDROÉLECTRIQUES

Pages.

ARGUMENT .....
PRÉFACE DE M. A. BLONDEL. .....
INTRODUCTION. — HISTORIQUE DE LA HOUILLE BLANCHE. CONSIDÉRATIONS TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES. 1

CHAPITRE I

Formation et régime des cours d'eau

I. — NOTIONS GÉNÉRALES

1. Nature des eaux 37
2. Classification des cours d'eau 38
3. Action dynamique des cours d'eau 39
4. Glaciers 44
5. Charrois des eaux torrentielles 48
6. Hauteurs d'eau de pluie annuelles 51
7. Débits d'étiage des cours d'eau de montagne et de plaine 55
8. Débits moyens 58

II. — HYDROGRAPHIE PANORAMIQUE DES GRANDES RÉGIONS MONDIALES DE HOUILLE BLANCHE

9. Région des Alpes 62
10. Région des Pyrénées 69
11. La Suisse 74
12. L'Italie 78
13. Amérique méridionale 84
14. Amérique septentrionale 87
15. Région des pays scandinaves 91

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

Hydrologie des bassins de montagne

I. — Caractéristiques des cours d'eau

Pages.

16. Graphiques des débits 93
17. Relations entre les débits des cours d'eau et la pluie reçue par leurs bassins 99
18. Relations entre les crues et les pluies qui les produisent..... 104
19. Services d'études et d'annonces des crues dans divers pays 109

II. — Régularisation du régime des cours d'eau

20. Action des forêts 116
21. Action des lacs 119
22. Réservoirs artificiels..... 124
23. Régularisation au moyen de la puissance totale que l'on peut tirer des cours d'eau ainsi que de leurs affluents..... 130

III. — Services d'études et d'évaluation des forces hydrauliques

24. Services d'études des grandes forces hydrauliques en France..... 132
25. Services de l'évaluation des forces hydrauliques en Suisse..... 154
26. Services des forces hydrauliques belges au Bas Congo 161

IV. — Régime des principaux cours d'eau de France sur lesquels ont été créées de grandes forces hydrauliques. Usines établies, en cours de construction ou projetées.

27. Le Rhône 169
28. L'Isère 178
29. Le Drac 181
30. L'Arve 182
31. L'Arc..... 184
32. Le Giffre..... 186
33. La Romanche..... 189
34. Le Bréda. Le Cernon..... 190
35. Le Doron de Bozel 191
36. L'Arly 193
37. Le Guiers 194
38. Le Doubs. — La Valloirette. — Le Furon. — L'Ain. — Rivières de l'Aveyron 194
39. Le Fier. Les Dranses..... 197
40. La Durance 199
41. Le Var. — L'Argens. — Le Verdon. — La Roya..... 205
42. La Loire 209
43. L'Ariège..... 210
44. Le Vicdessos. — L'Orlu 212
45. Le Cher. — La Garonne. — La Dordogne. — La Vézère. — L'Allier. — Le Lot. — La Creuse. — 213
46. L'Adour. — La Têt. — L'Orb. — L'Aude, le Tarn et l'Hérault. — Région des Gaves 222
47. L'utilisation du Rhin entre Schaffouse et Bâle..... 225

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE III

Canaux

Pages.

48. Équations du mouvement varié et du mouvement uniforme 231
49. Influence des parois..... 234
50. Profils des canaux..... 237
51. Remous..... 244
52. Calcul des canaux d'amenée. — Applications numériques..... 247

CHAPITRE IV

Jaugeage des cours d'eau, des canaux et des turbines

I. — Jaugeage par la mesure des vitesses

53. Jaugeage par flotteurs 254
54. Jaugeage au moyen des hydromètres 259
55. Installation et contrôle des appareils de jaugeage..... 274
56. Détermination des pentes superficielles et des courbes de débit..... 285

II. — Jaugeage par déversoirs

57. Orifices en déversoirs 296
58. Déversoirs à minces parois..... 299
59. Établissement des déversoirs..... 302

III. — Jaugeage par vannes

60. Méthodes diverses de jaugeage..... 306

IV. — Mesure des vitesses dans les conduites d'eau sous pression

61. Méthode des ondes colorées 311
62. Méthode des jaugeages chimiques..... 311
63. Méthodes Parenty-Bellet 314
64. Méthode Venturi 315

CHAPITRE V

Conduites forcées

I. — Formules pour la détermination du diamètre des conduites

65. Mouvement de l'eau dans les tuyaux..... 323
66. Conduites à diamètre constant..... 324
67. Conduites à diamètre variable..... 332
68. Détermination du débit correspondant au travail maximum à l'issue aval d'une conduite donnée 337

II. — Construction des tuyaux

69. Tuyaux en tôle 338
70. Travail de la tôle dans les clouures 346
71. Conduites en ciment armé 347

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — Coups de bélier dans les conduites d'eau

		Pages.
72.	Théorie du coup de bélier	358
73.	Dispositifs de protection contre les coups de bélier	366

IV. — Épaisseur des tuyaux

74.	Conduites à diamètre constant	384
75.	Formules et abaques pour la détermination des épaisseurs des tuyaux	388
76.	Conduites à diamètres variables	392

V. — Installation des conduites

77.	Causes de déformation des conduites forcées	393
78.	Tracé des conduites	395
79.	Pose des conduites	396
80.	Appuis et ancrages des conduites	414
81.	Applications numériques	419

CHAPITRE VI

Barrages

I. — Établissement et role des barrages

82.	Réglementation des barrages	425
83.	Digues en terre	431
84.	Barrages en béton ordinaire	441
85.	Barrages en acier	445
86.	Barrages creux en béton armé	448
87.	Barrages mobiles	457

II. — Gros barrages en maçonnerie

88.	Conditions d'établissement des ouvrages	487
89.	Barrages-réservoirs	493
90.	Barrages évidés	500
91.	Calculs et capacités des réservoirs	500

III. — Calcul des barrages, méthodes diverses

92.	Généralités	503
93.	Conditions de stabilité	504
94.	Loi du trapèze	507
95.	Construction graphique	509
96.	Méthode Lévy	512
97.	Méthodes Bouvier et Guillemain, Pelletreau et Hetier, Wegmann	517
98.	Courbes de pression dans un profil normal	521
99.	Barrages en voûtes	522
100.	Efforts à admettre dans le travail des matériaux	524
101.	Coût des barrages	526
102.	Utilisation des barrages pour la production de l'énergie électrique en vue des usages agricoles	527

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IV. — Types de barrages-réservoirs de grande capacité

Pages.

103. Barrage-réservoir du Gouffre-d'Enfer (Loire) 528
104. Barrage de Lignon (Loire) 529
105. Barrage du Couzon (Loire) 529
106. Barrage-réservoir de l'Échapre (Loire) 532
107. Barrage-réservoir du Ternay (Ardèche) 532
108. Barrage-réservoir de la Gileppe (Belgique) 534
109. Barrage-réservoir François-Joseph (Bohême) 534
110. Barrage-réservoir du Lagolungo (Italie) 535
111. Barrage-réservoir du Vyrnwy (Grande-Bretagne) 535
112. Barrage-réservoir du Thirlmère (Grande-Bretagne) 536
113. Barrage de Barossa (Australie) 536
114. Barrage-réservoir d'Olive Bridge (Amérique) 537
115. Nouveau barrage du Croton (New-York) 537
116. Barrage-réservoir de Marklissa (Haute-Silésie) 540
117. Barrage de Ponte della Serra (Italie) 549
118. Barrage des Dardennes (Bouches-du-Rhône) 552
119. Types de profils calculés 557

CHAPITRE VII

Récepteurs hydrauliques. — Turbines

I. — Caractères généraux des turbines

120. Classification des turbines 565
121. Turbines à axe vertical et turbines à axe horizontal 568

II. — Turbines centrifuges

122. Fonctionnement des turbines centrifuges 569
123. Équation des turbines centrifuges 571
124. Types de turbines centrifuges 576
125. Données de construction 584
126. Hydropneumatisation 585

III. — Turbines centripètes, turbines Francis

127. Fonctionnement des turbines centripètes 585
128. Équation des turbines centripètes 590
129. Types de turbines centripètes 594
130. Tubes d'aspiration 622
131. Application numérique. — Calcul des turbines de l'usine de Jonage (turbine radiale centripète) 623

IV. — Turbines parallèles

132. Fonctionnement des turbines parallèles 626
133. Équation des turbines parallèles 633
134. Tracé des aubes 637
135. Données de construction 639
136. Turbines semblables 640

V. — Turbines mixtes

137. Fonctionnement des turbines mixtes ou américaines 640
138. Tracé des aubes 642

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.
139. Types de turbines mixtes 645
140. Construction en série des turbines mixtes à grande vitesse 656

VI. — TURBINES TANGENTIELLES OU ROUES PELTON

141. Fonctionnement des roues vives à réaction 668
142. Types de roues Pelton 677
143. Pertes d'énergie dans les turbines 683

VII. — FORMULES NOUVELLES POUR LE CALCUL DES TURBINES

144. Turbines à pression variable 688
145. Influence des divers facteurs entrant dans les nouvelles formules 691
146. Turbines à libre déviation. Turbines Girard 693
147. Applications numériques 693

VIII. — MÉTHODES GRAPHIQUES POUR L'ÉTABLISSEMENT DES TURBINES

148. Exposés analytiques 695
149. Tracés géométriques 699
150. Efforts dynamiques 702
151. Influence de l'angle α et du degré de réaction sur les éléments du fonctionnement 703
152. Fonctions caractéristiques des turbines 705

CHAPITRE VIII

Installation des turbines

I. — VANNAGES ET PIVOTS

153. Vannages divers des turbines 708
154. Pivots divers. Calculs 712

II. — MISE EN PLACE DES TURBINES

155. Montage des turbines 721
156. Accouplement des turbines 734

III. — APPLICATION DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE TURBINES

157. Utilisation des turbines selon le débit et la hauteur de chute 736
158. Renforceurs de puissance pour chute d'eau 760
159. Usure anormale des turbines 762

IV. — ESSAIS DES TURBINES

160. Essais au frein 764
161. Caractéristiques expérimentales 766
162. Installations pour les essais de turbines 769
163. Nouvelles installations d'essais préconisées en France 774
164. Méthode d'essai chimique 778

CHAPITRE IX

Réglage des turbines

165. Rôle des régulateurs de vitesse 780
166. Équation du réglage de la vitesse des turbines 781

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.
167. Régulateurs mécaniques 784
168. Régulateurs hydrauliques 791
169. Régulateurs électriques 800
170. Régulateurs de pression 802
171. Régulateurs à frein 810
172. Régulateurs absorbeurs à frein hydraulique 811
173. Hydrotachymètres 814

CHAPITRE X

Création des chutes. — Travaux de dérivation et d'aménagement

174. Examen et étude du cours d'eau au point de vue de l'emplacement de l'usine 824

I. — Établissement des profils

175. Profils en long 827
176. Profils en travers 833
177. Nouveaux profils en long 836

II. — Barrages et prises d'eau

178. Emplacement du barrage 841
179. Détermination du débit 842
180. Calcul de l'appareil déversoir de l'usine de Jonage 843
181. Barrages sur rivières navigables 846
182. Prises d'eau pour force motrice 848
183. Échelles à poissons 855
184. Établissement des prises d'eau 861
185. Déglaçage des cours d'eau 869
186. Comparaison entre usines établies sur rivière de plaine et sur rivière torrentielle 871

III. — Canaux et bassins

187. Canaux d'amenée. — Tunnels 875
188. Chambres de prise en charge 879
189. Détermination des oscillations de niveau au bassin de charge 886
190. Bassins de décantation. — Réservoirs artificiels 889

IV. — Vannes et grilles

191. Vannes. — Types divers. — Calculs 892
192. Grilles 912

V. — Travaux et installations accessoires

193. Travaux de curage 919
194. Endiguements 920
195. Rectifications des cours d'eau 922
196. Chemins d'accès 923
197. Évacuateurs 927
198. Appareils accessoires 930

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XI

Régularisation des usines hydrauliques au moyen des lacs ou réservoirs naturels

I. — Cours d'eau régularisés par des lacs

Pages.

199. Volumes d'eau à emmagasiner 932
200. Régularisation des cours d'eau de Lancey et de Saint-Mury par l'aménagement des lacs Crozet et Blanc (Isère) 935
201. Régularisation du régime de la rivière la Neste par l'aménagement des lacs de son bassin (Hautes-Pyrénées) 937
202. Régularisation du bassin des Sept-Laux (Isère) 941
203. Régularisation du torrent le Doron par l'aménagement du lac de la Girotte 943
204. Régularisation de la rivière La Têt 944
205. Régularisation du fleuve Congo (Projet) 947

II. — Exemples de lacs régularisés ou en cours de régularisation

206. Lac d'Annecy (Haute-Savoie) 948
207. Lac de Genève (Suisse) 952
208. Lac de Lugano (Suisse) 953
209. Lac de Constance (Allemagne) 954
210. Lac de Joux (Suisse) 955
211. Lac de Challain (Ain) 955
212. Lac du Bourget (Savoie) 956
213. Lac de Paladru (Isère) 957
214. Lac de la Girotte (Savoie) 957
215. Lacs Trout et Coquitlan (États-Unis) 958
216. Lac de Paschiavo (Suisse) 958
217. Lacs du bassin de Barèges 960
218. Aménagement de la Vallée d'Aure et de la vallée d'Ossau dans les Pyrénées 961
219. Lacs ou réservoirs compensateurs 963
220. Jurisprudence des lacs 966

CHAPITRE XII

Matériaux pour l'étude de l'aménagement des chutes d'eau et de l'établissement des Usines hydroélectriques

I. — Conditions d'établissement des usines hydroélectriques

221. Chevaux permanents et chevaux périodiques 968
222. Moyens de parer aux variations de débit et de hauteur d'une chute. Tamponnage hydraulique 971
223. Répartition du débit entre plusieurs usines 977
224. Répartition des eaux d'un bassin 979
225. Utilisation de l'énergie résiduelle d'une chute 980
226. Zones d'action des usines noires et des usines blanches 983
227. Détermination de la puissance rationnelle d'une chute d'eau 988
228. Emplacement de l'usine 990
229. Association des chutes. — Installations d'usines de secours 991
230. Choix des turbines 997
231. Bâtiments. — Postes à haute tension 1001

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PRIX DE REVIENT ET DE VENTE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

		Pages.
232.	Avantages économiques des usines hydrauliques	1017
233.	Dépenses de premier établissement des usines hydroélectriques	1022
234.	Coûts d'installation de quelques usines hydroélectriques	1027
235.	Prix de vente de l'énergie électrique	1033
236.	Prix de revient et taux d'amortissement applicables aux usines hydroélectriques	1036
237.	Impôts et redevances des usines hydroélectriques	1039
238.	Prix des matériaux pour constructions	1043
239.	Qualités des matériaux pour constructions	1044
240.	Formalités administratives	1046
241.	Ressources financières	1046

CHAPITRE XIII

Les forces hydrauliques mondiales

242.	Moyens employés pour établir la puissance des chutes d'eau d'un pays	1051
243.	Puissance hydraulique de la région des Alpes françaises	1051
244.	Région du Massif central	1053
245.	Région des Pyrénées	1053
246.	Bassin de la Normandie	1054
247.	Évaluation de la richesse de la France en houille blanche	1056
248.	Évaluation des forces hydrauliques mondiales	1058

CHAPITRE XIV

Législation et réglementation des cours d'eau

I. — LÉGISLATION FRANÇAISE

249.	Régime antérieur des cours d'eau non navigables ni flottables	1076
250.	Droits des riverains sur les cours d'eau non navigables ni flottables	1078
251.	Réglementation des cours d'eau	1079
252.	De la jouissance des eaux	1080
253.	Autorisations d'usines hydrauliques	1082
254.	Obligations des riverains et des usiniers	1090
255.	Analyse du projet de loi des 15 janvier 1904 et 12 juin 1906	1094
256.	Projet de loi sur les usines du domaine public (16 juillet 1909)	1100
257.	Lois de finance du 28 septembre 1916	1105
258.	Projet de loi sur les cours d'eau navigables et non navigables (juillet 1917)	1105
259.	Décret en vue des autorisations administratives (6 octobre 1917)	1108
260.	Législations étrangères	1110

CHAPITRE XV

Études d'usines. — Avant-projets d'usines hydroélectriques

261.	Rôle des usines hydroélectriques dans la Défense nationale	1119

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

I. — Étude d'une usine hydro-électrique avec transport d'énergie électrique

I. — Travaux d'aménagement hydraulique

Pages.

262. Bases du projet 1127
263. Capacité du réservoir de retenue 1129
264. Barrage 1132
265. Canal d'amenée 1134
266. Galerie de dérivation 1136
267. Conduites forcées 1137

II. — Cout des travaux de captage

268. Coût du barrage 1138
269. Coût du canal d'amenée et des chambres d'eau 1138
270. Coût des conduites forcées 1140

III. — Usine génératrice

271. Coût de l'installation 1141

IV. — Usine de secours

272. Coût de l'installation 1143

V. — Ligne de transport d'énergie électrique

273. Calcul des conducteurs 1143
274. Coût de l'installation 1145

VI. — Étude financière

275. Dépenses d'exploitation 1146
276. Recettes et bénéfices 1147

II. — Projet d'usine hydro-électrique au moyen d'un barrage fixe et d'une prise d'eau dans la Durance. (Usines de Fontbeton et des Bons Enfants).

277. Caractéristique des aménagements hydrauliques 1148
278. Barrage-réservoir 1148
279. Canal d'amenée 1150
280. Chambre de mise en charge 1150
281. Conduites forcées 1150
282. Dégravement des apports solides de la Durance 1151
283. Fonctionnement des usines de Fontbeton et des Bons-Enfants 1156
284. Projet financier. — Évaluation du capital 1158
285. Devis général 1160

III. — Projet d'aménagement des Dranses (Haute-Savoie)

286. Régime et débit de la rivière 1164
287. Puissance des chutes étudiées 1164

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

288. Régularisation de la rivière 1164
289. Chutes supplémentaires 1165
290. Coût des travaux pour les trois chutes étudiées 1165
291. Création d'une grande usine mixte électrométallurgique et électrochimique 1165
292. Création d'une usine de transport d'énergie électrique et d'une usine électrochimique 1166
293. Création d'une verrerie électrique 1167

IV. — USINE D'INSTALLATION MODERNE

294. Usine hydroélectrique de la Bridoire 1168
295. Errata 1185

FIN

TOURS. — IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES ET Cie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En vente à la Librairie H. DUNOD et E. PINAT, Éditeurs

47 ET 49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, PARIS (VI^e)

Le rôle et l'utilisation des chutes d'eau dans l'extension de l'activité industrielle et agricole, par P. LÉVY-SALVADOR, chef du service technique de l'hydraulique agricole. In-8° 16 × 25 de 112 pages, avec 14 fig..... 7 fr. 50

Vers la houille blanche. *Moto-culture et électro-moto-culture*, par A. TURPAIN, professeur à la faculté des Sciences de Poitiers. In-8° 13 × 21 de XI-76 p..... 2 fr. 50

La houille verte. *Mise en valeur des moyennes et basses chutes d'eau en France*, par Henri BRESSON. 2^e édition augmentée d'un supplément. In-8° 16 × 25 de XXII-335 p., avec 129 figures et une planche..... 8 fr. 50

Définition de la houille verte. Les électriciens de la région normande. De fil en aiguille. Considérations hydrographiques. Des unités hydroélectriques. Un peu d'erg. s. v. p. ! Rivières navigables et flottables et rivières non navigables ni flottables. Roues et turbines. Moteurs de secours et accumulateurs. De la statistique et de son utilité. Idées syndicales. Visions électriques. La houille verte dans l'Orne, l'Eure-et-Loir, la Sarthe, la Mayenne, le Maine-et-Loire, la Manche, le Calvados, l'Eure. Graphiques et tableaux. *Supplément :* De la houille verte à la houille blanche. Complément des monographies. Dictionnaire abrégé des meilleures rivières de France (bassins de la Seine et de la Loire).

Hydraulique agricole, par Paul LÉVY-SALVADOR, ingénieur du service technique de l'Hydraulique agricole au ministère de l'Agriculture.

Tome I. — Cours d'eau. Barrages sur cours d'eau non navigables ni flottables. Maintien du libre écoulement des eaux. 2^e édit. In-16 12 × 18 de 628 pages, avec 218 fig. et 4 planches. Reliure souple..... 15 fr.

CONDITIONS GÉNÉRALES. — RÉGLEMENTATION DES BARRAGES ET PRISES D'EAU SUR COURS D'EAU NON NAVIGABLES NI FLOTTABLES : Généralités. Dispositions générales des prises d'eau d'usines. Dispositions particulières des ouvrages de retenue et de décharge. Exemple de la réglementation d'un barrage d'usine. Réglementation des barrages dans des conditions spéciales. Opérations et études nécessitées par la réglementation des barrages d'usine. Récolement des ouvrages. Revision des règlements. Réglementation des barrages d'irrigation et de submersion.

MAINTIEN DU LIBRE ÉCOULEMENT DES EAUX. Curages. Faucardements. Suppression des obstacles à l'écoulement des eaux. Endiguements. Défenses des rives. Travaux d'étanchement et de désobstruction. Législation des travaux divers. Annexes.

Tome II. — Des irrigations. In-16 12 × 18 de 668 pages, avec 459 figures et 18 pl. Reliure souple..... 15 fr.

IRRIGATIONS : Généralités. Mode d'établissement des canaux d'irrigation. Des prises d'eau. Ouvrages d'art. Ouvrages d'art exceptionnels et spéciaux. Des barrages-réservoirs. Des lacs-réservoirs. Des appareils élévatoires. Des canaux secondaires et rigoles d'arrosage. Etude du réseau de distribution. Distribution des eaux des canaux d'irrigation. Utilisation de l'eau par les intéressés. Concession et administration des canaux d'irrigation. Annexes.

Tome III. — Assainissements et desséchements. Colmatage. Polders, drainage, utilisation agricole des eaux d'égout. Annexes. In-16 12 × 18 de 563 p., avec 279 fig. et 2 planches. Reliure souple..... 15 fr.

ASSAINISSEMENT ET DESSÈCHEMENTS : Généralités. Législation des travaux d'assainissement et de dessèchement. Travaux d'assainissement agricole. Généralités sur les travaux de dessèchement par écoulement continu. Travaux de dessèchement par écoulement discontinu. Travaux de dessèchement par élévation mécanique.

COLMATAGES : Généralités. POLDERS : Généralités. DRAINAGES : Généralités. Systèmes divers de drains. Projets de drainage. Exécution des travaux de drainage, drainages spéciaux. Législation du drainage. Utilisation agricole des eaux d'égout.

Etude économique d'un transport d'énergie à grande distance, par E. DUSAUGEY, ing. 3^e édit. In-8° 16 × 25 de XIV-48 p., avec 3 fig. Cartonné..... 3 fr. 50

Mode d'utilisation de l'énergie électrique à Grenoble. Etablissement du prix de revient. Installation de l'usine. Distribution. Prix de vente.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Traité pratique de transport de l'énergie par l'électricité, par Louis BELL, ingénieur-électricien, traduit sur la troisième édition américaine revue et augmentée, par A. LEHMANN, ing. des Arts et Manufactures. In-8° 16 × 25 de 735 p., avec nombreuses fig. et pl. Broché, 25 fr.; cartonné..... 26 fr. 50

Principes élémentaires. Conditions générales d'un transport de force. Transport de force par courants continus. Propriétés des courants alternatifs. Transport de l'énergie au moyen des courants alternatifs. Moteurs synchrones et moteurs d'induction. Transformateurs polymorphiques. Machines à vapeur et chaudières. Turbines et roues diverses. Aménagement d'une chute d'eau. Organisation d'une station génératrice. La ligne. Centres de distribution. Le problème commercial. Mesure de l'énergie électrique. Etat actuel de la question.

Les distributions publiques d'énergie électrique en France, par J.-A. MONTPELLIER. In-4° 19 × 28 de 568 pages, avec plus de 100 cartes et fig. Cartonné. 25 fr.

La partie principale de cet ouvrage est constituée par la nomenclature des usines génératrices, classées par département. Pour chacune d'elles, on a donné la nature du courant produit et de la force motrice utilisée, ainsi que la liste des localités qu'elles desservent. Pour les usines importantes, il a été ajouté des renseignements techniques.

Pour 2.912 localités pourvues d'une distribution publique d'énergie électrique, indépendamment des renseignements géographiques relatifs à chacune de ces localités, ainsi que du chiffre de la population, on a donné la liste des principales industries susceptibles d'utiliser l'énergie électrique. Quant aux usines hydraulico-électriques, le nom du cours d'eau qui les alimente a été soigneusement indiqué.

Indépendamment de la carte d'ensemble de chaque département, de nombreuses cartes de détail donnent le tracé des grands réseaux de distribution. Plusieurs tableaux statistiques et une liste alphabétique de toutes les localités terminent ce travail.

Les industries électriques d'hier et de demain. *L'enseignement de l'électricité industrielle*, par Maurice SOUBRIER, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, professeur suppléant au Conservatoire des Arts et Métiers. Annexe d'André BLONDEL, membre de l'Institut. In-8° 16 × 25 de 214 pages, avec figures..... 10 fr.

La production de l'énergie. Le réseau électrique français. La houille blanche. Utilisation des gaz de four à coke. L'utilisation de l'énergie. Electrochimie. Traction sur voies ferrées. Eclairage, chauffage. Equipement électrique des ateliers, ports, gares, etc. Le point de vue de l'organisation et du commerce. La formation du personnel et de ses cadres. Apprentissage. Enseignement technique. Laboratoires,

Cours élémentaire d'électricité industrielle, par P. ROBERJOT, professeur à l'Ecole pratique d'industrie de Reims. Préface de P. JANET, directeur de l'Ecole supérieure d'Electricité. 2e édit. In-16 13 × 21 de XII-491 p., avec 448 fig. Cart... 10 fr.

De l'énergie. Energie électrique. Groupement des conducteurs. Générateurs et récepteurs électriques. Piles et accumulateurs. Actions chimiques des courants. Magnétisme et électromagnétisme. Voltmètres et ampèremètres. Générateurs mécaniques d'électricité. Dynamos. Electromoteurs. Eclairage électrique. Courants alternatifs. Alternateurs. Transformateurs. Champ tournant. Téléphonie. Chauffage électrique.

Electrotechnique appliquée. Machines électriques (*Théorie, essais et construction*), cours professé à l'Institut électrotechnique de Nancy, par A. MAUDUIT, ancien élève de l'Ecole Polytechnique. Préface de A. BLONDEL, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. In-8° 16 × 25 de XX-930 p., avec 366 fig. (*En réimpression*)

Essais de machines dynamos et moteurs à courant continu. Théorie des dynamos à courant continu. Enroulements. Réaction de l'induit. Commutation. Calcul des dynamos à courant continu. Courants alternatifs : généralités et appareils de mesure. Alternateurs. Transformateurs statiques. Moteurs d'induction. Machines synchrones. Commutatrices. Moteurs monophasés à collecteurs. Complément aux moteurs d'induction. Rotors. Régulation de la tension des générateurs électriques. Courants alternatifs non sinusoïdaux.

La technique pratique des courants alternatifs, à l'usage des électriciens, contremaîtres, monteurs, etc., par G. SARTORI, ingénieur, professeur d'électrotechnique à l'Institut royal technique supérieur de Milan, traduit de l'italien par J.-A. MONTPELLIER, rédacteur en chef de l'*Electricien*.

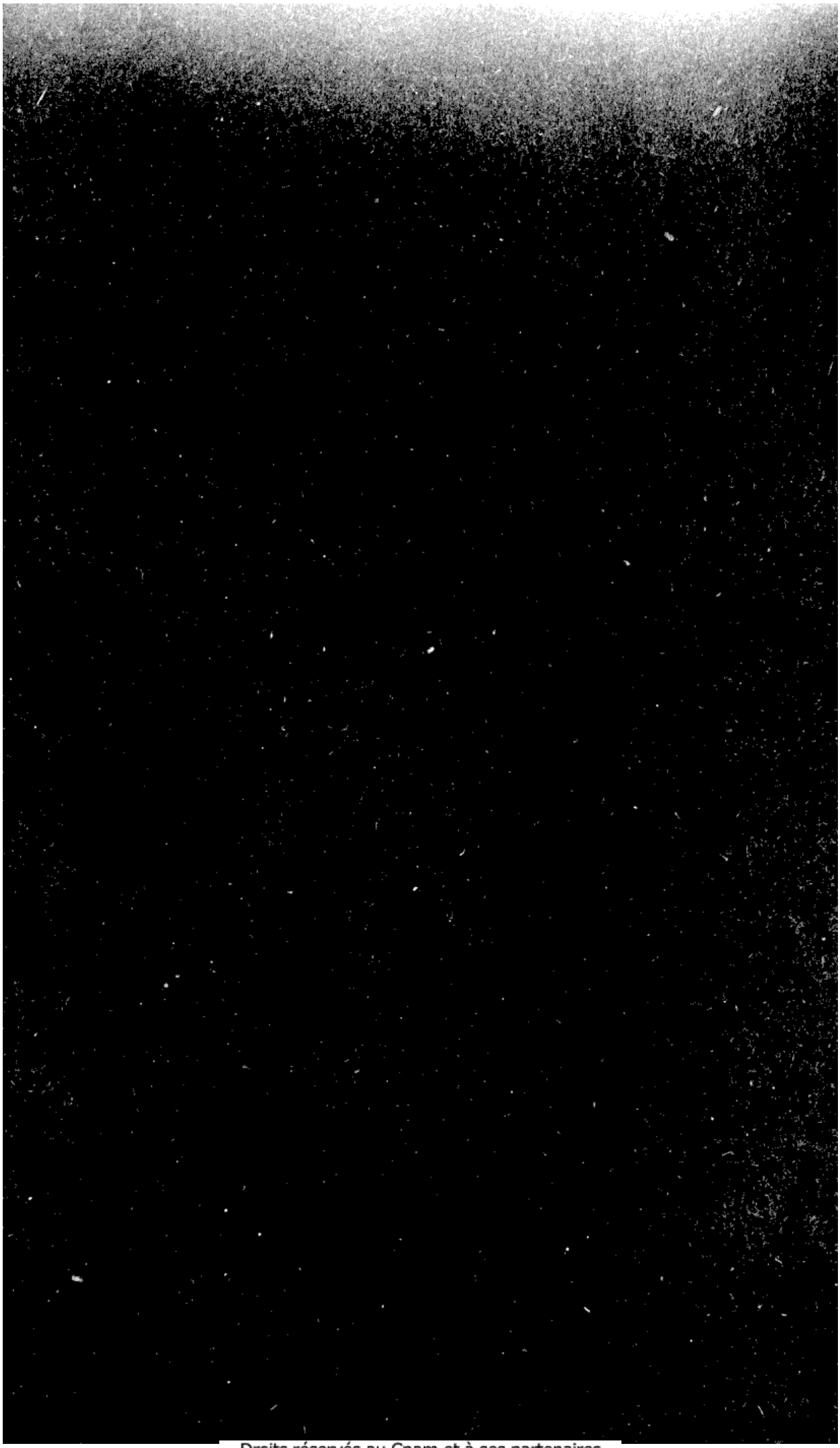
Tome premier : Exposé élémentaire et pratique des phénomènes du courant alternatif. 4e *édition*. In-8° 16 × 25 de IX-576 pages, avec 397 figures..... 22 fr. 50

Tome second : Développements théoriques et calculs pratiques sur les phénomènes du courant alternatif. 3e édition. In-8° 16 × 25 de VIII-644 p. avec 287 fig..... 25 fr.

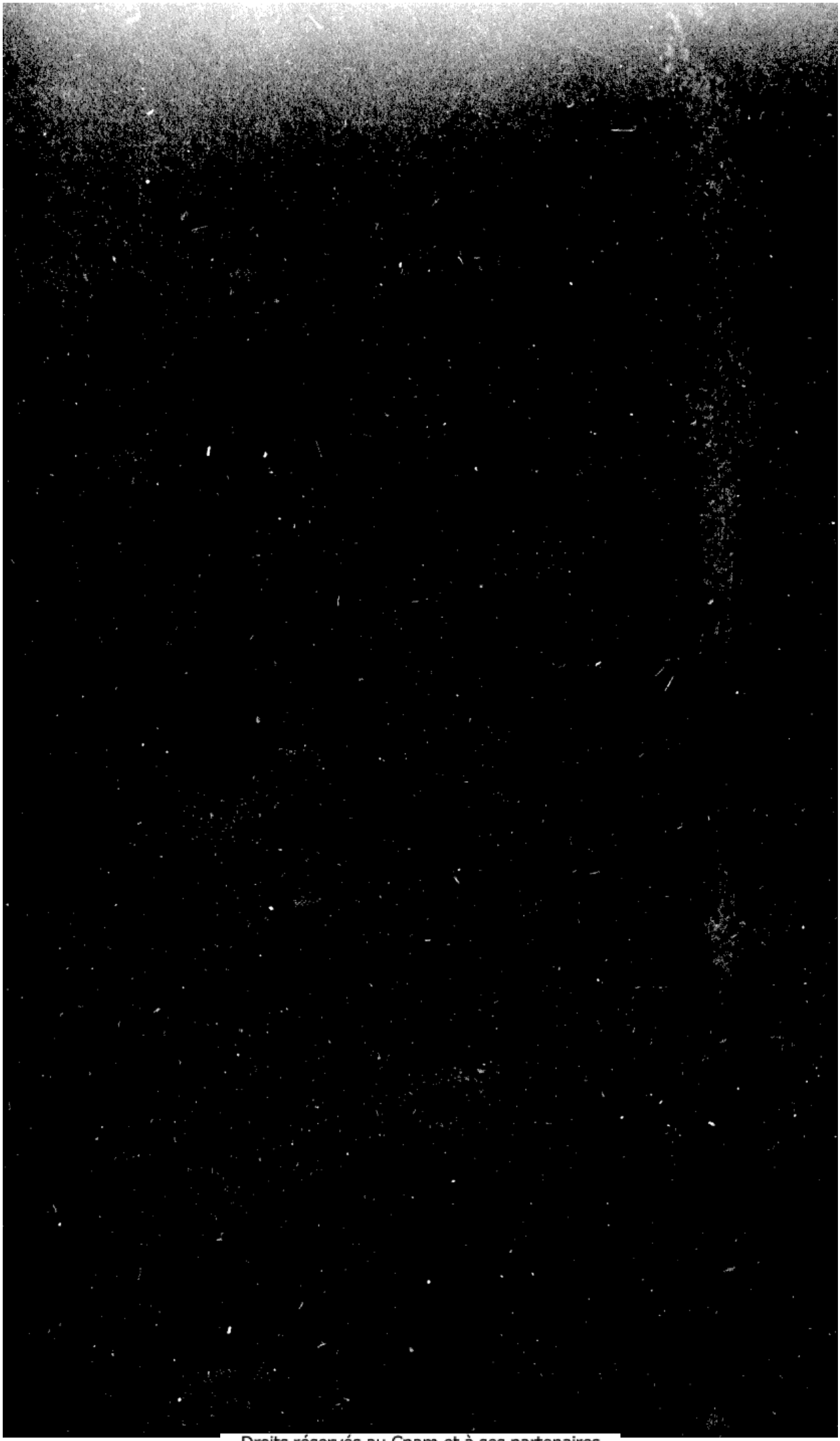
Majoration temporaire de 20 0 0 sur les prix ci-dessus.

TOURS. — IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES ET Cie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

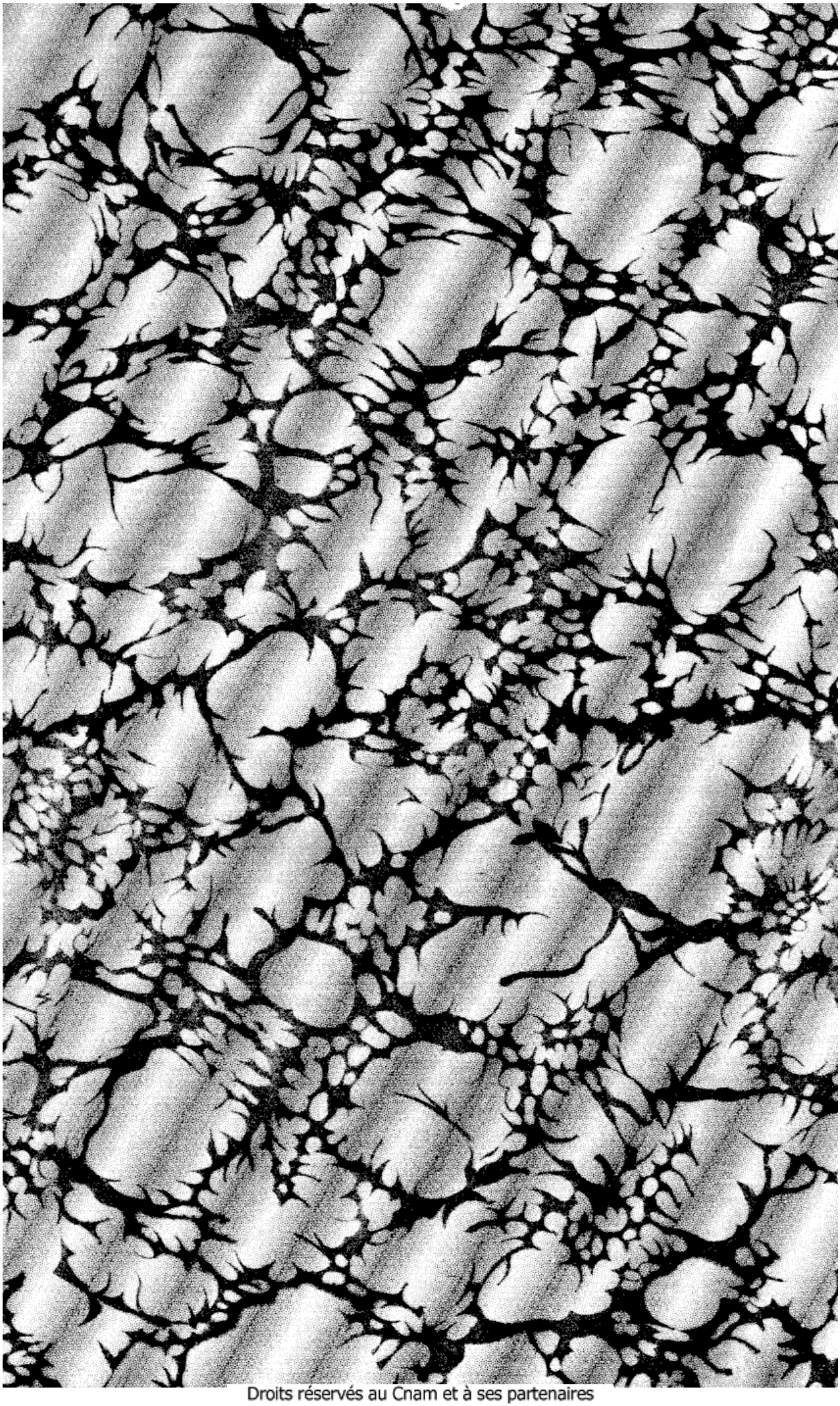


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

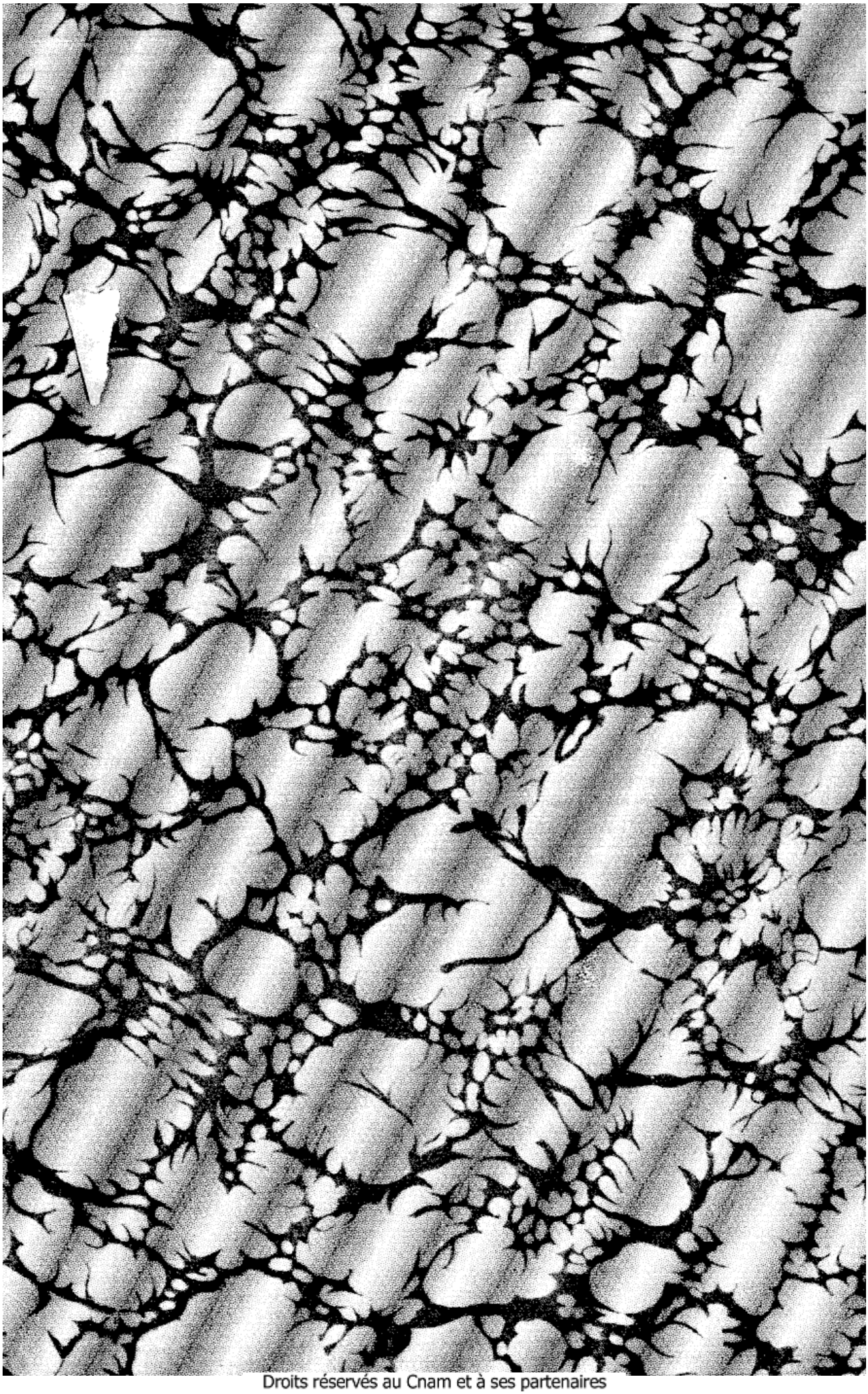


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

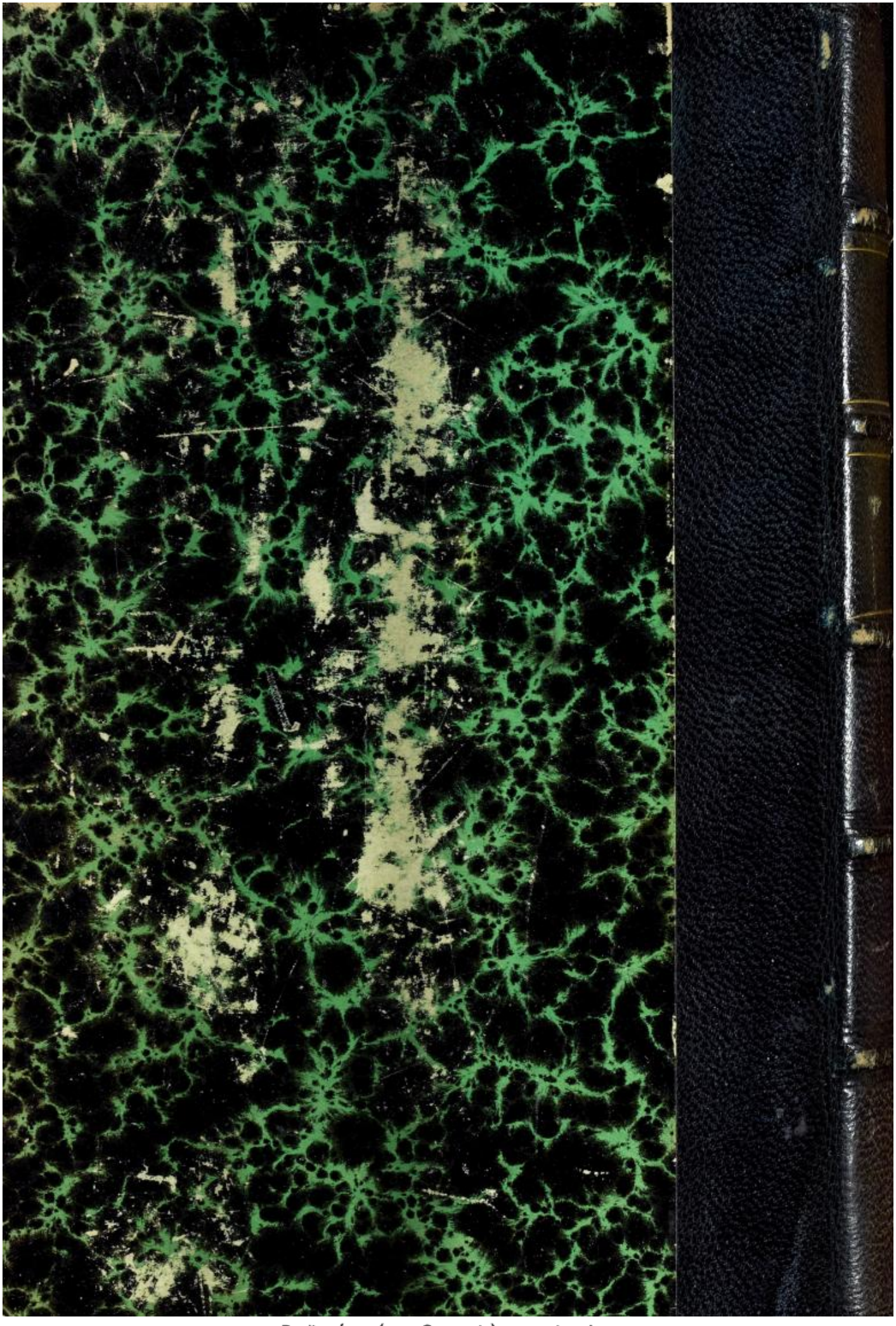
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires