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. Tome IV. Utilisation de l'énergie des forces hydrauliq...

Adresse : Paris : H. Dunod et E. Pinat, 1920
Collation : [3]-3307 p. : pl. et fig. ; 24 cm
Cote : CNAM-BIB 8 Di 68 II (4)
Sujet(s) : Centrales hydroélectriques

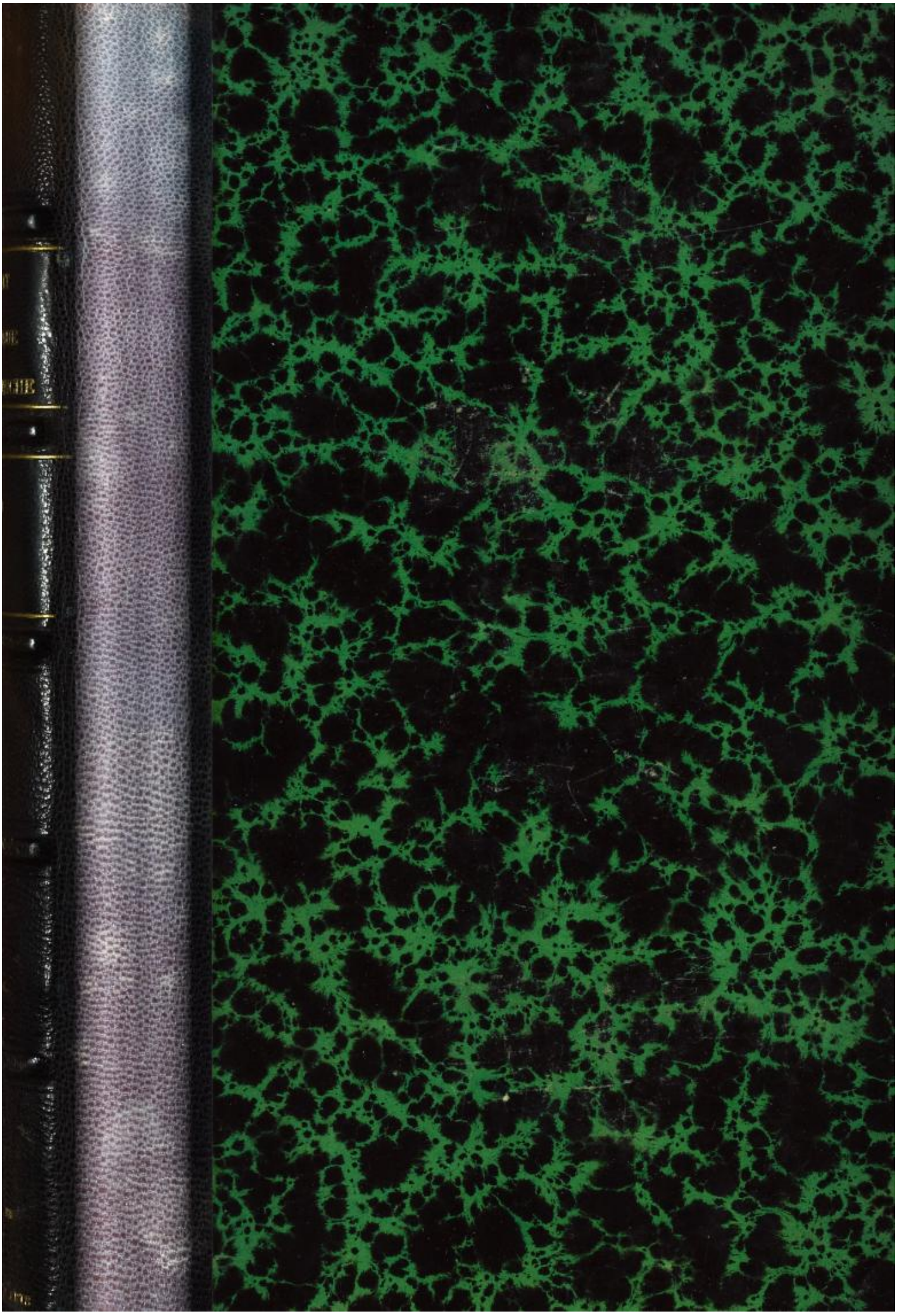
Date de mise en ligne : 08/11/2016
Langue : Français

URL permanente : http://cnum.cnam.fr/redir?8DI68II.4

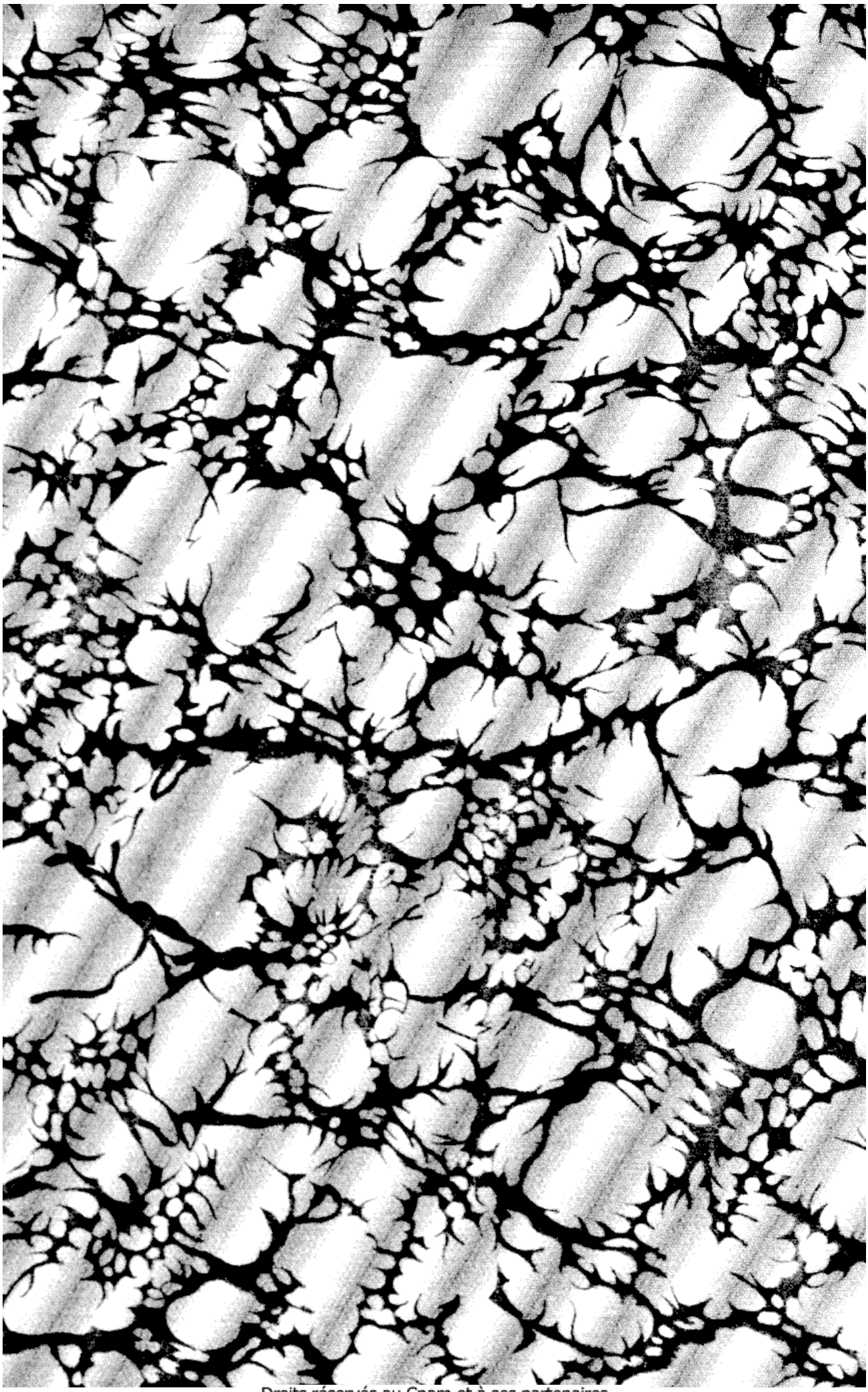
La reproduction de tout ou partie des documents pour un usage personnel ou d'enseignement est autorisée, à condition que la mention complète de la source (*Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*) soit indiquée clairement. Toutes les utilisations à d'autres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

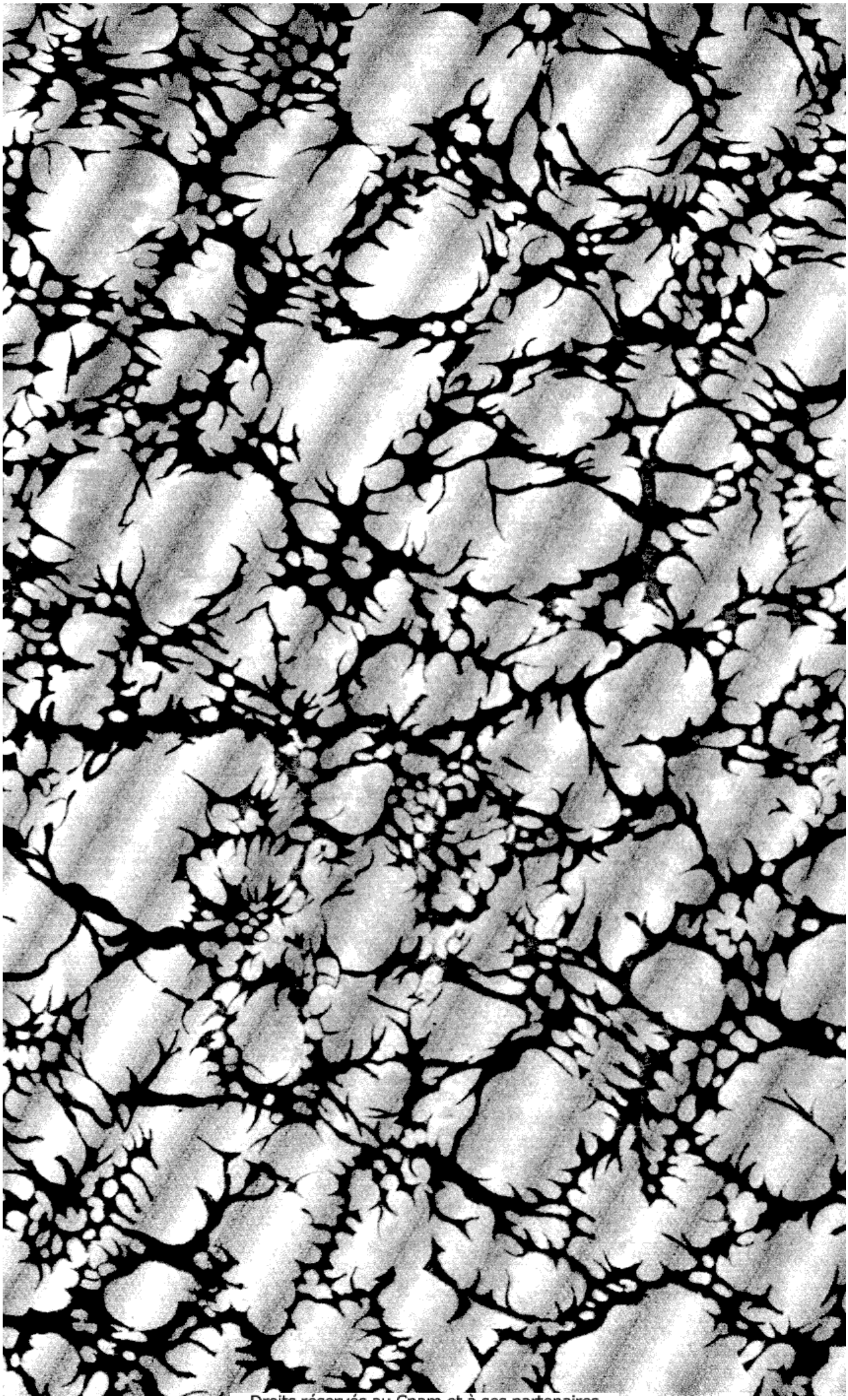
PDF créé le 7/11/2016



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

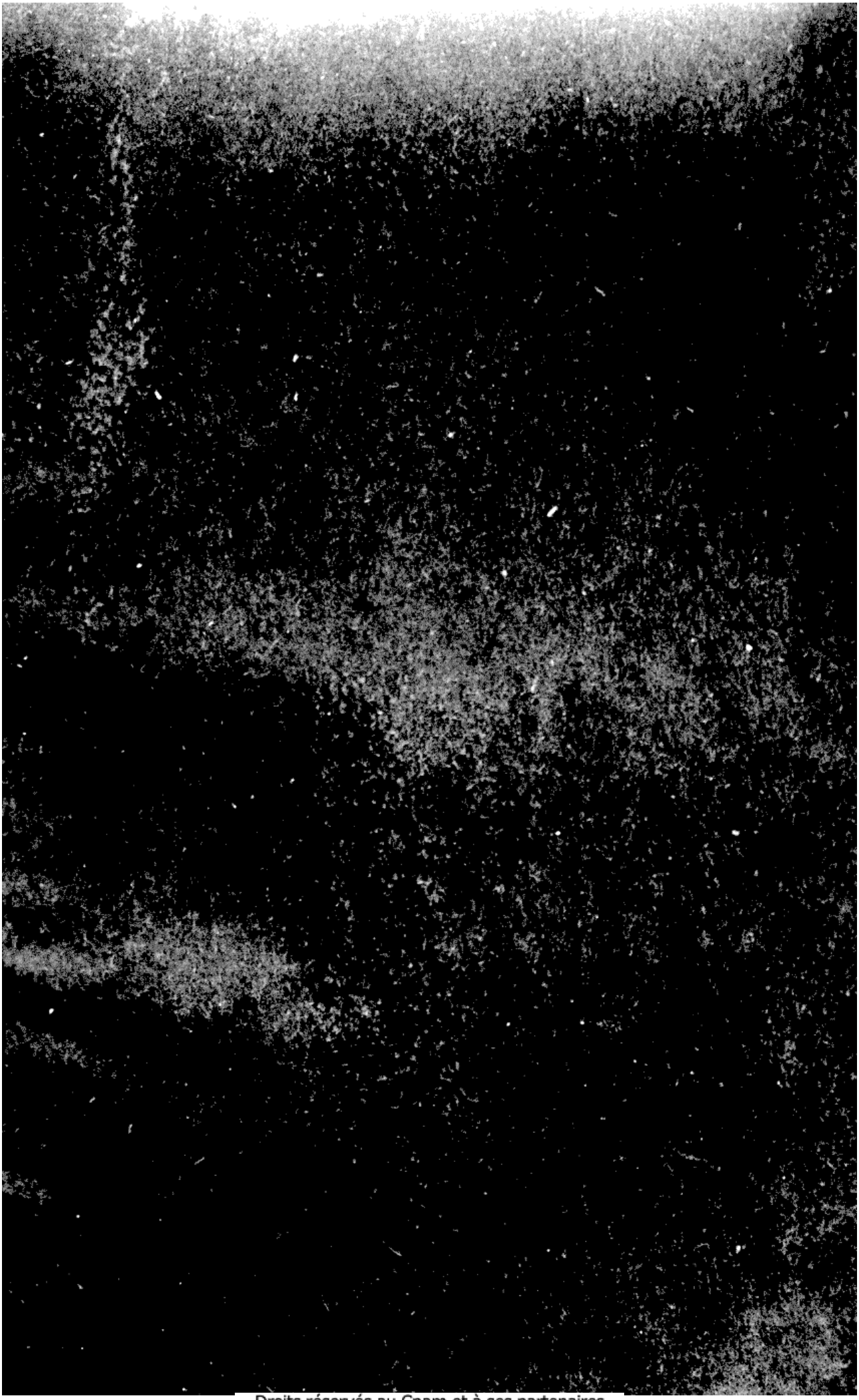


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

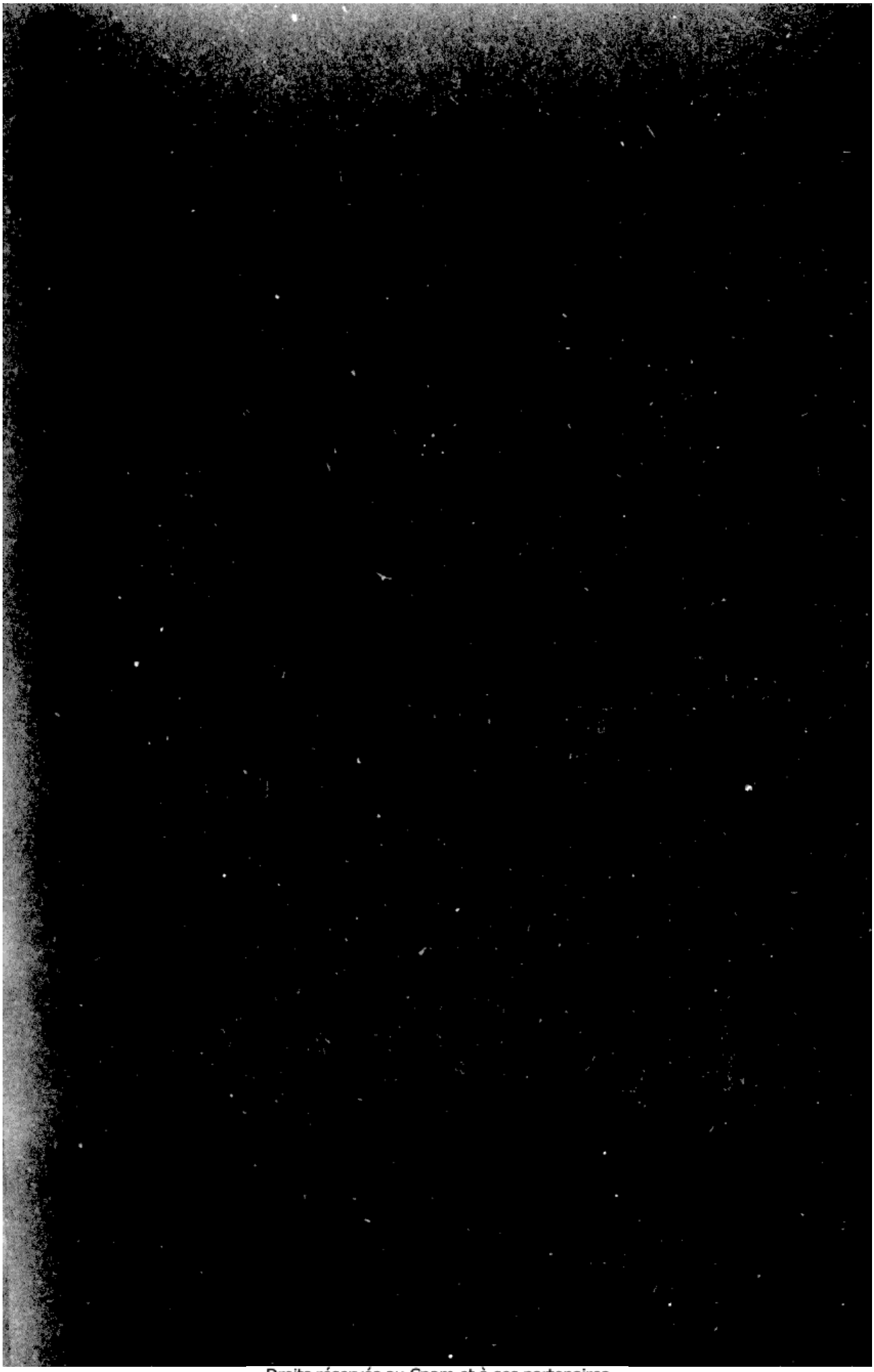


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

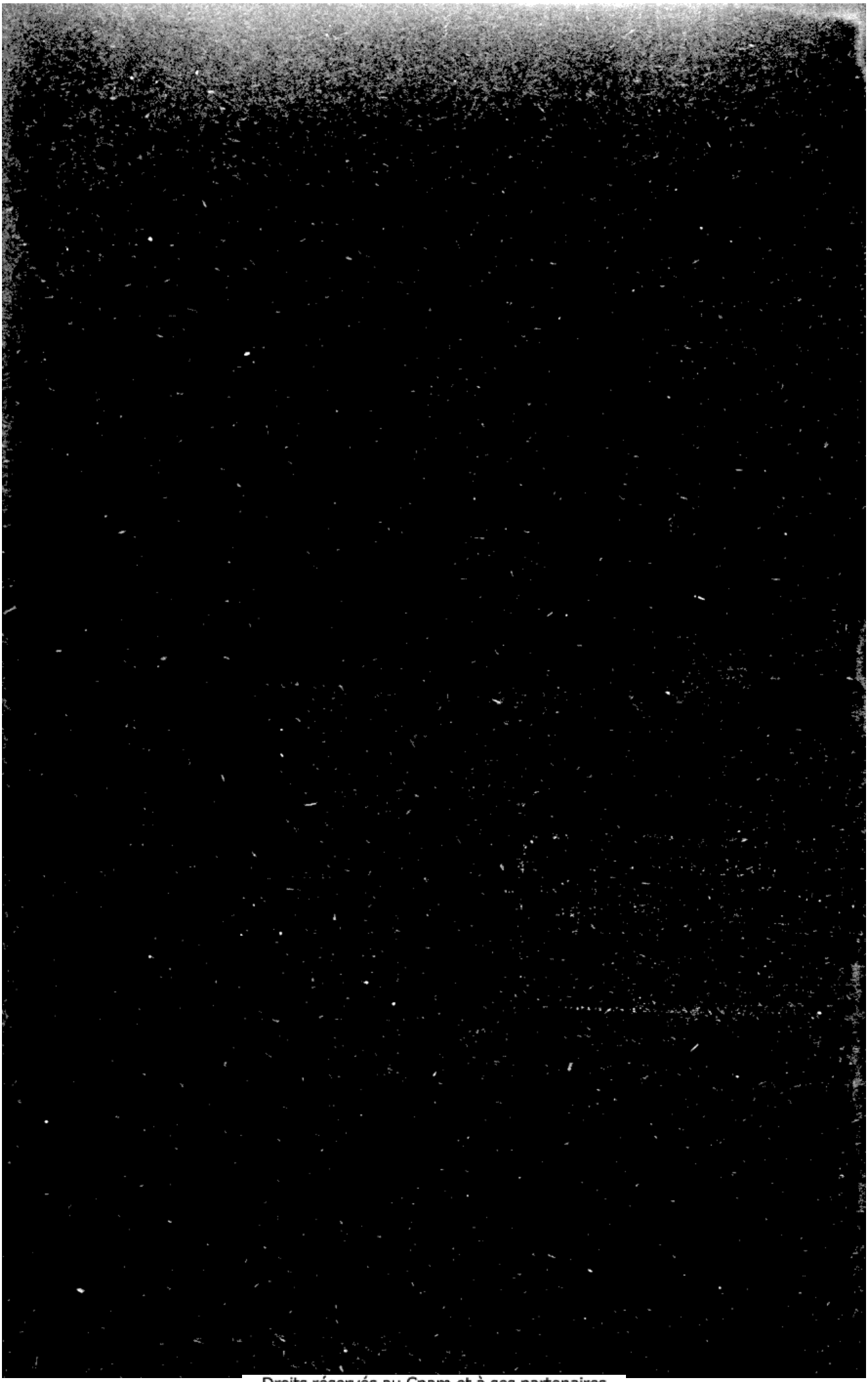
LA TECHNIQUE

DE LA

HOUILLE BLANCHE

TOME IV

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8° Di 68 (2)
8° Di. 68

LA TECHNIQUE

DE LA

HOUILLE BLANCHE

TOME IV

UTILISATION DE L'ÉNERGIE DES FORCES HYDRAULIQUES
APPLICATION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
USINES CENTRALES ET USINES LOCALES

STATIONS CENTRALES
TRACTION ÉLECTRIQUE
ÉLECTROMÉTALLURGIE — ÉLECTROCHIMIE

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
8° Di. 68 (2)
Février 1925
CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

PAR

ÉTIENNE PACORET
INGÉNIEUR CIVIL

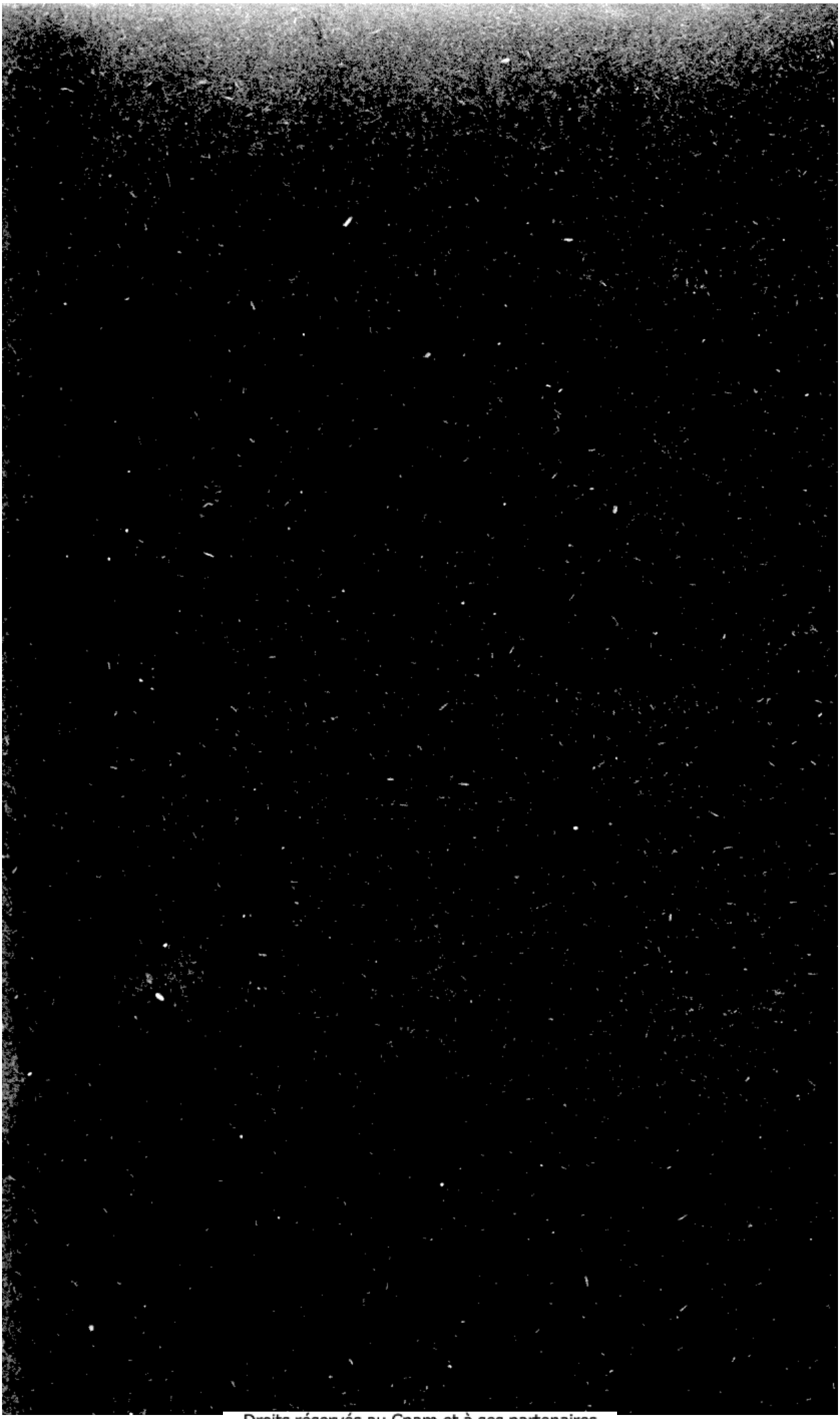
PRÉFACE DE M. A. BLONDEL
INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
PROFESSEUR A L'ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES
MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

TROISIÈME ÉDITION COMPLÈTEMENT REFONDUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

PARIS
DUNOD, EDITEUR
Successeur de H. DUNOD et E. PINAT
47 ET 49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS (VIe)
1920

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

SYMBOLES

A la suite d'un accord international intervenu en 1913, où vingt-quatre pays étaient représentés, les symboles suivants ont été adoptés pour les unités électrotechniques.

I. — Grandeurs

Longueur	l	Résistance	R
Masse	m	Résistivité	ρ
Temps	t	Conductance	G
Angles	α β γ	Quantité d'électricité	Q
Accélération de pesanteur	g	Induction électrostatique	D
Travail	A	Capacité	C
Énergie	W	Constante diélectrique	ε
Puissance	P	Self-inductance	L
Rendement	η	Inductance mutuelle	M
Nombre de tours	n	Réactance	X
Températures centigrades	t	Impédance	Z
Température absolue	T	Réluctance	S
Période	T	Flux magnétique	Φ
Pulsation $\left(\frac{2\pi}{T}\right)$	ω	Induction magnétique	B
Fréquence	f	Champ magnétique	H
Déphasage	φ	Intensité d'aimentation	J
Force électromotrice	E	Perméabilité	μ
Courant	I	Susceptibilité	κ

II. — Signes pour les noms des unités électriques à employer seulement après des valeurs numériques

Ampère	A	Volt-coulomb	VC
Volt	V	Watt-heure	Wh
Ohm	O ou Ω	Volt-ampère	VA
Coulomb	C	Ampère-heure	Ah
Joule	J	Milliampère	mA
Watt	W	Kilowatt	KW
Farad	F	Kilovolt-ampère	K. V. A.
Henry	H	Kilowatt-heure	KWh
m, signe pour milli		μ, signe pour micro	
K, signe pour kilo		M, signe pour méga	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TOME IV

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE XXX

USINES CENTRALES

I. — DONNÉES D'ORDRE ÉCONOMIQUE ET D'EXPLOITATION

605. Conditions de fonctionnement et d'exploitation des usines centrales. — Les années de 1891 à 1899 ont marqué une première période de prospérité remarquable pour les usines de distribution d'électricité, car, en outre de l'éclairage, elles alimentèrent les moteurs de nombreux ateliers et les tramways électriques qui, peu à peu, remplacèrent ceux à traction animale.

Parallèlement, les ateliers de construction de matériel électrique et ceux de matériel hydraulique prirent de très grandes extensions.

Les banques et le public, témoins de ce développement grandiose, souscrivirent volontiers les émissions qui furent alors présentées ; de sorte que les affaires qui se créèrent ne manquèrent pas de capitaux. L'Allemagne, la France et la Suisse profitèrent plus particulièrement de la confiance des capitalistes.

Mais la plus grande impulsion fut donnée par les Sociétés de construction, qui se chargèrent de fournir les capitaux nécessaires aux entreprises de distribution d'énergie électrique dont elles provoquèrent elles-mêmes la création, la plupart du temps. Elles fondèrent alors des sociétés financières spéciales dont le but était, avant tout, de leur racheter les installations de distribution d'énergie électrique qui furent exploitées par des sociétés spéciales dont les actions appartenaient aux sociétés financières mères.

Ces dernières financèrent ainsi des affaires électriques ; elles acquirent les actions ou obligations d'entreprises électriques pour les revendre ou les conserver, et émettre par contre leurs propres actions ou obligations. Elles procurèrent aussi les capitaux nécessaires à des entreprises dont les titres ne pouvaient être placés que difficilement et qui le furent indirecte-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment par l'émission des actions et obligations des Sociétés mères ou trusts. Quelques-uns de ces derniers entreprirent de grosses installations soit en leur nom, soit au nom de sociétés filiales et réalisèrent ainsi un bénéfice de construction.

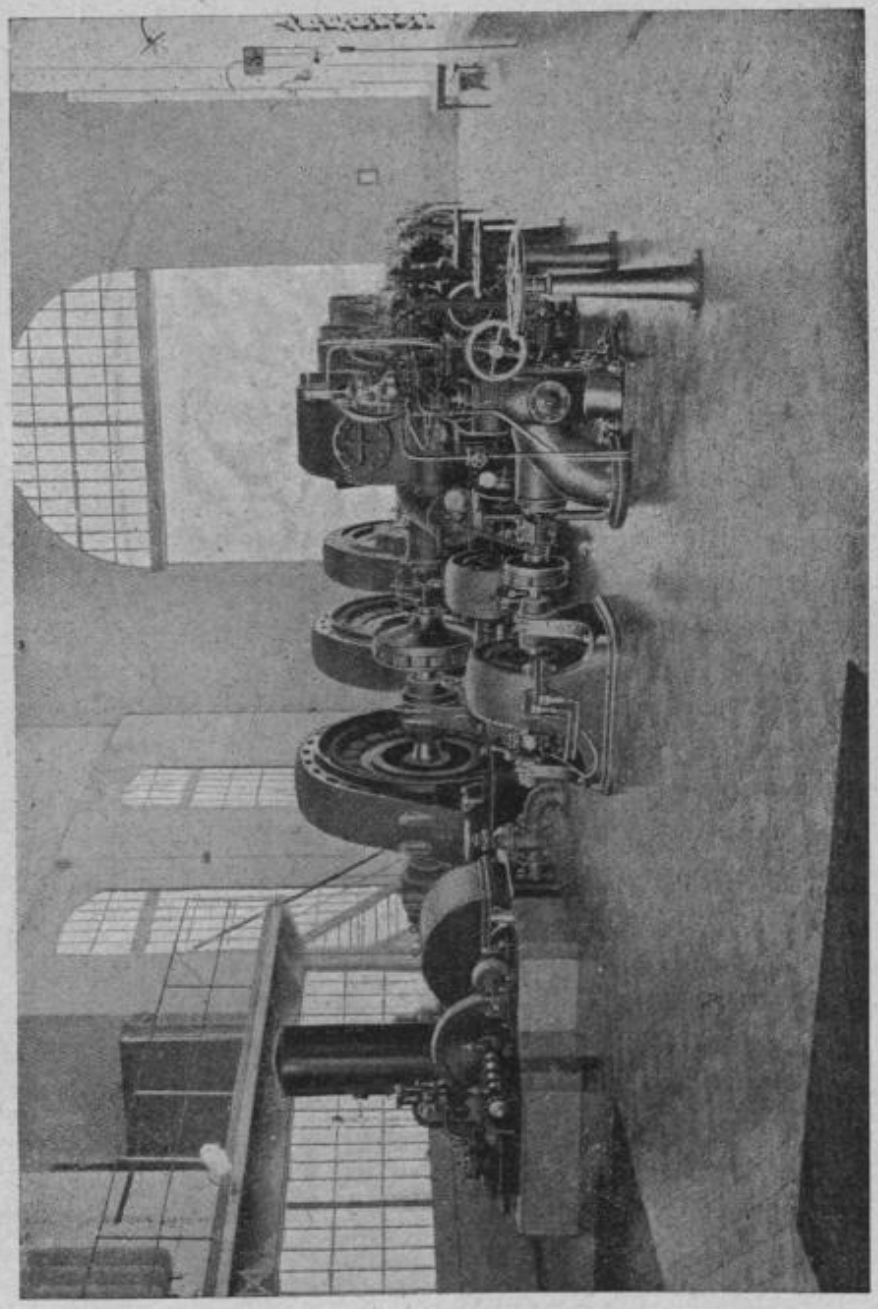


Fig. 1697. — Usine de la Sioule. Salle des machines.

D'autres ont trouvé une source de bénéfice importante dans la vente du matériel électrique.

Cependant les entreprises de distribution d'énergie électrique, d'électrochimie et d'électrométallurgie passèrent par une crise assez intense, du fait d'un certain manque d'expérience et d'une fièvre de création

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui empêchait de juger, avec suffisamment de sang-froid, de la rentabilité des installations projetées. Depuis lors elles sont pour la plupart rentrées dans une ère prospère ; les installations de toutes sortes se sont développées et les capitaux ont aussi trouvé leur rémunération.

En Suisse, ces trusts se sont implantés avec une certaine facilité par la raison que les lois suisses présentent des commodités que n'offrent pas les lois des autres pays. En 1910, ils disposaient d'un capital actions, entièrement versé, de près de cent millions, et d'un capital obligations de 88 millions.

La participation de ces capitaux aux affaires électriques françaises est importante.

Les stations centrales qui ne font que l'éclairage sont soumises à une variation périodique de la consommation, désavantageuse pour le rendement économique de l'exploitation, car cette consommation varie suivant les saisons et les heures de la journée. En hiver, le maximum de la production journalière a lieu de quatre à six heures du soir, et le minimum vers cinq heures du matin ; c'est en novembre que le maximum est atteint et en juillet et août que se produit le minimum.

D'après la (*fig.* 1698) (*a*), un diagramme journalier quelconque de la puissance instantanée présente un ou deux maxima et autant de minima différents.

On peut noter que les maxima et les minima ne se présentent pas, en toutes saisons, aux mêmes heures de la journée.

La (*fig.* 1698) (*b*) donne une idée de la manière dont peuvent se présenter les diagrammes annuels chronologiques des puissances journalières maxima, moyennes (calculées en rapportant l'énergie consommée journellement à 24 heures) et minima.

Dans l'exemple correspondant à cette figure, si l'on représente par 100 la demande moyenne annuelle de puissance de la part du réseau (calculée en rapportant l'énergie consommée annuellement à 8.760 heures), la charge moyenne journalière varie approximativement de 40 à 160, alors que la charge minima journalière (1) reste *grosso modo* entre les limites de 16 et 44 (moyenne de 30 environ), et que la charge maxima journalière varie *grosso modo* entre les extrêmes de 130 à 470 (moyenne de 280 environ).

Quoique n'ayant rien d'absolu, ces chiffres sont très expressifs.

On peut noter en passant que les valeurs maxima, moyennes et mini-

(1) Les minima sont relativement plus élevés dans le cas d'une agglomération où l'éclairage public serait fait en très grande partie à l'électricité. On a supposé, au contraire, que d'autres moyens d'éclairage étaient en usage concurremment à l'électricité. C'est le cas de beaucoup de villes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ma des charges journalières maxima, moyennes et minima ne se présentent pas les mêmes jours de l'année.

Le diagramme annuel des charges maxima journalières, en outre,

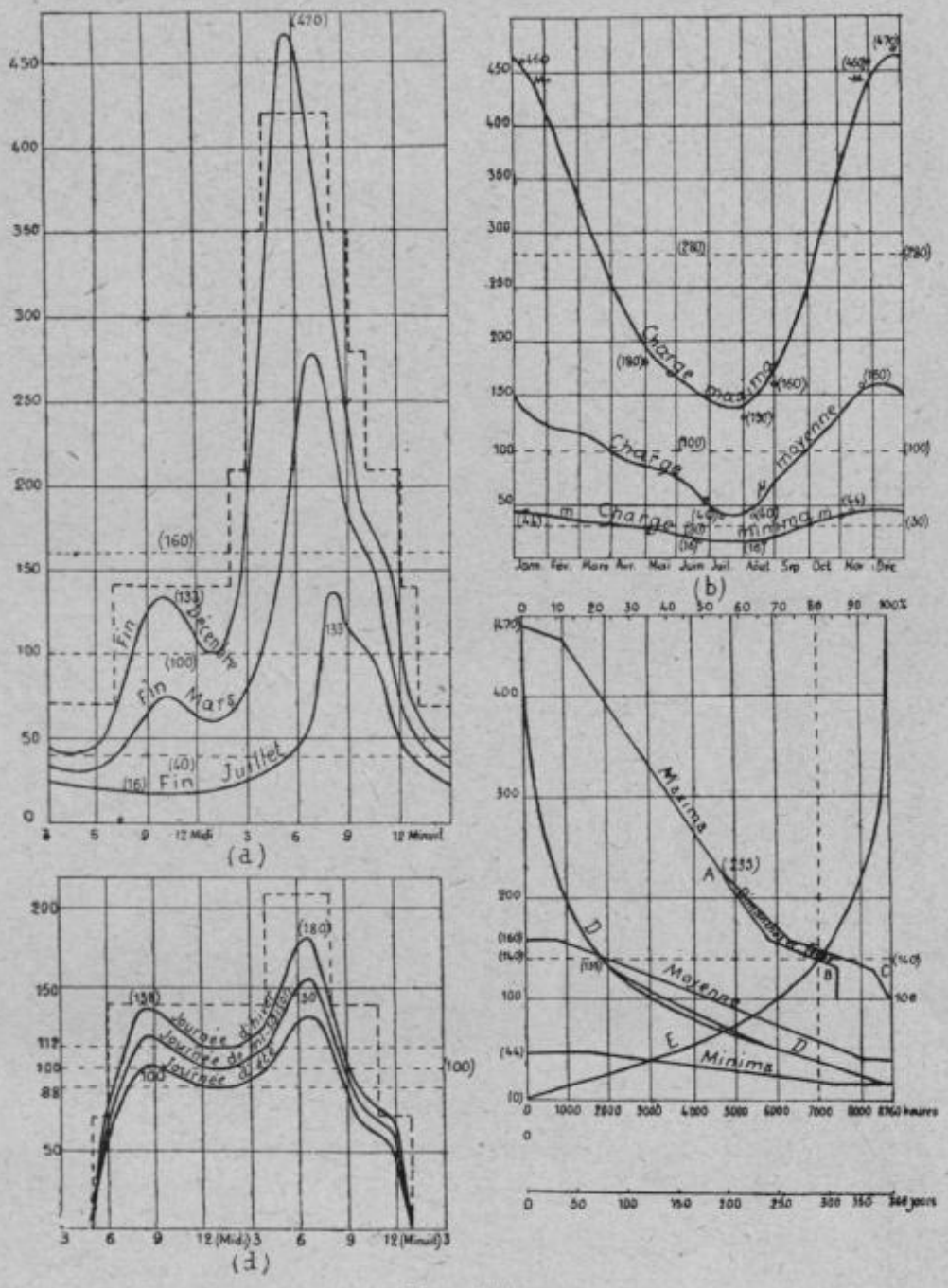


FIG. 1698.

passe généralement au-dessous de son ordonnée moyenne 195 à 200 jours par an, alors qu'il ne passe pas au-dessus de cette ordonnée moyenne que 160 à 165 jours par an environ.

La (*fig.* 1698) (*c*) donne une idée de la manière dont peuvent se présenter

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le diagramme annuel des puissances instantanées et les diagrammes annuels des puissances journalières maxima, moyennes, minima, disposés en ordre décroissant de grandeur.

Le diagramme annuel D des puissances instantanées rangées dégressivement présente deux branches : la branche supérieure inclut et la branche inférieure exclut les puissances instantanées qui interviennent dans la constitution du mamelon que présentent la plupart des diagrammes journaliers pendant la matinée.

L'aire comprise entre le diagramme D et l'axe des durées d'utilisation représente l'énergie absorbée annuellement par le réseau.

La courbe E représente l'intégrale du diagramme D, en prenant comme variable indépendante la puissance (l'ordonnée).

Chaque point de cette courbe indique donc qu'à l'utilisation de toutes les puissances inférieures à une certaine valeur p (ordonnée dudit point) correspond une certaine fraction, x 0/0 (abscisse dudit point), de l'énergie absorbée annuellement par le réseau. Il est facile de déduire la fraction $100 - x$ 0/0 de cette énergie qui correspond à l'emploi de puissances dépassant ladite valeur p.

Considérons, à titre d'application, les puissances représentées par les trois chiffres 100, 140 et 200 (100 étant toujours la charge moyenne annuelle du réseau).

Le diagramme annuel D des puissances instantanées rangées dégressivement montre que, dans l'exemple choisi, la puissance absorbée par le réseau ne dépasse au-dessus de ces trois valeurs que pendant 3.300, 1.800 et 1.000 heures par an seulement (sur 8.760).

Le diagramme annuel A des puissances journalières maxima montre que néanmoins la puissance absorbée par le réseau peut, à l'occasion, atteindre ou dépasser ces trois valeurs 365, 315 et 225 jours par an (sur 365).

La courbe auxiliaire E montre que l'énergie absorbée par le réseau, pendant tout le temps où sa demande de puissance ne dépasse pas les trois limites indiquées, atteint déjà le 69, le 80,5 et le 90 0/0 de l'énergie que le réseau absorbe pendant l'année tout entière.

Si l'on fait abstraction des variations purement accidentelles et momentanées, la charge absorbée par un réseau de traction desservant une grande agglomération, quoique encore très variable, l'est toutefois beaucoup moins que la charge absorbée par un réseau d'éclairage.

La (*fig.* 1698) (*d*) peut servir à donner une idée grossière de la manière dont varie, pendant la durée du service journalier, la charge absorbée par un pareil réseau à des époques différentes de l'année, le diagramme inférieur se rapportant à une journée d'été, le diagramme supérieur à une journée d'hiver et le diagramme intermédiaire à une journée de mi-saison.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les diagrammes des jours ouvrables présentent généralement deux et quelquefois trois maxima journaliers. Ceux des dimanches et des jours fériés en possèdent un seul ou quelquefois deux.

Ici encore les maxima et les minima n'ont pas lieu en toutes saisons aux mêmes heures de la journée.

La relation entre la capacité de l'usine et la nature du débit est des plus importantes, car c'est d'elle que dépend la continuité dans la production de la puissance. La présence de machines thermiques auxiliaires, de réservoirs hydrauliques ou électriques exerce, comme l'on sait, une influence très nette sur le fonctionnement de l'usine, de même que sur le facteur de charge.

Dans le cas de la vapeur, quelle que soit l'utilisation du matériel, l'intérêt, l'amortissement, les taxes et assurances, la main-d'œuvre restent constants ; seuls croissent, avec la production, les frais de réparations et la consommation en combustible, eau, huile, etc. Avec la force hydraulique seuls croissent, avec la production, les frais d'entretien et de réparation du matériel.

Le meilleur moyen de régularisation, et par suite le meilleur prix de revient, peut être déduit des graphiques de débit hydraulique et des graphiques des variations de charge, suivant l'utilisation à laquelle est destiné le courant.

Le problème, dans sa généralité, consiste à rechercher les meilleurs moyens pour le passage des pointes, ainsi qu'il a été expliqué plus haut.

Relativement au nombre de lampes installées et dont le courant est utilisé d'une façon plus ou moins continue par les abonnés, le maximum de la consommation varie entre 30 et 60 0/0 de l'énergie correspondant à la totalité de ces lampes fonctionnant simultanément.

La vente de force motrice améliore d'une façon très sensible le rendement des usines d'éclairage.

On peut tabler, pour les deux modes d'énergie combinés, sur les chiffres ci-après, qui sont des données moyennes :

a) *Puissance installée par abonné* : 3 kilowatts ;

b) *Puissance totale installée par rapport au nombre d'habitants* (après la cinquième année d'existence de la station centrale) : grandes villes, 20 kilowatts ; villes de 100.000 à 600.000 habitants, 6 à 10 kilowatts ; villes de 20.000 à 100.000, 10 à 30 kilowatts ; au-dessous de 20.000, 30 à 35 kilowatts. Ces chiffres sont pour 1.000 habitants ;

c) *Rapport de la puissance installée chez les abonnés à la puissance de la station centrale* : 1,6 à 1,8 ;

d) *Coefficient d'utilisation de l'usine ou coefficient économique* (rapport du nombre de kilowatts-heures produits annuellement au nombre de kilowatts-heures correspondant à la marche continue de la puissance totale

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de l'usine) : 15 0/0 environ pour une usine ne vendant que de la lumière, 30 0/0 pour une centrale de distribution de force motrice et près de 50 0/0 dans les usines génératrices de tramways ;

e) *Nombre de kilowalls utiles* (totalisation des kilowatts-heures vendus aux abonnés et fournis par l'éclairage public et les divers services de la centrale) : kilowatts-heures utiles annuels, 8 à 9 par habitant ;

f) *Coefficient de charge de l'usine* (rapport du nombre de kilowatts distribués à un moment quelconque au nombre total de kilowatts installés chez les abonnés) : entre 30 et 50 0/0.

Quant aux usines pour tramways, elles doivent assurer un service de

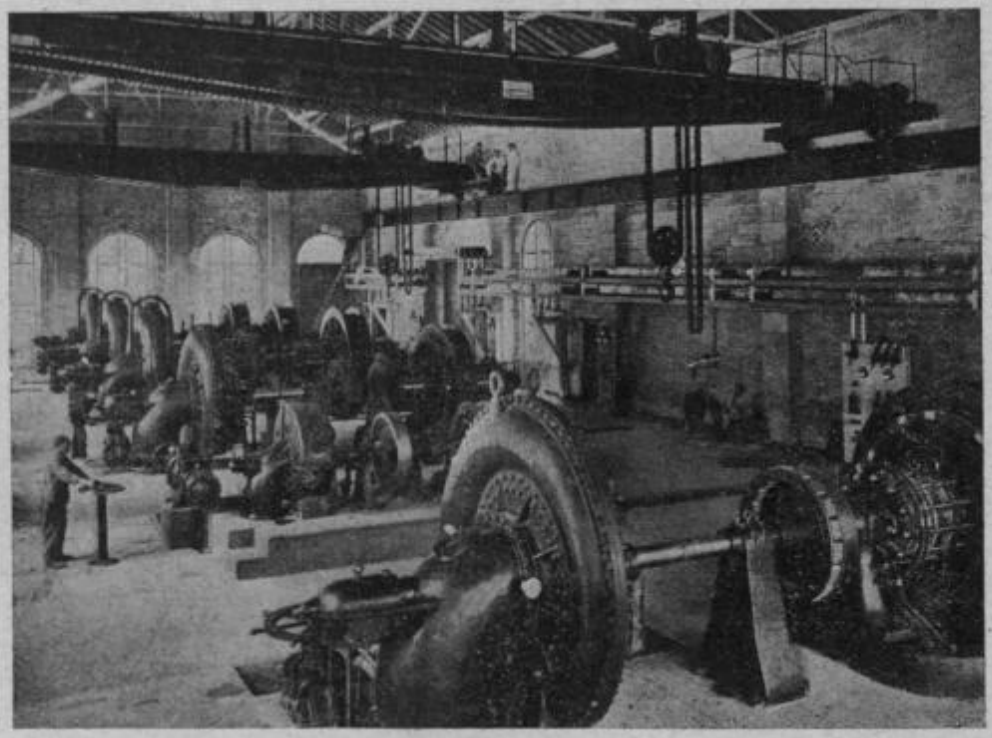


Fig. 1699. — Usine de Saint-Jean-de-Maurienne. Salle des machines génératrices.

18 à 20 heures par jour, pendant lesquelles on leur demande d'être capables de fournir la puissance maxima, le service des trains pouvant la réclamer à un instant quelconque. Ces usines seront plus spécialement étudiées dans le (chap. XXXI).

Nous avons renseigné dans le tome I sur les frais d'établissement des usines hydroélectriques ; nous revenons sur cet important sujet pour présenter quelques chiffres intéressant plus particulièrement l'exploitation des usines centrales.

Il a été déjà expliqué, au cours de cet ouvrage, que de grandes centrales à vapeur obtiennent, dans des conditions de durée quotidienne de fonctionnement exceptionnelles et avec du charbon, de la main-d'œuvre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à bon marché, le kilowatt-heure, intérêt et amortissement du capital non compris, à 0 fr. 04.

Naturellement, les frais de production, dans les centrales à vapeur, par kilowatt, chez l'abonné, varient avec l'importance de l'usine, mais d'une façon très sensible. Pour une puissance de 500 kilowatts, le prix atteint 0 fr. 22 le kilowatt, 0 fr. 208 pour 1.000 kilowatts, 0 fr. 18 pour 2.000 kilowatts et 0 fr. 13 pour celles au-dessus de ce dernier chiffre, pour descendre enfin à 0 fr. 05 dans les grandes centrales de 25.000 HP au moins. (Avant guerre).

Les centrales avec moteurs à gaz pauvre peuvent produire le kilowatt à

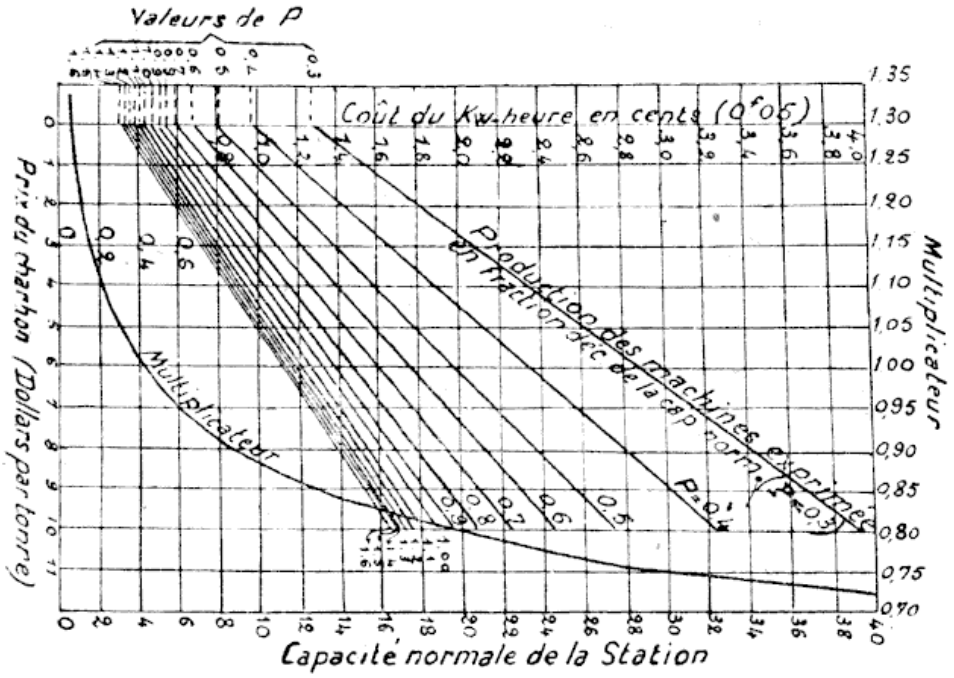


Fig. 1700.

raison de 0 fr. 06 à 0 fr. 10, le gaz des hauts fourneaux coûtant encore 90 à 120 francs le kilowatt-an. (Avant guerre.)

M. F.-A. Griffin a résumé en un diagramme intéressant à consulter, ses études sur une centrale moderne à vapeur, composée de quatre unités de 1.000 kilowatts. Ce diagramme (*fig.* 1700) permet de trouver directement le prix de revient du kilowatt-heure. Les rendements à pleine charge des diverses machines entrant dans l'installation ont été pris de la façon suivante : transformateurs, 98 0/0 ; générateurs, 95 0/0 ; moteurs, 90 0/0 ; conduites de vapeur, 95 0/0. En outre, la perte de vapeur provenant de la condensation est supposée constante et égale à 10 0/0, quelle que soit la pression, et les machines auxiliaires sont considérées comme employant 20 0/0 de la vapeur circulant dans les conduites, 1/4 de cette consommation restant constante, quel que soit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'état de la charge, et la moitié du reste variant en raison directe de la charge.

Proposons-nous, à titre d'application du diagramme de M. Griffin, de trouver le prix de revient du kilowatt-heure dans une station génératrice dont la capacité normale est de 12.000 kilowatts, la charge moyenne P des machines en service étant de 0,85 de la production normale, et le prix du charbon de 3,5 dollars la tonne, on obtient sur le graphique 1,03 centime environ. Ce chiffre est à multiplier par le coefficient de correction afférent à 12.000 kilowatts, soit, en suivant la verticale 12 jusqu'à sa rencontre avec la courbe multiplicatrice, le chiffre 0,86.

Par suite, le prix du kilowatt-heure cherché est :

$$1{,}03 \times 0{,}86 = 0^{cent},885 = 0{,}885 \times 0{,}05 = 0 \text{ fr. } 044.$$

A pleine charge, c'est-à-dire avec P = 1, on aurait comme prix de revient du kilowatt-heure :

$$0{,}65 \times 0{,}86 = 0^{cent},56 = 0{,}56 \times 0{,}05 = 0 \text{ fr. } 028.$$

Les dépenses d'exploitation par kilowatt dans les centrales hydro-électriques peuvent être décomposées comme suit : 1° à l'usine génératrice, sur l'arbre des turbines, 82 francs ; lignes primaires, 22 francs, sous-stations, 18 francs ; lignes secondaires, 12 francs ; 2° chez l'abonné et dans le même ordre que ci-dessus : 115, 30, 22 et 4 francs.

Toute amélioration dans la conduite des usines centrales se traduit par une diminution des frais d'exploitation, qui conservent dès lors un caractère permanent. Telle est, pour les usines hydroélectriques, l'idée de constituer chaque unité de puissance par un groupe « turbo-alternateur-transformateur », qui, tout en simplifiant l'installation, influe d'une façon heureuse sur le rendement économique de l'installation. Dans ce système, la turbine est accouplée directement à l'alternateur qui envoie son courant dans le transformateur-élévateur, les interrupteurs pour la marche en parallèle étant directement intercalés dans le circuit à haute tension. On rachète ainsi, par la simplicité des schémas, par la bonne exécution et la sûreté de marche des machines, les avantages obtenus difficilement par des complications qui ne vont pas sans danger et sans interruption de service.

En effet, en laissant les barres collectrices entre générateurs et transformateurs de côté, on réduit de moitié le nombre des appareils pour le contrôle et le service de l'usine. En branchant les transformateurs de courant et de tension pour les ampèremètres et voltmètres, ainsi que les relais pour la mise en marche automatique sur la basse tension, on diminue notablement la dépense, les transformateurs de mesure coûtant d'autant plus cher que la tension est peu élevée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En ce qui concerne les lignes aériennes, il y a certaines difficultés à pouvoir garder constamment en bon état une transmission s'étendant sur des centaines de kilomètres, en raison des accidents du sol, des résistances rencontrées de la part des propriétaires des terrains bordant la ligne. D'autre part, la difficulté d'approche des supports ou des fils influe beaucoup sur l'état d'isolement et sur celui de l'entretien de la canalisation. Dans certains cas, pour parer à de tels inconvénients, on a pu acquérir une bande de terrain longeant la ligne, mais ce n'est là qu'une circonstance exceptionnelle.

La possibilité d'établir économiquement la ligne dépend de la section des câbles, de la tension employée et de la perte en ligne.

Le tableau suivant renseigne sur les dépenses de cuivre pour des installations à courant triphasé pour diverses tensions et une production de 10.000 kilowatts à 100 kilomètres.

TENSIONS (volts)	POIDS DE CUIVRE par cheval	DÉPENSE PAR CHEVAL (le cuivre coûtant 2 fr. 40 le kg)
10.000	330	768
20.000	80	192
40.000	20	48
60.000	8,888	21,23

Les formules Thompson et variantes permettent bien de réaliser le minimum de frais de transmission, mais cela ne veut pas dire le maximum d'économie de l'énergie transmise. Il convient donc, dans chaque cas particulier, de définir la perte en ligne, selon les conditions spéciales dans lesquelles on se trouve. Par exemple, si l'on peut disposer avec certitude d'une quantité donnée de la force transmise, on calculera la ligne en se fixant d'avance une perte d'énergie en pleine charge, perte assez faible pour permettre d'obtenir un réglage commode et constant. Cette perte varie entre 5 et 15 0/0.

En ce qui concerne les frais d'intérêt et d'amortissement du cuivre, une bonne méthode, selon M. Louis Bell, serait de faire correspondre ces frais à la valeur de la perte d'énergie annuelle ; en d'autres termes, à augmenter le poids de cuivre de la ligne jusqu'à ce que la valeur réelle et nette d'un cheval-an économisé sur la ligne soit compensé par l'intérêt et l'amortissement du cuivre qui a permis d'obtenir cette économie de force. Pratiquement, cette règle donne une canalisation dont les frais de premier établissement sont beaucoup plus élevés qu'à l'ordinaire.

En résumé, la régulation de la tension, la sécurité du fonctionnement, la simplicité, la robustesse de l'installation sont les principaux objectifs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

visés par l'ingénieur, et en même temps les meilleurs facteurs d'un bon rendement financier.

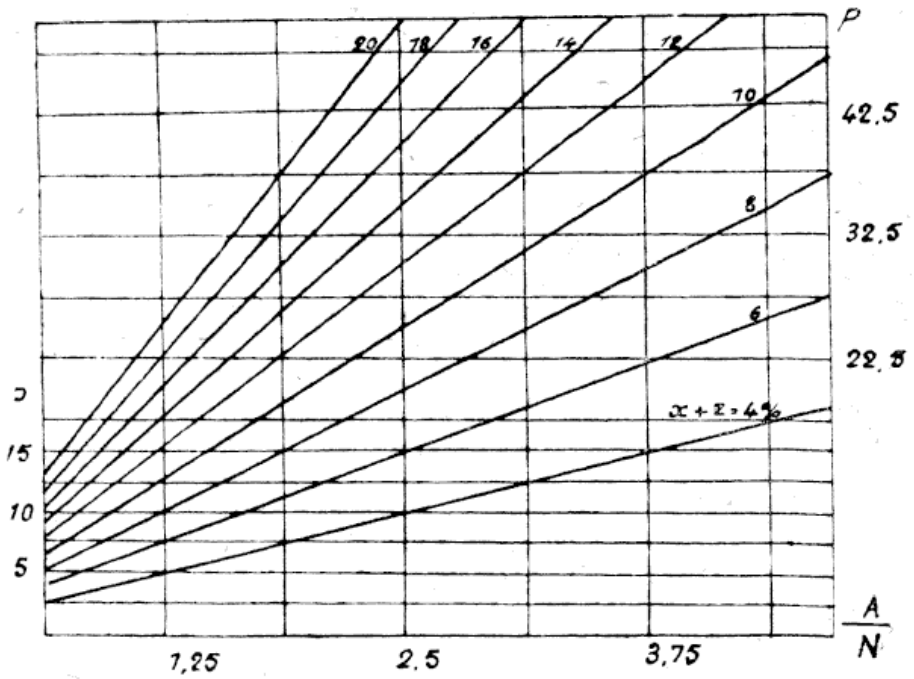


FIG. 1701. — Charges du capital en fonction des frais d'établissement et de la durée d'utilisation.

Les divers aspects de la question économique tendent soit à réduire les

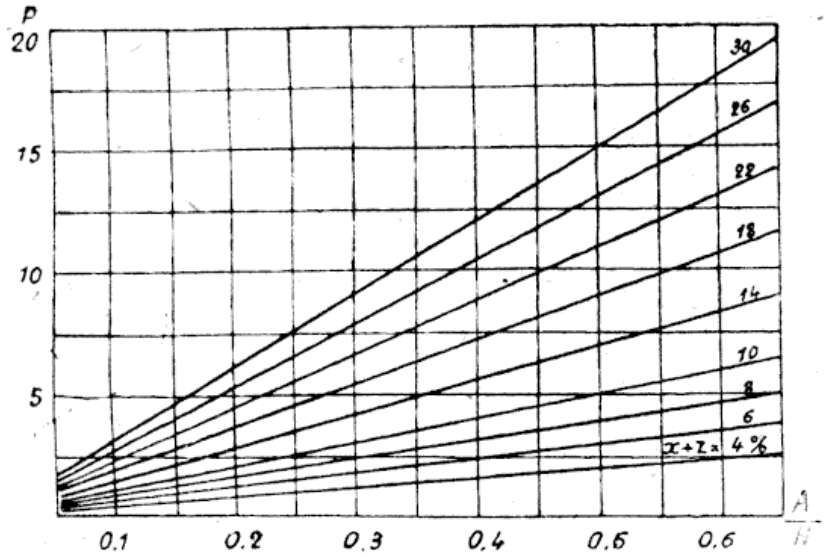


FIG. 1702. — Charges du capital en fonction des frais d'établissement et de la durée d'utilisation.

A, Frais d'établissement de la centrale par kilowatt de capacité en francs par kilowatt. — N, Coefficient d'utilisation en kilowatt-heure par kilowatt. — $p = \frac{A}{N}(x + z)$ centimes par kilowatt-heure produit : x amortissement annuel en 0/0 du capital de premier établissement, z intérêt du capital de premier établissement en 0/0.

dépenses annuelles au minimum, ce qui conduit à la *section la plus écono-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mique du fil transporteur d'énergie électrique, soit à tirer de l'entreprise le bénéfice maximum, ce qui donne la *section la plus profitable*, et soit enfin à obtenir des capitaux engagés, le meilleur rendement financier, et on se trouve alors en présence de la *section la plus productive*.

M. Swyngedauw, professeur à la Faculté des sciences de Lille, a, dans un travail remarquable paru dans le *Bulletin de la Société belge des Electriciens* (janvier 1907), étudié diverses solutions des problèmes énoncés ci-avant, selon que l'usine génératrice doive fournir une puissance et une énergie utiles données et invariables, ou que ladite usine ait une puissance installée donnée invariable, entièrement utilisable, ou enfin que l'usine soit appelée à se développer graduellement.

Dans le premier cas, il conclut que la section la plus économique est aussi la plus profitable et la plus productive ; pour le deuxième cas, la différence entre la section la plus économique et la section la plus profitable s'accentue pour les usines hydroélectriques et pour les entreprises comportant des récepteurs très divisés, où les frais généraux sont notables et les transformateurs secondaires coûteux. Enfin, pour le troisième cas, qui est le plus fréquent et le moins susceptible de précision, la section profitable donne toujours, pour le réglage de la tension, une meilleure solution que la section économique.

Dans les canalisations à haute tension (à partir de 5.000 volts), au point de vue des dangers qui menacent les habitants, il vaut mieux chercher à prévenir les courts-circuits que de prendre des précautions extraordinaires pour en diminuer les effets. Dans la plupart des grandes installations, on a doublé les lignes aériennes pour avoir une canalisation de secours.

Les statistiques sont un aide précieux pour servir de guide dans l'établissement des projets et des prévisions d'exploitation des stations centrales. Les ingénieurs anglais, sous ce rapport, sont particulièrement privilégiés, car on publie annuellement en Angleterre un Annuaire des stations centrales qui donne des renseignements assez complets permettant de se faire une idée suffisamment exacte des conditions générales de ces exploitations. On y trouve des chiffres de production de courant, de vente de courant, de charge maxima, ainsi que les puissances installées aux usines, la puissance et le nombre des moteurs alimentés, les puissances nominalement installées comme éclairage, etc. C'est sur ces données que M. R. Rougé a dressé le tableau de la page suivante.

Pour des agglomérations dépassant 100.000 habitants, la moyenne des installations donne pour la puissance à l'usine par habitant, 25,6 watts. Les chiffres compris entre 20 et 30 watts sont les plus fréquents. Les résultats les plus bas sont, dans la plupart des cas, fournis par les villes où le gaz et l'électricité sont exploités par la même Compagnie. En général,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DÉSIGNATION de L'EXPLOITATION	DÉPENSES de premier établissement	RECETTES totales d'exploitation	DÉPENSES d'exploitation	RECETTES nettes	INTÉRÊTS amortissement et réserve	DISPONIBLE pour dividende	PRIX DE REVIENT DU KILOWATT-HEURE					PRIX moyen de vente du kilowatt-heure	PUISSANCE maxima demandée en kilowatts	FACTEUR de charge	PUISSANCE de l'installation en kilowatts	NOMBRE de kilowatts-heures produits
							Charbon	Salaires	Total des charges d'exploitation	Charges de capital	Prix de revient total					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.				
Croydon Corporation Londres (municipalité)..	7.639.375	1.210.525	595.350	615.175	514.825	100.350	0,066	0,019	0,146	0,131	**0,277**	0,291	2.507	17,84	4.750	3.918.000
Bourg de Fulham, Londres (municipalité)..	5.108.100	496.100	259.175	236.925	236.200	725	0,051	0,026	0,133	0,127	**0,260**	0,248	1.008	21,12	1.500	1.865.000
Manchester (municipalité).....	54.992.250	7.554.975	3.399.800	4.155.175	3.416.600	738.575	0,026	0,021	0,097	0,101	**0,198**	0,214	20.023	19,21	25.300	33.687.000
Liverpool (municipalité).....	46.244.375	6.591.715	2.455.900	3.703.275	2.433.900	1.269.375	0,027	0,011	0,075	0,078	**0,153**	0,184	15.752	22,79	27.670	31.452.000
Salford (municipalité).....	13.674.425	1.635.900	618.600	1.017.300	829.450	187.850	0,019	0,008	0,066	0,092	**0,158**	0,171	3.600	28,55	6.400	9.002.310
Newcastle-sur-Tyne (Compagnie).....	20.811.050	3.307.700	1.788.675	1.719.025	495.875	1.223.150	0,013	0,005	0,057	0,016	**0,073**	0,097	15.300	22,67	20.000	30.379.000

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la puissance à l'usine tend à augmenter avec la population ; les grandes agglomérations atteignent jusqu'à 40 watts.

La moyenne de la charge maxima par habitant est de 14,78 watts ; elle est ordinairement grande pour toutes les usines qui alimentent en même temps des tramways. On remarquera que le maximum de charge par habitant est à très peu près les 3/5 de la puissance installée à l'usine ; la réserve ressort donc à 40 0/0 de la puissance de cette dernière. Ce chiffre est d'ailleurs souvent dépassé, et beaucoup de stations, aux jours de la plus grande charge, ne tournent qu'avec la moitié de leurs machines.

L'utilisation horaire de l'usine, c'est-à-dire le nombre d'heures qu'elle aurait dû tourner à pleine charge pour produire l'énergie engendrée dans toute l'année, est un facteur important des conditions de production. Ce coefficient est assez variable; la moyenne ressort à 1.093 heures par an, soit 3 heures par jour ou 12 0/0 du temps total. Il est élevé lorsque les usines sont à leur limite de puissance ou même quand elles la dépassent par l'emploi des batteries d'accumulateurs ; ainsi, à Manchester, il atteint 2.250 heures.

Le quotient de l'énergie vendue par la puissance nominale des installations d'éclairage donne une idée de l'utilisation du réseau. Cette utilisation est encore plus faible que celle de l'usine. Elle ressort en moyenne à 750 heures par an. Les chiffres les plus bas concernent les installations qui n'ont que peu de moteurs à alimenter, pas de traction et qui n'imposent aucun tarif spécial à leurs abonnés.

L'utilisation rapportée au maximum de charge, ou le quotient de l'énergie par le maximum de charge à l'usine ,est particulièrement intéressant, puisqu'il serait le coefficient d'utilisation d'une usine idéale strictement suffisante pour la demande. C'est un coefficient qui ne dépend que des circonstances locales matérielles ; sa moyenne est de 1.769 heures, soit près de 5 heures par jour. Il a une valeur élevée dans les installations où il y a beaucoup de moteurs et de la traction. Les usines qui n'ont pas de traction peuvent bonifier le coefficient en utilisant des tarifs spéciaux qui restreignent la demande maxima.

Le rendement de la distribution, qui est le quotient de l'énergie vendue par l'énergie produite, est en réalité un rendement commercial. La moyenne du rendement de distribution est de 82,7. Les rendements inférieurs à 80 0/0 sont ceux d'installations alternatives.

La moyenne du prix des réparations a été de 1,67 centime, et celui des fournitures accessoires de 0,47 centime. Les fournitures accessoires ne dépassent pas 0,8 centime. Dans bien des cas, le prix des réparations est tout à fait comparable à celui des combustibles. Le chiffre le plus bas est de 3,9 centimes.

M. Snell donne, comme prix du kilowatt de l'énergie produite avec des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteurs divers et sous des facteurs de charge variables, ceux relatés dans la tableau suivant, qui permet de reconnaître les clients qui sont susceptibles d'être recrutés par les centrales d'électricité.

FACTEUR DE CHARGE	ÉQUIVALENT EN HEURES PAR AN	GAZOGÈNE PAR ASPIRATION		GAZ DE VILLE		PÉTROLE		VAPEUR		MOYENNE	
		Moins de 100 HP	100 à 500 HP	Moins de 100 HP	100 à 500 HP	Moins de 100 HP	100 à 500 HP	Moins de 100 HP	100 à 500 HP	Moins de 100 HP	100 à 500 HP
10 0/0	876	15,96	13,36	14,94	»	13,50	10,57	13,88	11,40	14,67	11,78
15	1.314	13,33	9,91	12,70	»	10,20	8,16	10,82	8,51	11,77	8,86
20	1.752	10,92	7,98	11,40	»	8,53	6,88	9,19	7,06	10,01	7,30
25	2.190	9,49	7,03	10,57	»	7,50	6,13	8,46	6,19	9,22	6,45
30	2.628	8,52	6,25	9,91	»	6,82	5,62	7,40	5,60	8,16	5,82
35	3.066	7,81	5,67	9,36	»	6,30	5,22	6,78	5,18	7,56	5,36
40	3.504	7,28	5,27	8,86	»	5,91	4,92	6,27	4,87	7,17	5,01
50	4.380	6,56	4,69	8,30	»	5,36	4,51	5,69	4,42	6,47	4,54
60	5.256	6,04	4,26	7,82	»	4,98	4,24	5,22	4,12	6,02	4,21
70	6.132	5,67	3,95	7,11	»	4,70	4,01	4,83	3,91	5,64	3,95
80	7.008	5,39	3,75	7,03	»	4,47	3,84	4,50	3,74	5,25	3,78

Les prix des combustibles, qui ont servi de base aux estimations ci-avant, sont les suivants : gaz de ville, 0 fr. 088 le mètre cube ; anthracite, 27 francs la tonne ; houille (fin), 12 fr. 25 la tonne ; pétrole, 52 fr. 10 la tonne, et l'eau, 0 fr. 120 le mètre cube ; l'amortissement fixé à 10 0/0 du capital.

Il convient aussi de faire intervenir dans une exploitation le facteur de diversité qui dépend de la variété des usines desservies, et qui est égal au rapport de la somme des maxima de toutes les demandes au maximum réellement fourni.

Ce rapport varie entre 1,25 et 2. En moyenne, on peut tabler sur 1,66.

Dans ces conditions, le prix d'établissement d'une usine centrale revient à :

		TRANSFORMATEURS STATIQUES		TRANSFORMATEURS ROTATIFS	
Capacité de la s/station en kw.		100 à 250	250 à 1.100	250 à 500	500 à 1.500
Coût de l'usine génératrice.	par kilowatt.	325fr	325fr	325fr	325fr
— des transmissions....		300	300	300	300
— des sous-stations.....		83,25	43,75	130	106,50
— total.....		708,25	668,75	755	731,50
— — avec un facteur de diversité de 1,66.....		458,25	418,75	505	481,50

L'expérience montre que le facteur de diversité est d'autant plus grand que le système de distribution est plus important. Prenons comme exemple, pour l'étude du facteur de diversité, le cas d'un système de distribution à courant alternatif, d'une analyse plus aisée que celle d'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

système à courant continu à basse tension, à cause de la présence des transformateurs dont la charge peut être mesurée. D'après des observations faites en Amérique par M. Géar, dans les quartiers de « résidence », alimentés par des lignes aériennes, la somme des demandes maxima des clients individuels est de 2,5 à 3 fois plus forte que la demande maxima au transformateur qui les alimente ; ce rapport devient moindre s'il y a moins de 10 clients branchés sur le transformateur, et plus élevé s'il y en a plus de 30.

Dans les quartiers commerciaux comprenant beaucoup de petits magasins, le rapport de la somme des maxima des clients à la charge maxima du transformateur varie de 1,5 à 1,7 : plus faible s'il y a beaucoup de magasins avec étalages brillamment éclairés, expositions, etc... et plus élevé dans le cas contraire.

Le facteur de diversité entre les compteurs et le transformateur correspondant dans les circuits de moteurs est, en général, assez faible, car il est rare qu'un nombre considérable de moteurs soit groupé sur un seul transformateur ; il ne doit pas dépasser une valeur moyenne de 1,1.

En arrivant aux sous-stations, on trouve un facteur de diversité considérable entre les demandes maxima des transformateurs et la charge maximum du feeder qui les alimente. Ce facteur est de 2 à 2,2 dans les régions de résidences disséminées : de 1,6 à 1,8 dans celles où la population est plus dense, et de 1,2 à 1,3 dans les quartiers commerciaux.

Dans les régions où sont alimentés des moteurs disséminés de 5 à 100 chevaux, le facteur de diversité entre les transformateurs et le feeder qui les alimente est de 2 à 2,2 ; lorsque peu de gros moteurs de 100 à 500 chevaux ou davantage sont groupés sur un feeder séparé, le facteur de diversité est de 1,2 à 1,3.

Dans la sous-station elle-même, il existe un facteur de diversité dû aux différences caractéristiques des charges supportées par les différents feeders partant de cette sous-station. Si cette dernière comprend dix feeders ou davantage, la valeur du facteur de diversité est d'environ 1,15.

Le tableau ci-après donne la valeur du facteur de diversité total entre la sous-station et le consommateur, pour différentes classes de clients :

	ÉCLAIRAGE D'HABITATION	ÉCLAIRAGE COMMERCIAL	MOTEURS DISPERSÉS	GROS CLIENTS MOTEURS ET LAMPES
De la sous-station aux feeders.	1,15	1,15	1,15	1,15
Des feeders aux transformateurs	1,8	1,25	2,0	1,25
Des transformateurs aux compteurs	3,0	1,6	1,1	»
Facteur de diversité total	6,2	2,30	2,53	1,44

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La dernière colonne s'applique aux clients dont la demande est de 100 à 500 kilowatts,

Le facteur de diversité résultant, dans un système de distribution réunissant toutes les classes de clients, varie entre 2,5 et 3,5 suivant les proportions relatives de ces diverses classes.

Si l'on applique les considérations précédentes à l'exemple d'un réseau desservant des habitations, dans lequel la somme des demandes des clients durant le mois le plus chargé de l'année est de 100 kilowatts, d'après le tableau ci-dessus, la capacité des transformateurs devra être de : $\frac{100}{3} = 33{,}3$ kilowatts, celle des feeders de : $\frac{33{,}3}{1{,}8} = 18{,}5$ kilowatts, et celle de la sous-station de : $\frac{18{,}5}{1{,}15} = 16$ kilowatts.

Dans un quartier commercial la capacité de la sous-station devrait être de 43,5 kilowatts ; dans un réseau comprenant des moteurs disséminés, de 39,5 kilowatts ; et dans un réseau de gros clients, de 69,5 kilowatts.

Inversement, pour 100 kilowatts d'équipement dans une sous-station qui alimente un réseau desservant des habitations, la compagnie de distribution doit prévoir l'installation de 620 kilowatts en compteurs, 287 kilowatts en transformateurs et 115 kilowatts en feeders.

Pour desservir de gros clients de lumière ou de force, elle doit prévoir 144 kilowatts en compteurs et transformateurs, et 115 kilowatts en feeders.

Le capital immobilisé par kilowatt se répartit entre les diverses parties d'une distribution dans des conditions données, qu'on peut considérer comme assez générales, et il se divise à peu près comme l'indique le tableau suivant :

	FORCE MOTRICE clairsemée	HABITATIONS clairsemées	HABITATIONS concentrées	ÉCLAIRAGE commercial	GRANDS consommateurs
Matériel générateur	37	18,5	30	44,5	60
Ligne de transmission et sous-station	9	4,5	7,5	10,5	14
Feeders et distributeurs	49,5	52	26	35	23
Transformateur	4	4	2,5	3	3
Compteur	0,5	21	34	7	
	100	100	100	100	100
Capital immobilisé par kw de demande annuelle maxima de l'usine	2.050 fr.	4.100 fr.	2.500 fr.	1.750 fr.	1.250 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour le relèvement du facteur de puissance des réseaux par machines synchrones, M. Poirson préconise l'utilisation des alternateurs en repos ou de réserve, comme moteurs synchrones compensateurs, et la répartition rationnelle du courant réactif entre certaines usines génératrices dans les limites d'une bonne marche en parallèle, ceci comme moyens généraux. Et à titre de moyens particuliers : la réalisation de compteurs spéciaux pour tarification rationnelle de l'énergie électrique à courant alternatif en fonction du $\cos \varphi$; la réalisation de petits condensateurs à basse tension, à grande capacité et faible volume, pouvant s'assembler aisément en batteries de volume réduit ; enfin la réalisation de condensateurs robustes et durables pour les hautes tensions en réduisant leur volume spécifique si possible.

L'équipement électrique d'une grande gare moderne offre un débouché important pour les centrales de distribution d'énergie, qui peuvent fournir le courant à des prix avantageux aux administrations de chemins de fer.

L'éclairage jouant un rôle prépondérant dans ces sortes d'installations, on a été amené à envisager le genre de courant qui lui convient le mieux. Or, l'éclairage à incandescence par courant alternatif à 25 périodes donne un papillotement à la lumière, à moins d'employer des lampes à gros filaments, et les lampes à arc ont un fonctionnement instable. De plus, certaines lampes à filament métallique supportent mal le courant alternatif, et, en outre, leur vie est considérablement réduite. Il semble donc que le courant continu s'impose pour l'éclairage.

En ce qui concerne les circuits de force, les deux formes de courant peuvent être adoptées, l'étude de chaque cas décidant de la forme la plus avantageuse, selon que l'on a affaire à des moteurs à démarrages fréquents et couple constant (courant continu, moteurs shunt), moteurs à démarrages fréquents et couple variable (courant continu, moteur-série), moteurs à marche continue (courant triphasé, moteur asynchrone ou moteur shunt), et enfin moteurs à vitesse variable (courant continu ou courant triphasé).

Dans une installation de gares de chemins de fer, où dans aucun cas une extinction de tous les appareils d'éclairage ne doit se produire, le rendement des appareils de transformation doit s'effacer devant la sécurité du fonctionnement.

A la suite de longues études, l'Administration des chemins de fer de l'État belge se décida, au vu des considérations ci-dessus, à faire choix, pour toutes les sous-stations de l'agglomération bruxelloise, de groupes moteurs-générateurs entraînés par moteurs asynchrones triphasés.

Les enroulements de ces moteurs ont été prévus pour du courant à haute tension, 6.500 volts, 25 périodes (fourni par l'usine de la Société

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bruxelloise), pour les groupes d'une puissance utile, égale ou supérieure à 65 kilowatts, débitant du courant continu à 550 volts. Pour les autres, des transformateurs statiques abaissent la tension primaire de distribution à la valeur de 110 volts.

Les sous-stations de transformation sont reliées à l'usine génératrice par un double système de câbles à haute tension, et dans aucun cas les deux lignes de câbles ne peuvent être mises en parallèle, pour éviter tout risque de répercussion, sur un système, des accidents survenant à l'autre système. Les tableaux des sous-stations sont prévus de façon à pouvoir diviser les circuits d'éclairage des gares importantes en deux groupes de circuits raccordés séparément à deux groupes moteurs-générateurs distincts.

Les câbles ont été, suivant les endroits, disposés en terre ou dans des caniveaux en fonte visitables. Chacun des groupes est alimenté de façon identique. Un seul câble servant à l'alimentation est figuré sur le dessin, l'autre arrivée étant identique.

Cet appareillage, bien que très simple, est fort complet. Il permet d'effectuer toutes les manœuvres nécessaires au service courant, à l'entretien et aux réparations. En général, il est toujours possible, quand la nécessité oblige à travailler sur un appareil, d'ouvrir un sectionneur empêchant matériellement le courant d'être lancé par une fausse manœuvre dans l'appareil en question.

Pour la construction des tableaux à haute tension, on a employé le système cellulaire. En particulier, les interrupteurs automatiques et les commutateurs à deux directions sont enclenchés entre eux de façon à prévenir toute manœuvre sous courant du commutateur et à obliger ainsi le personnel à couper le courant au moyen de l'interrupteur. Les limiteurs de tension sont du type à bornes multiples, à résistance liquide.

Les circuits d'utilisation comportent trois barres omnibus dont deux positives et une négative, et les circuits sont protégés par de petits parafoudres à cornes à écartement réglable. Les interrupteurs sont branchés sur le pôle positif ; ils sont à renversements à double plombs fusibles.

L'*usine hydroélectrique de la* « *Arizona Power Company* » (comté de Gila) est un exemple de l'application du système Huntington adopté dans la Californie du sud qui consiste à connecter les usines et sous-stations sans l'aide d'interrupteurs automatiques d'aucune sorte [1]. Quand le réseau comprend plusieurs usines génératrices, une seule d'entre elles est autorisée à connecter les deux lignes de la distribution ensemble. Les

[1] Texte du règlement « Mettez chacun de vos groupes de transformateur sur une ligne seulement, et partage la charge entre les deux lignes autant que possible. Si l'une des deux lignes ne fonctionne plus, passez sur l'autre. Vite ! Prenez le courant sur celle des lignes que vous voyez bonne ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

autres usines et les sous-stations ne doivent jamais connecter un groupe de transformateurs à deux lignes à la fois. Si un trouble survient sur l'une des lignes, l'électricien de l'usine maîtresse déconnecte tous ses groupes transformateurs de la ligne en question, et immédiatement les électriciens de toutes ces sous-stations se conformant au règlement et agissant sans ordres téléphoniques, prennent le courant sur l'autre ligne. Si, en outre de l'usine maîtresse, il y a plusieurs usines génératrices sur le réseau, les électriciens de chacune d'elles font passer la charge sur la ligne restée bonne.

Dans plusieurs cas l'application de ce système a permis de faire passer la charge entière des deux lignes à une seule ligne, pour toutes les usines et sous-stations du réseau, en deux minutes seulement. Les sous-stations arrivent à faire ce changement en une demi-minute et souvent en dix secondes.

Quand tout le système est ainsi transporté sur la ligne restée bonne, l'opérateur de l'usine maîtresse, au moyen d'une génératrice déjà en service, monte lentement le voltage sur la ligne où un trouble avait été constaté, évitant ainsi tous les chocs et surtensions sur les appareils et isolateurs de ligne. Si la ligne est bonne, il connecte immédiatement toutes ses unités aux deux lignes à la fois ; l'électricien de chaque sous-station, voyant briller les lampes témoins sur les deux lignes, remet les choses dans l'état primitif, puis il téléphone, si nécessaire, à l'usine maîtresse, pour faire un rapport, demander des ouvriers de ligne pour réparations, etc.

606. Installations des Centrales et usines de secours à vapeur. — Les exploitants de chutes d'eau, à l'effet d'obtenir le plus grand effet utile de l'énergie qu'ils tirent de la force dynamique de l'eau, sont appelés, dans certains cas, à demander à l'usage de la vapeur une constance de marche qui leur fait défaut autrement. De plus, ces installations de secours servent à parer soit à des accidents pouvant survenir dans la marche des machines génératrices ou dans le fonctionnement des lignes électriques. L'installation si moderne du réseau du Littoral méditerranéen (§ 252) est d'un enseignement tout spécial à cet égard.

Nous citerons aussi l'exemple typique suivant.

A l'usine de Chèvres, pendant quelques jours, la puissance motrice de l'eau peut atteindre des maxima de 6.000 à 7.000 poncelets ; la puissance moyenne pendant plusieurs mois est de 3.000 à 4.500 poncelets, et elle tombe pendant quelques jours au-dessous de 2.200 poncelets (elle est même descendue parfois à 1.500 poncelets). Et c'est justement pendant le mois de juin, époque à laquelle le débit du Rhône est le plus élevé, que cette puissance présente son minima. Les raisons de la diminution de puissance en hautes eaux sont que le niveau d'aval s'élève d'environ

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2 mètres, et qu'on est obligé de baisser le niveau amont d'une quantité à peu près égale pour éviter les dépôts d'alluvion. Aux très grandes crues, il est arrivé que les grilles des turbines s'obstruaient.

L'adjonction d'une réserve à vapeur de 2.600 poncelets a permis d'assurer une puissance constante de 3.700 à 4.500 poncelets, au lieu de 1.900 environ par le jeu seul de l'eau motrice (1).

Le prix de revient de l'énergie à l'usine hydraulique, qui était de 4,82 centimes le kilowatt-heure, est descendu à 3,7 centimes avec l'addition de la réserve à vapeur. De plus, cette modification a eu pour résul-

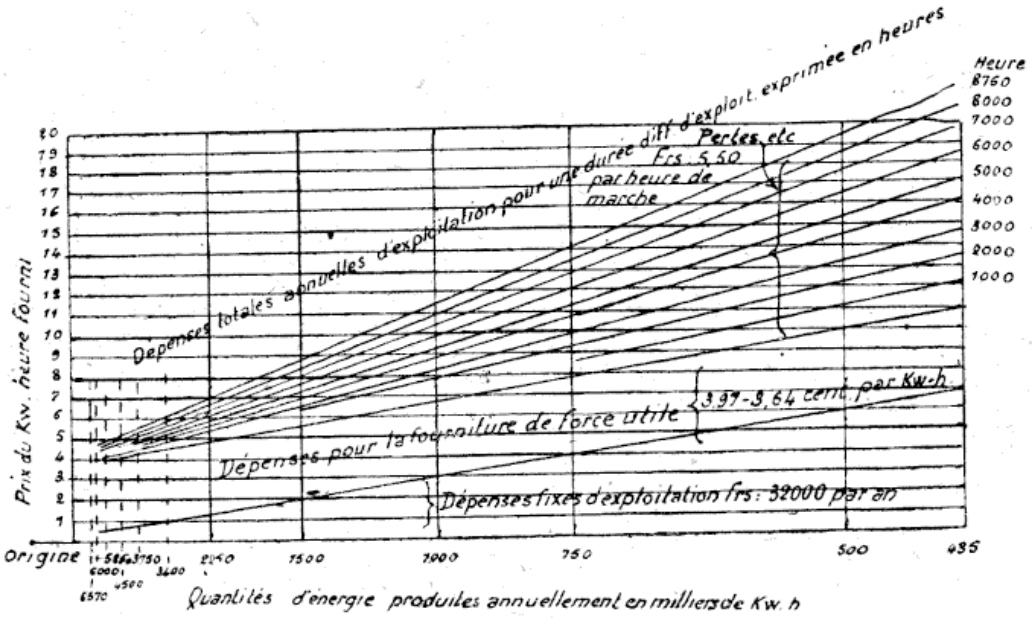


FIG. 1703. — Diagramme d'exploitation d'une installation d'usine à vapeur comprenant deux chaudières multitubulaires de 200m² de surface de chauffe d'un turbo-alternateur de 750 kw. avec vapeur de 12 k. surchauffée à 300° C.

tat de vendre l'énergie à un prix plus élevé à certains clients, en raison d'une garantie de la quantité qui, à ce défaut, ne permettait guère que d'alimenter des usines électro-chimiques.

Aujourd'hui, dans les installations à vapeur, on reconnaît que le tirage induit avec ventilateurs centrifuges aspirant est la solution préférable, aux points de vue du fonctionnement, du coût et de l'encombrement.

L'alimentation des combustibles continue en dessous, par procédés mécaniques, constitue une solution remarquable d'une combustion par-

(1) Le problème de la pointe dans les centrales à vapeur paraît devoir être facilité par l'introduction d'un nouveau système d'accumulation de l'énergie. Nous entendons parler des accumulateurs thermiques dont le procédé de M. Halpin combine heureusement l'économie de vaporisation avec la grande élasticité de production. Des essais pratiques ont mis en lumière l'accroissement de vaporisation que l'on peut obtenir en augmentant le volume d'eau du générateur par l'intermédiaire de l'accumulateur et l'accroissement théorique à des régimes où ce rendement baisse usuellement de façon très sensible dans les chaudières.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

faite du charbon. Dans certaines centrales, on a constaté une diminution de plus de moitié dans les frais de production de la vapeur par l'adoption du tirage des foyers par procédés mécaniques.

Pour arriver à de tels résultats, il faut établir un contrôle permanent du rendement de la combustion, autrement dit de la bonne utilisation thermique des générateurs. A cet effet, on a recours à des appareils analyseurs permettant de constater principalement les pertes par combustion incomplète et celles par chaleur sensible rejetée dans la cheminée. Le dosage de l'acide carbonique est un excellent moyen de contrôle de la chauffe, qui devient parfait si on le double d'un dosage de l'oxyde de carbone ; de cette façon l'on se rend compte si la combustion est effective.

Depuis quelque temps, en Angleterre, on a poussé très loin le souci d'utiliser toute chaleur perdue et l'on chauffe l'air avant son entrée dans le foyer. Celui-ci est chauffé par les gaz de la combustion avant de se rendre à la cheminée, puis aspiré par un ventilateur mû électriquement, qui l'envoie sous pression dans le foyer pourvu d'un chargeur mécanique. L'air qui traverse le *chauffeur d'air* placé dans les carneaux vient de la salle des machines où il a été chauffé par des dynamos.

Nous pouvons citer les chiffres suivants : température des gaz quittant le chauffeur d'air et entrant sous le chargeur automatique : 220° F, (110° C.).

La vapeur d'échappement des appareils auxiliaires sert à chauffer l'eau d'alimentation.

Les rendements obtenus ont été les suivants :

A pleine charge, 80 0 /0 ; à trois quarts de charge, 80 0 /0 ; à 25 0 /0 de surcharge, 78 0 /0.

Les pertes dans les périodes de non-production peuvent être divisées en deux parties : pertes dans les chaudières et pertes de vapeur, après que celle-ci a quitté les chaudières.

Les premières sont représentées selon la méthode R. H. Parsons par l'équation :

$$(3) \qquad (W = A' + B'S) \qquad \text{et les secondes par :} \qquad (S = C + D \text{ Kw.}) \qquad (2)$$

W représentant les kilogrammes de combustible brûlés durant un poste de huit heures, S = kilogrammes d'eau évaporée pendant le même laps de temps, A′, B′, C et D des constantes.

A ces formules on peut ajouter celles-ci-après :

$$(1) \qquad W = A + B \text{ kilow.} \qquad \text{et} \qquad S = C'W - D'). \qquad (4)$$

Les constantes sont obtenues en traçant des courbes des résultats obtenus pendant un certain temps. L'exemple suivant, présenté par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. Murray, ingénieur de la « North Metropolitain Electric Power Supply Cº » dont la production annuelle est de 25 millions de kilowatts-heures montre comment on peut traduire les formules de M. Parsons.

Pour la Centrale précitée, les équations ont présenté les formes ci-après :

$$W = 17.000 + 2{,}17\ Kw \quad (1); \qquad S = 12.000 + 16{,}48\ Kw; \quad (2)$$
$$W = 15.420 + 0{,}1317\ S \quad (3) \qquad \text{et} \qquad S = 7.594\ W - 117{,}106. \quad (4)$$

Les chiffres sont exprimés en livres.

Sur une feuille de papier quadrillé, on trace les deux lignes droites, charbon et eau, que l'on obtient en calculant les équations (1) et (2). Quand on achève un poste de huit heures, on marque sur le diagramme les consommations réelles de charbon et d'eau correspondant aux kilowatts-heures. Si les points tombent au-*dessus* des lignes tracées, c'est que le rendement a été moins bon et l'inverse s'ils tombent au-*dessous*.

M. Napier a proposé une formule qui permet de suivre un peu mieux la marche générale de la centrale. Soit, pour fixer les idées :

$$W = 20.000 + 2{,}8\ Kw. \qquad (5)$$

On prépare un diagramme, dans lequel les ordonnées représentent des livres de charbon par kilowatt-heure et les abscisses les postes consécutifs. Sur ce diagramme une ligne horizontale est tracée, correspondant à la dépense en charbon de 2,8 livres. Supposons qu'à la fin d'un poste on trouve que la dépense en charbon s'est élevée à 112.250 livres de charbon, pour une production de 32.720 kilowatts-heures, on a alors : $\frac{112.250}{32.720} =$ 2.819 livres. On marque par un point ce résultat sur le diagramme et comme il se trouve au-*dessus* de la ligne droite *standard*, on en conclut que le rendement est un peu inférieur à ce standard.

On peut traiter de la même façon la question de vapeur et voir où se trouve le défaut, quand il y a diminution de rendement ; on peut le trouver en effet soit aux chaudières, soit aux machines.

De plus en plus les installations de secours à l'aide de la vapeur emploient les turbines à vapeur. Les raisons qui militent en faveur de ce nouvel élément de forces ont été exposées au (§ 489), et nous n'avons pas à y revenir ici. Nous signalerons seulement les résultats économiques obtenus avec ces machines dans d'importantes installations en Amérique, où on fait surtout appel aux turbines Parsons et Curtis.

La (*fig.* 1704) permet de se rendre compte de la dépense totale de vapeur par des turbines à vapeur ainsi que la vapeur consommée par kilowatt-heure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il y a très peu d'installations avec économiseurs, le charbon ne coûtant en ce pays que 10 à 12 fr. 50 la tonne. Les appareils de chargement automatiques permettent à trois hommes d'assurer le service de 10 chaudières d'environ 1.500 HP chacune.

Des essoreuses centriguges à vapeur permettent de récupérer l'huile des chiffons gras, de façon que les chiffons et l'huile peuvent resservir, cette dernière après filtrage.

Le prix de revient du kilowatt-heure, avec facteur de charge de 50 0/0, est de 0 fr. 0277, dont 0,0167 pour les amortissements divers, 0 fr. 00235 pour réparations et entretien, 0,00315 pour graissage, eaux et fournitures

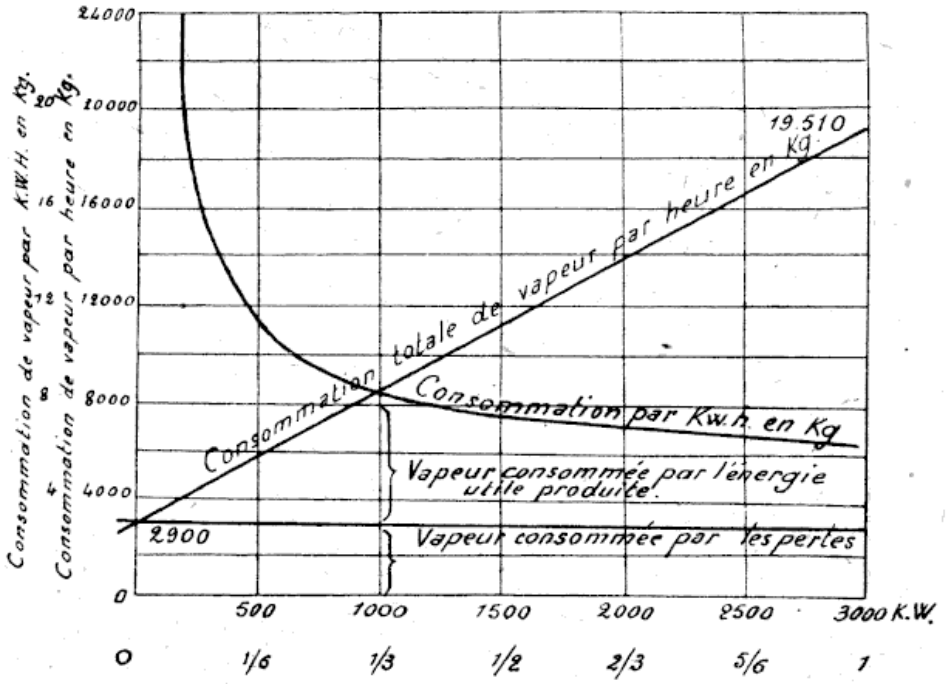


FIG. 1704.

diverses, et 0,0055 pour la main-d'œuvre, soit 119 fr. 50 le kilowatt-an. L'économie par rapport à la machine à vapeur est de 8 fr. 50 par kilowatt-an.

Au point de vue des dépenses d'installation, on peut compter en moyenne par kilowatt : bâtiments de l'usine, 54 fr. 85 ; turbines et génératrices, 152 fr. 75 ; générateurs, 69 fr. 60 ; installation de la condensation = 19 fr. 90 ; manutention mécanique du charbon, 4 fr. 90 ; bâtiments d'administration, 29 fr. 70.

L'encombrement de l'usine par kilowatt, en mètres carrés varie, selon l'importance de l'installation, de 0,08 à 3,315.

Le coût total d'une usine prévue avec une réserve de 33 0/0 est par kilowatt d'environ 570 francs, et on compte pour amortissement, intérêt, impôt et assurance, 72 francs par kilowatt-an.

Pour les installations de puissance réduite, le type de moteur assurant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les meilleurs résultats est la machine demi-fixe. On peut se procurer des machines tandem ou cross-compound, à détente automatique, surchauffe et condensation, pour des puissances de 100 HP ou même moins, donnant une consommation aux essais de moins de 5 kilogrammes de vapeur, et moins de 700 grammes de houille, c'est-à-dire des consommations qu'il est difficile d'atteindre avec les grosses machines horizontales de 500 ou 1.000 HP, munies des mêmes perfectionnements. On doit surtout veiller, avec ces machines, à ce que la dilatation de la chaudière soit libre, c'est-à-dire indépendante du bâti portant les paliers, les cylindres et le mécanisme proprement dit.

Pour les puissances moyennes, le moteur à générateur séparé reprend

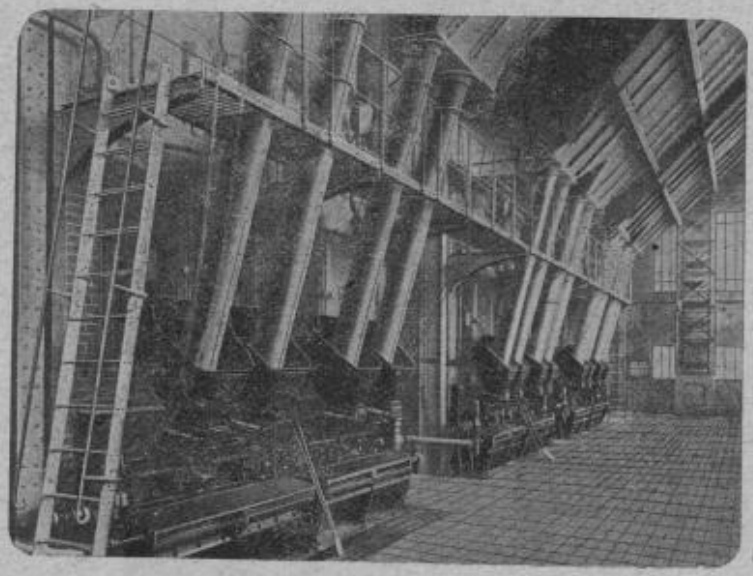


FIG. 1705. — Vue d'une rue de chaudières.

ses droits, et la machine horizontale est celle qui convient le mieux, comme présentant la moindre consommation de vapeur en présence de charges variables. Mais son prix est plus élevé que celui d'une machine-pilon de même force (environ le double) et nécessite un plus grand emplacement.

Les distributions par soupapes s'accommodent le mieux de la vapeur surchauffée, du bénéfice de laquelle il convient de s'assurer. Les distributions Corliss et par pistons-valves fonctionnent bien avec surchauffe modérée et présentent, sur les soupapes, l'avantage d'un espace mort plus faible, qui se traduit le plus souvent par une consommation légèrement améliorée.

Enfin, pour les stations à puissance élevée, la turbine à vapeur présente une supériorité incontestable.

L'emploi généralisé de ces dernières a modifié les anciennes disposi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions concernant l'installation des générateurs de vapeur. Aujourd'hui, on dispose les générateurs d'un même groupe ou d'une même salle de chauffe, face à face, comme les maisons d'une rue. De cette façon on peut réaliser, dans des conditions rationnelles, l'extension progressive de l'usine, la division de l'usine totale en sections entièrement distinctes et autonomes, la boucle des tuyautages de vapeur et d'eau d'alimentation, et enfin le grou-

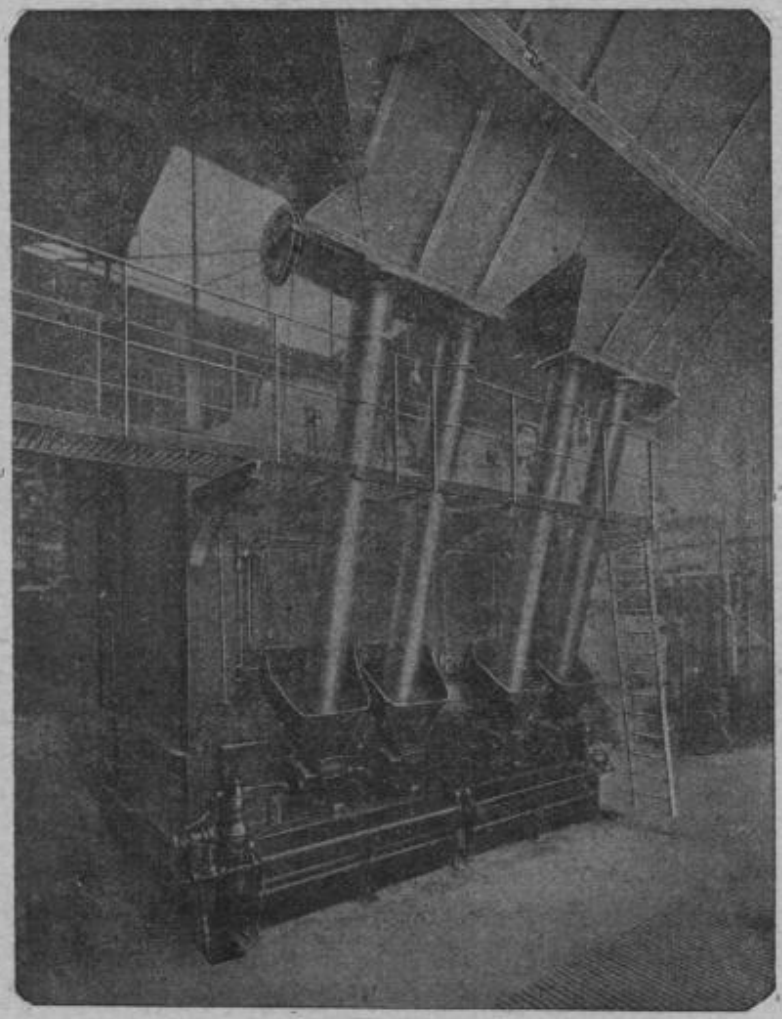


FIG. 1706. — Vue de face de deux chaudières accouplées.
(Station électrique de l'usine à gaz de la Villette.)

pement et l'agencement rationnels de tous les services desservant un même groupe de générateurs.

On encadre la chambre de chauffe entre, d'une part, la salle des machines dont les diverses unités génératrices se trouvent au droit des groupes de générateurs ou salles de chauffe partielles affectées à leur alimentation et, d'autre part, les silos de charbon, côté des cheminées. Le tableau de distribution et ses nombreux accessoires sont placés de préférence sur le grand côté de la salle des machines opposé aux chaudières.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les trois grands services de l'usine : service de chauffe, service des machines et service électrique, sont ainsi localisés suivant un plan d'ensemble susceptible de ne comporter qu'assez peu de variantes.

La disposition de l'usine, sectionnée en groupes autonomes entièrement

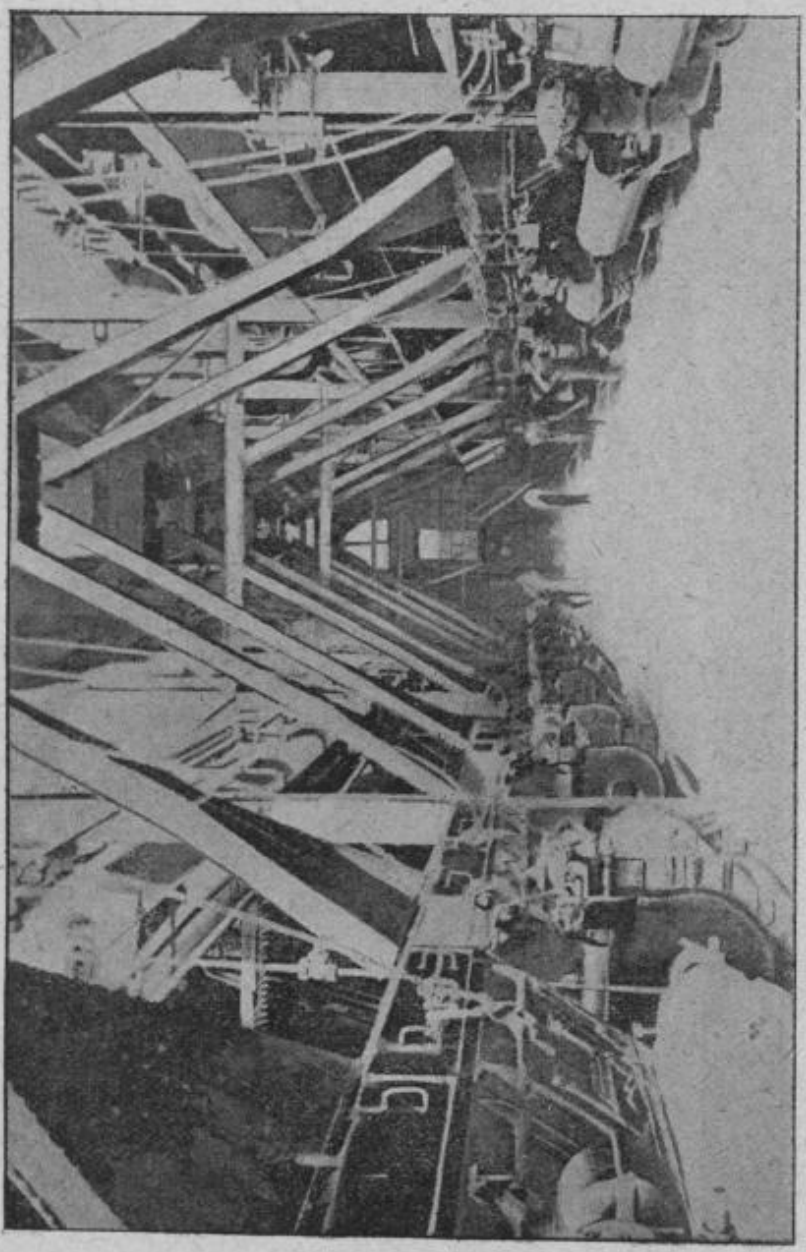


FIG. 1707. — Usine de Vereeniging. — Vue d'une rue de chauffe.

distincts, permet une meilleure utilisation du matériel en service et une plus grande sécurité que le système de l'usine indivisée, surtout si chaque subdivision comporte un groupe supplémentaire destiné à servir de rechange immédiat.

En ce qui concerne les services auxiliaires, il est aussi préférable de maintenir complètes l'indépendance et l'autonomie de chaque turbomoteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'idée directrice qui doit régir l'agencement des auxiliaires du service de chauffe est, d'après M. Chevrier, la possibilité de centraliser, dans chaque batterie distincte, l'ensemble des moyens de contrôle et d'action. En d'autres termes, réaliser de cette façon un tableau analogue à ce qui est, pour le service électro-mécanique d'une usine, le tableau de distribution y afférant. On centralise ainsi, dans un local *ad hoc*, les manomètres, les thermomètres, les compteurs, les bascules automatiques pour le combustible, les doseurs enregistreurs du gaz de la combustion, les appareils de réglage et d'alimentation.

L'entrée en scène du moteur Diesel [1] mérite une attention toute spéciale comme concurrent pour les centrales d'électricité. Déjà dès 1907, à la suite d'expériences faites à Ausbourg, on avait pu se rendre compte qu'un moteur Diesel de 200 chevaux fournissait le cheval-heure effectif avec 188 grammes de pétrole de Galicie produisant 10.700 calories. C'était un rendement thermique effectif qui n'avait pas encore été atteint (33,5 0/0) par aucune autre machine motrice.

Les moteurs Diesel sont fabriqués aujourd'hui par les grands constructeurs d'Europe et d'Amérique. Ils sont appelés à un développement considérable, non seulement dans la marine, où leur introduction leur a assuré un plein succès, mais encore sur terre en raison du coût élevé du charbon et du soin que l'on apporte à la fabrication des huiles de goudron et des pétroles bruts pour la marche directe des chaudières.

Les perfectionnements incessants introduits dans la fabrication des moteurs Diesel à multiples cylindres ont permis de créer des types de plusieurs milliers de chevaux. Ils sont destinés à supplanter dans bien des cas les turbines à vapeur, non seulement dans les centrales thermiques, mais encore dans les usines thermiques adjointes comme secours aux usines hydroélectriques, soit comme adjuvant des pointes, soit comme moyen de régulation du régime des cours d'eau. On a observé que pour des installations avec moteurs Diesel, de 50 à 800 kilowatts, dès que la durée d'utilisation atteint mille heures, une centrale ne peut pas concurrencer, si sa puissance totale installée est inférieure ou atteint 1.040 kilowatts. Si la puissance installée atteint 15.000 kilowatts, elle peut entrer en concurrence pour des puissances de 500 kilowatts avec 580 heures d'exploitation, ou 400 kilowatts avec 1.000 heures, ou 300 kilowatts avec 2.000 heures, ou 250 kilowatts avec 4.000 heures.

---

[1] On sait que la difficulté de produire de hautes compressions dans les moteurs à pétrole est celle de ne pouvoir opérer de fortes compressions ce qui diminue le rendement et encrasse le cylindre. L'idée dominante de M. Diesel a été de revenir au type à combustion, en conservant les quatre temps et en n'injectant le pétrole dans la chambre de combustion qu'après la fin de la compression.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 1709) a trait à des données provenant de centrales de 10.000 et 20.000 kilowatts. Elle montre les valeurs limites pour lesquelles la centrale électrique peut entrer en concurrence avec les installations à moteur Diesel de 200 kilowatts travaillant déjà plus économiquement avec des durées d'utilisations élevées, et que, pour des puissances de 400 à 800 kilo-

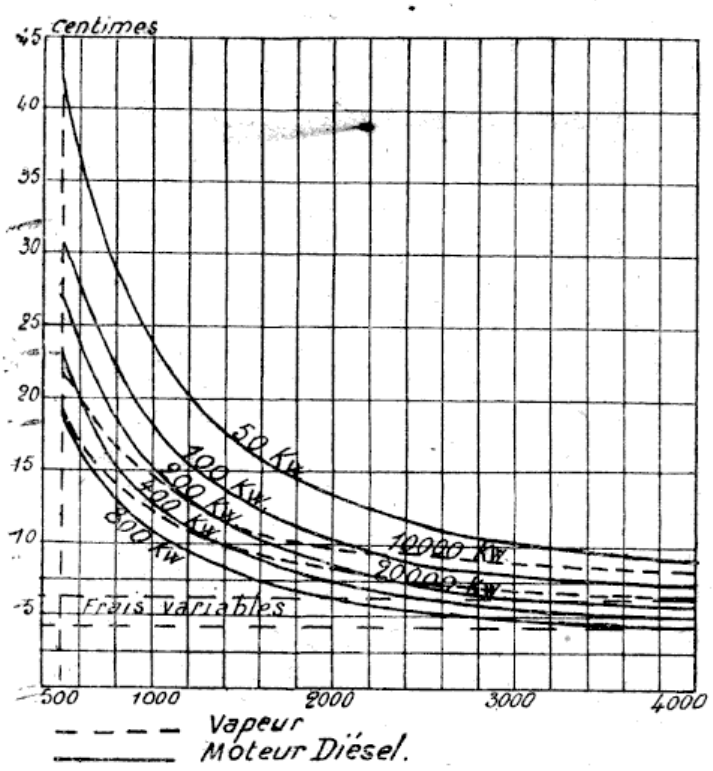


FIG. 1709. — Comparaison des dépenses de consommation des moteurs à vapeur ordinaires et des moteurs Diesel.

watts, les frais d'exploitation sont nettement inférieurs à ceux des grandes centrales, pour peu que l'utilisation des moteurs Diesel atteigne ou dépasse 1.000 heures par an.

TYPES DE SOUS-STATIONS. — *Sous-station d'Arles.* — Cette usine, ainsi que nous l'avons dit au (§ 318), est destinée à servir de secours à l'usine hydroélectrique de la Brillanne, soit pour l'alimentation des lignes du réseau d'énergie électrique du « Littoral méditerranéen » aux tensions de 13.500 volts et 50.000 volts et à la fréquence 25, soit pour l'alimentation des lignes du réseau du « Sud électrique » sous forme de courant triphasé à la tension de 13.500 volts et à la fréquence 50.

La sous-station, dans ce but, renferme des alternateurs donnant directement les uns 13.500 volts à la fréquence 50 et les autres 13.500 volts à la fréquence 25.

Une station de transformation annexée à l'usine renferme des alternateurs élevant au besoin à 50.000 volts la tension des courants produits

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par les alternateurs, ainsi que des transformateurs rotatifs de fréquence convertissant en courant à 50 périodes le courant de 25 périodes ou inversement, permettant ainsi de faire passer la charge d'un alternateur quelconque sur un autre également quelconque.

La chaufferie, qui est contiguë à la salle des machines, renferme quatre groupes de deux chaudières Babcok et Wilcox, huit économiseurs Green, trois pompes d'alimentation et un ventilateur, ce dernier pour activer la vaporisation au moment des pointes. Chacune des chaudières peut, en marche normale, avec une surface de chauffe directe de 265 mètres carrés et une de surchauffe de 85 mètres carrés, fournir par heure 4.000 kilogrammes de vapeur surchauffée à 300° C. sous la pression de 13 kilogrammes par mètre carré.

L'eau d'alimentation est envoyée aux générateurs sous une pression de 13 à 15 kilogrammes par centimètre carré par des pompes du type turbine et commandées par des moteurs électriques de 50 HP. Les économiseurs portent l'eau d'alimentation à une température voisine de 90°.

La salle des machines est prévue pour contenir quatre groupes turbo-alternateurs de 1.000 kilowatts chacun ; elle renferme, en outre de ces groupes principaux, les groupes d'excitation et le tableau général de l'usine génératrice et de la station de transformation située à côté.

Les turbines sont du type Curtis à axe vertical, donnant 1.500 HP à la vitesse angulaire de 750 tours par minute, la vapeur étant admise à la température de 296° C. environ et à la pression de 12 kilogrammes par centimètre carré. Le graissage des pivots et des paliers, ainsi que le fonctionnement des servo-moteurs des régulateurs de vitesse sont assurés par deux pompes à huile à commande électrique refoulant 100 litres d'huile, à l'heure, sous la pression de 50 kilogrammes par centimètre carré dans un accumulateur avec réservoir d'air pouvant débiter 300 litres à l'heure sous la même pression et dans lequel l'air est comprimé par un compresseur à commande électrique.

Les condenseurs à surface ont une surface de refroidissement individuelle de 1.000 mètres carrés. L'eau de refroidissement est puisée dans un canal venant des tours de refroidissement et un autre canal conduit à ces mêmes tours l'eau sortant des condenseurs. L'installation comporte en outre une pompe à air et une pompe à eau condensée.

Les alternateurs ont une puissance normale de 300 kilowatts et tournent à 750 tours à la minute. Le courant d'excitation est normalement fourni par un groupe constitué par un moteur asynchrone de 250 HP, 220 volts, 25 périodes par seconde, et par deux dynamos de 100 kilowatts à 125 volts. Une batterie d'accumulateurs d'une capacité de 215 ampères-heures pour une décharge en trois heures sert de secours.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tableau de distribution qui commande les connexions de l'usine et de la station de transformation comprend : 1 panneau d'excitation, 1 panneau pour les services intérieurs à courant continu, 1 panneau pour les services intérieurs à courant alternatif, 3 panneaux d'alternateurs, 1 panneau à haute tension (13.500 volts), 4 panneaux pour les lignes de départ à 13.500 volts, 2 panneaux pour les groupes de transformateurs-abaisseurs de 50.000 à 13.500 volts pour le courant venant de l'usine de la Brillanne, 4 panneaux pour les transformateurs de fréquence et enfin 1 panneau pour l'arrivée des lignes aériennes à 50.000 volts.

Les transformateurs de fréquence, au nombre de deux, sont constitués chacun par un groupe de trois transformateurs statiques abaissant de 13.500 à 5.500 volts la tension du courant à 25 périodes par seconde, un moteur synchrone triphasé à la fréquence 25, de 500 kilowatts, tournant à 500 tours, un alternateur à la fréquence 50 calé sur l'arbre du moteur et ayant la même puissance que celui-ci, un groupe de trois transformateurs statiques élevant de 5.500 à 13.500 volts la tension du courant à la fréquence 25 fourni par l'alternateur et enfin un moteur à courant continu de 30 kilowatts, 125 volts, placé en bout d'arbre du groupe moteur-alternateur et servant au démarrage et à la mise en synchronisme de celui-ci.

Sous-station d'Arenc (*Marseille*). — Cette usine est reliée au poste de transformation d'Allauch (§ 318), alimenté à 50.000 volts par l'usine hydroélectrique de la Brillanne, de deux façons différentes. D'abord par une canalisation directe formée de deux feeders à trois fils à 13.500 volts ; en second lieu par une canalisation constituée aussi par deux feeders à trois fils allant de l'usine à un poste de transformation sis à Castellane, ce dernier appartenant au réseau de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen et desservi lui-même par le poste d'Allauch. Ces liaisons, complétées par des transformateurs abaissant la tension de 13.500 volts à 5.500 volts, donnent à l'usine d'Arenc une très grande souplesse pour l'alimentation de ses réseaux de distribution. Elle peut en effet, en cas de surcharge du réseau alternatif de 55.000 volts à la fréquence 50, desservi directement par l'usine, ne plus contribuer à l'alimentation d'un poste de transformation sis à Muy et relié à la station de Castellane (*fig.* 1710), le fonctionnement de celui-ci étant assuré par cette dernière ; elle peut

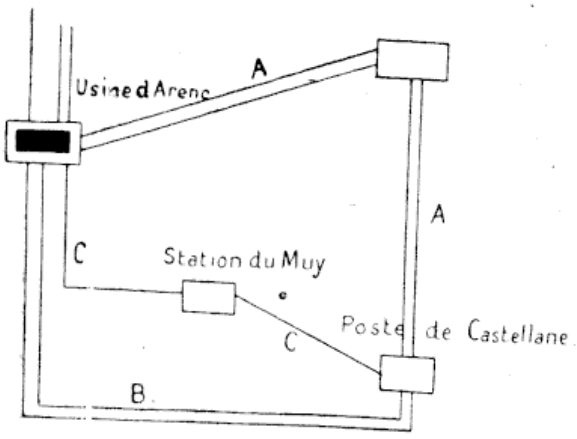


FIG. 1710.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même, en cas de surcharge encore plus grande ou d'accidents aux groupes générateurs, se servir de transformateurs de fréquence installés dans l'usine pour transformer en courants à 5.500 volts, 50 périodes, l'énergie fournie par les lignes de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen sous forme de courants à 13.500 volts, 25 périodes.

Deux groupes turbo-alternateurs de 3.000 kilowatts donnant du courant à 13.500 volts, 25 périodes, peuvent être reliés directement aux lignes à 13.500 volts de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen.

Les autres groupes générateurs, soit 5 unités de 1.000 kilowatts, fournissent le courant à 25 et 50 périodes.

Les turbines à vapeur sont du type Curtis à axe vertical. La vitesse angulaire des unités de 1.000 kilowatts est de 1.500 tours à la minute ; les pivots tournent dans de l'eau comprimée à 25 kilogrammes par centimètre carré ; la surface de refroidissement des condenseurs est de 385 mètres carrés et le débit de la pompe de circulation, de 450 mètres cubes à l'heure.

Les unités de 3.000 kilowatts tournent à 150 tours à la minute. Les condenseurs à corps tubulaire horizontal de 1.000 mètres carrés de surface de refroidissement sont munis chacun d'une pompe centrifuge de circulation débitant 1.500 mètres cubes à l'heure.

Une batterie d'accumulateurs de 60 éléments et d'une capacité de 315 ampères-heures au régime de décharge en trois heures sert de réserve.

La chaufferie comprend six groupes de deux chaudières multitubulaires ; chacune d'elles a une surface de chauffe de 265 mètres carrés, un surchauffeur de 65 mètres carrés et un économiseur Green.

La distribution du courant comporte un tableau à courant alternatif à 5.500 volts, un tableau à courant continu, un tableau à courant alternatif pour le courant à 25 périodes, un tableau à courant alternatif de 50 périodes, un tableau de 13.500 volts et les panneaux des alternateurs et des groupes de convertisseurs de fréquence.

Sur les pupitres du tableau à haute tension de 13.500 volts est gravé un schéma dit « vivant » des barres de distribution montrant la position des interrupteurs à commande à main placés dans un bâtiment à proximité de l'usine, lequel contient les barres à 13.500 volts et les transformateurs.

La station de transformation de Muy, dont il a été question plus haut, sert à transformer le courant alternatif triphasé à 5.500 volts 25 périodes, envoyé de l'usine d'Arenc ou du poste de Castellane, en courant continu à 2×240 volts, alimentant la partie centrale de Marseille. Elle comprend des groupes moteurs-générateurs, des groupes compensateurs, des survolteurs, les appareils de manœuvre et de mesure des arrivées et départs, des câbles, enfin une batterie d'accumulateurs de 250 éléments de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1.800 ampères-heures. Chaque groupe compensateur est composé d'un moteur triphasé asynchrone démarrant par rhéostat intercalé dans le rotor et actionnant par manchon semi-élastique deux génératrices à courant continu.

Sous-station d'Avignon. — Cette usine dessert le réseau du Sud-Élec-

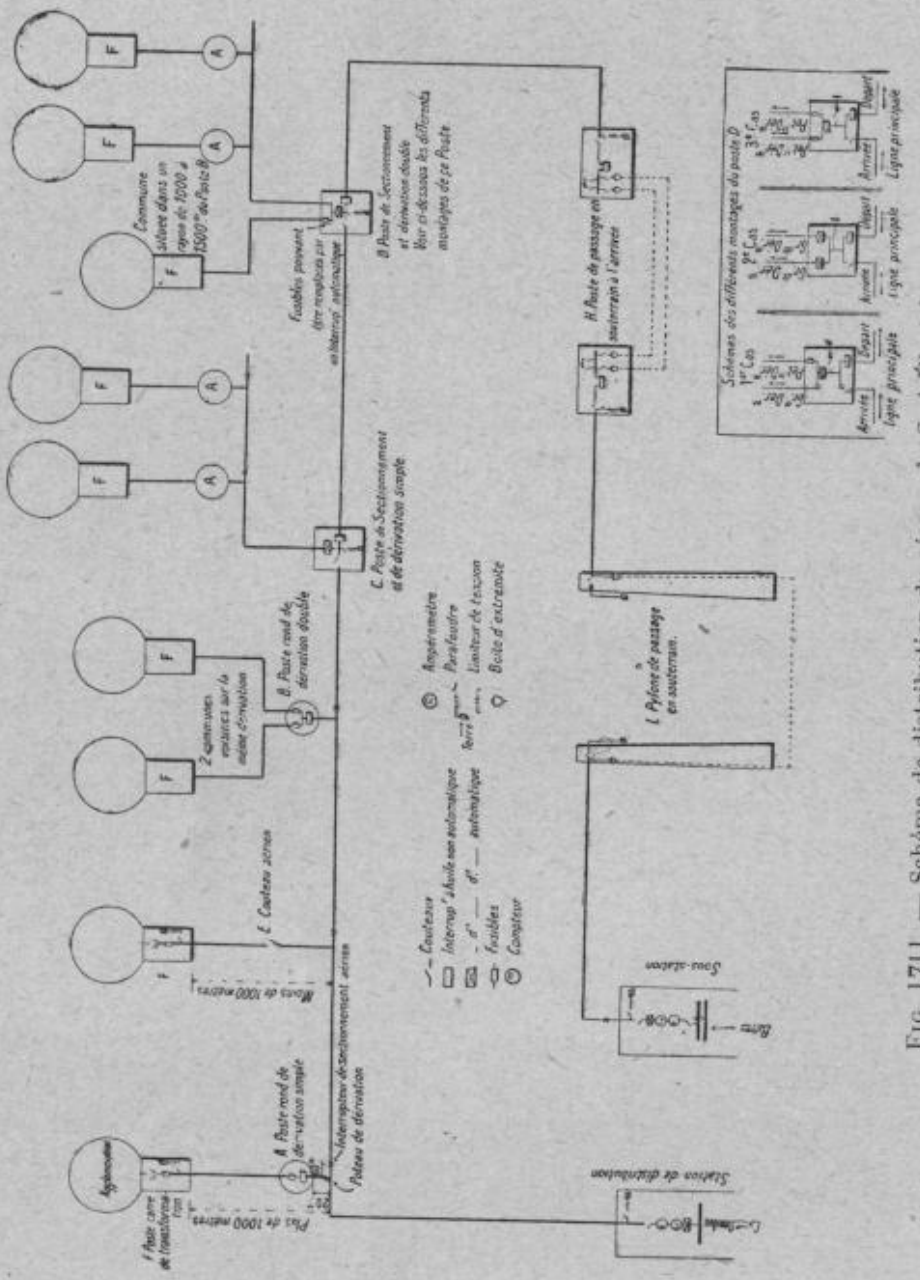


Fig. 1711. — Schéma de distribution du réseau du Sud-Électrique.

trique. Comme les autres sous-stations de ce réseau, elle est alimentée par deux lignes à 13.500 volts. Deux séries de barres omnibus conduisent le courant aux interrupteurs à cornes qui permettent le couplage des deux lignes ou envoient le courant dans l'un quelconque des trois groupes de transformateurs, qui abaissent la tension de 13.500 volts

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à 5.000 volts. Ces groupes de transformateurs sont placés dans des sortes de vitrines en ciment armé dans lesquelles on ne peut pénétrer que par l'extérieur de l'usine, en soulevant les rideaux en fer qui les ferment ; un courant d'air produit par des ventilateurs placés à l'intérieur de l'usine refroidit constamment les chambres des transformateurs.

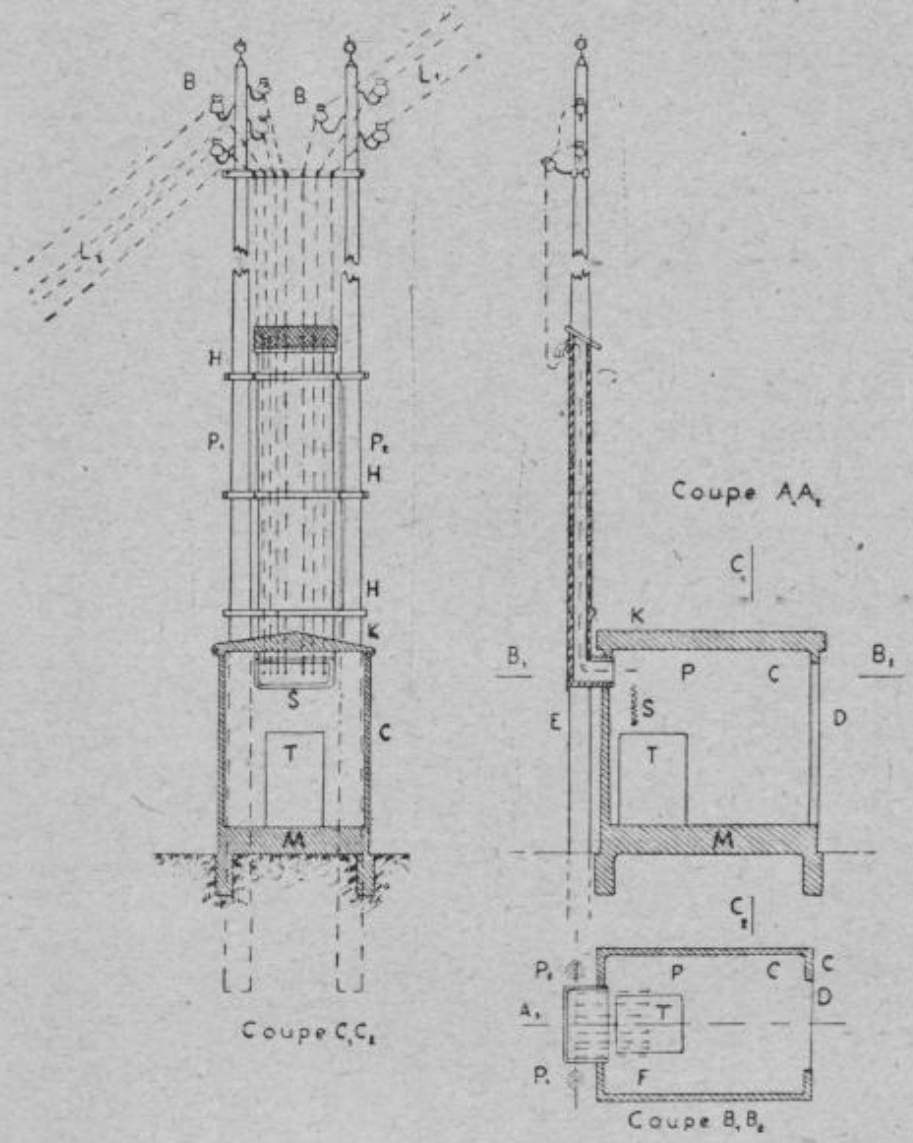


FIG. 1712. — Poste de transformation. (Secteur électrique de la Cie Électrique de Franche-Comté).

Deux services de barres omnibus à 5.000 volts suspendues au plafond du rez-de-chaussée, derrière les tableaux à 5.000 volts, font le tour de l'usine. D'un côté, sont placés les tableaux de commande des interrupteurs des circuits à basse tension des transformateurs ; de l'autre, sont alignés les tableaux des lignes de départ à 5.000 volts.

La sous-station comprend en outre trois groupes de transformateurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rotatifs (moteurs-générateurs) alimentant le réseau de traction d'Avignon et les services auxiliaires de la sous-station.

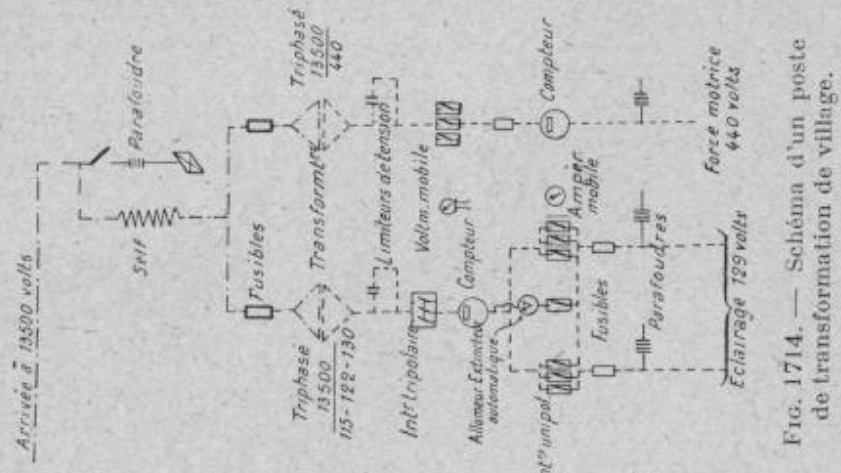


FIG. 1714. — Schéma d'un poste de transformation de village.

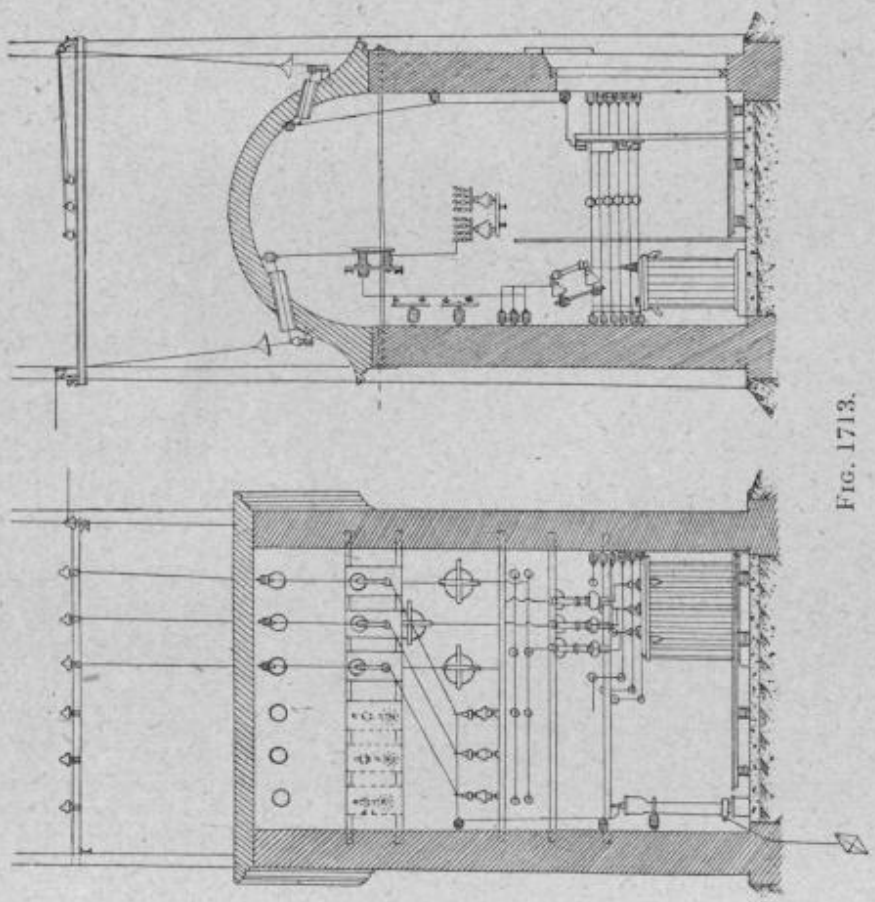


FIG. 1713.

Le réseau du Sud-Électrique comporte environ trois cents postes de transformateurs de voltage dont les (*fig.* 1713 et 1714) montrent la disposition.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les sous-stations en plein air, très usitées en Amérique, sont principalement employées dans les faubourgs éloignés, les villages et fermes, grosses usines, mines, réseaux de chemins de fer.

Les types de sous-stations sont indiqués dans le tableau ci-après :

TENSIONS	PUISSANCES EN KILOW.	TYPES D'INSTALLATION
Jusqu'à 9.500 volts De 9.500 à 16.500 — Au-dessus de 16.500 —	Jusqu'à 75 75 à 150 150 et au-dessus	Sur poteaux. Sur tourelles en acier. Sur fondations en béton protégées par une grille.

L'appareillage de ces sous-stations doit être soumis aux mêmes épreuves spéciales que les isolateurs des lignes aériennes de haute tension.

Les transformateurs hermétiques fermés doivent être d'une construction très solide pour pouvoir résister aux variations de pression intérieure. Ils doivent être protégés contre le froid en hiver et la chaleur en été. Quelquefois les installations sont du type mixte. Alors les appareils à haute tension sont placés à l'extérieur et ceux à tension moins élevée à l'intérieur, ainsi que les convertisseurs. Dans ces dernières on peut citer les sous-stations d'Agawan et de Chicopée (Massachussets).

Une intéressante application des sous-stations en plein air a été faite aux États-Unis par la Southerin Power qui a mis en exploitation une sous-station roulante destinée à servir de station de secours de renfort aux sous-stations en service, à se substituer temporaitement aux stations de distribution en réparation ou en reconstruction, à alimenter les réseaux voisins où le réseau de la société en se branchant au réseau d'une compagnie voisine, à alimenter des lignes d'essai ou des installations d'essai dans des usines, à fournir du courant à des installations temporaires ayant besoin du courant dans un délai très bref.

Elle est établie sur une plate-forme de $11^{m},60$ de longueur et de $2^{m},75$ de largeur. Elle comprend trois transformateurs monophasés à haute tension, accompagnés chacun d'un interrupteur à cornes, pesant 14.500 kilogrammes environ. Un moteur de 20 HP, alimente un ventilateur destiné à refroidir les transformateurs. Les transformateurs peuvent utiliser 42 tensions primaires de courant comprises entre 13.200 et 100.000 volts et 28 de ces tensions peuvent être obtenues à la puissance normale de chaque transformateur de 1.000 kilowatts sans que la température dépasse 40° C. La tension secondaire à pleine charge peut être de 2.200, de 4.400, de 6.600 et de 12.000 volts, ce qui permet 168 différentes combinaisons de transformation. Le poids total de l'installation, le wagon

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

compris, s'élève à 57.500 kilogrammes et elle a coûté 165.000 francs, c'est-à-dire 35 francs environ par kilowatt installé.

La sous-station de Deuver (Colorado) peut être considérée comme le type des sous-stations américaines à haute tension actuelles. Les barres à haute tension sont à l'air libre entre les bâtiments où sont logés les coupe-circuits et les bâtiments des transformateurs.

Les lignes à haute tension arrivent à un bâtiment contenant les parafoudres, puis de là chacune d'elles se rend à un poste d'interruption séparé. L'interrupteur à huile qu'il contient est isolé entre deux jeux de connecteurs à couteaux, placés à l'extérieur et montés sur des isolateurs du type de la ligne à 100.000 volts.

De là, le courant se rend aux barres supportées par des pylônes à air libre, séparées en leur milieu par des connecteurs à couteaux et dont les extrémités sont reliées, toujours par l'intermédiaire de connecteurs à couteaux et d'interrupteurs à huile, aux transformateurs situés dans la sous-station proprement dite. Les transformateurs sont montés sur roues.

Le tableau suivant renseigne sur le coût approximatif des stations centrales, des sous-stations et longueur, de la ligne pour laquelle les dépenses sont les mêmes dans les deux systèmes (Courant alternatif et courant continu).

	ALTERNATIF	CONTINU	ALTERNATIF	CONTINU
Puissance en kw	10.000	10.000	30.000	30.000
Tension d'exploitation	20.000	100.000	20.000	100.000
Coût de la canalisation en francs (par kw-km posé)	6,8	2,30	4,30	1,35
Coût de la station centrale en francs par kw.	353	378	278	316
Puissance de la sous-station en kw	1.500	1.500	3.500	3.500
Coût de la sous-station en francs par kw :				
a. Avec transformateurs statiques	102	»	84	»
b. Avec convertisseurs rotatifs	187	»	144	»
c. Avec moteurs générateurs	249	214	207	174
Coût total de la station centrale et de la sous-station en francs par kw :				
a. Avec transformateurs statiques	455	»	362	»
b. Avec convertisseurs rotatifs	540	»	422	»
c. Avec moteurs générateurs	500	618	486	490
Spécification des câbles en mm^2	3×806	2×806	3×226	2×226
Longueur des câbles pour laquelle le coût des deux systèmes est le même (en km) :				
a. Avec transformateurs statiques	35,9	»	42,2	»
b. Avec convertisseurs rotatifs	17,0	»	21,4	»
c. Avec moteurs générateurs	3,4	»	1,58	»

Nous donnons à titre d'indication la description de quelques grandes centrales à vapeur se présentant comme types d'installations selon les circonstances auxquelles elles ont été adaptées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Centrale à vapeur de la Société d'Électricité de Paris (*Usine de Saint-Denis*). — Cette centrale est équipée pour fournir l'énergie de distribution d'éclairage et de force motrice dans Paris.

Au point de vue de la production du courant on a utilisé deux solutions : l'une consiste à transformer l'une des espèces de courant dans l'autre au moyen de groupes moteurs-générateurs constitués par un alternateur triphasé dont le nombre de pôles est dans le rapport de 6 à 10 et qui sont montés sur le même arbre ; l'autre est fournie par l'installation de deux groupes générateurs formés chacun d'une turbine et deux alternateurs montés sur le même arbre, l'un des alternateurs étant à courants triphasés, l'autre à courants diphasés.

L'usine a trois grandes divisions comportant chacune : un bâtiment pour le charbon, une chaufferie, une salle des pompes et une partie de la grande salle des machines. Indépendamment de ces bâtiments l'usine comprend des locaux annexes, entre autres une briqueterie pour la confection de briques silico-calcaires.

La plus grande partie des charbons arrive par la Seine où le chargement est effectué au moyen de grues à bennes piocheuses de 40 à 80 tonnes de capacité à l'heure.

Pour le déversement du charbon ainsi que pour sa reprise en silos on utilise des trémies, des doubles transporteurs à godets ; puis il passe dans des concasseurs et dans des peseurs-enregistreurs et enfin repris par des transporteurs à godets qui le déversent dans les trémies d'alimentation des chaudières.

Les cendres et mâchefers sont aussi manutentionnés mécaniquement.

Une chambre de filtration des eaux destinées à la condensation est placée à proximité du fleuve, avec lequel elle communique par deux galeries ovoïdes. Cette chambre est munie de vannes pour son nettoyage et d'un pont roulant électrique pour l'enlèvement des dépôts. L'eau est amenée de cette chambre au-dessous des fosses des turbines ou elle est prise par des pompes centrifuges qui la refoulent dans les condenseurs. L'évacuation se fait par deux autres galeries en communication avec la Seine.

L'alimentation du générateur de vapeur est assurée par : six pompes Rateau à commande électrique, débitant chacune 130 mètres cubes à l'heure ; par quatre pompes de secours à piston Weir, de 120 mètres cubes à l'heure, par une pompe centrifuge Laval de 75 mètres cubes à l'heure ; par quatre épurateurs ayant un débit de 8 mètres cubes à l'heure ; par dix compteurs Schilde placés sur le retour d'eau de condensation des turbo-alternateurs de 6.000 kilowatts et enfin par un enregistreur-intégrateur Lea Recorder installé sur le retour d'eau de condensation du turbo-alternateur de 15.000 kllowatts.

La chaufferie comporte cinquante-six chaudières Babcock et Wilcox,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 420 mètres carrés de surface de chauffe timbrées à 16 kilogrammes effectif, munies chacune de deux grilles automatiques à chaînes et d'un surchauffeur à 530°. La production horaire totale de ces générateurs est de 494.000 kilogrammes de vapeur à l'allure normale et de 608.000 kilo-

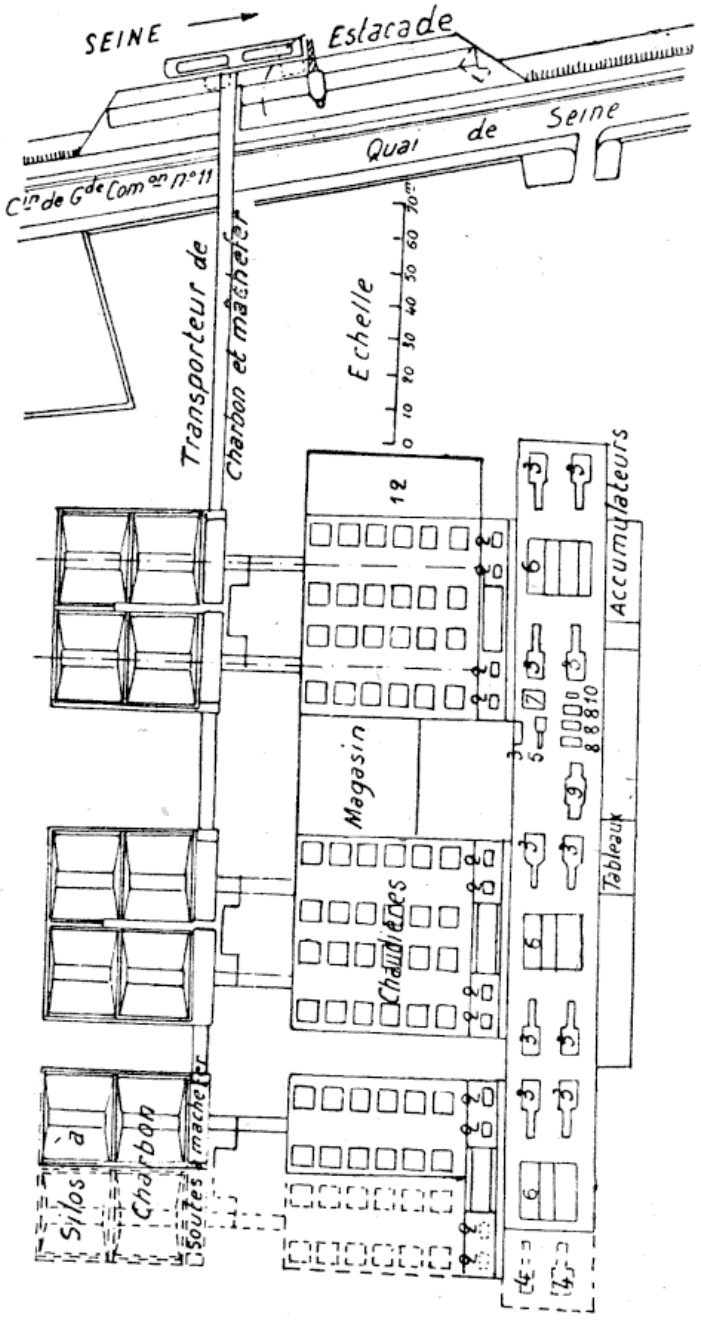


FIG. 1715. — Plan général de l'usine électrique de Saint-Denis, Paris.

grammes à l'allure poussée. Les chaudières portent des économiseurs Green, de 160 et 240 mètres carrés de surface de chauffe.

Le tirage naturel est assuré par huit cheminées de 55 mètres de hauteur et de $3^{m},25$ de diamètre intérieur au sommet et par deux cheminées en ciment armé, système Monnoyer, de 90 mètres de hauteur sur les grilles et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 3m,75 de diamètre intérieur au sommet ; chacune des cheminées correspond à une ligne de cinq à six chaudières.

Des ventilateurs système Prat avec éjecteur en tôle permettent d'augmenter de 50 0/0 la vaporisation normale des chaudières. En outre, des souffleurs à vapeur servent de secours aux ventilateurs Prat.

Les groupes générateurs de courants triphasés, 10.250 volts, 25 périodes, sont conduits par cinq turbo-alternateurs Brown-Boveri-Parsons dont quatre d'une puissance normale de 5.000 kilowatts pouvant être élevée à 6.000 kilowatts et un dont la puissance est de 11.000 kilowatts en marche normale et de 15.000 kilowatts en surcharge pendant trente minutes. Ils tournent à 750 tours-minute.

Les courants diphasés, 12.300 volts, 41 2/3 périodes, sont produits par quatre groupes Brown-Boveri-Parsons, d'une puissance de 5.000-6.000 kilowatts tournant à 835 tours-minute, suffisante pour alimenter un turbo-alternateur. Il y a aussi un hall de silos, une chaufferie et un système de manutention de charbon pour chaque groupe de huit chaudières.

Les chaudières sont du type marine Babcock et Wilcox et chaque unité de deux chaudières avec leurs foyers mécaniques, surchauffeurs, économiseurs, soufflerie et cheminée, peut vaporiser continuellement, en service normal, un peu plus de 27.000 kilogrammes d'eau par heure, la vapeur étant à la pression effective de 14 kilogrammes, avec surchauffe de 300° C. à la soupape d'arrêt de la turbine. Dans ces conditions, avec du charbon de 6.110 calories, la consommation de combustible n'excède pas 1.870 kilogrammes par heure. Chaque chaudière a une surface de chauffe de 625 millimètres carrés et une surface de grille de 15m²,60. En marche forcée, chaque générateur peut vaporiser 17.000 kilogrammes d'eau par heure dans les mêmes conditions.

Les chargeurs automatiques des grilles à chaîne ont leurs châssis munis de roues, de sorte qu'ils peuvent être écartés aisément en roulant sur rails, ce qui facilite les réparations et le nettoyage. Chaque chaudière possède son moteur et appareil de commande des stokers.

Le bâtiment des économiseurs Green est situé au-dessus de celui des chaudières, à 16m,75 au-dessus du sol. La manutention de la suie traitée se fait mécaniquement.

Chaque paire de générateurs possède sa cheminée et un ventilateur Davidson, type « Siroco », à tirage forcé, pour marche continue. De chacune des deux rangées de chaudières, la conduite de vapeur principale descend dans son propre receiver principal disposé au niveau du sous-sol des machines ; de là la conduite monte vers le séparateur de vapeur et ensuite vers la valve d'admission de la turbine. Une autre conduite à vapeur réunit les deux receivers par l'intermédiaire d'une partie recourbée en V située entre les turbines et en dessous. La conduite d'alimentation des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaudières a la forme d'une boucle complète divisée au moyen de vannes de sectionnement. Des bassins de purge sont disposés de chaque côté du bâtiment des chaudières, en dessous de la salle des pompes ; ces réservoirs reçoivent l'eau de purge propre, à haute pression, qui, de là, est pompée et envoyée dans la bache alimentaire (eau chaude).

Les services d'eau sont au nombre de cinq, savoir : 1° service d'eau douce prise sur les conduites d'eau de la ville pour les besoins de l'usine et pour la bâche alimentaire d'eau chaude ; 2° distribution d'eau provenant du fleuve, assurant le service par l'intermédiaire des pompes de

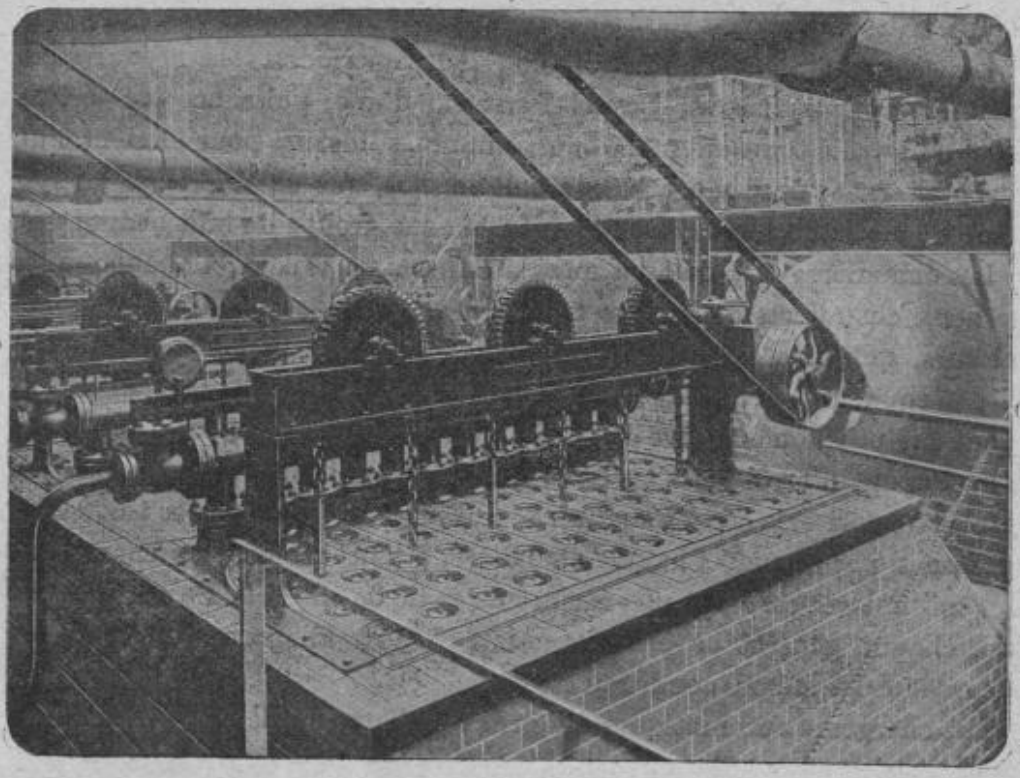


FIG. 1716. — Économiseur Green.

circulation, des bâtiments des silos, des chaudières et des machines, des ventilateurs souffleurs et des turbines ; 3° services des réservoirs d'eau salée à la pompe haute pression et aux prises d'eau de nettoyage des tubes ; 4° décharge de la pompe à air aux bassins d'eau chaude et 5° tuyauteries d'eau de circulation et vannes servant à connecter les appareils entre l'entrée principale et les conduites de décharge.

Au-dessus de la salle des pompes est installée l'épuration des eaux, système Paterson. Chaque pompe à vapeur peut débiter 90 mètres cubes par heure ; la vapeur d'échappement se rend dans les bâches alimentaires par l'intermédiaire d'un réchauffeur à vapeur d'échauffement, avec bypass vers l'air libre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les quatre turbo-alternateurs Brown-Boveri et A. E. G. ont une puissance unitaire de 8.000 kilowatts.

Les machines du groupe A. E. G. fonctionnent à 5.750 volts, 40 pé-

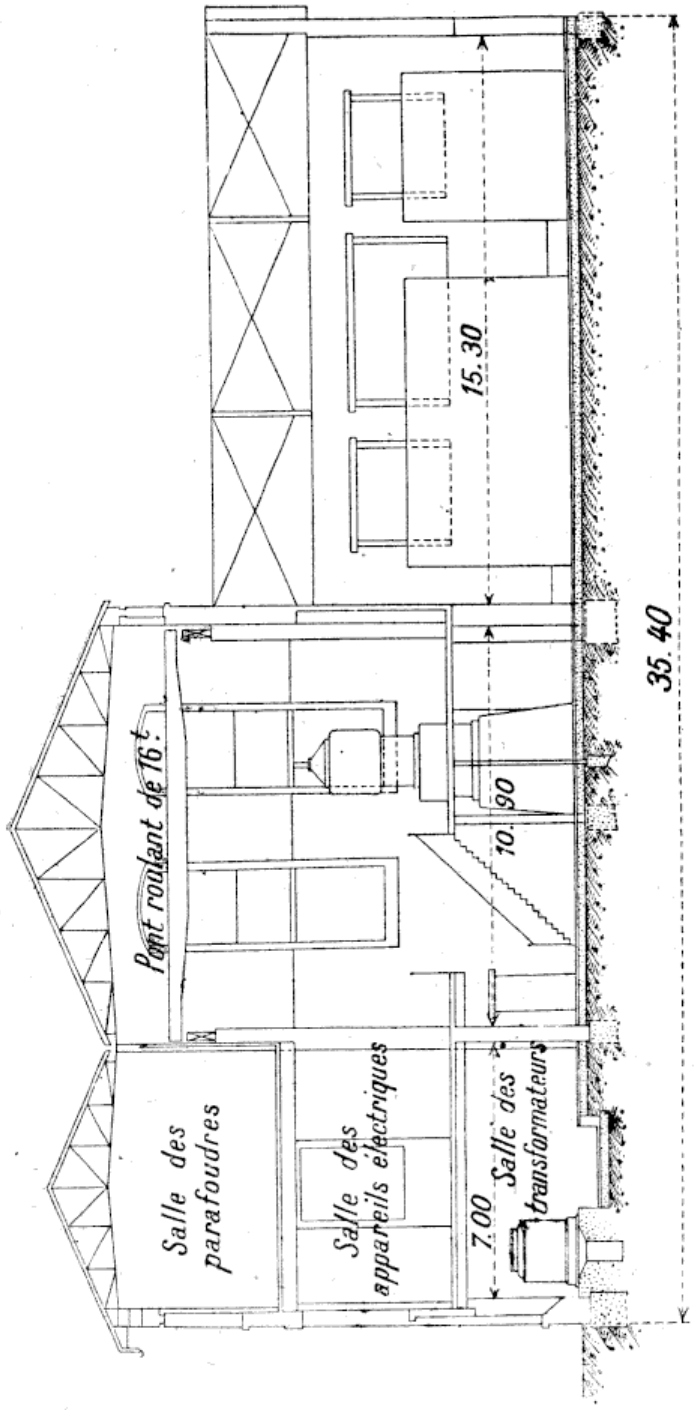


Fig. 1717. — Coupe longitudinale. — Usine de Montluçon.

riodes, avec cos $\varphi = 1$. Les régulateurs des turbines sont réglés de façon que la vitesse puisse varier de 5 0/0, en plus ou en moins de la vitesse normale pendant la marche. Un régulateur mécanique de sûreté coupe l'arrivée de vapeur lorsque la vitesse s'élève à 1.320 tours par minute.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les alternateurs sont à inducteur tournant avec bagues d'excitation en acier et balais en charbon. Les stators sont en deux pièces et les enroulements du rotor sont excités par des machines montées en bout d'arbre sans paliers extérieurs. Des dispositions sont prises pour mettre le point neutre à la terre à travers une résistance intermédiaire.

Des dispositions spéciales ont été adoptées aussi pour la ventilation ; l'air est amené de l'extérieur à l'aide d'un ventilateur monté sur l'arbre du rotor et est renvoyé à l'extérieur débouchant du côté nord de la salle des machines. Les entrées d'air sont munies d'un filtre.

Les condenseurs à surface peuvent recevoir 2.050 mètres cubes d'eau de condensation par heure.

En condensant 36.500 kilogrammes de vapeur par heure, le vide est maintenu constant à 97 0/0 et à 95 0/0 avec 54.500 kilogrammes de vapeur, l'eau de condensation étant à la température de 22°,4 C. et la décharge de la pompe à air étant à 44°,4 C.

Les pompes à air Edwards à triple effet sont directement accouplées à des moteurs triphasés. Les tableaux de distribution à haute tension et les instruments de mesure sont installés dans un bâtiment indépendant situé à 140 mètres de la salle des machines ; il renferme aussi bien les interrupteurs principaux que leurs dispositifs de contrôle ; c'est là que se

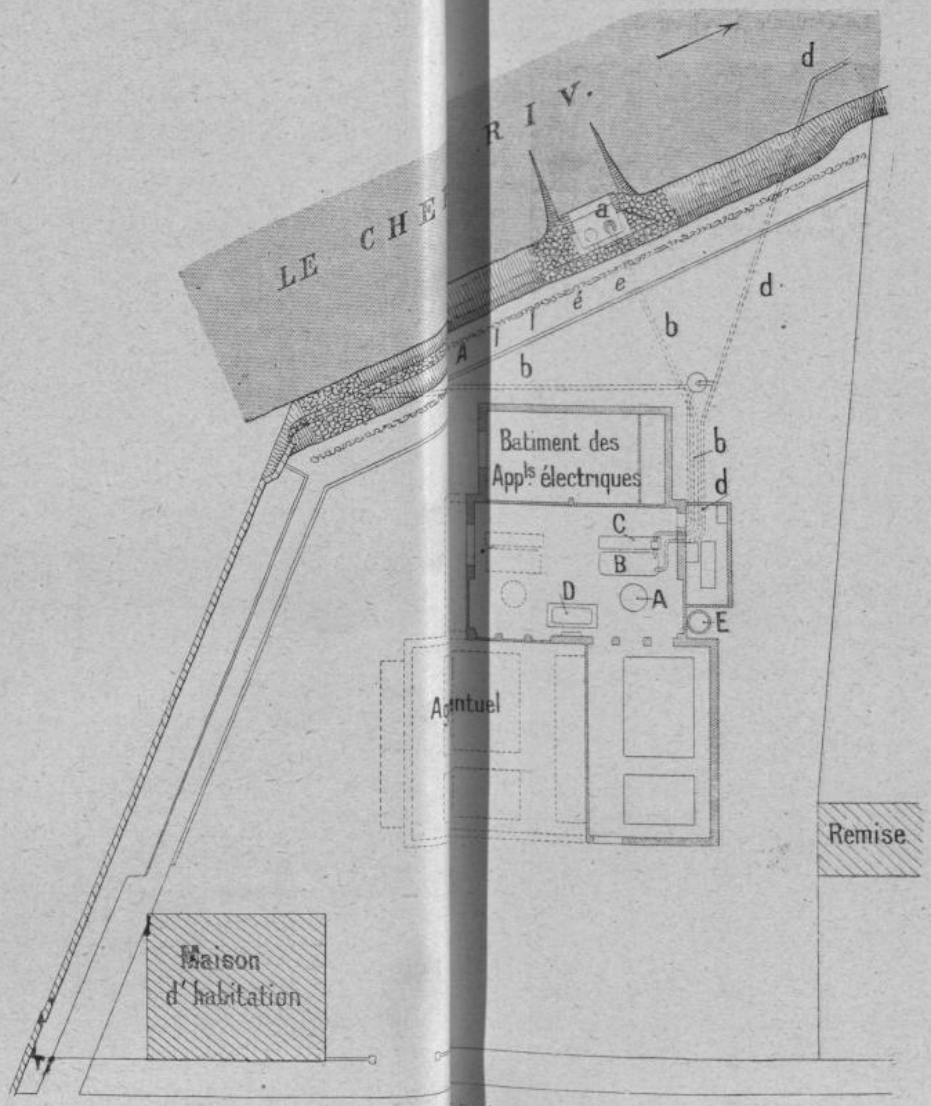


FIG. 1718. — Plan d'ensemble de l'usine à vapeur de Montluçon.

tient l'opérateur. Ces tableaux sont divisés en trois parties : les panneaux de contrôle placés dans une salle spéciale et servant à la commande des appareils à haute tension ; les panneaux des interrupteurs principaux à haute tension qui se trouvent dans le bâtiment de distribution ; les appareils interrupteurs à basse tension placés dans la salle des machines.

La salle de contrôle est disposée au premier étage du bâtiment de distribution ; la partie arrière est réservée aux appareils d'interruption proprement dits ; les barres collectrices et les interrupteurs à huile principaux se trouvent à l'étage supérieur et les sectionneurs et transformateurs de potentiel, à l'étage inférieur.

Tous les panneaux à haute tension sont munis du système de protection équilibré. Un compresseur d'air facilite le nettoyage dans toutes les parties de l'installation.

En plus des appareils décrits, il y a, dans la salle des machines, un sectionneur de neutre pour chaque machine et une série d'appareils de déclenchement de secours. Chaque génératrice possède son propre groupe de transformateur placé dans l'annexe des transformateurs. Les câbles destinés à ces transformateurs passent par un tableau armé système Reyrolle, placé dans des locaux situés du côté nord de la salle des machines. Le tableau principal à courant continu,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec les moteurs générateurs, est situé à l'un des coins de la salle des machines.

Centrale à vapeur de North-West. — La centrale à vapeur de North-

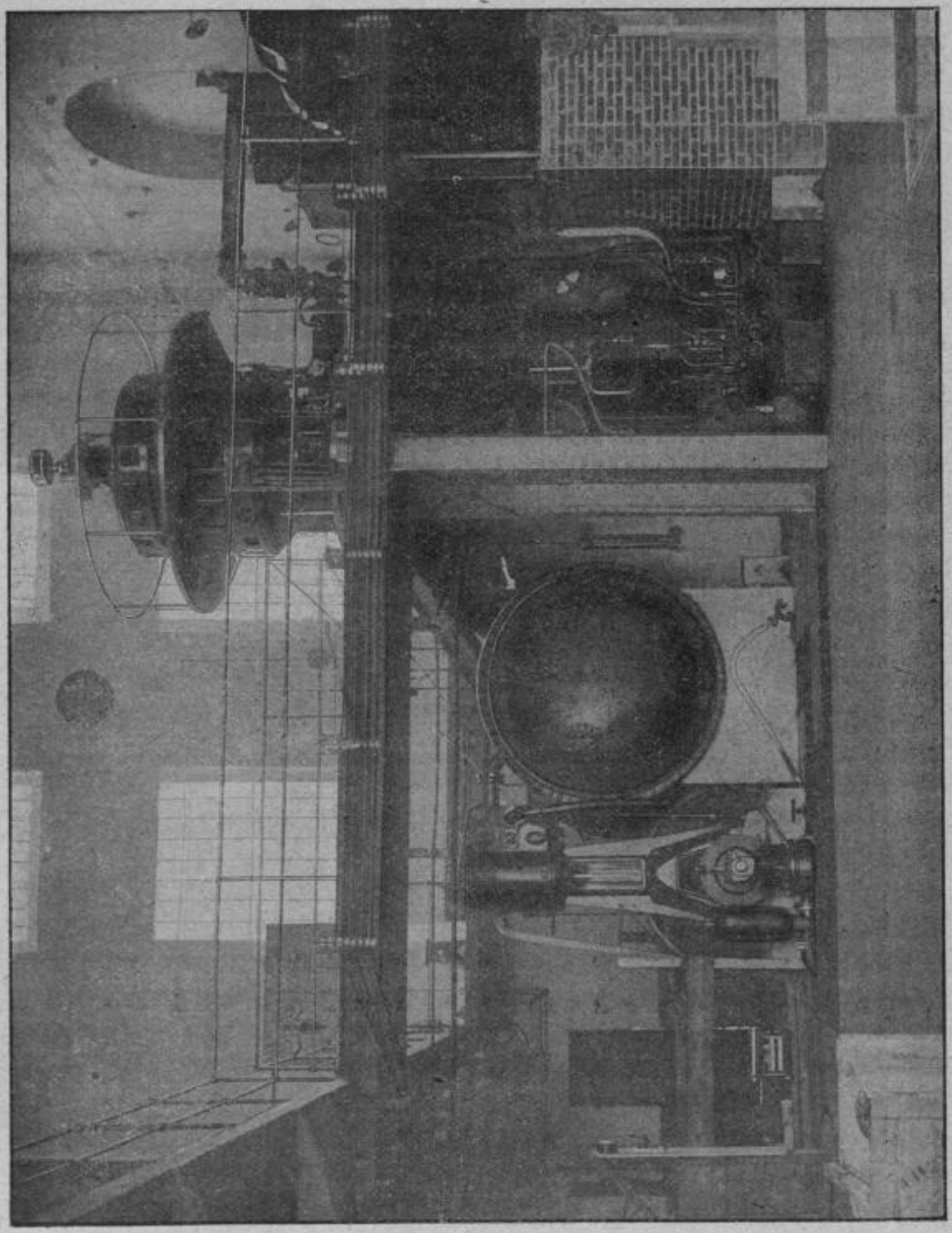


Fig. 1719. — Usine de Montluçon. — Groupe à vapeur Curtis.

West est capable d'une puissance de 240.000 kilowatts à l'aide de douze turbo-groupes à vapeur à axe vertical, de chacun 20.000 kilowatts. Cette station est éloignée de 10 kilomètres de Chicago et son installation, une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fois finie, dépassera 100 millions de francs, soit environ 440 francs par kilowatt.

L'installation comporte trois bâtiments nettement séparés : soit un pour les turbines et les chaudières, l'autre pour les transformateurs et le troisième pour les appareils de sectionnement et les tableaux de distribution.

Chaque turbine capable d'une puissance de 30.000 chevaux est alimentée par dix chaudières de chacune 500 mètres carrés de surface de chauffe à foyer mécanique. Ces chaudières sont munies de surchauffeurs et de réchauffeurs d'eau d'alimentation et chaque groupe de dix chaudières correspond à une cheminée en tôle de 75 mètres de hauteur.

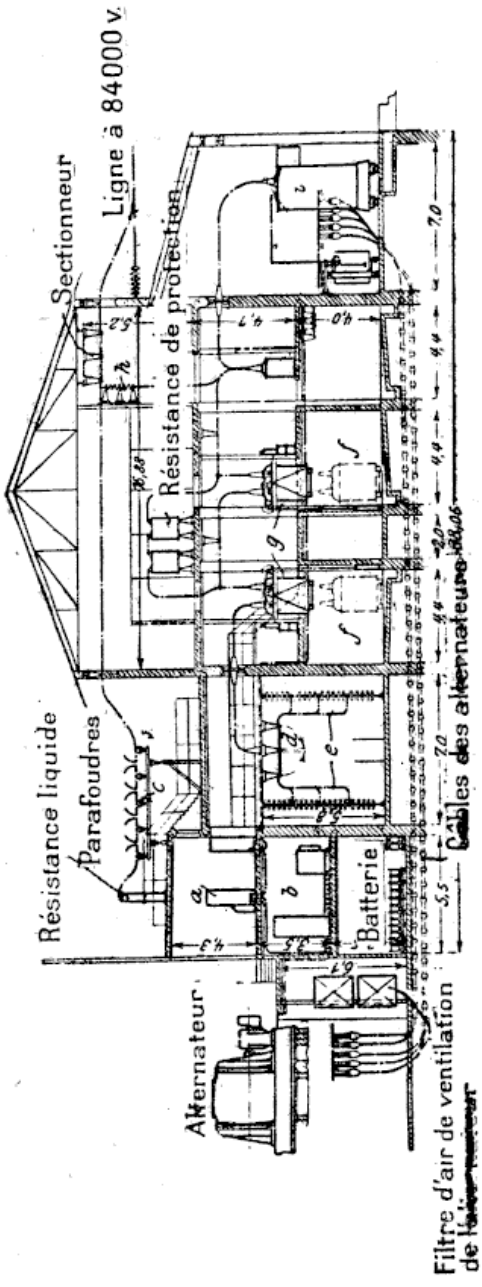


FIG. 1720. — Usine de Verceneging. — Coupe du bâtiment du tableau.

Centrale à vapeur de San Paolo. — Cette usine thermique qui dépend du réseau Tivoli-Rome comprend trois bâtiments, dont un pour les turboalternateurs, un pour le tableau et le troisième pour les chaudières.

L'usine, d'une puissance de 18.000 kilowatts, comprend quatre turboalternateurs, dont deux de 3.000 kilowatts et deux de 6.000 kilowatts.

Les deux turbines à vapeur de 3.000 kilowatts sont verticales et celles de 6.000 kilowatts sont à axe horizontal ; elles sont toutes du type Curtis à quadruple expansion.

Elles fonctionnent à la pression normale de 12 kilogrammes avec vapeur surchauffée à 275°. Elles ont des condenseurs à surface et peuvent fonctionner à échappement libre. Elles sont susceptibles d'une surcharge de 20 0 /0.

Les alternateurs triphasés Thomson-Houston fournissent du courant à 8.500 volts, 42 à 48 périodes. Ils peuvent supporter 50 0 /0 de surcharge

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pendant une demi-heure. Ces alternateurs peuvent fonctionner en parallèle avec ceux des usines de Tivoli, Subiaco et Arci.

Chaque turbine est alimentée par six chaudières multitubulaires Clarke-Chapman. Les 24 chaudières sont à chargement automatique et la moitié possède des surchauffeurs-économiseurs. L'eau de condensation est puisée dans le torrent d'Almone qui débouche dans le Tibre.

Un turbo-alternateur de 1.700 kilowatts pourvoit à tous les services auxiliaires et une turbo-dynamo de 100 kilowatts assure l'excitation et la charge d'une batterie d'accumulateurs. Celle-ci fournit l'excitation aux premiers instants de la mise en marche des turbo-alternateurs ainsi que l'éclairage.

La turbo-dynamo sert à actionner les foyers des chaudières au moment du premier embrasement. De petits moteurs poussent le charbon dans les foyers automatiques Dusseldorf et Underfeeld et le répartissent automatiquement sur les grilles au fur et à mesure que le charbon s'allume.

607. Rôle des accumulateurs. — On sait que dans ces appareils l'énergie électrique est transformée et enmagasinée sous forme d'énergie chimique à la charge, pour être restituée sous forme d'énergie électrique à la décharge.

L'accumulateur au plomb est basé sur le couple réversible : peroxyde de plomb, acide sulfurique, plomb.

L'électrolyte est composé d'eau distillée et de SO^4H^2 pur à 66° Beaumé. On emploie très souvent une solution à 24° Beaumé.

L'équation de la charge est la suivante :

$$\underset{(+)}{PbO^2} + 2SO^4H^2 + \underset{(-)}{Pb} = \underset{(+)}{SO^4Pb} + 2H^2O + \underset{(-)}{SO^4Pb};$$

et celle de la décharge a une forme inverse :

$$\underset{(+)}{SO^4Pb} + 2H^2O + \underset{(-)}{SO^4Pb} = \underset{(+)}{PbO^2} + 2SO^4H^2 + \underset{(-)}{Pb}$$

Le courant est inversé.

La résistance intérieure d'un accumulateur au plomb n'est que de quelque centième à quelque dix-millième d'ohm. La force électromotrice à la charge varie de 2 volts à 2 v.8 et à la décharge 2 v.1 à 1 v.8. La capacité varie en sens inverse de l'intensité de décharge ; elle augmente avec la densité de l'acide, passe par un maximum, puis décroît ensuite. Elle augmente avec la température d'environ 1 0/0 (par rapport à sa valeur à 15° C.) par degré.

Le rendement en quantité peut atteindre 90 0/0 ; celui en énergie varie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 75 à 85 0/0. Pratiquement on compte sur 60 0/0 de rendement utile en énergie.

Types d'accumulateurs. — Les différents types se rapportent à deux sortes d'électrodes : celles à grande surface, à formation autogène (Planté) qui, en général, forment le pôle positif, et les électrodes à oxydes rapportés qui forment le pôle négatif.

Les accumulateurs Tudor emploient la plaque à formation autogène et les négatives à oxydes rapportés : les accumulateurs du type Faure forment une grille d'électrode à oxydes rapportés ; la société « Puissance et Lumière » utilise une plaque à augets à oxydes rapportés : les accumulateurs Dinin ont une grille double en une seule pièce à oxydes rapportés et positives à formation autogène ; les C. E. S. ont une plaque à chlorure à oxydes rapportés ; les T. E. M., une plaque à augets à âme, à oxydes rapportés, et comme positives, des plaques à grande surface à formation autogène.

Le tableau suivant concernant les accumulateurs Tudor, qui sont très répandus, renseignent sur les caractéristiques de ces accumulateurs, dont les autres types se rapprochent plus ou moins.

TYPES		L4 ou AL4	M5 ou AM5	R17 ou AR17	S30 ou AS30
Dimensions d'encombrement :	Longueur	197	220	793	446
	Largeur	250	255	425	605
	Hauteur	305	531	620	875
Poids total en kilogr.		27	61	450	1609
Nature du bac		verre			
Capacité en ampères heures aux régimes de décharge en	10 heures	120	300	2040	8100
	5 »	100	250	1700	6750
	3 »	90	225	1530	6030
	2 »	72	180	1224	4860
	1 »	60	150	1020	4050

La capacité massique maxima des meilleurs types de plaques varie de 30 à 40 ampères-heures. La tension finale moyenne varie de 1 v. 85 pour décharge en 10 heures et 1 v. 70 pour décharge en 1 heure.

Les accumulateurs *nickel-fer* Édison ont leur matière positive constituée par de l'oxyde de nickel mélangé de graphite et la négative est de l'oxyde de fer additionné d'oxyde de mercure. L'électrolyte est une solution de potasse pure à 20 ou 21 0/0.

La force électromotrice à la charge est de 1 v. 5 à 1 v. 9 et à la décharge entre 1 v. 5 et 1 v. 2. Les rendements atteignent 82 0/0 en quantité et 58 0/0 en énergie. A encombrement et poids égaux, leur capacité est supérieure de 25 0/0 à celle des accumulateurs au plomb.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'ACCUMULATEUR A OXYDE LÉGER (SYSTÈME JACOB) (*fig.* 1721) a ses électrodes toutes du même modèle, aussi bien pour les plaques positives que pour les négatives. La plaque est constituée d'une gaine rectangulaire en plomb antimonié, dont le fond et les côtés sont pleins, et qui sert de support à un grillage appliqué sur les deux faces, de $1^{mm},5$ d'épaisseur. La largeur de la gaine ne dépasse pas 5 millimètres.

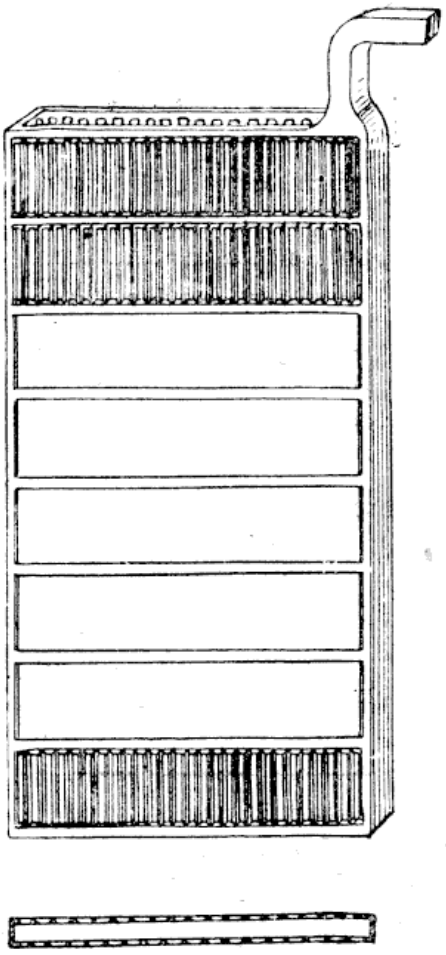


FIG. 1721.

La gaine constituant l'électrode positive contient des grains sphéroïdaux obtenus par décomposition de l'aluminium dans un électrolyte formé de plombate de plomb avec un excès de base, le produit obtenu étant calciné puis enrobé de minium.

L'électrode négative est constituée d'une gaine semblable, empâtée d'oxyde de plomb léger obtenu par un procédé spécial et dont la densité est en moyenne 2,90. Cet oxyde donne, lors de la charge, un plomb très spongieux facilitant les réactions.

Les électrodes sont interchangeables : l'électrode positive peut être transformée facilement en électrode négative. Il suffit d'en détacher les grains et de les remplacer par de l'oxyde de plomb léger.

La gaine pèse 360 grammes. L'électrode positive contient 370 grammes de matières et l'électrode négative 320 grammes. Un élément complet, de neuf plaques, pèse $9^{kg},485$ et a une capacité utile de 160 ampères-heures à la tension moyenne de 1,95 volts.

Pour éviter les baisses de capacité dans les accumulateurs au plomb, il est avantageux de décharger les éléments complètement au moins une fois par mois. On charge la batterie à l'intensité normale jusqu'à ce que le dégagement gazeux se produise aux électrodes et on continue par charges successives juqu'à ce que le dégagement gazeux se déclare sitôt la mise en charge.

On emploie la surcharge toutes les fois qu'il y a sulfatation. On utilise aussi la surcharge lorsque la batterie est restée en repos, chargée ou déchargée ; après une décharge à fond ou plusieurs charges incomplètes et enfin régulièrement tous les trois mois.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les grandes stations centrales, on ne cherche en général qu'à compenser les pointes, car une égalisation complète de la puissance de base conduirait à l'emploi d'accumulateurs d'énergie énormes et très coûteux. Pour parer aux à-coups trop subits et trop répétés on égalise par l'emploi d'installations à compensation naturelle qui s'effectuent directement par les accumulateurs lors d'une variation de tension ou de vitesse des machines travaillant en parallèle avec la batterie. Lorsque ce genre de compensation ne suffit pas, l'effet produit par l'accumulateur doit être renforcé par des régulateurs appropriés et ces systèmes rentrent alors dans la catégorie des installations à compensation réglée.

Pour la compensation naturelle, dans le cas d'une batterie tampon pour courant continu, il faut s'arranger de manière, que pour une charge moyenne de la génératrice, la tension de cette dernière corresponde à celle de la batterie au repos, celle-ci étant directement branchée au réseau.

La compensation naturelle, dans un système triphasé, admet la batterie placée aux bornes d'une machine à courant continu faisant partie d'un convertisseur actionné par moteur synchrone. On s'arrange de façon que lorsque la puissance prise au réseau augmente au-dessus d'une valeur donnée, la batterie alimente la machine à courant continu en moteur ; le groupe convertisseur fournit alors du courant triphasé. Si la demande diminue, la machine à courant continu débite sur la batterie et la charge.

En passant, nous signalerons l'action des volants comme compensation naturelle, qui emmagasinent l'énergie sous forme cinétique. Dans ce cas, il faut pouvoir faire varier la vitesse du volant et on peut aussi bien employer la méthode en continu qu'en alternatif. Pour pouvoir dimensionner convenablement la puissance du moteur et le poids du volant il est nécessaire de connaître la variation dans le temps du nombre de tours du volant et du moteur ainsi que la variation dans le temps de la répartition des puissances.

Au point de vue de l'entretien des accumulateurs, on doit journellement s'assurer du niveau de l'électrolyte et de sa densité ; surveiller le début du dégagement gazeux à la charge pour voir si certains éléments sont en retard ; s'assurer de la non-sulfatation et du voltage de la batterie, enfin, enlever les corps qui peuvent être tombés entre des plaques. Le régime de décharge qui convient bien est celui de 1 à 2 ampères par kilogramme de plaque. La charge est généralement faite à potentiel constant avec un courant égal à 0,75 à 1 ampère par kilogramme de plaques, et on reconnaît la fin de l'opération par le dégagement gazeux abondant aux électrodes et par la valeur du voltage des éléments. Pratiquement on arrête la charge, après avoir réduit de moitié

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le courant de charge, dès l'apparition des premières bulles de gaz et que le voltmètre atteint 2 v. 7 par élément. Les charges doivent toujours être complètes.

Une bonne manière d'opérer est de charger la batterie en y faisant passer un très fort courant au début et un très faible à la fin, mais il faut avoir des éléments robustes.

Transformateurs. — Ces appareils doivent périodiquement être sortis de cuve et inspectés, ou dès que leur température présente un état anormal provenant le plus souvent de l'état d'encrassement des appareils eux-mêmes ou des organes intermédiaires qui transportent la chaleur (huile, air, eau). Les cuves seront éventuellement nettoyées au pétrole et l'huile et les enroulements séchés séparément.

L'huile des transformateurs doit être fréquemment visitée et essayée, au moyen de prises d'échantillons prélevées en haut et en bas de la cuve. Si la quantité d'eau est reconnue anormale, on filtre et on sèche l'huile après l'avoir transvasée dans une autre cuve par pompage à la partie supérieure. Si l'huile n'est que légèrement hydratée, on peut la filtrer par groupe moteur-pompe, filtre-presse et circuit fermé, en ayant soin d'aspirer l'huile par le bas de la cuve.

Le séchage des enroulements s'opère soit électriquement, soit par soufflage d'air chaud. Dans le premier cas on alimente durant vingt-quatre heures un enroulement avec une tension approchant du court-circuit, l'autre enroulement étant court-circuité. Le séchage par l'air chaud consiste à placer une résistance électrique dans un élargissement de la conduite d'air pour porter la température de cet air à 90°. Pour éviter de sortir le transformateur de sa cuve, on peut adapter l'appareil calorifique au robinet de vidange de la cuve du transformateur. Avec ce système, on sèche les bobines par l'extérieur, ce qui est à la fois plus logique et permet un contrôle plus facile de la température.

On doit recouvrir les isolateurs supportant les bacs d'une couche de paraffine appliquée à chaud.

608. Tarification de l'énergie électrique. — Clientèle des stations centrales. — Le problème de la tarification consiste à peser tous les facteurs, aussi bien économiques que techniques, qui influent, d'une part sur l'emploi, d'autre part sur la production de l'énergie électrique et à tenir compte, suivant son importance relative, de chacun de ces facteurs.

Au point de vue de la consommation de l'énergie, le prix de revient peut se décomposer : 1° en frais généraux constants qui sont ceux auxquels donne lieu tout client ; 2° en frais fixes variables avec le client, et 3° en frais qui sont fonction de la consommation ou dépenses

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de production proprement dites. En principe le prix de vente du courant doit être suffisamment rémunérateur pour couvrir la somme de ces frais.

Les stations centrales ne vendent pas uniquement suivant le prix de revient avec un même pourcentage de bénéfice : elles font intervenir le service rendu, qui dépend des avantages particuliers que le consommateur trouve à employer l'énergie électrique. Il s'ensuit que le tarif ne peut pas être uniforme pour tous les consommateurs, et les exploitants sont toujours maîtres de leurs tarifs (1) et, par suite, des rabais qu'il leur plaît de consentir sur les tarifs maxima.

Actuellement ces rabais peuvent se diviser en deux classes principales, savoir ; les rabais donnant lieu à des prix tels que la dépense faite par le client est rigoureusement fonction de sa consommation (employés par les stations centrales brûlant du combustible), et les rabais donnant lieu à des prix tels que la dépense est indépendante de la consommation ou n'en dépend que d'une manière indirecte (usines hydroélectriques).

Dans la première catégorie on peut distinguer les rabais suivant la nature des appareils d'utilisation (éclairage, chauffage, force motrice) où la notion seule des services rendus justifie l'établissement de ce genre de concession ; les rabais suivant la nature des locaux dans lesquels le courant est utilisé (éclairage privé, éclairage industriel) ; les rabais suivant la quantité d'électricité consommée dans l'année, le prix moyen des hectowatts-heures diminuant quand leur nombre augmente (on fait application alors de tarifs dits tarif à minimum, tarif dégressif et tarif à ristourne dont les noms indiquent suffisamment l'usage) ; rabais suivant la régularité de la consommation (le prix des hectowatts-heures est fonction du rapport du nombre d'hectowatts-heures consommés dans l'année à la puissance installée, ou mieux, si cela est possible, à la puissance maxima instantanée ; dans l'application on fait usage du tarif à prime et des tarifs à minimum, dégressif et à ristourne) ; rabais suivant l'heure à laquelle le courant est consommé, l'horaire étant variable selon les saisons (dans l'application le système change-tarif est mis en œuvre soit à l'aide d'un compteur présentant un seul cadran et tel que les hectowatts-heures au tarif fort soient automatiquement majorés, soit à l'aide de compteurs à deux cadrans, préférables au premier système) ; rabais pour cause d'ex-

(1) La loi du 15 juin 1906 sur les distributions de l'énergie électrique a apporté une restriction à la liberté entière dont jouissaient les exploitants d'énergie électrique. L'article 6 stipule en effet que « si le concessionnaire abaisse pour certains abonnés le prix de vente de l'énergie, pour l'éclairage, avec ou sans conditions, au-dessous des limites fixées par le tarif maximum, il sera tenu de faire bénéficier des mêmes réductions tous les abonnés placés dans les mêmes conditions de puissance, d'horaire, de consommation, d'utilisation et de durée d'abonnement. » C'est donc là une condition obligatoire pour les concessions nouvelles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

clusivité (une réduction sur le prix maximum est accordée en raison de l'engagement pris par le consommateur de n'utiliser que le courant fourni par l'exploitant d'énergie électrique) ; enfin rabais suivant la durée de l'engagement (cet engagement n'a de valeur que combiné avec celui du minimum ou avec celui d'exclusivité).

La seconde catégorie a trait aux tarifs à forfait. Lorsque la puissance installée augmente, le taux du forfait par hectowatt de puissance doit diminuer. Pour les clients importants, on remplace la puissance installée par la puissance maxima instantanée. On bonifie ce mode de tarification par l'application de la méthode dite à « dépassement » qui permet au consommateur d'accepter le forfait pour une puissance limitée dont il fait généralement usage, et de payer les hectowatts-heures résultant de l'emploi d'une puissance supplémentaire exceptionnelle à un prix plus élevé que les hectowatts-heures précédents, mais moins fort cependant que celui qu'il payerait s'il acceptait le forfait pour ce supplément de puissance.

Ces dernières années, un nouveau système de tarification est entré en faveur auprès de quelques stations centrales ; il consiste à fournir à forfait l'énergie jusqu'à un taux déterminé et à faire payer au compteur l'excédent de consommation du client. Les compteurs construits par la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériels d'usines à gaz, en vue de ce genre de tarification, possèdent deux systèmes amortisseurs, dont l'un a une action qui n'est pas fonction de la vitesse et fait équilibre à tout couple moteur correspondant à une consommation consentie par le forfait, tandis que l'autre n'entre en jeu que quand la consommation dépasse le forfait et produit un couple de freinage proportionnel à la vitesse, couple qui fait équilibre au couple moteur dû à l'excédent de puissance demandé par le client.

Le couple constant qui absorbe le travail fictif correspondant au forfait est obtenu soit par frottement d'organes fixes sur les organes mobiles, soit par action d'un champ magnétique constant sur une pièce solidaire des organes mobiles, constituée par un métal ayant un grand coefficient d'hystérésis magnétique.

On peut classer comme suit les différents modes de tarification : au compteur d'énergie ; à prix uniforme avec taxe fixe proportionnelle à la consommation à forfait (ces tarifications ne favorisent pas le facteur de charge) ; avec taxe fixe proportionnelle à la demande maximum et tarif uniforme proportionnel à la consommation ; tarification de Vright ou de Brighton ; tarification mobile (ces tarifications exigent l'emploi d'appareils compliqués et ne permettent pas de tenir chaque jour compte des variations que peut subir la demande) ; tarification Brown et Routin (permet à l'abonné de se rendre compte par la lecture d'un seul

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cadran de l'importance de ce qu'il a à payer ; tarification au compteur à dépassement ; tarification Passavent (établi sur le prix unique du kilowatt-an) ; tarification Fodor et enfin tarification basée sur l'emploi d'interrupteurs automatiques ; tarification à taux variables en cours de police.

Le tableau ci-après résume les différents modes de tarification en usage.

A. Tarifs sans forfait

- 1° Suivant la nature des appareils.
- 2° Suivant la nature des locaux.
- 3° Suivant la quantité
  - *a.* tarif à minimum.
  - *b.* tarif dégressif..... — simple ; avec minimum.
  - *c.* tarif à ristourne..... — simple ; avec minimum.
- 4° Suivant régularité
  - *a.*
    - α. tarif à minimum.
    - β. tarif dégressif..... — simple ; avec minimum.
    - γ. tarif à ristourne.... — simple ; avec minimum.
  - *b.* tarif à prime..... — simple ; avec taux de la prime variable ; avec prix du courant variable.
- 5° Suivant horaire
  - *a.* simple.
  - *b.* à minimum.
  - *c.* dégressif.
  - *d.* à ristourne.
- 6° Avec exclusivité.
- 7° Suivant durée
  - *a.* avec exclusivité.
  - *b.* avec minimum.

B. Tarifs à forfait

- 1° Forfait avec dépassement.
- 2° Forfait avec dépassement et suivant horaire.
- 3° Forfait suivant production du client.

M. Choulet est l'auteur d'une méthode graphique permettant de représenter très simplement tout l'ensemble de la question (*fig.* 1722, *a*). En ordonnées sont portés des francs et en abscisses des heures d'utilisation. On obtient ainsi, par exemple, les prix de revient du kilowatt en fonction de la durée d'utilisation = droite CGH. Cette droite rencontre l'axe des ordonnées en C, et l'on a OC = *s* = charges fixes par kilowatt. Le coeffi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cient angulaire de CH représente le prix de revient du kilowatt-heure. Étant supposé ainsi connu le prix de revient du kilowatt-heure, on peut se proposer de le revendre suivant une formule qui conduirait à la droite MBN. Comparons ce tarif idéal au plus simple des tarifs en usage : à tant le kilowatt-heure. Ce dernier tarif est représenté par la droite OGBA partant évidemment de l'origine. On voit immédiatement qu'au-dessous de l'utilisation *og*, le fournisseur est en perte. Il fait le bénéfice prévu pour une utilisation *ob*, et il le dépasse pour une utilisation *oa*.

On voit donc que, pour obtenir une exploitation suffisamment rémunératrice, sans atteindre des prix prohibitifs pour de gros abonnés, il y a lieu d'appliquer un tarif dépendant de la durée probable d'utilisation.

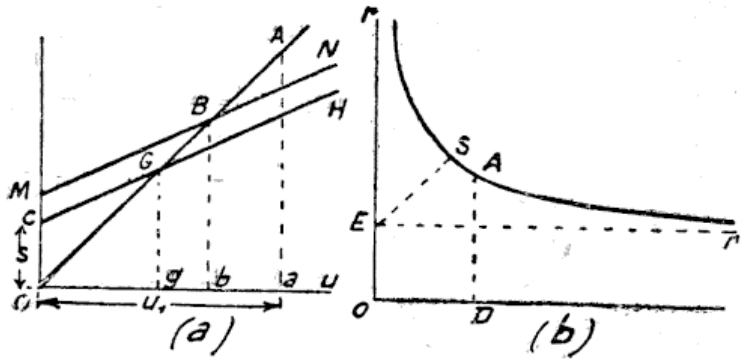


FIG. 1722.

Le prix de vente moyen du kilowatt-heure (ordonnées de la droite MBN), divisé par les heures (abscisses) est, en fonction de l'utilisation, une hyperbole équilatère, asymptote à l'axe des ordonnées d'une part, et au prix de revient du kilowatt-heure, parallèle à l'axe des abscisses, d'autre part (*fig.* 1722, *b*).

On pourra donc choisir le tarif approprié en fonction de l'utilisation prévue.

Pour les clients dont l'importance le justifie, on installe, en plus du compteur à dépassement, un change-tarif qui permet de facturer les pointes des consommateurs à deux prix différents, suivant qu'elles se produisent ou non aux heures de charge de l'usine.

Les exploitants des grandes centrales ont escompté la supplantation de la machine à vapeur dans les grandes usines telles que filatures, tissages et autres ayant des puissances motrices de 500, 1.000 et même 2.000 HP. Elles ont ainsi engagé la lutte contre la grosse machine à vapeur ; à cet effet elles vendent la force motrice à ces usines, à forfait, en prenant comme unité le cheval-an.

Partant de la supposition que ces usines travaillent trois mille heures

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par an, les centrales cèdent à celles-ci le courant sur la base de 100 francs le cheval-an pour les très grosses puissances (1.000 HP et plus) et 150 francs par exemple pour les puissances moyennes (100 à 500 HP), avec cette conviction que ces prix représentent les prix de revient minima de la force motrice par la vapeur. Portant tous leurs efforts de propagande vers la grosse industrie, elles négligent ou plutôt ne comptent que comme des renforts les industries de puissance petite et moyenne. De plus, ayant fait de gros sacrifices pour attirer à elles les gros consommateurs, elles appliquent aux petits consommateurs des tarifs par trop élevés qui rendent difficile le recrutement de ces derniers clients.

Or le champ d'exploitation des industriels usant des moyennes et petites forces est vaste et là les entreprises de transport de force peuvent lutter avantageusement tant pour l'industriel abonné que pour la station centrale. Il importe donc d'envisager la question sous son véritable jour, pour la plus profitable utilisation de l'énergie des centrales vendant du courant électrique.

En premier lieu, il convient de se rendre compte des prix de revient que les industriels possédant un bon matériel moderne à vapeur peuvent obtenir par l'emploi de ce dernier. En ceci, nous citerons d'abord deux exemples caractéristiques fournis par M. O. H. Wilot (1) concernant une installation type de 650 chevaux à vapeur et une de 30 HP fonctionnant 3.000 heures par an. De nombreux essais faits sur des machines de 600 à 800 HP, qui existent en grand nombre dans les grands centres industriels, ont fait reconnaître que la consommation moyenne de vapeur par cheval-heure ramenée à un type de 650 HP était de $8^{kg},500$ et la consommation de charbon de 750 grammes.

L'entretien et le salaire pour une installation de 650 HP peuvent s'évaluer à 9.600 francs. Quant aux dépenses d'installation, elles ressortent à 141.000 francs. Ces chiffres sont plutôt poussés. En adoptant 5 0/0 d'intérêt et 10 0/0 d'amortissement (chiffres admis pour la plupart des industriels du Nord), on obtient pour 141.000 francs la somme de 21.150 francs qui, ajoutée à celle de 9.600 francs donnée comme total de frais fixe, égale 30.750 francs, soit par cheval-an 47 francs.

La dépense de charbon, d'après les évaluations ci-dessus, s'élève à 45 francs aussi par cheval-an (à raison de 20 francs la tonne), soit de ces deux chefs une somme de 92 francs.

Le prix du cheval-heure de l'installation qui nous occupe est donc de :

$$\frac{92}{3000} = 0 \text{ fr. } 0306.$$

(1) *Revue électrique*, 15 août 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais, après dix ans de marche, ce prix de revient tombe à 61 francs par cheval-an.

Et si l'on répète ce calcul pour des moteurs de 200 à 1.000 HP, on voit varier le prix de revient de 120 francs à 75 francs dans la période où on fait supporter à l'installation l'amortissement du matériel.

D'une façon générale, on peut, d'après ces exemples, se rendre compte qu'un industriel avisé obtiendra aisément le cheval-heure entre 4 centimes et 2 1/2 centimes suivant l'importance de l'installation, et tout de suite l'on voit que cet industriel n'aura pas intérêt à prendre le courant électrique à forfait, même pour 100 francs par cheval-an, pour peu qu'il ait besoin d'une puissance supérieure à 500 HP.

Pour établir une comparaison complète il convient de bien déterminer la quantité de watts correspondant au cheval indiqué. On sait que lorsqu'un moteur à vapeur travaille à sa charge normale, son rendement mécanique est le plus souvent voisin de 90 0/0. La perte due aux câbles est généralement égale à 5 0/0, ce qui donne un rendement de 85 0/0. Il faut donc que les moteurs électriques développent 0,85 HP effectif pour chaque cheval indiqué du moteur à vapeur. Si enfin on accepte comme rendement moyen de la génératrice 90 0/0, on trouve que le cheval indiqué correspond à :

$$\frac{736 \times 0{,}85}{0{,}9} = 695 \text{ watts},$$

soit 700 watts en nombre rond.

Pour arriver à égalité de prix avec la force motrice par la vapeur, il faudrait donc fournir le courant à un prix variant entre $\frac{4}{0{,}7} = 5{,}7$ centimes et $\frac{2{,}5}{0{,}7} = 3{,}6$ centimes le kilowatt-heure, suivant qu'il s'agit d'une puissance de 200 ou 1.000 HP.

La question est de savoir si une station centrale peut fournir, à un prix rémunérateur pour elle, le courant dans de telles conditions. L'exploitant de force motrice peut en effet trouver des déboires en visant trop particulièrement ou exclusivement la fourniture de courant pour la grosse industrie. Il serait peut-être plus avisé de rechercher la clientèle d'un grand nombre de petits et moyens abonnés que de se cantonner dans un nombre restreint de gros abonnés, les premiers assurant la plupart du temps une marche de 10 heures par jour ; mais à la condition de ne pas faire supporter des tarifs exagérés comme cela arrive dans la plupart des cas, car les stations centrales comptent sur les petits abonnés pour se rattraper des concessions ruineuses faites à la grosse industrie.

Il importe donc aussi de se rendre compte, pour l'application des tarifs,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des prix de revient exacts de la petite industrie et à cet effet nous allons reprendre l'examen de l'exemple type annoncé plus haut, relatif à une installation de 30 chevaux de force.

L'entretien et les salaires pour une installation de ce genre (que l'on peut estimer coûter 12.000 francs), compris frais d'intérêt et d'amortissement, s'élèvent au prix annuel de 5.100 francs, ce qui met le cheval-heure à 0 fr. 56. La consommation d'un moteur de 30 HP perfectionné, sans con-

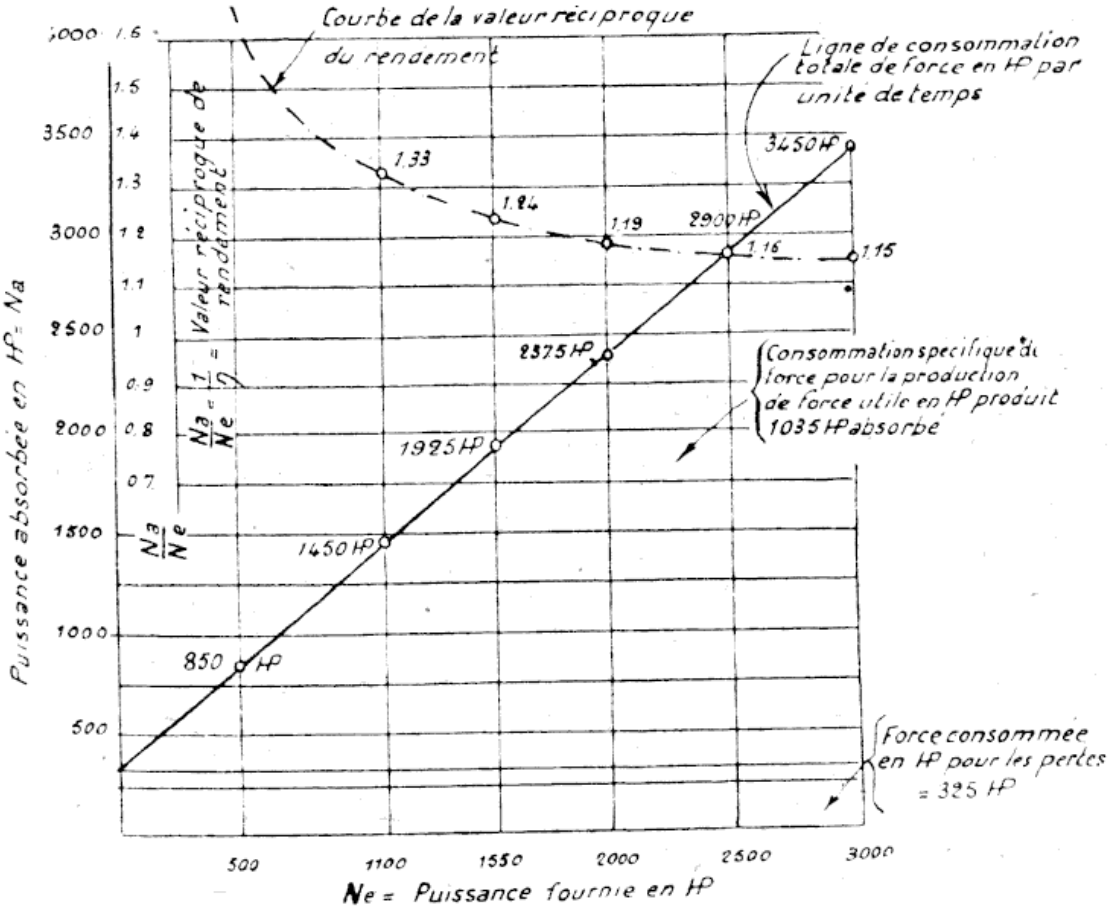


FIG. 1723. — Diagramme de consommation d'une turbine Pelton de 3.000 chevaux.

densation, est de $1^{kg},500$ de charbon par cheval-heure, ce qui, à raison de 20 francs la tonne, met le cheval-heure à 0 fr. 03. Le kilowatt-heure revient donc à :

$$\frac{0,056 + 0,03}{0,7} = 0^{fr},123.$$

Après amortissement ce chiffre tombe à 0 fr. 09.

Si nous prenons un moteur à gaz de 10 HP de force, par exemple, dont l'installation coûte 4.000 francs, on trouve comme total des frais fixes annuels 1.000 francs, ce qui met le cheval-heure à 0 fr. 033. La consommation de gaz, à raison de 500 litres à 0 fr. 15 le mètre cube, met le cheval-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

heure à 0 fr. 075. Le kilowatt-heure doit donc être fourni au maximum à :

$$\frac{0^{fr},033 + 0,075}{0,7} = 0^{fr},15.$$

Après amortissement ce chiffre descend à 0 fr. 12 par kilowatt-heure.

Il faut convenir que, dans les deux exemples, les moteurs sont supposés

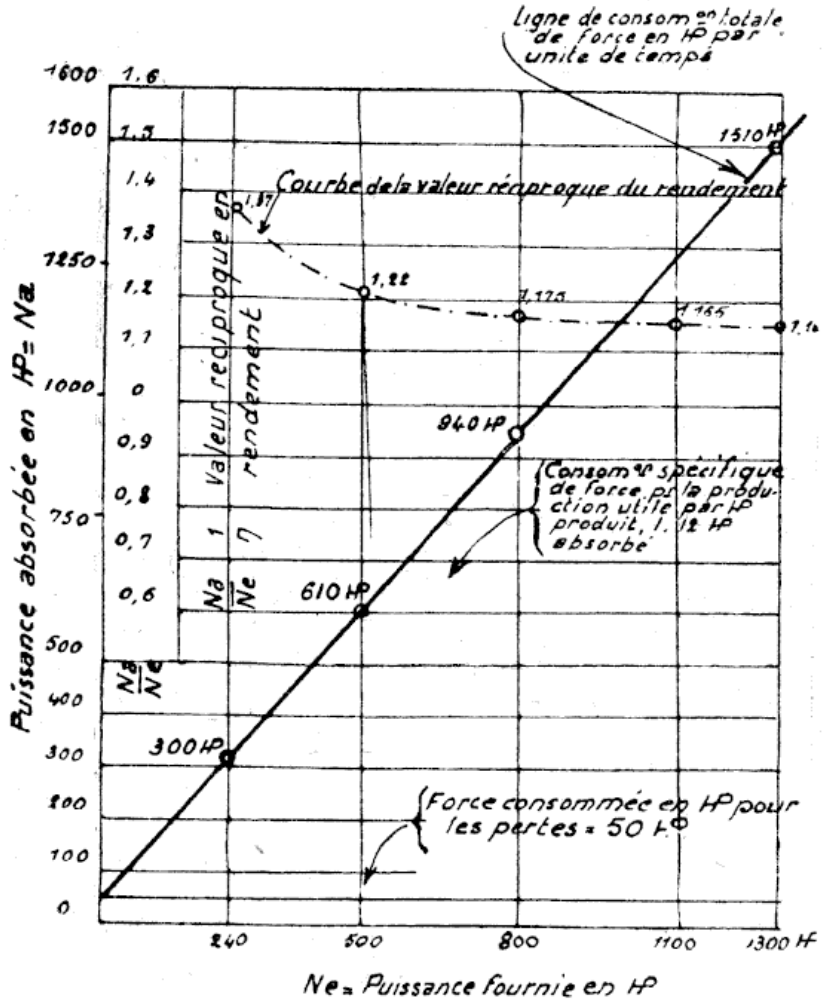


FIG. 1724. — Diagramme de consommation d'une turbine Francis de 1.300 chevaux.

marchant pendant les 3.000 heures à pleine charge. Il n'en est pas toujours ainsi ,mais souvent la charge moyenne est assez voisine de la pleine charge, ce qui ne change pas sensiblement les chiffres indiqués.

Donc, au prix de 0 fr. 09 à 0 fr. 12 par kilowatt-heure, une station centrale peut trouver de nombreux abonnés qui obtiendront un avantage réel dans l'emploi du courant, surtout lorsque leur charge moyenne s'éloigne un peu du maximum. Et ici, on marche sur un terrain sûr, ce qui n'existe pas avec la grosse industrie, qui peut plus facilement s'approprier les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

éléments divers capables d'abaisser le prix de revient de sa force motrice. Ce prix de vente de 9 à 12 centimes, pour un service soutenu de jour, doit être rémunérateur lorsque le nombre d'abonnés est grand et lorsque l'usine centrale est bien organisée.

Le développement de la clientèle peut efficacement s'appuyer sur certains sacrifices consentis en faveur d'une certaine classe d'abonnés, telle que la gratuité des installations, tant pour la force motrice que pour l'éclairage. Ainsi la Société grenobloise d'Électricité a pu obtenir une extension rapide de son réseau d'éclairage par l'application des conditions suivantes contractées avec la ville de Grenoble : 1° gratuité des installations pour les abonnés à raison d'une lampe par pièce habitable ; 2° branchement obligatoire de tout immeuble comportant un minimum de 20 lampes ou une lampe par deux étages dans l'escalier ; 3° pour les lampes à installer, en sus de celles gratuites, leur coût d'installation ne peut individuellement dépasser 3 fr. 50, avec réduction à débattre pour les groupements dans la lustrerie ; 4° pour les lampes d'appartements, l'énergie consommée par les abonnés, qui bénéficient d'installations intérieures gratuites, est payée au tarif ordinaire.

Il ne nous semble pas téméraire de signaler, en terminant ce paragraphe, l'état d'indolence dans lequel paraissent se complaire les centrales vis-à-vis du chauffage et de la cuisine électriques, dont de regrettables tarifs prohibitifs empêchent l'extension. Cependant, l'intérêt bien compris des usines productrices d'électricité devrait les pousser à retirer d'une telle consommation de courant — qui se présente, en grande partie, aux heures de la journée où la charge des machines est la plus faible, et en été, au moment où les besoins d'éclairage sont peu importants — un accroissement de recettes des plus sérieux. Un tarif unique, pour tous les consommateurs, même un peu supérieur à celui du gaz, amènerait aux centrales d'électricité une bonne partie de la clientèle absorbée par le gaz, laquelle saurait vite apprécier les avantages offerts par le chauffage et la cuisine électriques : confort, hygiène, cuisson plus parfaite, plus grande rapidité dans la cuisson des aliments, commodité, propreté et absence d'odeurs et de fumées.

II. — CONDITIONS SPÉCIALES DE FONCTIONNEMENT DES RÉSEAUX DE GRANDE ÉTENDUE

609. Régulateurs automatiques de tension. — Avec les réseaux de grande étendue que l'on rencontre dans les longues lignes de transmission d'énergie, et en raison des conditions de distribution assez différentes qui existent dans les divers circuits, il a fallu prendre des dispositions spéciales pour assurer, aux points d'utilisation, une tension

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constante. Les moyens dont disposent à cet effet les usines sont de deux sortes : réglage de vitesse des turbines, réglage de tension des alterna-

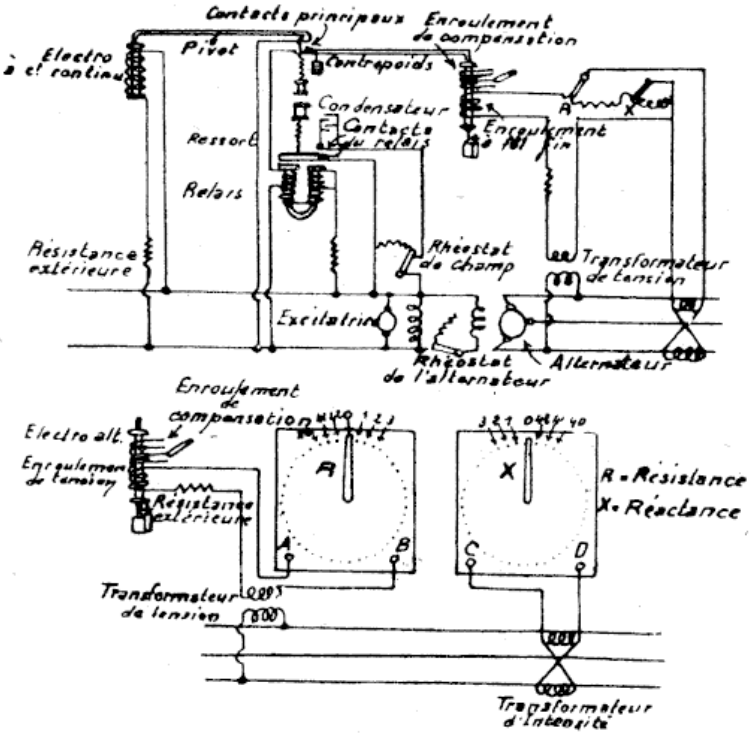


FIG. 1725. — Schéma d'un compensateur de chute de tension.

teurs. Ainsi que nous l'avons vu, la vitesse est rendue constante par des régulateurs commandés par des servo-moteurs actionnés soit directe-

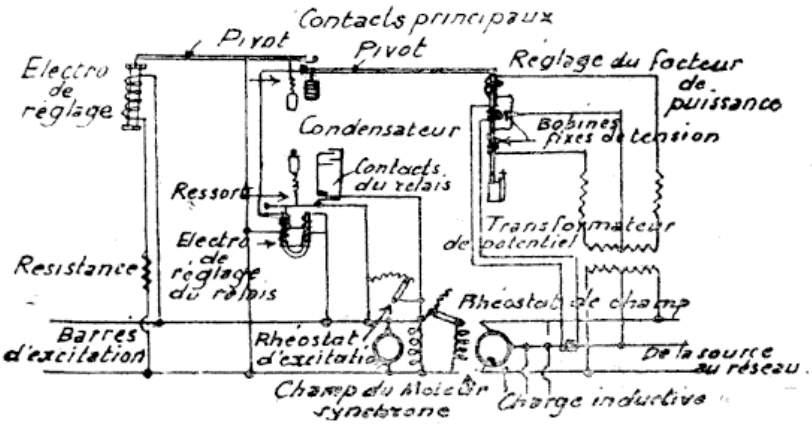


FIG. 1726. — Schéma de réglage évitant les surtensions.

ment par l'eau de la chute, soit indirectement par de l'huile à la pression de 25 kilogrammes par centimètre carré.

Les régulateurs automatiques de tension se divisent : en régulateurs de champ pour maintenir constante la tension de la centrale malgré les va-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

riations de charge dans le réseau et de la vitesse de la machine motrice ;

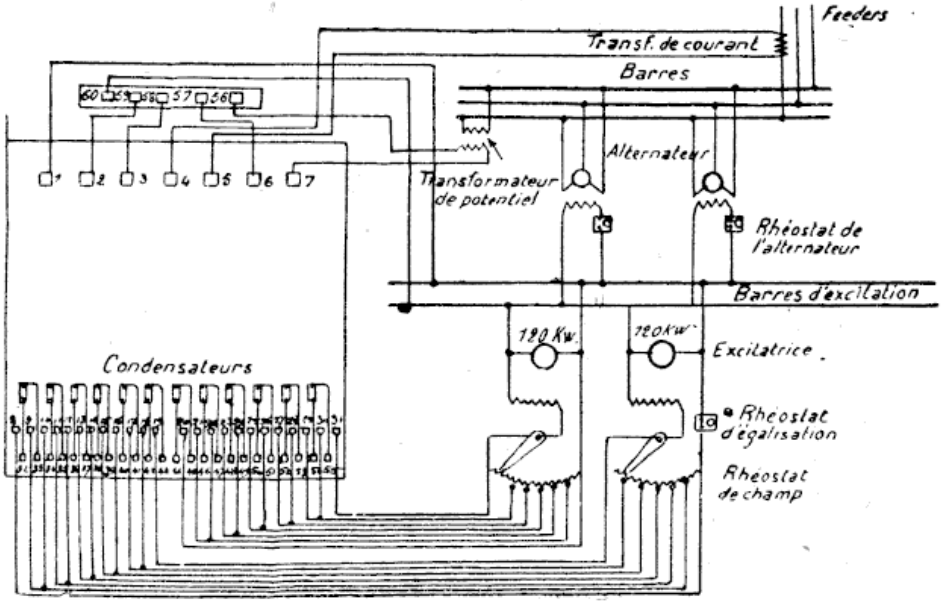


FIG. 1727. — Schéma de réglage de deux excitatrices.

en régulateurs d'excitation pour obtenir la constance de la tension des alternateurs, et en régulateurs du courant principal pour la constance de la tension d'un point principal de la distribution assez éloigné de la centrale, malgré les variations de l'intensité. La plupart de ces régulateurs se composent en principe d'une résistance, d'un relais et d'un petit moteur auxiliaire avec renvoi de mouvement ou mécanisme enclencheur. La construction intérieure de la résistance de réglage se fait d'après les mêmes principes que pour le réglage à la main.

Dans les appareils de la maison Siemens-Schuckert, le moteur auxiliaire transmet son mouvement au régulateur par une vis sans fin. L'A. E. G. emploie, pour le même but, un cordon de transmission et un

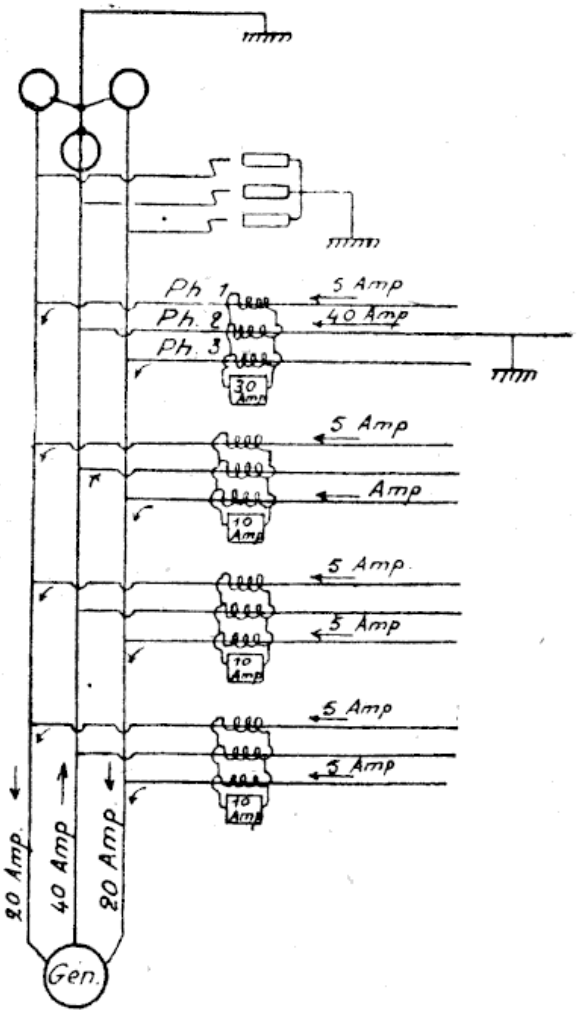


FIG. 1728. — Montage général des relais sur un réseau de câbles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

renvoi de mouvement approprié à grande démultiplication avec déclenchement automatique à fin de course. L'appareil de réglage automatique de la maison Voigt et Haeffner actionne un voltmètre à contacts dont les écarts sont produits par les variations de tension dans le réseau. Ce voltmètre est relié au réseau soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transformateur lorsque la tension est trop élevée.

Mais les régulateurs des usines ne suffisent pas toujours et il arrive qu'une ligne secondaire se trouve branchée sur l'une des lignes principales, de sorte que les variations de charge sur cette ligne secondaire amènent à son extrémité des variations trop grandes. Dans ce cas, on corrige ce défaut à l'aide de transformateurs dont les circuits secondaires sont en série avec les lignes dans lesquelles il faut compenser la perte de charge. Le premier de ces transformateurs est alimenté par les transformateurs de potentiel du réseau principal. La capacité de ces transformateurs auxiliaires est faible puisqu'ils n'ont qu'à fournir un courant équivalent aux pertes à compenser ; ils peuvent d'ailleurs être réglés automatiquement par un régulateur Thury, entraîné à faible vitesse par un petit moteur asynchrone, calculé de manière à se mettre automatiquement en marche, dans toutes les conditions, sans risque d'échauffement dangereux.

Comme transformateur-survolteur-dévolteur, on peut employer soit un transformateur à sections indépendantes mises en série ou exclues par

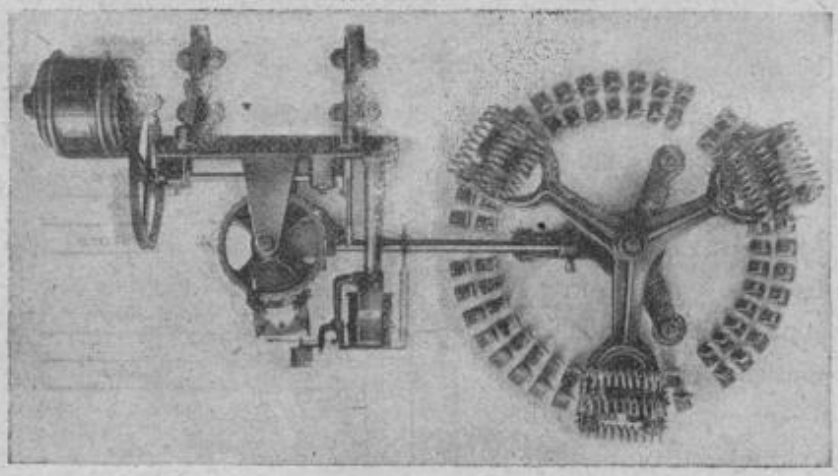


Fig. 1729. — Réglage d'un transformateur triphasé au moyen d'un régulateur Thury.

un curseur commandé par le régulateur, soit un transformateur à noyau mobile, déplacé par le régulateur de manière à donner la tension voulue (régulateur d'induction) (*fig.* 1729 à 1736).

Le régulateur Thury se compose d'une balance électromagnétique qui, dès qu'elle quitte sa position d'équilibre, provoque le réglage en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

empruntant la force motrice nécessaire à un mouvement de va-et-vient, entretenu d'une manière permanente par un moteur indépendant. Pour

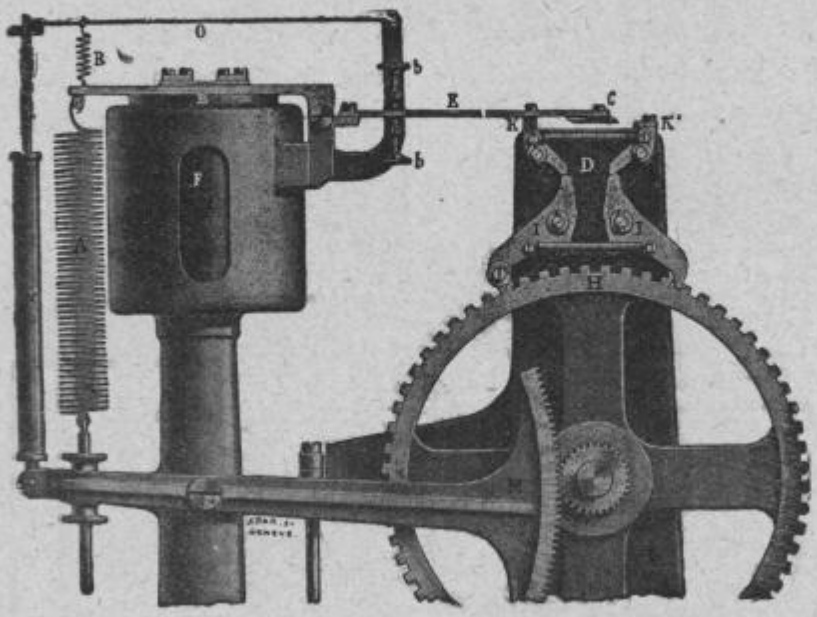


FIG. 1730. — Mécanisme du régulateur (courant continu).

les régulateurs à courant continu (*fig.* 1730 à 1733), le circuit magné-

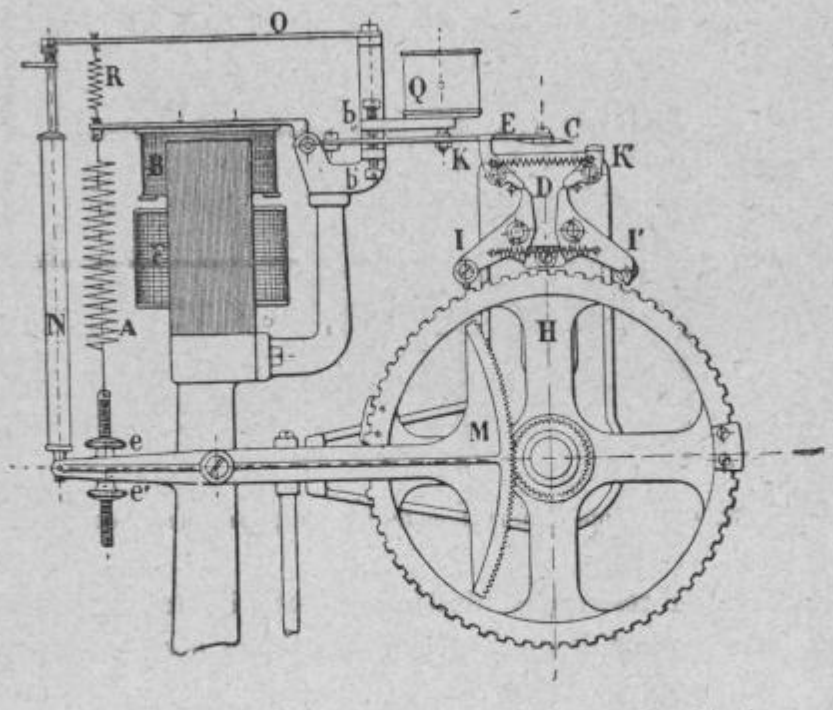


FIG. 1731. — Mécanisme du régulateur (courant continu).

tique F de l'électro-aimant inducteur est coupé par un intervalle annulaire, formant un entrefer dans lequel se déplace une bobine B, suspendue à un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

levier contre-coudé E, qui pivote en son milieu et porte à l'une de ses extrémités les attaches du ressort de réglage A et du ressort d'asservissement R, et à l'autre extrémité, une butée en acier trempé C. Pour les régulateurs à courant alternatif, les masses de l'inducteur sont feuilletées et le tambour en cuivre est remplacé par un cadre portant l'enroulement de la bobine mobile. Pour éviter les inconvénients des variations de fréquence, on em-

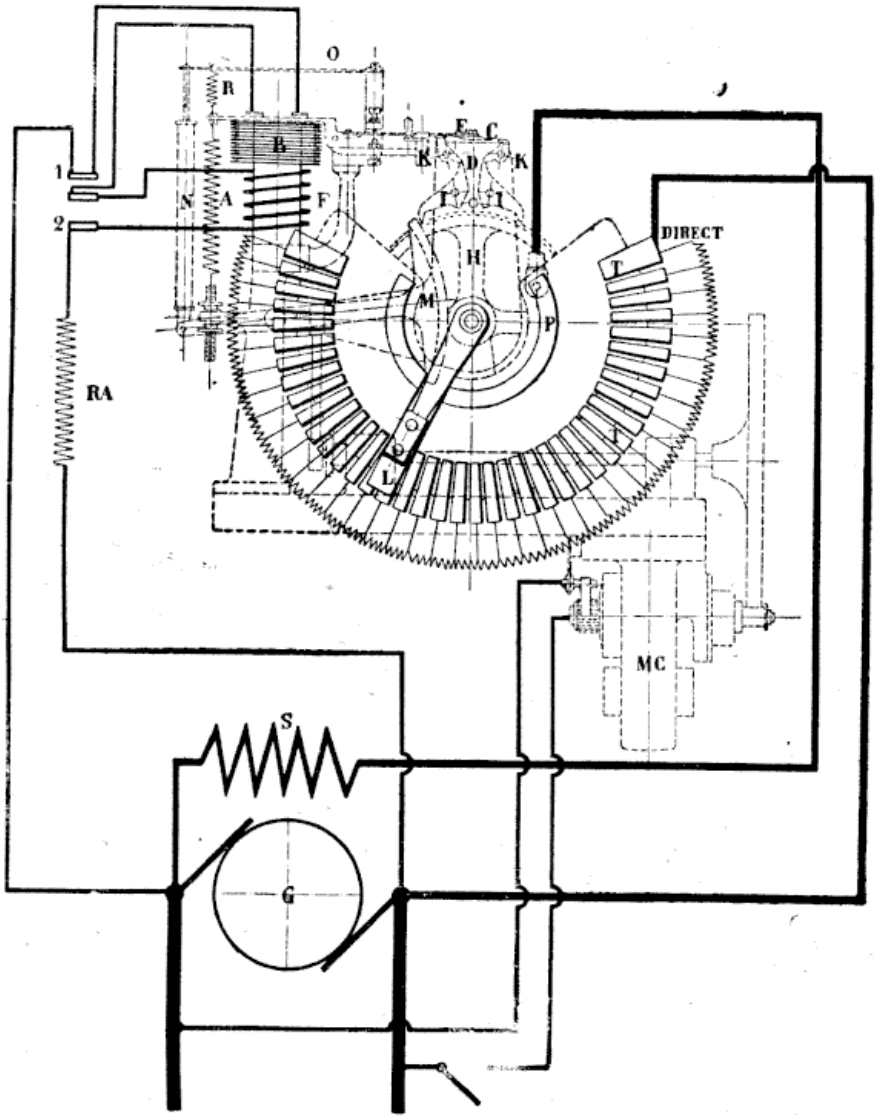


Fig. 1732. — Schéma d'un réglage de tension pour courant continu.

ploie en général une résistance additionnelle non inductive, en série avec l'inducteur et, pour éviter que les vibrations dues à ces courants, en se transmettant au levier E et à la butée C, gênent le réglage, on a recours à un amortisseur à huile Q.

Le mouvement de va-et-vient, auquel la force motrice nécessaire a réglage est empruntée, est imprimé à la bascule D par un arbre à manivelle, commandé par le moteur du régulateur ; le balancement de cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bascule provoque les déplacements de la roue H calée sur le même arbre que les organes de réglage à commander.

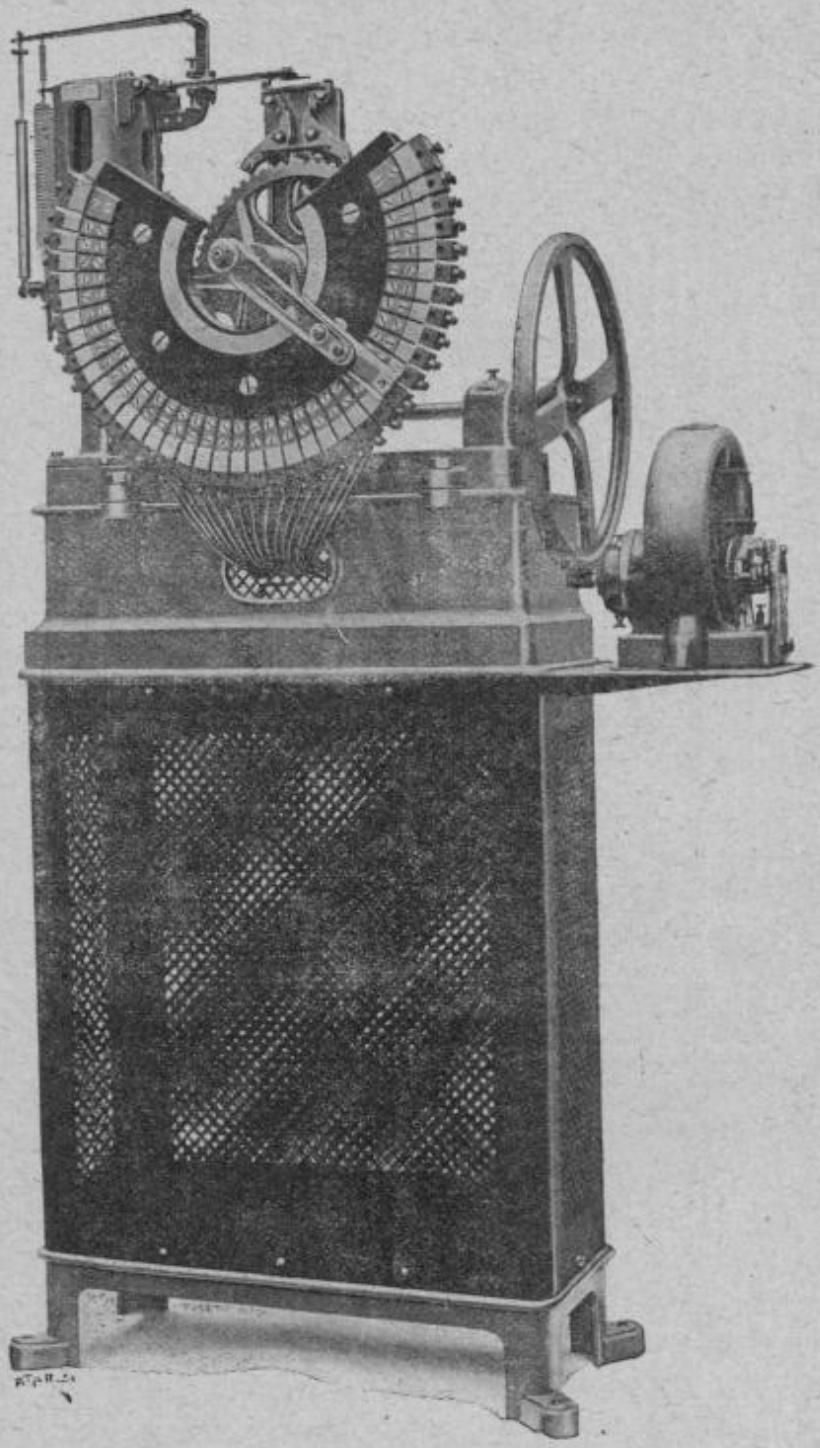


Fig. 1733. — Régulateur automatique pour courant continu avec rhéostat et moteur.

Pour provoquer le réglage, il suffit d'entraîner la roue dentée H et par là le curseur calé sur le même axe que cette roue ; le mouvement de va-et-vient de l'encliquetage entraîne la roue dans un sens ou dans l'autre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour régler le courant des alternateurs, on complète l'appareil par une disposition d'asservissement évitant des oscillations qui tendraient à se produire du fait des retards d'aimantation dus à la self-induction.

Le mécanisme du régulateur Thury se prête d'une manière avantageuse à la commande à distance d'appareils quelconques. Il est alors relié à l'arbre du régulateur, qui provoque ainsi des déplacements correspondants à ceux déterminés par le poste de commande. Il suffit de

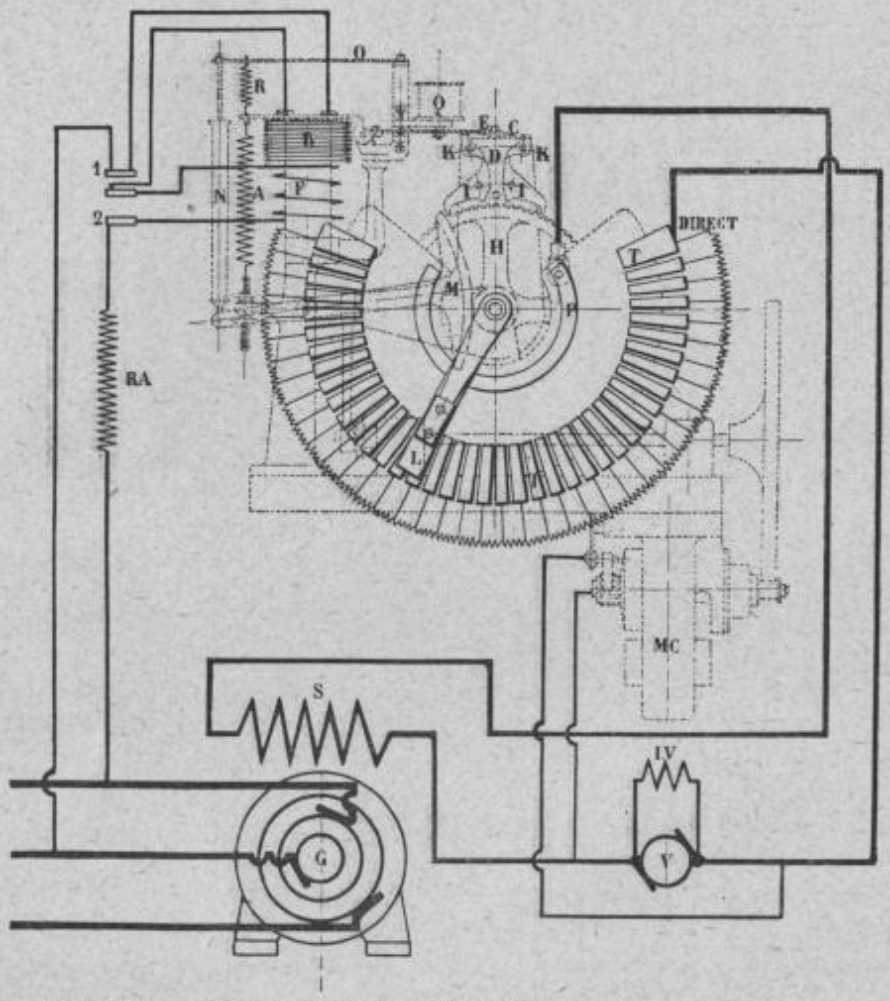


FIG. 1734. — Schéma de réglage de tension pour courant alternatif.

mettre en relation les deux postes par deux fils ; la commande se fait sans relais d'aucune sorte et peut en pratique utiliser un effort quelconque, qui est fourni par le moteur qui actionne le régulateur. Les déplacements angulaires de l'arbre commandé sont rapides et constants.

Le réglage d'un alternateur est représenté schématiquement par les (*fig.* 1734). L'appareil est supposé agir sur le courant produit par l'excitatrice V qui alimente l'excitation S de l'alternateur ; il pourrait aussi régler le courant d'excitation IV de l'excitatrice, mais son action serait alors un peu moins rapide par le fait de la paresse des champs à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mettre en action. Quelle que soit la tension de l'alternateur à régler, le régulateur est toujours alimenté par un courant secondaire, de faible voltage, sans danger aucun pour le personnel.

Dans le schéma, le moteur MC, qui commande le régulateur, est supposé à courant continu. Il peut être également à courant alternatif, mais

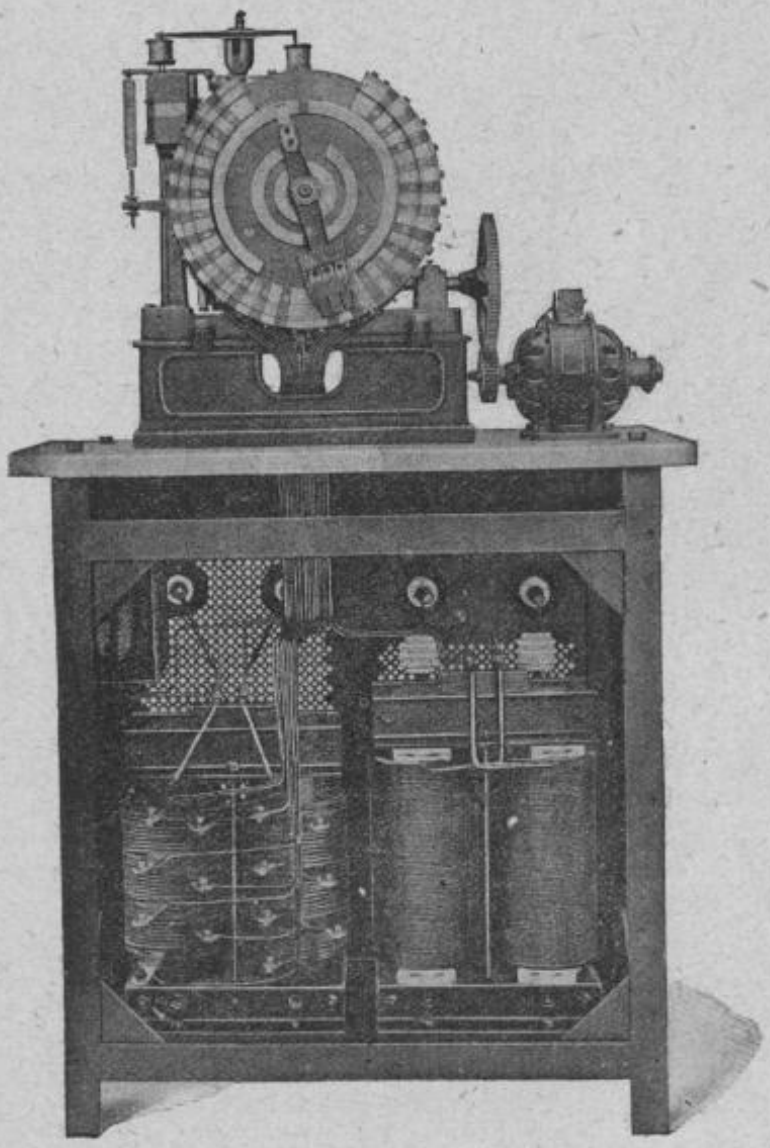


Fig. 1735. — Régulateur-survolteur monophasé. (Construction H. Guénod, S. A.).

il est préférable d'employer le premier, car il permet de mettre en marche le régulateur avant l'alternateur et de régler dès le début.

Le régulateur automatique à action extra-rapide construit par les ateliers H. Guénod, à Genève, permet de corriger des variations de vitesse très brusques et importantes. Dans cet appareil c'est un servo-moteur à huile qui est le dispositif utilisé pour transmettre au curseur habituel l'énergie disponible et provoquer par là ses déplacements sur le cadran de réglage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le régulateur comporte donc une pompe centrifuge, actionnée par un moteur quelconque et mettant à sa disposition de l'huile sous pression. Par le jeu d'un tiroir, cette huile sous pression est dirigée de l'un ou de l'autre côté d'une palette, mobile dans un cylindre, et qui est calée sur le même arbre que le curseur de réglage. Les déplacements angulaires provoqués par la pression de l'huile sur la palette seront donc les mêmes que ceux du curseur se déplaçant sur le cadran de réglage. Le tiroir du distributeur est supporté par une extrémité du fléau d'une balance électromagnétique, dont l'autre extrémité porte un ressort antagoniste et la bobine mobile, placée sous l'action d'un puissant électro-aimant.

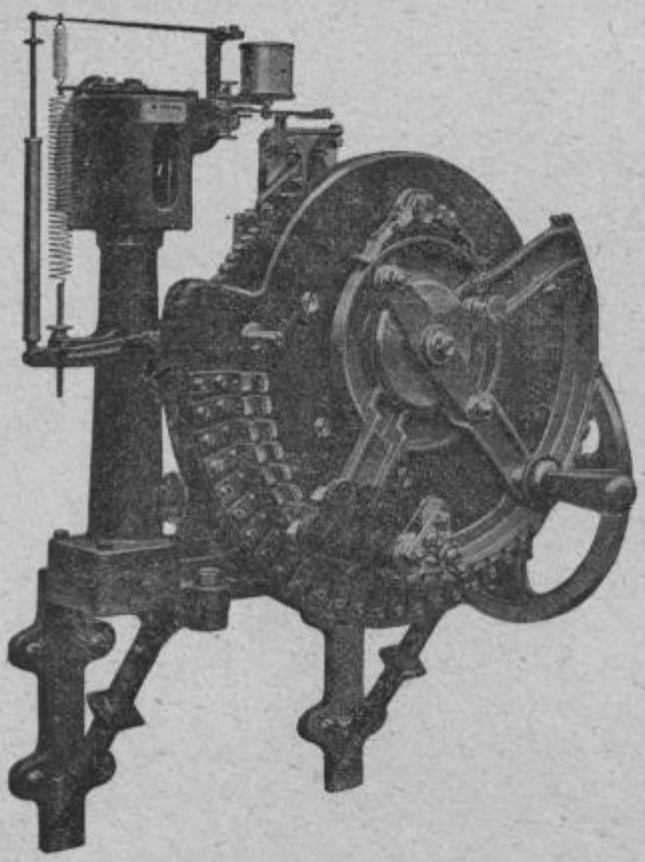


FIG. 1736. — Régulateur d'absorption (Construction H. Guénod, S. A.)

A chaque valeur du courant à régler correspond une position d'équilibre de la balance électromagnétique, position qui détermine l'arrêt de la circulation d'huile dans le régime normal, ou l'entrée de l'huile de l'un ou de l'autre côté de la palette, et par là le déplacement de cette palette, pour corriger un écart dans ce régime.

L'asservissement est le dispositif destiné à limiter le jeu du régulateur et, malgré les retards dus à la self-induction de l'inducteur à régler, à empêcher la formation de périodes d'une manière prolongée. Il est en tout analogue à celui du régulateur Thury.

Un dispositif spécial permet de varier le degré de cet asservissement et de laisser le curseur dépasser le point où il doit se tenir dans le nouvel état stationnaire pour revenir ensuite en arrière. Par cet artifice le courant d'excitation est forcé de se modifier plus rapidement. On gagne ainsi en vitesse de réglage.

Dans le cas général d'une génératrice avec excitatrice indépendante, deux schémas de réglage sont en présence : réglage direct caractérisé par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'insertion du rhéostat de réglage dans le circuit des inducteurs, de la génératrice, l'excitatrice étant abandonnée à elle-même, ou, réglage indi-

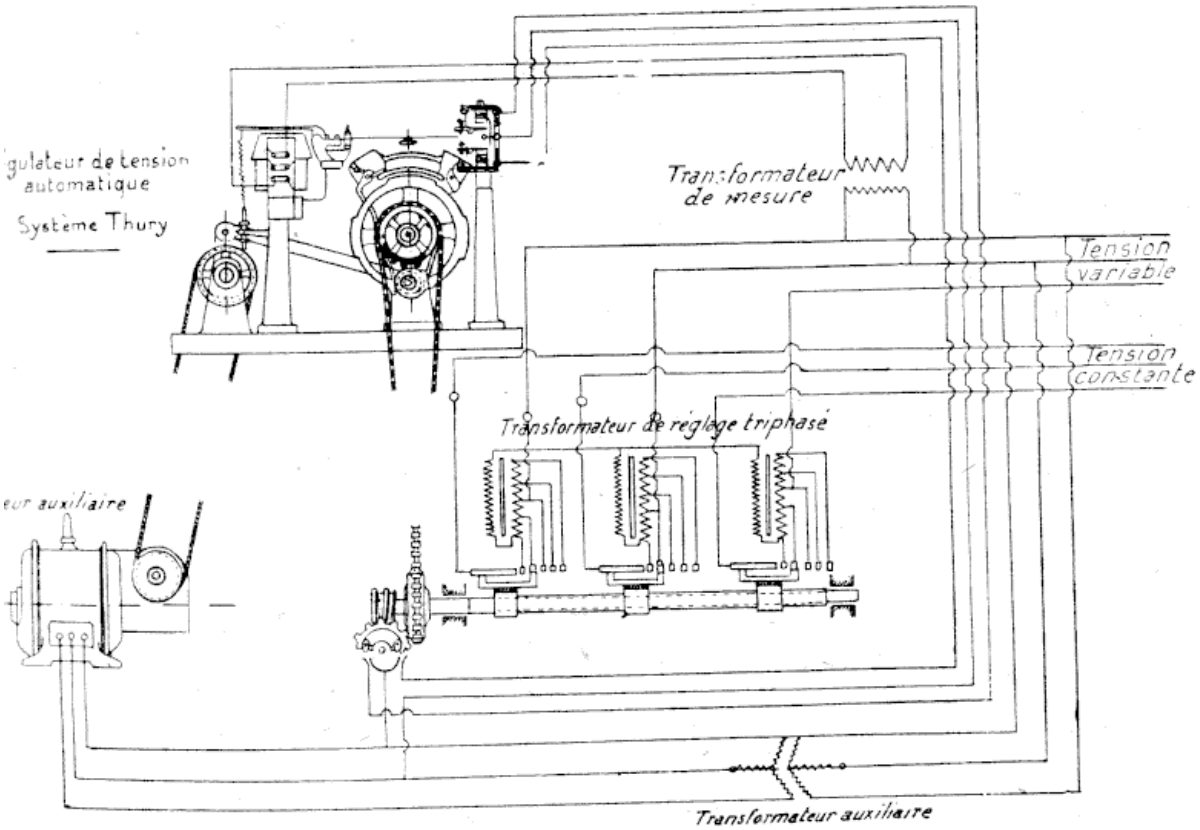


FIG. 1737. — Connexions d'un transformateur de règlage automatique.

rect, dans lequel le rhéostat de réglage se trouve dans le circuit des inducteurs de l'excitatrice.

Le régulateur Tirrill appartient au groupe des régulateurs rapides, lesquels compensent les oscillations de la tension du générateur par la modification de l'énergie magnétique du système inducteur, dont la constante de temps mesure la valeur, et qui possèdent les dispositions nécessaires pour obtenir rapidement cette modification malgré l'inertie du système.

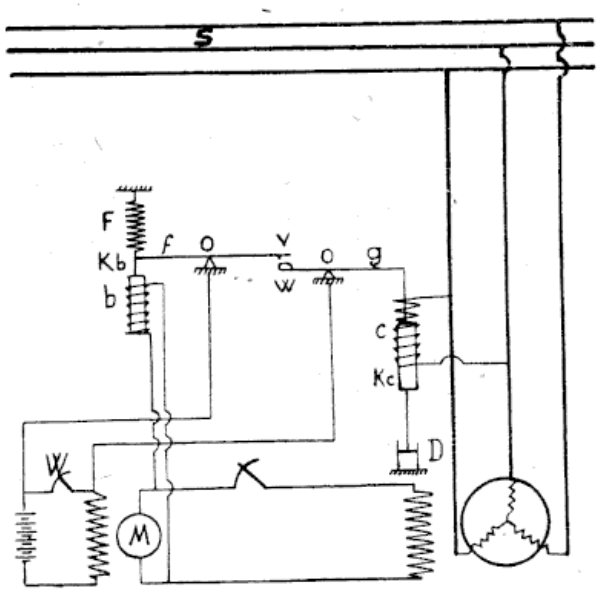


FIG. 1738.

La (*fig.* 1738) montre la disposition générale de l'appareil : le générateur travaille sur le réseau S, dont la tension doit être maintenue constante. Le circuit inducteur du générateur est alimenté par une exci-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tatrice M qui elle-même peut être auto-excitatrice ou être excitée séparément ; c'est ce dernier cas qui a été choisi comme exemple dans la figure. Dans le circuit d'excitation de la machine M est intercalée une résistance W qui est mise en circuit ou court-circuitée par le jeu du régulateur.

Le régulateur consiste en deux leviers de contact f et g mobiles autour des axes o et o'. Le levier f est commandé par la bobine b, dont l'effet dépend de la tension aux bornes de l'excitatrice ; le levier g est commandé par la bobine c, dont l'effet dépend de la tension du réseau, qu'il s'agit de

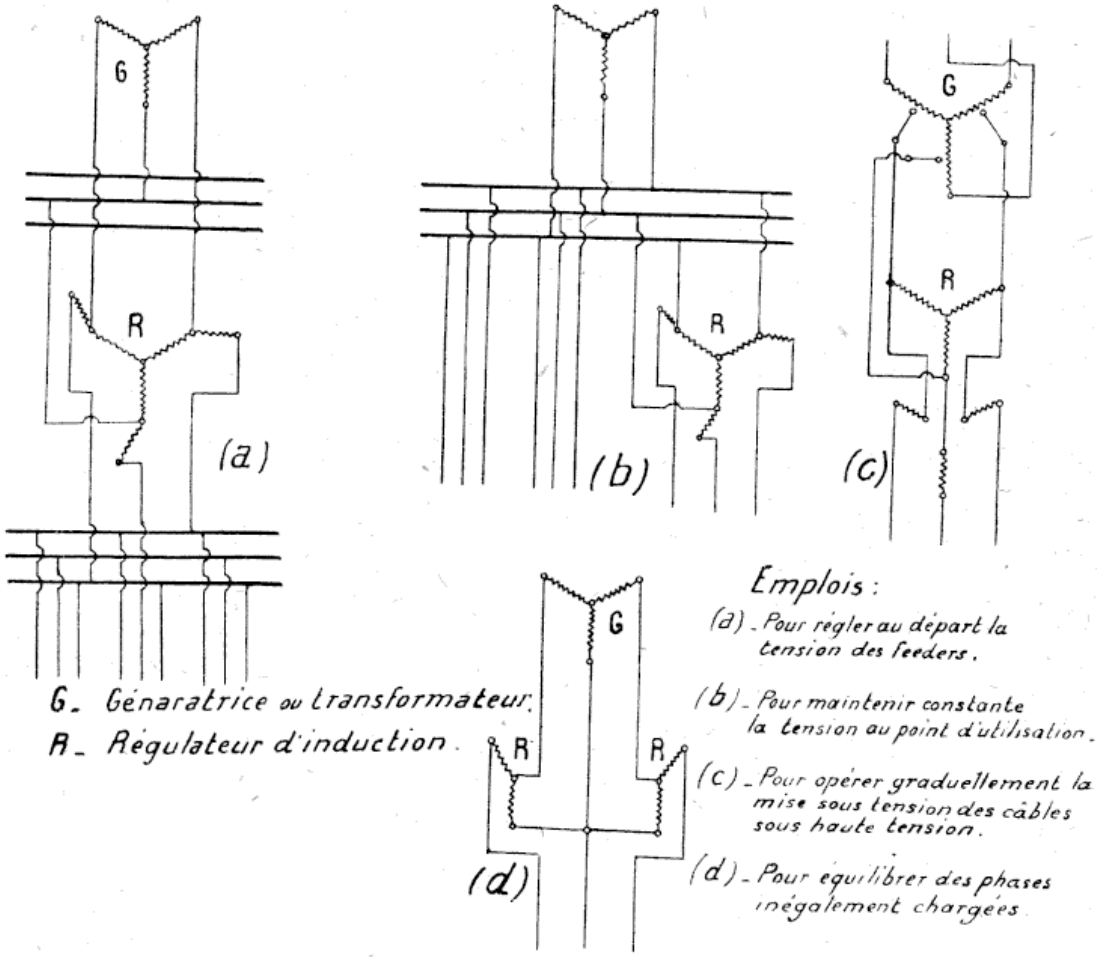


FIG. 1739.

maintenir constante. Chacun des leviers porte un contact v, w par lesquels la résistance W est court-circuitée quand ces deux contacts se touchent.

L'effort (P_b) de la bobine b sur le noyau K_b est équilibré par le ressort F et celui de la bobine c (P_c) est équilibré par le poids du noyau K_c. Les mouvements du levier g sont amortis par la pompe à huile D.

Le régulateur Seidner repose sur le principe suivant : si l'on fait passer en même temps un courant alternatif et un courant continu dans un circuit de résistance invariable, toute augmentation de l'intensité efficace du premier aura pour conséquence une diminution de l'intensité du second.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il résulte en effet de cette propriété que, si le courant alternatif est fourni par l'alternateur à régler et si le courant continu est celui qui alimente les inducteurs de l'excitatrice, toute variation dans le régime de l'alternateur se traduira par une variation dans l'excitation de celui-ci, et l'on peut dès lors, par des connexions convenables de circuits, faire en sorte que la variation du courant d'excitation de l'alternateur ait pour conséquence de maintenir constante la tension aux bornes du réseau. Comme résistance traversée par le courant alternatif et par le courant continu, M. Seidner prend des résistances en fil de fer très fin dont les qualités de stabilité sont depuis longtemps utilisées dans les résistances-ballast des lampes Nernst.

Dans le but d'éviter les à-coups de réglage, la firme Brown-Boveri et Cie a établi des régulateurs spéciaux permettant de faire varier progressivement la tension entre les limites de réglage prévues ; ce sont à proprement parler des régulateurs d'induction.

Ils donnent le moyen de régler la tension aux barres collectrices pour un ou plusieurs feeders dans les usines génératrices (*fig.* 1739) ; de maintenir la tension constante dans les sous-stations réceptrices disposées aux différents points d'utilisation ; d'équilibrer les phases inégalement chargées des réseaux alimentés par des courants polyphasés et enfin d'opérer graduellement la mise sous tension des câbles à haute tension.

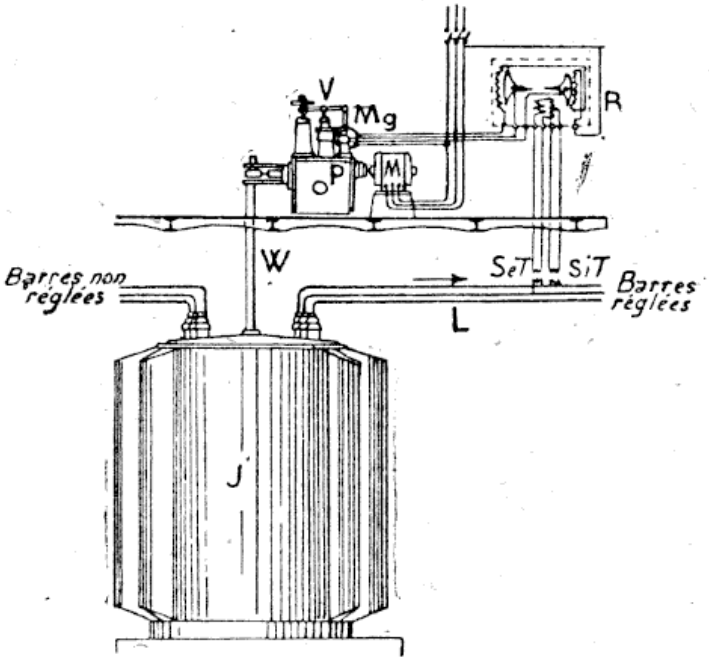


FIG. 1740. — Schéma de montage d'un régulateur d'induction à commande automatique par huile sous pression. (Brown-Boveri).

J, régulateur d induction. — R, régulateur à action rapide — Mg, électro-aimant de commande du servo-moteur. — P, servo-moteur à huile. — M, moteur de commande. — SiT, tran-formateur de compoundage. — SpT, transformateur de tension.

Les régulateurs d'induction Brown-Boveri se construisent en deux types. Dans l'un, on utilise une carcasse de moteur asynchrone généralement à quatre pôles, et le réglage s'effectue par le déplacement du rotor, lequel déplacement se fait, soit à l'aide d'une vis sans fin, actionnée à la main, soit par un volant, soit par l'intermédiaire d'un appareil

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

automatique commandé par le courant de ligne, tel qu'un régulateur Thury.

Dans l'autre, le régulateur d'induction est logé dans une caisse métallique remplie d'huile (*fig.* 1740). Le refroidissement est obtenu soit naturellement, soit à l'aide d'un ventilateur actionné par un moteur auxiliaire.

Les régulateurs Dick, Schwaiger, Dalémont et Herdt, Thieme, Blathy, Compton sont aussi utilisés dans les mêmes cas.

A l'aide du régulateur d'induction Oerlikon on peut régler simultanément, à partir de la centrale, la tension d'une ou plusieurs lignes de départ, soit d'effectuer ce réglage à l'extrémité du feeder d'alimentation, soit au point de consommation même. On peut aussi employer les régulateurs d'induction en guise de transformateurs proprement dits avec réglage de tension secondaire, par exemple pour l'alimentation de moteurs de traction, de fours électriques, etc.

La construction des régulateurs d'induction est, en ce qui concerne les parties actives, semblable à celle des moteurs asynchrones. C'est en quelque sorte un transformateur dont les enroulements peuvent mécaniquement être décalés l'un par rapport à l'autre ; suivant la position du rotor par rapport au stator, la tension totale du rotor ou une composante de celle-ci s'ajoute à celle du stator ou s'en déduit.

Pour des tensions allant jusqu'à 5.000 volts, l'enroulement primaire est branché directement sur la tension du réseau aux régulateurs d'induction monophasés, la phase du courant et de la tension secondaire est indépendante de la position du rotor et sa direction opposée à celle de la phase du circuit primaire. Pour ceux polyphasés, le courant et la tension subissent un décalage en avant ou en arrière, restant sans influence sur $\cos \varphi$. Ce dernier varie de 0,87 à 0,93.

Pour la commande du régulateur d'induction on fait appel à un moteur et à un régulateur qui embrasse le moteur lorsque le voltage s'abaisse ou s'élève (régulateur Thury). L'arbre de ce dernier est accouplé à la vis sans fin du régulateur d'induction soit au moyen d'un renvoi à engrenages, soit directement.

Pour les appareils de grande puissance, on fait appel à deux servomoteurs et les lignes de départ doivent être pourvues d'un appareillage complet de protection contre les surtensions (bobines de self, parafoudres à cornes, déchargeurs).

Soient W la puissance du réseau en kilowatts, E_0 la tension à maintenir constante ($E_1 = E_0 \pm e$), la tension variable, le réglage de tension qu'aura à effectuer le régulateur d'induction est alors $E_1 - E_0$. Dans la plupart des cas, la tension E_0 est une moyenne entre une tension maximum $E_0 - e$ et une tension minimum $E_0 - e$ et les limites de réglage de la tension se trouvent entre $+ e$ et $- e$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'intensité du courant du réseau qui passe par le régulateur d'induction est donnée par la formule :

$$J = \frac{W\ 1.000}{\sqrt{3}\ E_1},$$

si E_1 représente la tension composée variable d'un réseau à courant triphasé.

Pour le choix d'un régulateur d'induction il faut distinguer deux cas :

a) La puissance extérieure maximum W est constante pour toutes les valeurs de la tension variable, on a alors :

$$J = \frac{W\ 1.000}{\sqrt{3}\,(E_0 - e)};$$

Et *b*) la puissance externe est proportionnelle à la tension variable E_1, l'intensité maximum du courant est alors :

$$J = \frac{W\ 1.000}{\sqrt{3}\,(E_0 + e)}.$$

La puissance interne W_1, pour laquelle le régulateur d'induction choisi doit suffire est de :

$$W_1 = \sqrt{3}\ e\ J.$$

$$W_1 = W\frac{e}{E_0 + e} \quad \text{pour } (a) \qquad \text{et} \qquad W_1 = W\frac{e}{E + e}. \qquad (b)$$

Lorsque le réglage ne doit s'opérer que d'un côté, soit $+ e$ ou $- e$, on a alors :

(a) $$E_0 = E_1 + e\,; \quad W_1 = W\frac{e}{E_0}$$

lorsque

$$E_0 = E_1 - e \qquad \text{et} \qquad W_1 = W\frac{e}{E_0 - e};$$

(b) $$E_0 = E_1 + e\,; \quad W_1 = W\frac{e}{E_0}$$

lorsque

$$E_0 = E_1 - e \qquad \text{et} \qquad W_1 = W\frac{e}{E_0 + e}.$$

Il faut toujours, dans le cas (*a*) calculer l'intensité minimum du courant pour la tension minimum E_1 et dans le cas (*b*), l'intensité minimum du courant pour la tension maximum E_1.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rendement peut être approximativement exprimé à l'aide de la formule :

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{100}\,\frac{e}{E + e}} = \frac{1}{1 + \frac{a}{100}\,\frac{W_1}{W}}.$$

Si a désigne la perte approximative d'énergie électrique en 0/0 de W_1.

Les régulateurs de feeders sont basés sur deux principes différents : soit en régulateurs d'induction et en régulateurs à interruption. Les premiers, qui sont les plus employés, peuvent être mono ou polyphasés. Leur automaticité est assurée par un voltmètre à contacts, électrique-

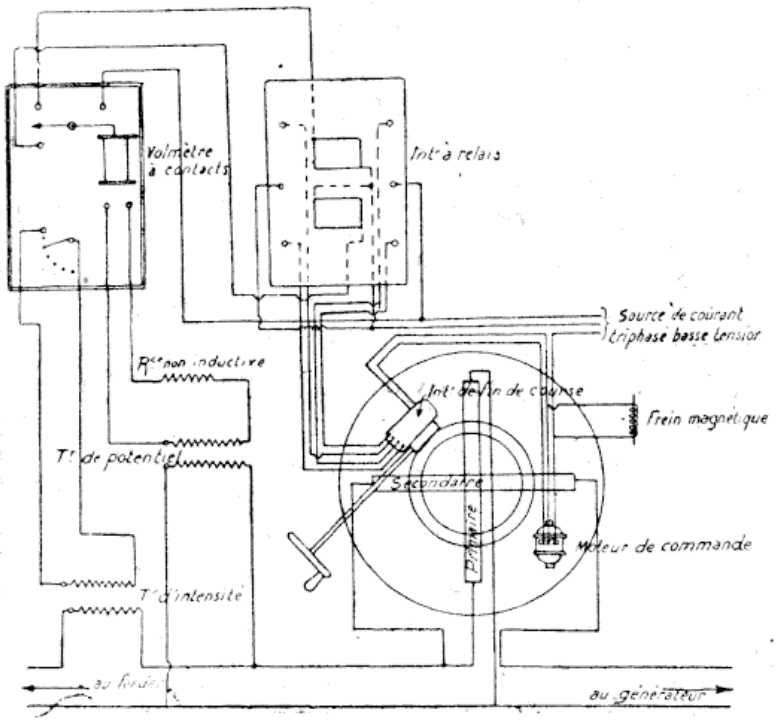


Fig. 1741. — Schéma de montage d'un régulateur de tension pour feeder.

ment reliés à des transformateurs de courant et de potentiel, de sorte que, pour une variation de tension en ligne, en deçà ou en delà de sa valeur normale, une palette mobile ferme le circuit d'un interrupteur à relais qui met en charge un petit moteur fixé sur le bâti de l'appareil. Par l'intermédiaire d'engrenages appropriés, ce moteur déplace l'armature du régulateur jusqu'à sa position stable. Le régulateur proprement dit comprend deux enroulements sur des noyaux de fer laminés placés concentriquement et séparés par un léger entrefer. L'enroulement primaire ou shunt est monté sur un arbre vertical qui supporte la bobine secondaire.

Le régulateur à interruptions est constitué essentiellement par une bobine primaire et une bobine secondaire. Cette dernière comporte plu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sieurs prises reliées à une sorte de commutateur sur lequel viennent appuyer des balais collecteurs solidaires d'un bras mobile actionné, dans les deux sens de marche, par un servo-moteur indépendant auquel il est mécaniquement relié par l'intermédiaire d'engrenages et d'embrayages magnétiques.

En raison de la faible inertie des pièces en mouvement l'appareil est susceptible de corriger toutes les variations de tension sans exiger plus de trois à quatre secondes pour parcourir la totalité de sa course.

610. Compoundage électrique. — Le compoundage électrique ne tient pas compte des variations de tension dues à des variations momentanées ou permanentes dans la vitesse, aux variations de température du bobinage shunt, à l'hystérésis, au facteur de puissance et surtout il ne permet pas de faire varier le degré d'hypercompoundage, cette dernière condition se présentant comme de toute nécessité pour les groupes électrogènes destinés à fonctionner en parallèle. Les générateurs compound sont une solution moins parfaite du réglage de la tension que les modérateurs tensimétriques basés sur les mêmes principes que les régulateurs tachymétriques ; on admet qu'on peut tolérer une certaine variation de la tension et on utilise cette variation elle-même pour commander le rhéostat de réglage de l'excitation. Les modérateurs tensimétriques à action indirecte (les plus usités) se composent, en principe, d'un voltmètre, d'un système de relais et d'un moteur qui commande le rhéostat. Comme pour les modérateurs tachymétriques, dans les systèmes non compensés, la charge est plus faible que la tension à vide, et dans le cas d'une commande indirecte à vitesse constante, il faut prévoir un asservissement faisant réagir le déplacement de la touche du rhéostat sur le tensimètre.

La compensation électrique que l'on obtient avec les modérateurs tensimétriques présente le caractère particulier d'intervenir au moment même où se produit la variation de la charge et avant que le réglage se soit effectué. En réalité, la compensation électrique d'un modérateur tensimétrique est un compoundage indirect, et comme on utilise un effet mécanique, qui est la manœuvre du rhéostat, on la désigne sous l'expression de « compoundage électro-mécanique », proposée par M. L. Routin.

Le régulateur électro-mécanique imaginé par M. L. Routin est tel que le déplacement de l'organe de réglage s'opère avec une vitesse proportionnelle à l'écart qu'il s'agit de corriger. En y adjoignant un accélérateur différentiel, on peut obtenir que le déplacement de l'organe de réglage s'opère avec une vitesse proportionnelle à la différence entre le couple moteur et le couple résistant. La différence qui existe entre le réglage par accélérateur différentiel et le réglage habituel avec asservissement est que,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans le premier cas, la vitesse de manœuvre est fonction de la variation de charge, de l'écart toléré et du poids du volant, tandis que dans le second cas la vitesse de manœuvre est à peu près constante. Le réglage habituel avec asservissement donne, en général, lieu à un certain nombre d'oscillations et ces oscillations ne peuvent être évitées qu'à condition d'adopter une vitesse de manœuvre suffisamment rapide. Mais alors le réglage s'opère par à-coups.

Le réglage électro-mécanique convient tout particulièrement bien aux groupes électrogènes conduits par des turbines hydrauliques. En effet, pour une admission constante, à la condition que l'on ne s'écarte pas trop de la vitesse normale, le travail moteur reste sensiblement constant et pratiquement indépendant de la vitesse ; dans l'hypothèse où la charge reste elle-même constante, on pourra donc, en agissant lentement sur l'excitation, corriger les petites variations de vitesse sans qu'il soit nécessaire de mettre à nouveau en action le régulateur de tension qui agit sur l'admission du fluide moteur.

Lorsqu'il s'agit de maintenir constante la tension fournie par une génératrice électrique, le régulateur se compose en principe d'un voltmètre, d'un système de relais et d'un moteur qui agit sur le rhéostat d'excitation.

La (*fig.* 1742) donne le schéma des connexions : (1) est un fléau de balance mobile autour du point (2) ; (3) est une bobine mobile suspendue au fléau (1) et sur laquelle le champ magnétique créé par les bobines (4) et (5) développe un effort vertical dirigé de haut en bas ; (3), (4), (5) sont connectées en série avec une résistance auxiliaire (6) et ce circuit est relié aux bornes du générateur dont il s'agit de régler la tension.

Le contrepoids (7) sert à équilibrer l'effort développé sur (3). On peut modifier à volonté la valeur de la tension normale sans avoir à toucher au contrepoids, en agissant sur un écrou (8) qui bande plus ou moins un petit ressort (9) fixé au fléau.

Lorsque la tension est, par exemple, trop forte, le couple antagoniste développé sur (3) l'emporte sur le couple fourni par (7) ; le fléau s'incline et un contact s'établit entre (10) et (11).

Le circuit de l'électro (13) est alors parcouru par un courant dérivé entre les points (14) et (15) d'une résistance utilisée comme potentiomètre et reliée en (17 et 18) à une source de courant continu.

L'électro (13) attire son armature (19) qui, pivotant autour de (20), vient appliquer le contact en charbon mobile (21) contre le contact en charbon fixe (22) ; l'induit (23) du moteur qui commande le rhéostat (moteur à excitation constante) est alors mis en rotation dans le sens qui entraîne la diminution de l'excitation. Dès que le contact est rompu entre (10) et (11), l'armature (19) est rappelée par un ressort non figuré

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au schéma) qui vient appliquer (21) contre (24) ; les balais de l'induit se trouvent ainsi mis en court-circuit, ce qui provoque l'arrêt brusque du moteur par freinage électro-magnétique.

Lorsque la tension est trop faible, le fonctionnement de l'appareil s'explique d'une manière analogue ; les organes qui entrent en jeu sont alors ceux qui sont désignés au schéma par des chiffres pourvus d'indices (19′), etc... Il suffit de remarquer que le contact entre (21′) et (22′) aura pour effet de faire tourner l'induit dans le sens qui entraîne l'augmentation de l'excitation.

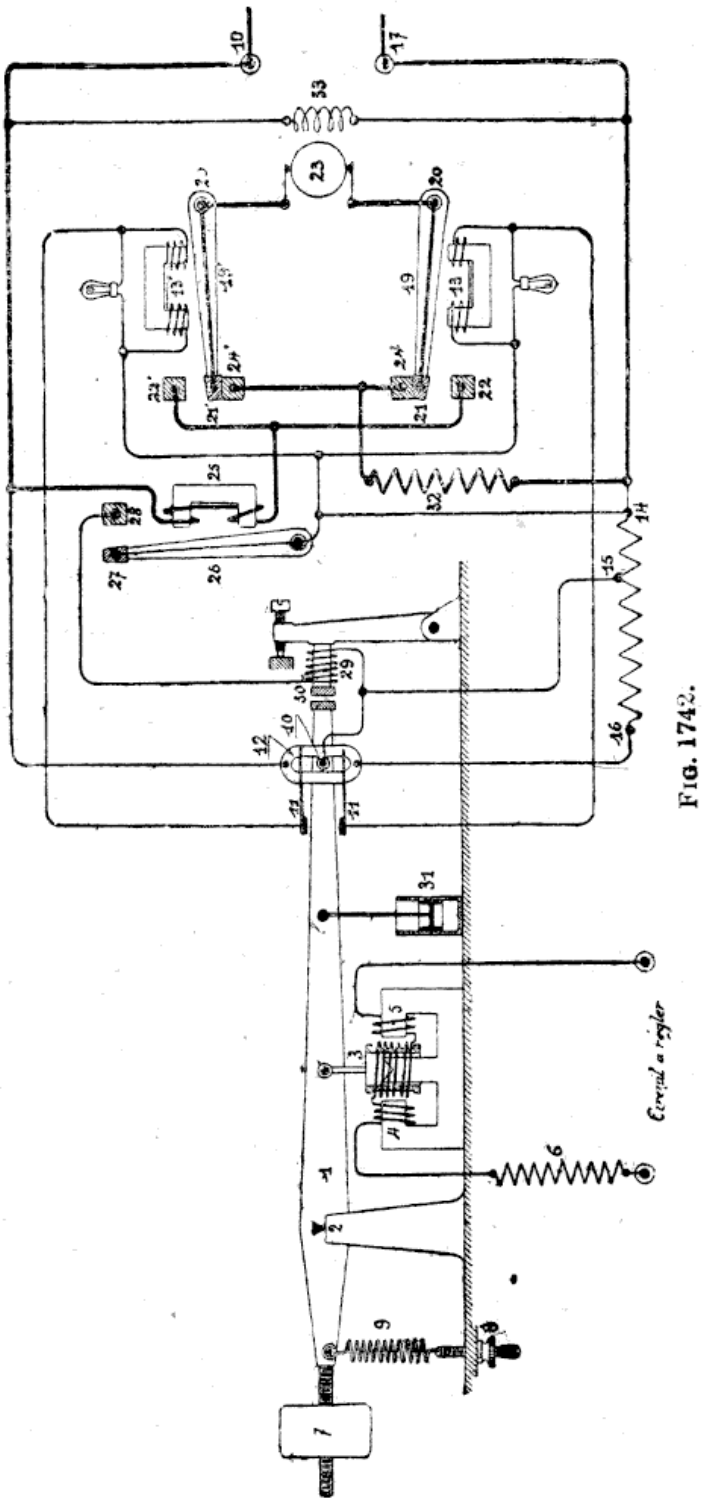


FIG. 1742.

Pour limiter le courant de démarrage, on intercale une résistance fixe dans le circuit de l'induit. Des butées d'arrêt, non figurées au schéma, servent à limiter la course du fléau.

Chaque fois que le courant est lancé dans le moteur, l'électro (25), qui est parcouru par le courant de l'induit, attire son armature (26) ; le contact en charbon, mobile (27), s'applique contre le contact en charbon fixe (28), et ferme le circuit de l'électro d'avertissement (29) alimenté, comme les relais, par une dérivation prise en (14) et (15) sur le potentiomètre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cet électro (29) (*fig.* 1743) attire une armature de fer doux (30) fixée à l'extrémité du fléau. Comme l'électro est disposé de façon à se trouver en face de son armature lorsque le fléau est horizontal, son action a toujours pour effet de développer sur le levier un couple qui agit en sens inverse de la variation de tension qu'il s'agit de corriger ; l'effet produit est donc bien en tous points comparable à celui d'un asservissement. La compensation est d'ailleurs instantanée, car l'asservissement cesse dès que le contact est rompu entre (10) et (11) ou (11′).

Tant que la variation de tension est supérieure à une certaine valeur qu'il est toujours possible de limiter d'avance en réglant convenablement

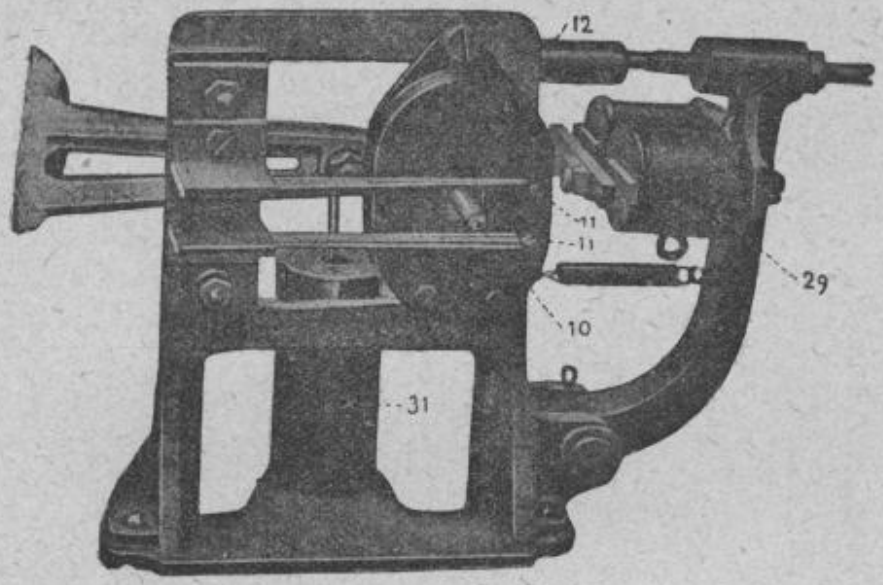


FIG. 1743.

la distance de (29) à (30), le contact entre (10) ou (11′) est maintenu malgré l'action de (29) sur (30) et l'induit tourne d'un mouvement continu à sa vitesse maxima. Mais lorsque la variation de tension se trouve réduite à la valeur assignée, le contact entre (10) et (11) ou (11′) se trouve brusquement rompu chaque fois que le courant est lancé dans l'induit. L'impulsion reçue par le fléau est amortie dans la cataracte à air (31) ; puis l'action de (29) sur (30) se trouvant supprimée, le fléau s'incline à nouveau pour rétablir un nouveau contact tant que la tension n'a pas été ramenée à sa valeur normale. L'induit ne tourne plus alors que par à-coups et sa vitesse moyenne se trouve d'autant plus réduite que la variation de tension qui reste à corriger est plus faible car, tandis que les impulsions successives communiquées au fléau pour éloigner (10) de (11) ou (11′) vont croissant à chaque instant, le couple qui tend après chaque rupture à ramener (10) vers (11) ou (11′) va au contraire en décroissant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour assurer la bonne conservation des contacts, M. Routin a mis en œuvre deux moyens distincts : le premier vise la fermeture franche et la rupture brusque des contacts et le second la réduction automatique du courant qui actionne le relais, avant la rupture du contact.

Pour bien comprendre le rôle que joue la magnétisation de la tige (10) il est nécessaire de considérer au préalable comment varient, en fonction de la distance entre (10) et l'un des fils de contact (11), l'attraction magnétique et le couple élastique développé par la flexion du fil antagoniste (11).

Si l'on suppose tout d'abord (10) immobile, et si l'on figure horizontalement sur l'axe (ox) (*fig.* 1744) la distance entre (10) et (11) et verticalement sur l'axe (oy) les couples, on voit de suite que le couple développé sur le fil d'acier (11) par l'attraction magnétique est représenté par une courbe hyperbolique telle que AB, tandis que le couple élastique développé par la flexion du fil (11) est représenté par une droite telle que CD. La distance OD correspond évidemment à la distance entre (10) et (11) lorsque celui-ci est au repos et ne développe aucun couple élastique. La distance OD peut donc servir à définir la position de (10).

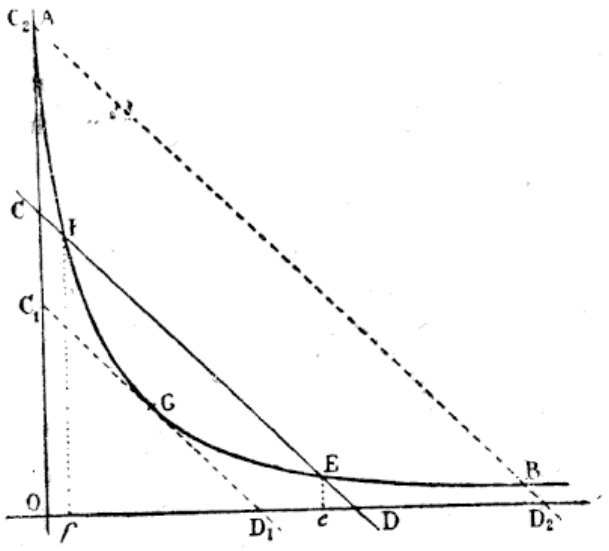


FIG. 1744.

Désignons par E et F les points de rencontre de CD et de AB, et par (e) et (f) les projections respectives de E et de F sur l'axe des x. Tant que la distance du ressort à l'aimant est supérieure à Oe, le couple magnétique est plus fort que le couple élastique ; mais celui-ci devient ensuite prépondérant. Pour une position déterminée de (10) le ressort, abandonné à lui-même, se placera donc à la distance Oe qui correspondrait à une position d'équilibre stable.

Si on déplaçait à la main le ressort de façon à réduire la distance à Of l'attraction magnétique redeviendrait prépondérante et le ressort serait attiré brusquement jusqu'au contact.

Lorsqu'on déplace (10), la droite CD se déplace parallèlement à elle-même. En considérant en particulier la tangente C_1D_1, on voit que lorsque (10) aura été amené dans la position définie par OD_1, le ressort sera brusquement attiré jusqu'au contact, car les deux points E et F étant alors confondus au point G, il n'y a plus de position d'équilibre stable intermédiaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'effort qui applique le ressort contre l'aimant est mesuré par la longueur AC_1. Le contact sera donc toujours établi d'une manière franche. Ce premier résultat est particulièrement appréciable lorsqu'il s'agit de régler la tension d'un générateur fournissant des courants alternatifs, car les vibrations auraient tôt fait, sans cette précaution, de mettre le contact hors service.

On voit de plus que, lorsque le fil (11) aura été amené au contact de la tige aimantée, il faudra déplacer cette dernière jusqu'à la position correspondant à OD_2 pour obtenir la rupture du contact ; le fil (11) s'écartera alors brusquement de la quantité $D_1 D_2$. Ainsi se trouve réalisée la seconde condition indispensable pour la bonne conservation du contact.

Lorsque (1) est au voisinage de la position horizontale, l'action de (10) sur (11) est négligeable ; d'autre part, lorsque (10) est en contact avec (11) le couple développé autour de (2) par l'attraction de (10) sur (11) est toujours de beaucoup inférieur à celui qui est développé autour du même point par l'action de (29) sur (30) et qui agit en sens inverse ; on n'a donc pas à craindre que l'action de (10) sur (11) puisse troubler le réglage.

Lorsque l'armature (19) a été attirée, l'entrefer se trouvant pratiquement nul, on peut diminuer considérablement le courant qui circule dans (13) sans avoir à craindre le relèvement de (20) sous l'influence du ressort de rappel. Pour obtenir automatiquement cette réduction de courant, on détermine le bobinage (29) de façon que la résistance de ce circuit soit très petite par rapport à la résistance de la partie (14-15) du potentiomètre. Au moment où (27) vient en contact avec (28) la partie du potentiomètre comprise entre (14) et (15) se trouve shuntée et la tension entre (14) et (15) peut être ainsi réduite à volonté ; on limite d'ailleurs très facilement l'augmentation de courant qui en résulte dans le potentiomètre en donnant à la partie qui reste en service une résistance beaucoup plus grande que celle de la partie shuntée.

La tension entre (14) et (15) peut être ainsi réduite à une fraction déterminée de sa valeur initiale.

Sur les régulateurs vibrants (genre Tirrill), le régulateur, que nous venons de décrire, présente l'avantage de s'appliquer aux survolteurs-dévolteurs placés aux centres d'utilisation, de rendre stable l'équilibre qui doit exister à l'état de régime entre le couple moteur et le couple résistant. Relativement aux régulateurs à vitesse de manœuvre constante (genre Thury) il a la supériorité d'opérer les corrections des circuits avec une très grande rapidité. Enfin, comparé aux régulateurs à relais électriques, il présente l'avantage d'une suppression à peu près complète des étincelles et des ratés.

Dans la plupart des centrales électriques on a l'habitude de prévoir autant de régulateurs qu'il y a de groupes et ce n'est qu'exceptionnelle-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment que l'on rencontre le réglage central qui permet de commander à l'aide d'un seul régulateur l'ensemble des servo-moteurs de tous les groupes en service sur un même réseau.

Cette dernière solution est cependant tout à la fois plus rationnelle et plus économique ; en particulier dans le cas où il s'agit de groupes fournissant l'énergie sous forme de courant alternatif ; comme tous les groupes électrogènes tournent rigoureusement à la même vitesse, il est *a priori* évident qu'il suffit d'un seul appareil pour mesurer la vitesse commune à tous les groupes. Au surplus on assure ainsi une répartition uniforme de la charge totale, car les degrés d'admission sont alors les mêmes pour tous les groupes en service.

En outre, le développement atteint par les distributions d'énergie a posé le problème nouveau du réglage de plusieurs usines accouplées sur un même réseau, et qui peuvent être distantes de plusieurs centaines de kilomètres. Le réglage central reste applicable dans ce cas à la seule condition d'avoir un servo-moteur approprié.

Le servo-moteur électrique Gramont et L. Routin résoud complètement ce problème. L'appareil se compose en principe d'un moteur à courant continu à excitation constante, actionné par un générateur à tension variable ou générateur auxiliaire. Sur le circuit de l'induit du moteur se trouve intercalé un interrupteur inversé commandé par un interrupteur central. Au repos cet induit est mis en court-circuit. Le rhéostat d'excitation du générateur auxiliaire peut être commandé à l'aide d'un différentiel, soit par le déplacement de l'organe qui règle l'admission du fluide moteur, soit par le régulateur central. L'asservissement est produit par le jeu du différentiel.

Au poste central se trouve un moteur asynchrone dont le rotor est alimenté en monophasé et dont le stator porte un bobinage triphasé. Les inventeurs désignent cet organe sous le nom de « transmetteur d'ordres ». Le rotor est commandé par l'induit du régulateur central. Chaque servo-moteur comporte un récepteur d'ordres constitué comme le transmetteur du poste central.

La mise en service et celle hors service des groupes électrogènes peuvent être obtenues automatiquement. Tous les récepteurs d'ordres doivent, dans ce cas, rester continuellement en service. On peut commander très facilement un grand nombre de servo-moteurs à l'aide d'un seul transmetteur, car l'énergie qu'a à fournir le poste central est toujours de peu d'importance. Au reste comme la transmission s'effectue en courants alternatifs, il est toujours loisible d'employer au besoin des transformateurs statiques pour élever la tension des transports et diminuer le prix de la ligne spéciale. Comme coût de la ligne, on estime qu'elle équivaut à une fois et demie celui d'une ligne téléphonique. Pour l'exécution des ordres, on a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donné la préférence au courant continu en raison des avantages qu'il présente, tant pour le démarrage que pour le freinage. Pour éviter les à-coups au démarrage on a utilisé la méthode bien connue de Ward Léonard.

On sait que les réactances sont employées pour prévenir les effets des courts-circuits et par suite les avaries et détériorations que ceux-ci déterminent.

Ces réactances, quand elles sont insérées dans l'alternateur même, conviennent bien pour des machines de fréquence 50, mais dès qu'on descend à 25 périodes, l'augmentation de la réactance intérieure, pour de grosses génératrices, augmente considérablement le prix de celles-ci. Il est préférable alors d'insérer la réactance entre l'alternateur et le tableau qui procure une protection efficace des machines et des interrupteurs ; cependant les interrupteurs de feeders sont exposés à une surcharge dangereuse en cas de court-circuit sur ce feeder et on voit ainsi que la sécurité absolue de l'exploitation n'est pas assurée.

Si l'installation comporte des transformateurs élévateurs, ces appareils peuvent remplir le rôle de bobines de réactance, à condition de posséder une réactance convenable.

La réactance introduite en série dans les feeders conduit à une solution très intéressante, si on peut installer sur le réseau des machines ou condensateurs synchrones. Cependant il apparaît qu'on peut, le plus souvent, dimensionner les réactances de manière à se tenir dans les limites de tension admissibles, tout en assurant une protection efficace, ce qui permet d'éviter des installations supplémentaires coûteuses. Dans certains cas, il est d'ailleurs possible de grouper les feeders et de diminuer le nombre des réactances à insérer en les remplaçant par une réactance unique.

Enfin la réactance peut être intercalée dans les barres omnibus ; alors elle exerce une action particulièrement efficace pour les alternateurs même lorsque, au moment du couplage en parallèle, les génératrices ne sont pas en concordance de phase. Mais ce système offre l'inconvénient que les alternateurs branchés sur des sections différentes fonctionnent sous des voltages présentant entre eux un certain déplacement angulaire.

En résumé, les meilleurs résultats sont obtenus dans chaque cas en choisissant la combinaison reconnue la plus satisfaisante en tenant compte du matériel à protéger. Il convient en outre de déterminer les proportions les plus avantageuses à donner aux réactances en ayant égard à la grandeur des puissances en jeu et à la valeur des constantes électriques de la distribution..

Des dispositions bien comprises permettent d'assurer le fonctionnement parfait de stations de grande puissance. Telle une station de 100.000 kilowatts composée de sept génératrices dont quatre de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

10.000 kilowatts et trois de 20.000 kilowatts. Dans cette installation les feeders sont de 2.000 et 5.000 kilowatts. Les feeders de 2.000 kilowatts peuvent être réunis en groupes de 10.000 kilowatts.

611. Caractéristiques de marche des alternateurs asynchrones. — On reconnaît aujourd'hui la supériorité des alternateurs à pôles alternés. Ils sont toujours multipolaires et, comme nous l'avons vu, le nombre de pôles varie suivant la fréquence ($f = pn$) désirée et la vitesse angulaire de l'organe mobile (p, nombre de pôles, et n, nombre de tours par seconde). Dans les alternateurs spécialement destinés à alimenter des moteurs, il convient de saturer non seulement les extrémités des pièces polaires, mais aussi le noyau du système inducteur.

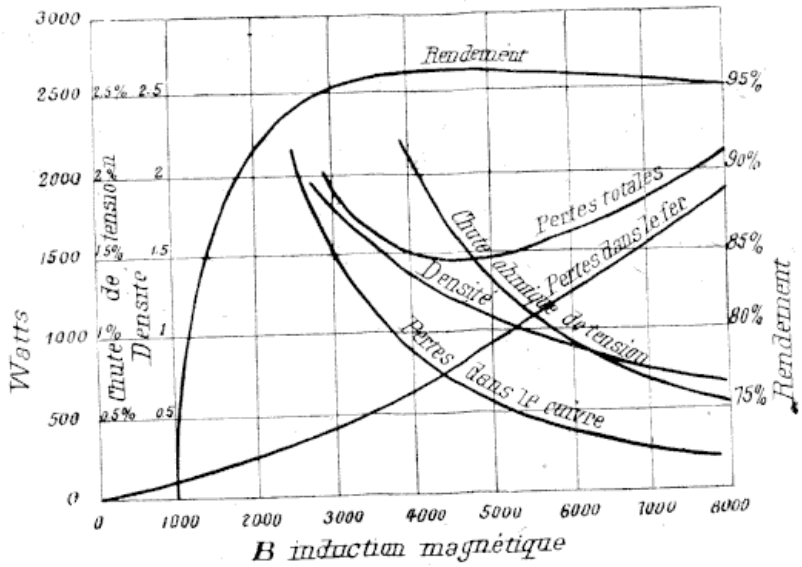


FIG. 1745. — Caractéristique d'un alternateur.

Le seul inconvénient des alternateurs asynchrones est qu'ils ne peuvent fournir de courant magnétisant et qu'ils exigent un courant de cette nature pour leur excitation. Mais pour des alternateurs de grande puissance, à la fréquence de 25 à 60 périodes, le courant magnétisant à fournir à ces machines ne constitue néanmoins pas une grande difficulté, seulement ils ne peuvent fournir du courant décalé en arrière du réseau. D'autre part, à cause du petit entrefer, le courant nécessaire à l'excitation des alternateurs asynchrones d'une installation donnée varie, d'un quart à une moitié de celui nécessaire à une station synchrone de même puissance. Au point de vue des courts-circuits et de la résonance, le générateur asynchrone présente un contraste absolu avec le générateur synchrone. Dans le cas d'un court-circuit, avec les générateurs asynchrones, le voltage tombe à zéro, donc il ne fournit aucun courant ; la force électromotrice de ces générateurs est sinusoïdale pour toute charge, et il n'y a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

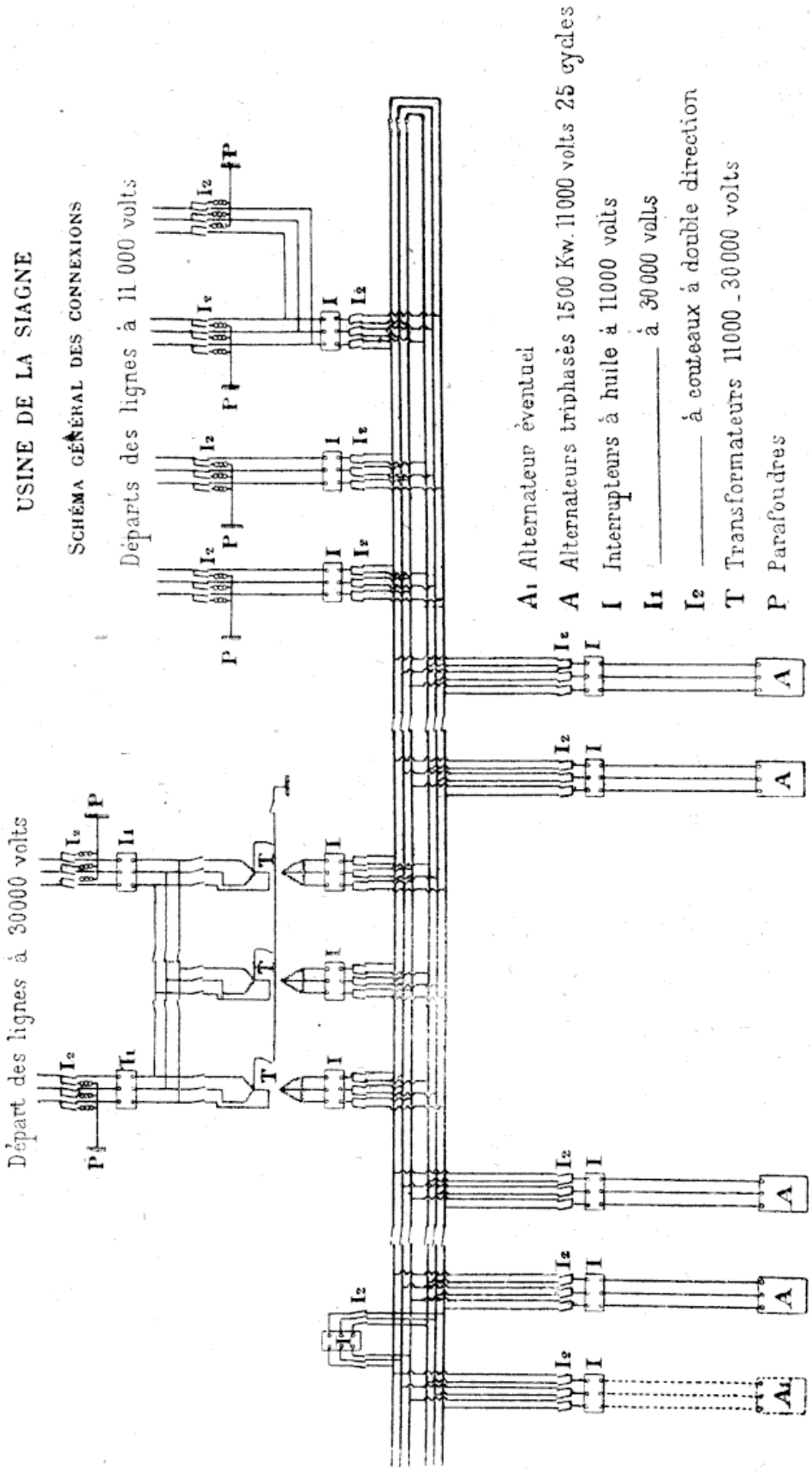


FIG. 1747. — Usine de la Siagne. — Schéma général des connexions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas tendance à introduction des plus hauts harmoniques formant résonance. Au contraire, avec les générateurs ou moteurs synchrones il y a accroissement subit de courant ou choc, et à cause de la réaction de l'armature vers la charge, les ondes sont distordues et très variables avec l'amplitude et la charge du courant, de sorte qu'il y a introduction d'harmoniques formant résonance.

Les harmoniques, même dans la marche à vide peuvent entrer en résonance quand l'alternateur est branché sur un réseau de grande capacité. Malgré l'emploi des encoches ouvertes dans les alternateurs à haute tension, les progrès dans la construction de ces derniers font que la courbe de tension à vide est une sinusoïde parfaite. Ces progrès consistent presque tous à donner aux pièces polaires des profils appropriés et à les incliner d'un angle déterminé par rapport à la direction des encoches de l'induit. Pour chaque position de l'inducteur, les encoches couvrent la même surface polaire totale, de telle sorte que les fluctuations provenant des variations de la valeur de la réluctance ne se produisent plus.

On constate des dispositions avec pôles droits mais dans lesquels l'arête des pièces polaires est taillée en biseau à la fraise. Les pôles sont quelquefois simplement droits mais partagés en gradins. D'autre part la forme, le nombre des encoches, la saturation dans les dents et les cornes polaires exercent une influence salutaire sur l'allure de la force électromotrice instantanée de la machine.

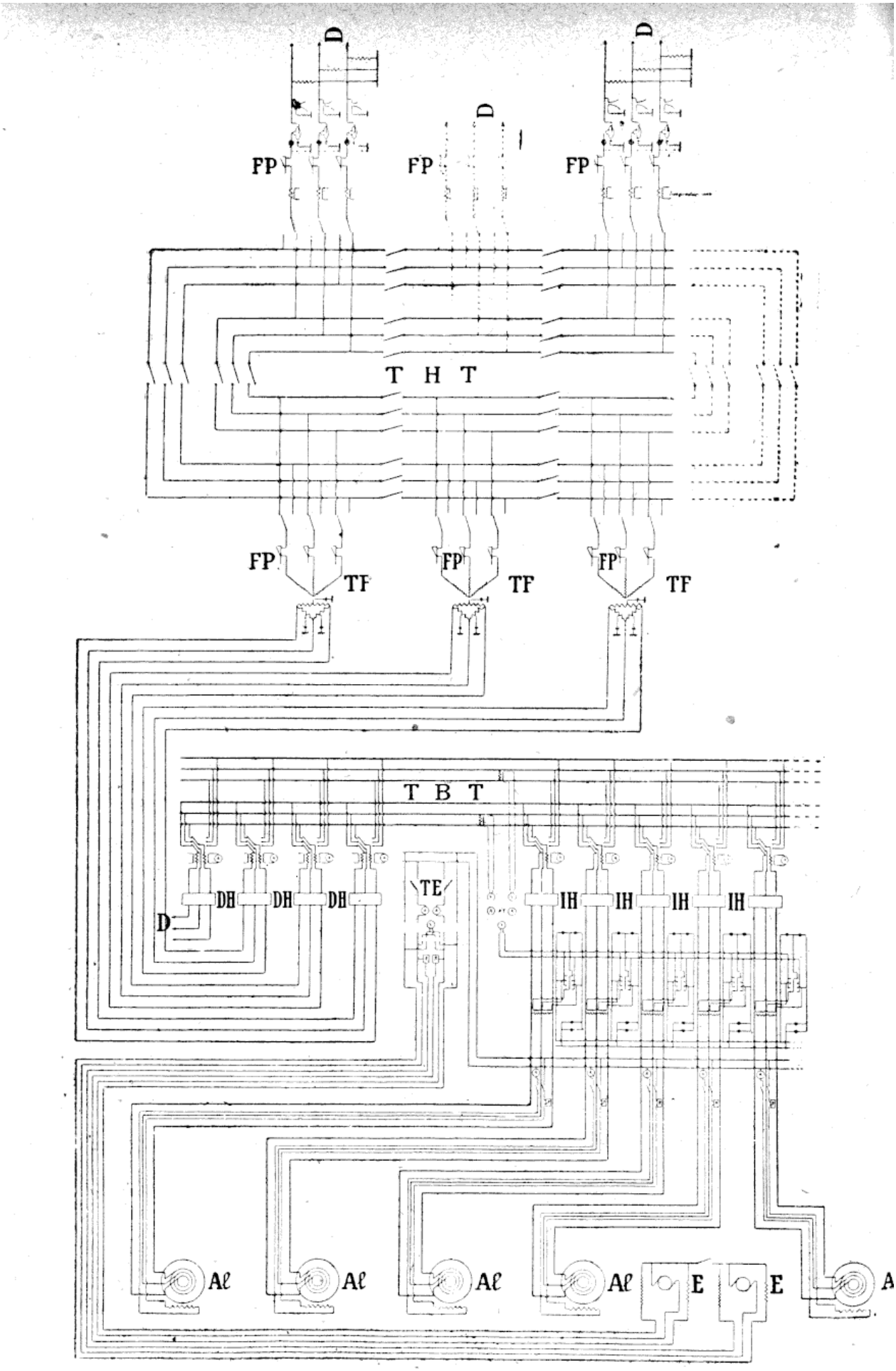
Nous ne signalerons ici que pour mémoire les circuits amortisseurs à cause de l'obstacle qu'ils opposent aux phénomènes de haute fréquence. On complète ces dispositions en montant les bobines inductrices sur des formes métalliques.

Pour que la courbe de tension en charge d'un réseau se rapproche, elle aussi, de la sinusoïde, on incline également par rapport à l'axe de la machine les pôles inducteurs des moteurs synchrones. De même pour les rotors des moteurs d'induction.

Les alternateurs asynchrones sont tout indiqués pour la commande par turbines ; au double point de vue mécanique et électrique, ils s'adaptent parfaitement à la marche à grande vitesse et leur construction s'y prête beaucoup mieux que les alternateurs synchrones, et le prix en est sensiblement plus réduit. Le rotor en cage d'écureuil, à fortes barres de cuivre contenues chacune dans une encoche presque sans isolement, est très robuste et peut supporter de très hautes températures. En raison de cette simplicité, l'alternateur asynchrone est moins coûteux de construction que l'alternateur synchrone.

Lorsque les alternateurs asynchrones alimentent des commutatrices, il devient inutile d'installer à l'usine génératrice des machines synchrones. La première commutatrice mise en circuit est amenée à sa vitesse nor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Al, alternateurs. — D, départ des lignes. — DH, disjoncteurs à huile. — E, excitatrices. — FP, fusibles à perche. — IH, interrupteurs à huile. — TBT, tableau à basse tension. — TE, tableau d'excitation. — THT, tableau à haute tension. — TF, transformateurs.

FIG. 1748. — Usine de Tusciano. Schéma des connexions de l'usine génératrice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

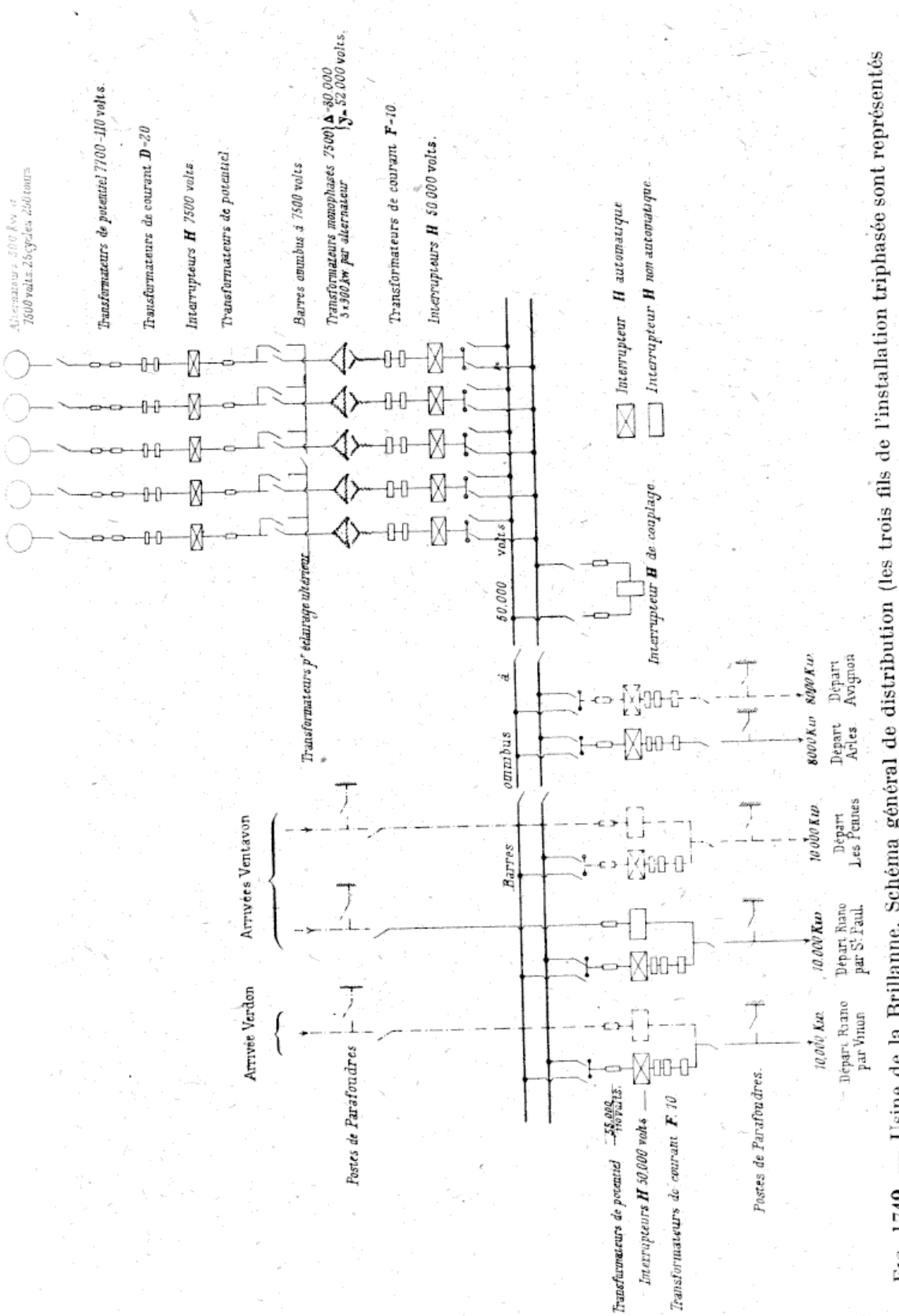


FIG. 1749. — Usine de la Brillanne. Schéma général de distribution (les trois fils de l'installation triphasée sont représentés par un seul trait).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

male au moyen du courant continu et couplée avec l'alternateur. Elle lui fournit le courant magnétisant et la tension est fixée par l'excitation de la commutatrice.

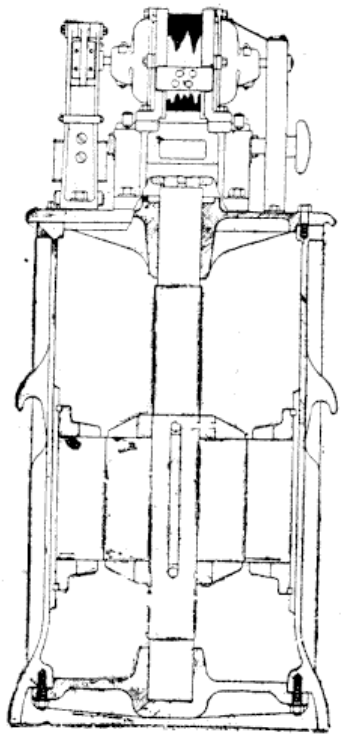


FIG. 1750. — Régulateur de feeders Thomson-Houston. Coupe diamétrale du régulateur à huile.

On constate que le facteur de puissance d'un alternateur asynchrone peut être rendu pratiquement constant depuis la demi-charge jusqu'à 25 0/0 de surcharge, c'est-à-dire que l'intensité du courant magnétisant nécessaire à l'alternateur, pour toutes ses charges usuelles, est pratiquement proportionnelle à l'intensité du courant watté. Alors, en admettant qu'on puisse négliger le courant de charge du réseau, si l'on a un certain nombre de commutatrices en marche, on peut régler l'excitation shunt de chacune d'elles de façon à obtenir la tension voulue à vide et l'excitation série, de façon à faire varier le voltage avec la charge suivant telle courbe qu'on voudra, les commutatrices compoundant ainsi les alternateurs par leur excitation série. Ce compoundage des alternateurs, à mesure que la charge augmente dans le réseau d'une quelconque des sous-stations, affecte naturellement toutes les autres sous-stations alimentées par ces alternateurs ; il peut donc y

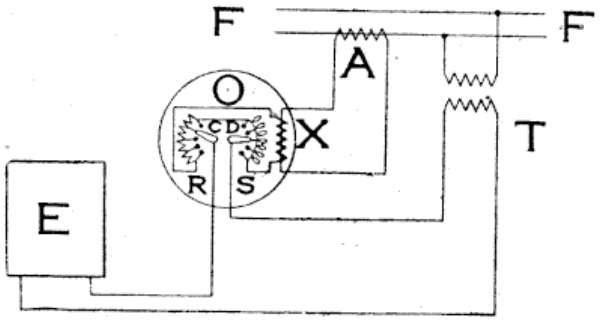


FIG. 1751. — Régulateurs de feeder monophasé système Thomson-Houston. Principe de la compensation à facteur de puissance variable.

FF, Feeder soumis à la compensation. — T, Transformateur de potentiel. — A, Transformateur de courant. — E, Relais compensé par le dispositif. — O, Appareil de réglage. — X, Transformateur commandant la compensation — R, Résistance réglable. — S, Inductance réglable. — GD, Commutateurs réglant la résistance et l'inductance.

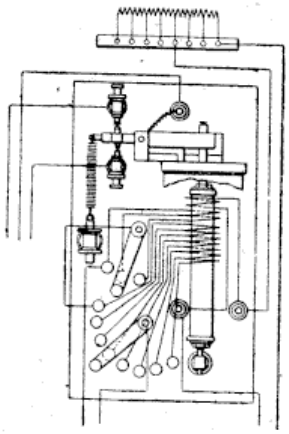


FIG. 1752. — Régulateur de feeder monophasé système Thomson-Houston de commande du moteur. Connexions du relais volmétrique.

avoir intérêt, dans certains cas, à introduire des self-inductions artifi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cielles dans les circuits d'alimentation des commutatrices, de façon à sur-compounder ces circuits plutôt que les alternateurs et à éviter les perturbations de voltage dans les autres sous-stations non chargées.

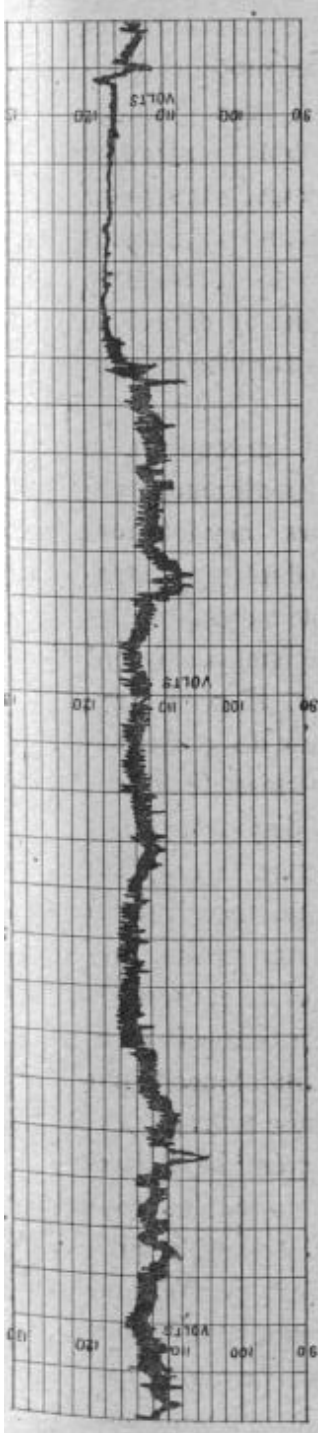


Fig. 1753. — Régulateur de feeders (Thomson-Houston). Variation de la tension (avant réglage).

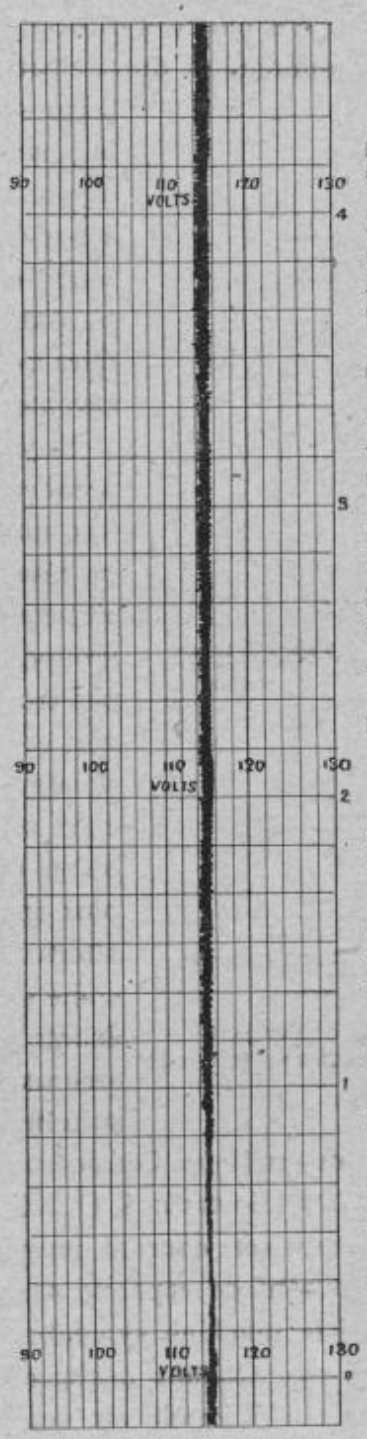


Fig. 1754. — Régulateur de feeders (Thomson-Houston). Variation de la tension. Régulateur BR.

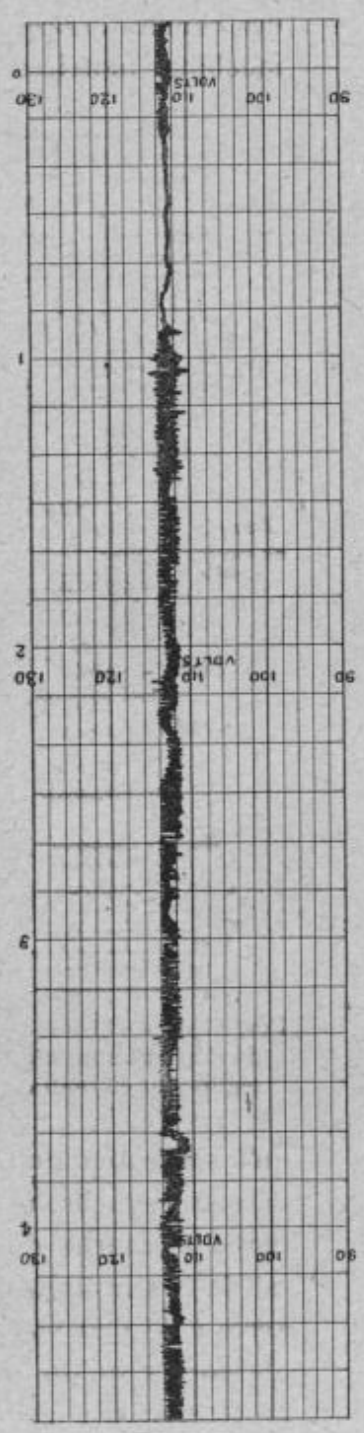


Fig. 1755. — Régulateur de feeders (Thomson-Houston). Variation du réglage. Régulateur du type IR.

Dans une usine génératrice équipée avec des alternateurs asynchrones, l'absence d'excitatrices et de circuits d'excitation rend les connexions du tableau très simples et les manœuvres très faciles. On n'a pas à synchro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

niser les alternateurs ; il suffit de les amener à la vitesse normale et de les coupler sur le réseau en mettant en série avec eux une bobine de self pour limiter l'intensité du courant. La bobine de self est mise alors en court-circuit, les alternateurs s'excitent automatiquement par l'intermédiaire des commutatrices, et l'on n'a plus à s'en occuper. Les régulateurs des machines motrices sont commandés du tableau par des moteurs électriques, et l'on peut répartir la charge à volonté entre les divers alternateurs sans avoir à régler l'excitation pour maintenir constant le facteur de puissance, comme on devrait le faire avec les alternateurs synchrones.

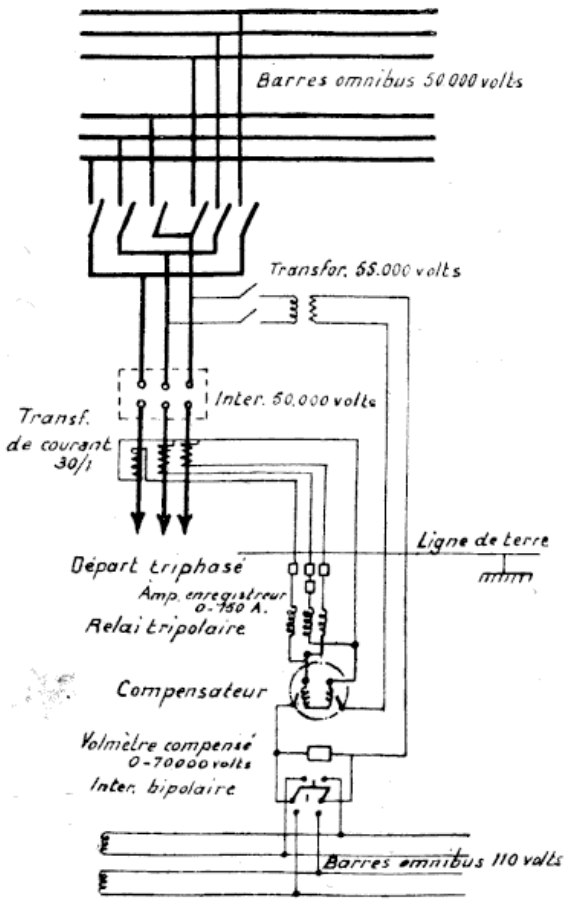


FIG. 1756. — Usine de la Brillanne. Schéma du départ triphasé à 50.000 volts prévu avec régulateur en bout de ligne.

Il y a une précaution à prendre lorsqu'on alimente avec des alternateurs asynchrones un réseau possédant une capacité considérable : c'est que les groupes électrogènes ne soient pas trop faibles. Il peut arriver, en effet, que des perturbations sur la ligne fassent déclencher plusieurs disjoncteurs et qu'en conséquence il ne reste plus en fonctionnement qu'un alternateur et une petite machine synchrone. Le courant de charge du réseau tendrait alors à surexciter les machines et par suite à élever leur voltage jusqu'à saturation du circuit magnétique. Considérons, par exemple, l'alternateur asynchrone de 2.000 kilowatts à 11.000 volts, auquel se rapporte la courbe de la figure, son courant magnétisant à 11.000 volts est de 9 ampères. Si le courant de capacité des câbles est de 100 ampères à 11.000 volts et si la machine synchrone est assez petite pour n'absorber qu'un courant magnétisant négligeable, il est probable que la tension des génératrices s'élèverait au double de la tension normale. Si, au contraire, les machines les plus faibles travaillant sur le réseau étaient un alternateur de 11.000 kilowatts et un moteur synchrone ou une commutatrice de 1.500 kilowatts, la surtension ne dépasserait pas 10 0/0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit (*fig.* 1757) que l'intensité du courant watté est dans un rapport défini avec celle du courant déwatté, et que le courant watté et par conséquent la charge de la machine ne peuvent pas varier sans que le courant déwatté varie aussi. En outre, pour chaque point de la courbe, le glissement de l'alternateur asynchrone en avant de la machine synchrone a une valeur bien déterminée. Donc, lorsqu'un court-circuit survient dans un réseau alimenté par un alternateur asynchrone ou un alternateur ou moteur synchrone, c'est la machine synchrone qui supportera le court-circuit.

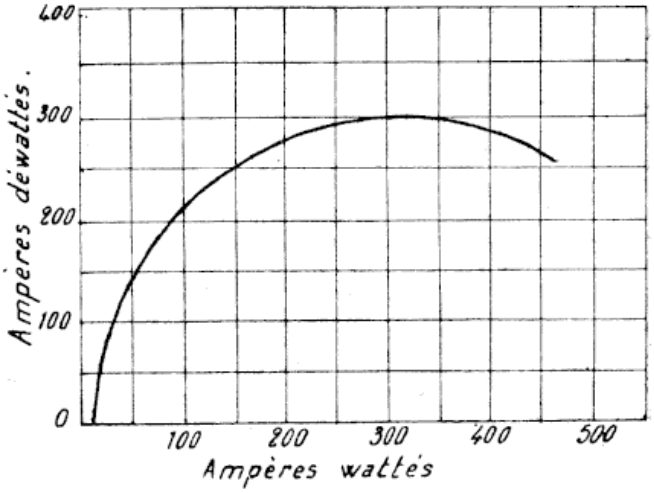


FIG. 1757.

Dans les usines génératrices d'importance secondaire, fournissant l'énergie directement aux circuits de lumière et de force motrice, les conditions ne sont pas aussi favorables aux alternateurs synchrones, surtout si le facteur de puissance du réseau à alimenter est bas. Mais d'ordinaire une charge à fac-

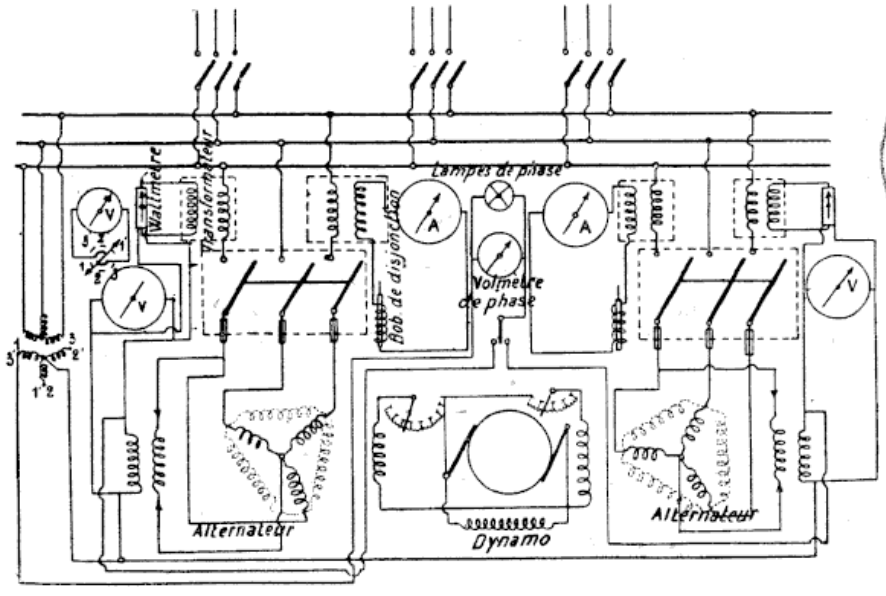


FIG. 1758. — Schéma d'installation de deux alternateurs triphasés à haute tension, avec dispositifs de disjonction et de mise en parallèle.

CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

teur de puissance bas se compose principalement de force motrice pendant les heures du jour, tandis que la forte charge est due à l'éclairage du soir. Dans ce cas on pourrait installer des alternateurs synchrones de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puissance suffisante pour fournir la charge de jour et des alternateurs asynchrones pour la charge du soir.

D'une façon générale, l'altération dans la forme de la courbe de tension d'un réseau est fréquemment une conséquence de l'utilisation des commutatrices dans les sous-stations et postes de transformation (production d'harmoniques du 5e et 7e ordre). Leur emploi pur et simple est dangereux dans les réseaux alimentés par des câbles souterrains de grande longueur ; dans ce cas on leur substitue avec avantage des groupes moteurs-générateurs ou des commutatrices en cascade.

La tendance actuelle qui consiste à adopter de très grosses unités (10.000 kilowatts et plus) dans les réseaux de villes, trouve de la sorte une répercussion heureuse au point de vue de la diminution des surtensions dans les installations.

M. Gibs a indiqué l'expression empirique suivante pour déterminer la force nominative d'une unité travaillant sur un réseau en câbles armés, pour qu'un harmonique d'ordre déterminé ne puisse entrer en résonance :

$$W > \left(\frac{n\,E}{400}\right)^2 \lambda ;$$

W en volts-ampères ; λ longueur totale des câbles en liaison avec l'unité en fonctionnement, exprimée en kilomètres ; E voltage entre phases aux bornes de l'alternateur ; n le rang de l'harmonique considéré.

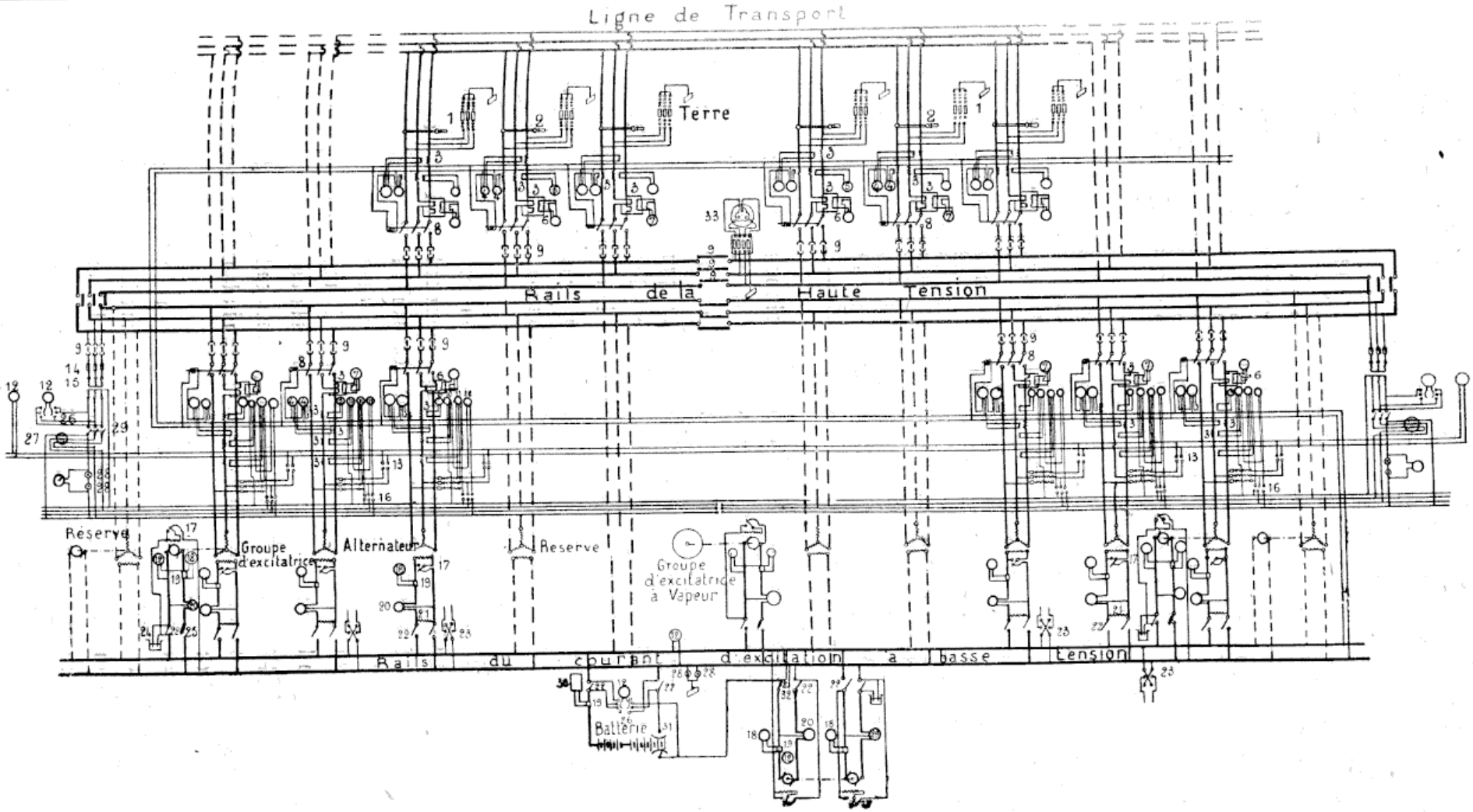
Au point de vue de l'influence du facteur de sécurité pour les isolations des machines, on emploie des bobinages imprégnés privés d'air. Les fils d'une même bobine sont noyés dans la matière isolante compacte.

Les générateurs asynchrones s'accommodent bien des moteurs à gaz, dont la vitesse irrégulière est une gêne très grande pour des générateurs synchrones ; d'autre part, leur emploi est aussi tout indiqué lorsque l'on se propose de produire du courant continu avec des turbines à vapeur ; on a alors comme intermédiaire un convertisseur synchrone. Avec un facteur de puissance de 0,70 les rendements des générateurs commandés par moteurs à gaz sont les suivants :

	Pleine charge	75 0/0	50 0/0
Générateurs synchrones....	95,7	95,1	94,0
Générateurs asynchrones ...	94,0	93,6	92,5

Le tableau ci-après donnant les caractéristiques des alternateurs asynchrones commandés par turbines ou moteurs à gaz font ressortir les avantages de ces générateurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



1, parasurtension. — 2, appareil de court-circuitage. — 3, transformateur de courant. — 4, relais à action différée. à maximum. — 5, ampèremètre alternatif. — 6, transformateur de tension. — 7, compteur triphasé. — 8, interrupteur à huile. — 9, couteaux à main. — 10, phasemètre. — 11, wattmètre. — 12, voltmètre. — 13, fiche de contact bipolaire. — 14, coupe-circuit. — 15, transformateur triphasé. — 16, fiche de synchronisation. — 17, rhéostat de champ. — 18, ampèremètre continu. — 19, shunt. — 20, compteur continu. — 21, résistance d'extra- courant de rupture. — 22, interrupteur unipolaire. — 23, interrupteur bipolaire à double direction. — 24, rhéostat de démarrage. — 25, interrupteur automatique à maximum. — 26, commutateur de voltmètre. — 27, appareil de comparaison de vitesse. — 28, lampe. — 29, interrupteur tripolaire. — 30, ampèremètre enregistreur. — 31, additeur-disjoncteur double. — 32, interrupteur automatique à maximum et à renversement. — 33, indicateur de terre.

FIG. 1759. — Schéma général des connexions d'une usine centrale (courant triphasé).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

KILOWATTS	TOURS par minute	VOLTS	FACTEURS DE CHARGE — RENDEMENTS 1	RENDEMENTS 0,75	RENDEMENTS 0,50	FACTEURS DE PUISSANCE 1	FACTEURS DE PUISSANCE 0,75	FACTEURS DE PUISSANCE 0,50	COURANT de marche à vide 0/0	GLISSEMENT 0/0
1.000	1.500	2.200	97,6	97,7	97,5	97,0	97,5	97,0	8,3	0,75
		13.000				95,0	95,9	96,5		
2.500	1.500	2.200	98,2	98,2	97,9	97,9	97,3	96,4	8,3	0,48
		13.000				96,5	96,9	96,0		
10.000	»	2.200	98,5	98,4	98,2	98,2	98,0	97,5	8,1	0,40
		13.000				96,8	97,3	97,1		
1.000	»	2.200	97,6	97,7	97,5	96,4	96,9	96,4	9,5	0,75
		13.000				94,0	95,0	94,5	11,5	
2.500	»	2.200	98,2	98,2	97,9	97,2	96,8	96,2	9,5	0,48
		13 000				94,5	95,3	94,8		
10.000	»	2.200	98,5	98,4	98,2	97,6	97,6	97,1	9,5	0,48
		13.000				95,3	95,6	95,5		
1.000	»	2.200	96,7	97,1	97,2	94,0	94,2	92,0	16,5	1,5
		13.000				89,3	90,9	88,7	18,0	
3.500	»	2.200	97,1	97,5	97,7	95,2	95,2	94,2	16,5	1,4
		13.000				92,6	93,4	91,0		
1.000	»	2.200	95,5	95,7	96,0	88,8	88,5	84,6	25,0	1,8
		13.000				83,0	81,0	73,3	40,0	
3.500	»	2.200	96,3	96,5	96,7	90,8	89,5	87,0	22,5	
		13.000				85,0	83,3	77,0	35,0	

Les réseaux de distribution d'énergie électrique alimentés par deux ou plusieurs usines génératrices sont assez répandus de nos jours. On se trouve dans ce cas en présence, d'une part, d'usines productrices dont le débit varie suivant certaines conditions et, d'autre part, de centres de consommation où la quantité d'énergie absorbée varie dans des conditions très différentes, et pour régulariser le rapport entre le débit des usines et la consommation sur le réseau de distribution, il faut rechercher quel est le mode de fonctionnement régulier et continu des usines génératrices qui comporte le maximum d'économie.

La marche en parallèle des usines est une solution qui satisfait le problème, à la condition que tout fonctionne régulièrement. Mais les accidents qui peuvent se produire dans les usines ou sur les lignes rendent l'exploitation difficile et compliquée. Aussi a-t-on assez fréquemment recours à la subdivision de l'installation en parties élémentaires et indépendantes, constituant chacune une usine génératrice alimentant un réseau qui lui est propre. Il semblerait qu'un système qui permettrait de sectionner le système en parallèle lorsqu'une perturbation survient donnerait toute satisfaction.

M. G. Semenza a proposé une solution dans ce sens, pour le cas d'un réseau de distribution alimenté par une usine hydroélectrique à l'aide d'une ligne de transport d'énergie et où, au centre de consommation, se trouve une usine génératrice à vapeur. Il divise le réseau en un certain nombre de zones et dans la station de distribution qui sert à alimenter

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le réseau arrivent les deux lignes amenant le courant des usines génératrices, chacune respectivement à une des extrémités des barres omnibus,

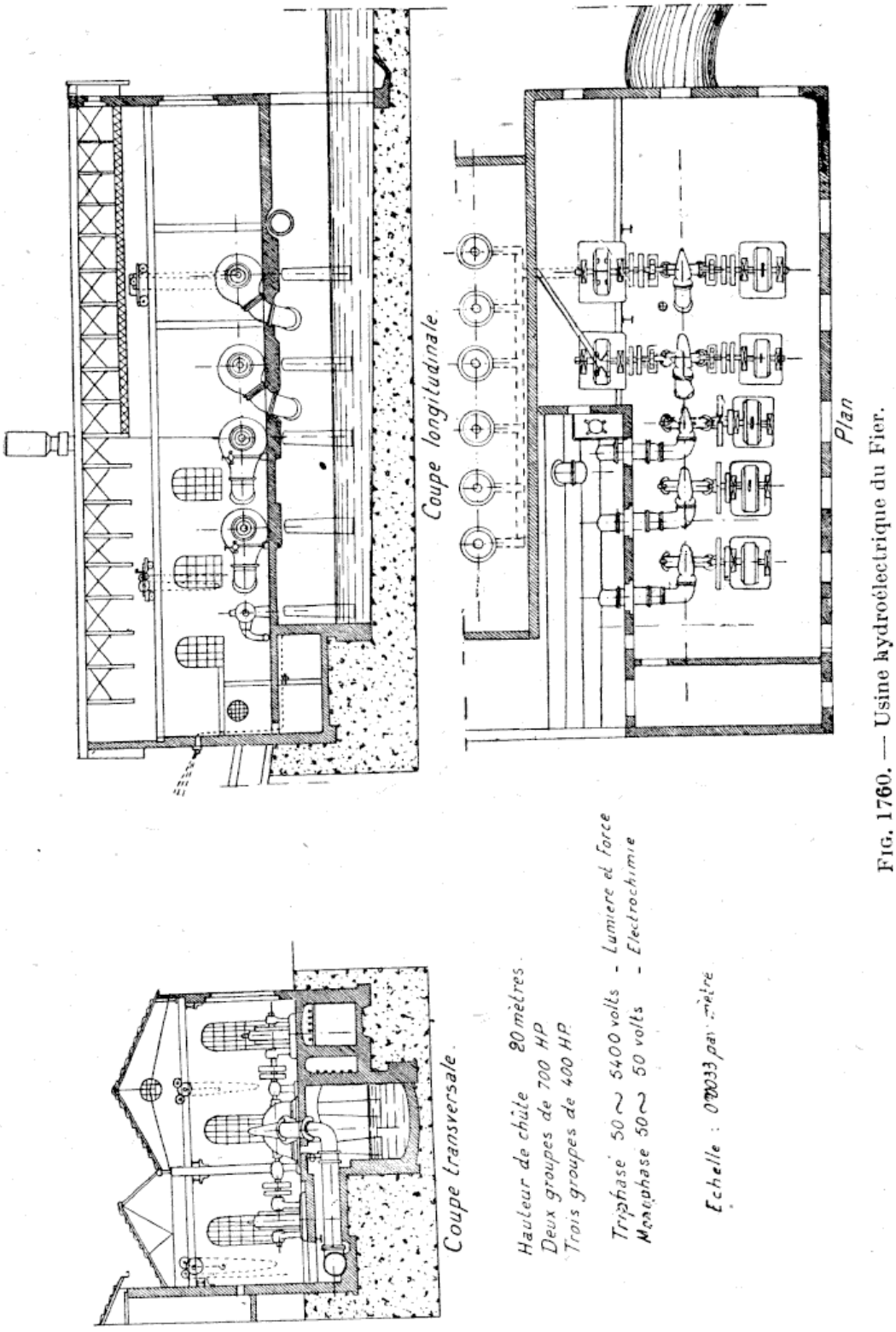


FIG. 1760. — Usine hydroélectrique du Fier.

afin que les prises de courant des différentes sections ou zones du réseau se trouvent placées entre les deux arrivées de courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Entre chaque section est installé sur les barres un interrupteur automatique spécial à maximum et à déclenchement brusque et instantané,

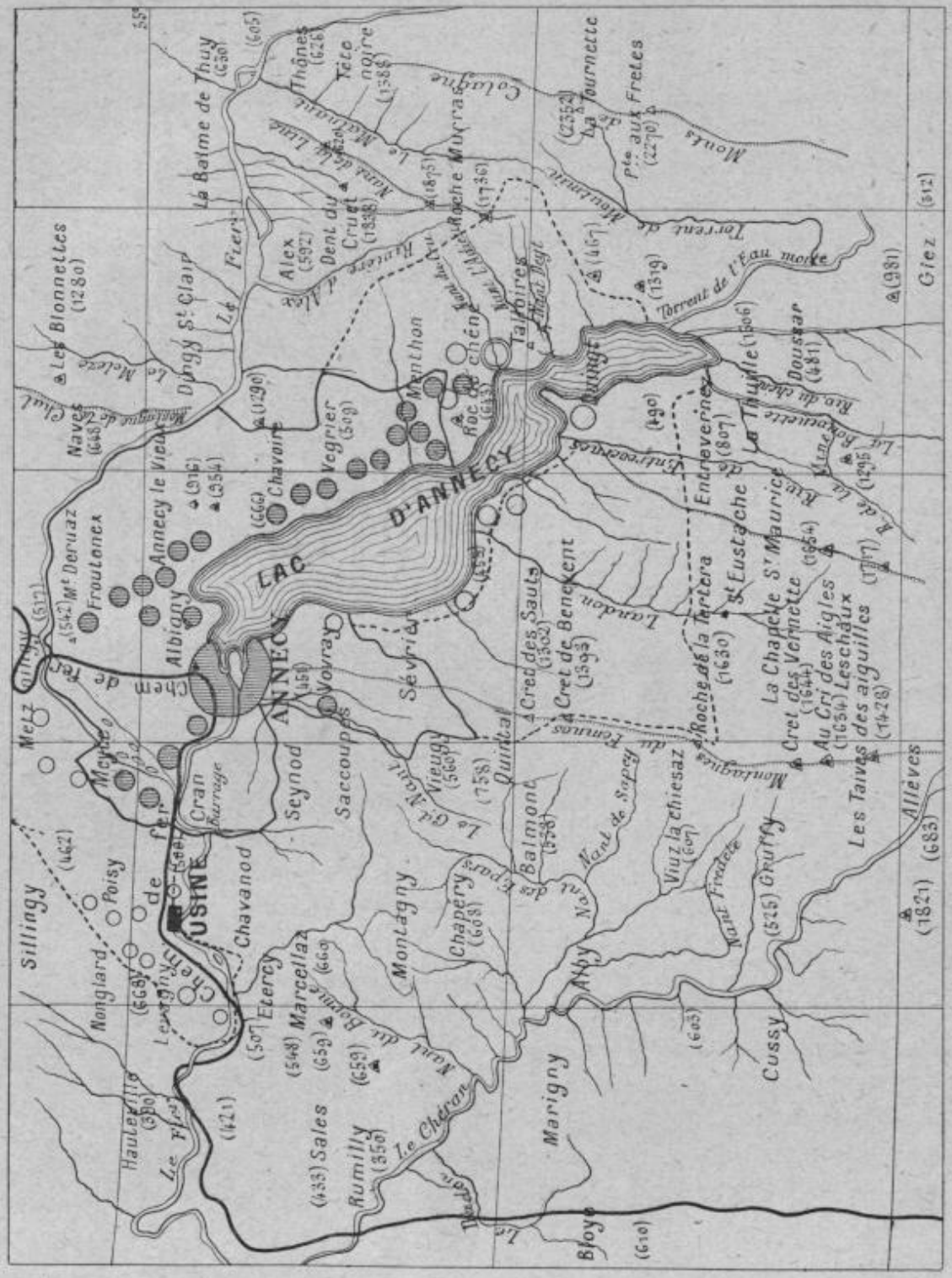


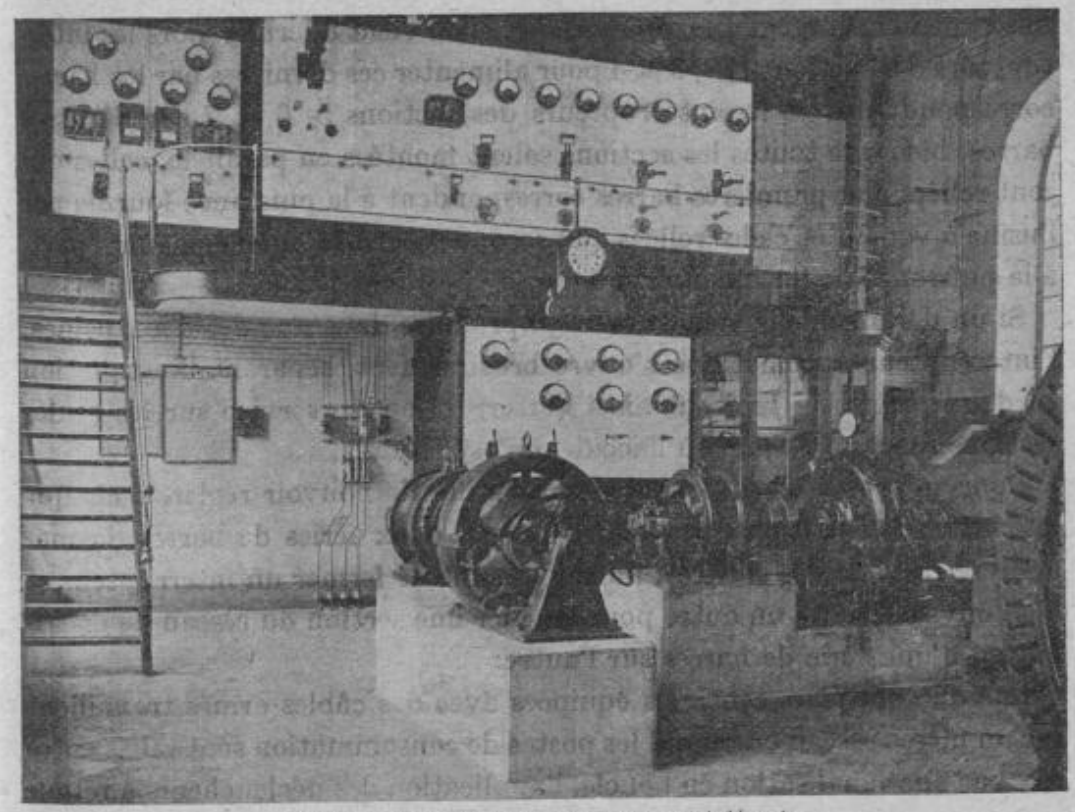
Fig. 1761. — Carte du réseau de la distribution de l'usine hydroélectrique du Fier.

mais construit de telle façon que son fonctionnement automatique puisse être établi ou supprimé à volonté (déclenchement à relais). On intercale

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

également sur les barres un petit interrupteur auxiliaire. Lorsque tous les interrupteurs sont fermés, les deux usines génératrices fonctionnent en parallèle. On rend automatique un seul interrupteur qui sépare les sections (en trois sections par exemple du côté de l'usine hydroélectrique et en trois du côté de l'usine à vapeur, dans le cas de six sections) et on rend inactifs tous les dispositifs de déclenchement des autres interrupteurs automatiques.

Si alors un accident vient à se produire du côté de l'usine hydroélec-



En haut, haute tension, alternateurs et départs.
En bas, excitation et groupe asynchrone d'excitation.

FIG. 1762. — Tableau de distribution de l'usine hydroélectrique du Fier.

trique par suite, par exemple, d'un court-circuit sur la ligne, l'augmentation d'intensité du courant provoqué par le court-circuit fait brusquement déclencher l'interrupteur manœuvré, tandis que les autres restent fermés, leur dispositif de déclenchement étant immobilisé. L'usine hydroélectrique étant ainsi isolée du réseau de l'usine à vapeur continuera à alimenter régulièrement les sections 1, 2 et 3. Une fois le dérangement réparé, progressivement et sans difficulté, on rétablit le fonctionnement en parallèle en fermant l'interrupteur.

Lorsque le nombre d'usines génératrices est seulement de deux ou encore quand, en un point du réseau, aboutissent les lignes de deux usines seulement, on peut appliquer un dispositif plus simple et moins coûteux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans la station de distribution alimentant le réseau, on installe deux séries de barres omnibus et on dispose l'installation de manière à pouvoir alimenter chaque section du réseau par l'une ou l'autre des séries de barres omnibus en utilisant, à cet effet, un double jeu d'interrupteurs.

En un point choisi, les deux séries de barres sont reliées entre elles par l'intermédiaire d'un interrupteur automatique à rupture brusque et maximum mais restant constamment automatique. Cet interrupteur étant fermé, les deux usines fonctionnent en parallèle. Il est réglé pour qu'il déclenche pour une certaine intensité du courant correspondant à deux fois la pleine charge d'une des sections. Si on vient à fermer alors les interrupteurs des sections 1, 2, 3 et 4 pour alimenter ces dernières par les barres correspondantes et les interrupteurs des sections 5, 6 et 7 sur d'autres barres, bien que toutes les sections soient montées en parallèle, celles qui sont reliées aux premières barres correspondent à la puissance fournie par l'usine à vapeur et celles reliées aux secondes correspondent, d'autre part, à la puissance de l'usine hydraulique.

Si un dérangement vient alors à se produire dans une des deux usines, l'interrupteur automatique s'ouvre brusquement, séparant l'installation en deux parties et limitant ainsi l'interruption du service sur les seules sections reliées à l'usine où l'accident s'est produit.

Pour suivre les variations de charge, afin de pouvoir régler, à chaque instant, la répartition des sections sur les deux séries de barres, la manœuvre est des plus simples, puisqu'il suffit de fermer un interrupteur et d'en ouvrir ensuite un autre pour amener une section du réseau de distribution d'une série de barres sur l'autre.

Lorsque plusieurs centrales équipées avec des câbles armés travaillent sur un même réseau ou quand les postes de consommation sont reliés entre eux par une canalisation en boucle, l'application des déclencheurs à retour de courant devient impossible, la direction du courant changeant constamment avec la charge. La solution qui consiste à munir les relais de déclenchement de commutateurs a pour inconvénient de créer de grandes complications dans le service.

Alors, dans chacune des sous-stations où le câble aboutit, on installe sur chacun des conducteurs un transformateur d'intensité ; les secondaires de ces appareils sont reliés entre eux au moyen d'un conducteur auxiliaire et les connexions sont faites de telle sorte qu'aucun courant ne parcoure ce conducteur quand le courant aux deux extrémités du câble principal a la même direction et la même intensité (en négligeant le courant de charge). Si un court-circuit se produit dans le câble principal, il s'ajoute, au courant normal, des courants de circulation dans le court-circuit, courants qui ont des directions inverses aux deux extrémités. Les deux secondaires du transformateur envoient alors dans le circuit auxiliaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des courants qui s'additionnent. Dès lors le courant qui parcourt le circuit auxiliaire peut actionner par l'intermédiaire de relais les interrupteurs du câble, lequel est donc déconnecté à ses deux extrémités. Dans les conducteurs auxiliaires des autres câbles du réseau l'équilibre des courants secondaires n'est pas modifié ; il n'y a donc aucun autre interrupteur d'actionné, partant aucun câble inutilement mis hors circuit.

Un avertisseur prévient automatiquement à la centrale qu'un câble a été déconnecté à la suite d'un court-circuit.

Ce système peut être employé également pour les réseaux aériens. Dans ce cas les conducteurs auxiliaires sont câblés et suspendus à un fil d'acier.

Ce dispositif, dit différentiel, a été appliqué, entre autres, à la centrale de Westphalie, à Bochum, qui équipe 15 stations avec 80 à 100 kilomètres de câbles à 10.000 volts et deux centrales.

612. Emploi des accumulateurs. — Les usines hydroélectriques qui ne possèdent pas de réserve hydraulique peuvent utiliser de jour la force de l'eau, qui coule inutilisée, à charger des accumulateurs qui fournissent, le soir, une partie du courant nécessaire. Comme, dans ce cas, la force motrice ne comporte pas de frais d'exploitation, les pertes dues à la transformation et à l'emmagasinage ne jouent aucun rôle.

L'établissement de sous-stations avec accumulateurs, dans les villes desservies, offre un avantage pour les centrales régionales : non seulement les dimensions des constructions des installations de turbines et de générateurs, mais encore la canalisation à distance, peuvent être calculées pour une puissance plus faible.

En général, dans une station centrale, les batteries d'accumulateurs sont utilisées pour placer les groupes générateurs dans des conditions de rendement maxima aux différents moments de la demande de consommation du courant. Aussi les batteries doivent avoir une certaine capacité suffisante pour assurer le service pendant l'arrêt des machines et être telle que son courant de charge corresponde au courant normal d'une génératrice débitant sa pleine puissance, et on les utilise pour fournir un appoint aux machines, à l'effet de ne mettre en charge sur le réseau de nouvelles machines qu'au moment où la consommation permet de les faire travailler en pleine puissance. Et lorsque la charge du réseau vient à diminuer, on récupère dans les batteries les décharges fournies au moment de l'appoint pour que les génératrices fonctionnent à plein rendement.

L'élasticité de régime des accumulateurs (1) offre en outre le moyen de

(1) Une batterie bien construite peut, sans risque de détérioration, en cas d'accident, décharger à un régime trois fois supérieur à son régime normal (décharge en cinq heures) et soutenir ce débit pendant une heure. Elle peut même fournir un débit plus élevé pendant vingt à trente minutes (temps suffisant pour des changements de machines ou pour franchir l'extrême pointe du débit).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

passer les pointes de forte charge et de parer aux avaries momentanées survenues aux machines.

Les batteries prennent, selon leur application, les désignations ci-après : lorsqu'elles fournissent le courant aux périodes de surcharge brusque et récupèrent les quantités déchargées aux époques de faible débit (batteries tampons) ; qu'elles maintiennent sur les feeders d'alimentation une tension normale en absorbant d'une part les à-coups et en débitant d'une façon continue quand la demande est importante (batteries de ligne) ; enfin quand elles servent de réserve momentanée (batteries de secours).

Les batteries-tampons s'imposent surtout dans les usines alimentant des réseaux de tramways, en raison des variations brusques de courant plus répétées que sur les réseaux d'éclairage. Placées en parallèle avec des génératrices, les batteries, lorsque le courant de ligne augmente, participent au débit, se chargent lorsque le débit extérieur diminue, maintenant ainsi le courant fourni par les génératrices à une valeur moyenne.

Dans les réseaux de tramways un peu étendus, pour parer à la baisse de tension en ligne, on adapte en série avec la batterie une génératrice dont la tension est réglée automatiquement ou autrement dit une dynamo survolteur-dévolteur automatique que l'on fait travailler au-dessous du coude de la caractéristique de fonctionnement. Comme le survolteur-dévolteur est en outre utilisé pour la recharge de la batterie en fin de service, il doit pouvoir donner, sous une intensité réduite, une tension 2,5 à 3 fois plus grande que pendant la marche en tampon. Le rendement en quantité des batteries-tampons est très élevé, les décharges étant de courte durée ; on a constaté que ce rendement variait entre 0,80 et 0,85.

Les batteries-tampons permettent d'assurer, en dehors des heures de marche de l'usine, l'éclairage des voitures et des dépôts, les services supplémentaires de nuit et du matin, la marche des moteurs de l'atelier de réparations, etc. De plus, on les fait servir à récupérer l'énergie disponible aux voitures descendant de fortes rampes.

Dans les grands transports de force à courant triphasé, lorsque la ligne alimente un réseau d'éclairage et des gros moteurs à marche intermittente, les batteries-tampons, installées dans les sous-stations peuvent rendre les mêmes services que dans les installations à courant continu. Alors la batterie est reliée à la ligne triphasée par l'intermédiaire d'un groupe réversible (moteur synchrone-génératrice shunt). Pour que l'intervention de la batterie se fasse automatiquement, on emploie soit des relais commandés par le courant alternatif principal et agissant sur la commande d'un rhéostat, soit intercalés dans le circuit d'excitation de la dynamo, soit que la dynamo possède deux enroulements d'excitation.

Cette disposition donne l'avantage d'un fonctionnement plus régulier,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une meilleure utilisation des lignes et, en cas d'arrêt de la haute tension, de permettre à la batterie le soin d'assurer la fourniture totale ou partielle du courant au cas d'interruption.

Nous avons vu que, dans les transports d'énergie, le souci d'assurer la fourniture du courant sans interruption, certains services ne pouvant pas s'accommoder du moindre arrêt, a conduit les exploitants à se prêter un mutuel concours en reliant leurs usines génératrices aux postes de transformation, de façon à alimenter ces postes indifféremment par l'une ou l'autre de ces usines. Les accumulateurs se présentent ici comme pouvant être d'un appoint fort utile, système qui a d'ailleurs reçu sa sanction dans quelques installations, car le rendement de double transformation, pour une marche momentanée, n'a que peu d'importance. Même dans les ins-

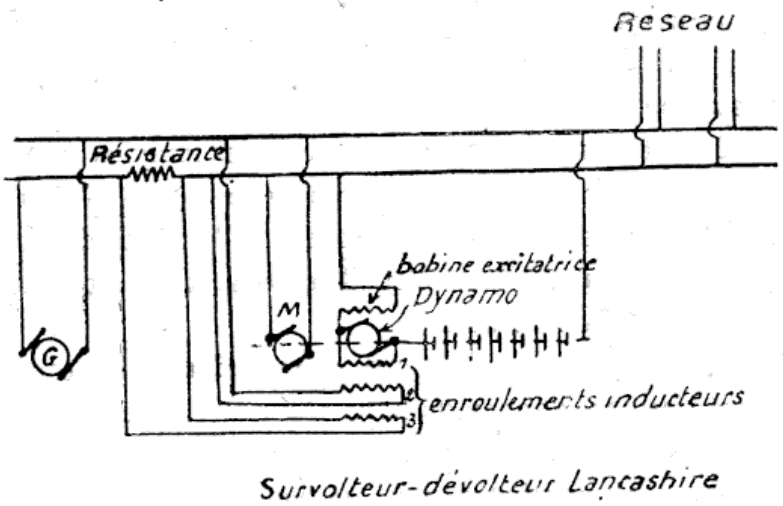


FIG. 1763. — Batteries tampon.

tallations où il existe un groupe de secours à vapeur, la présence d'une batterie d'accumulateurs permet de supprimer la nécessité du maintien en pression des chaudières.

Les batteries de secours sont mises en parallèle avec le réseau par l'intermédiaire d'un groupe synchrone-générateur shunt. Le démarrage du groupe s'effectue par la batterie et une fois synchronisé, les interrupteurs triphasés fermés, on peut, en agissant sur l'excitation de la dynamo, charger ou décharger la batterie. On peut utiliser un tel groupe, pendant les périodes de marche normale, à améliorer le facteur de puissance de celui-ci, en agissant sur l'excitation du moteur synchrone. Le courant de charge de la batterie a ainsi lieu à des heures où la vente de l'énergie disponible ne peut être envisagée d'une façon aussi complète que de jour. Quant aux dépenses résultant de la batterie, on en trouve la compensation dans : la suppression des manques de recettes, pénalités, etc., pendant les arrêts ; l'économie de combustible et de personnel réalisée en évitant le maintien continuel sous pression des unités à vapeur ; enfin

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans la possibilité d'accroître la fourniture du courant et, par conséquent, la recette.

Pour en terminer avec les usines produisant du courant triphasé, nous rappellerons que, dans un assez grand nombre d'entre elles, on utilise les batteries d'accumulateurs pour l'actionnement des relais des appareils automatiques à haute tension et pour l'alimentation des circuits d'excitation. En mettant une batterie en parallèle on peut assurer le service en cas d'arrêt de ces excitatrices, et par conséquent mettre les unités principales en service sans avoir besoin de mettre en route les groupes d'excitation. Cette indépendance permet d'avoir comme groupe d'excitation, soit des groupes moteurs synchrones ou asynchrones et dynamos, soit simplement des commutatrices. Il est possible en outre, avec ce système, d'assurer les services auxiliaires de l'usine.

613. Constance de la puissance dans les distributions de force motrice. — Dans les installations tributaires des longues lignes de transmission et comportant un grand nombre de moteurs, il y a un grand intérêt à maintenir une puissance constante à l'aide d'appareils égalisateurs, soit que l'alimentation ait lieu directement en alternatif, soit en courant continu par transformation.

L'application des accumulateurs aux installations à courant alternatif peut, dans certains cas, donner de bons résultats. D'une façon générale, les appareils égalisateurs utilisés pour les applications de cette nature sont constitués par un moteur-générateur, une batterie d'accumulateurs reliée au côté continu du générateur et une dynamo auxiliaire. Le réglage est automatique et se fait à l'aide d'un relais agissant sur une résistance au moyen d'un régulateur Thury. Une autre méthode consiste à insérer dans la ligne un transformateur-série alimentant une commutatrice dont l'intensité du courant débité est proportionnelle à celle fournie en alternatif, réglant ainsi l'excitation de la dynamo principale à courant continu.

Le problème peut être résolu pour une puissance constante du côté alternatif, ainsi que l'ont fait les ateliers Oerlikon. Le groupe égalisateur est formé dans ce cas d'un alterno-moteur triphasé, d'une dynamo et d'un groupe auxiliaire de réglage. Ces trois machines sont accouplées directement l'une à l'autre et montées sur le même bâti. Un groupe convertisseur fournit le courant d'excitation des trois machines et règle en même temps la compensation. Il est formé d'un alterno-moteur triphasé avec induit à bagues, dispositif de mise en court-circuit et de relevage de balais directement accouplé à une génératrice à courant continu qui donne l'excitation constante pour le moteur synchrone et la dynamo principale et à une machine de réglage qui sert à l'excitation du groupe auxiliaire lui-même.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'excitatrice du groupe auxiliaire est pourvue de deux enroulements inducteurs montés en opposition l'un par rapport à l'autre et qui reçoivent du courant continu à tension constante des barres d'excitation. Suivant que la tension de la dynamo auxiliaire doit être ajoutée à celle de la dynamo ou de la batterie, c'est l'un ou l'autre des enroulements excitateurs qui l'emporte. L'ensemble des appareils est monté comme l'indique d'une façon schématique la (*fig.* 1764). Le régulateur employé est un régulateur Thury, dont le relais habituel servant à actionner le commutateur, est remplacé par un wattmètre. Avec le régulateur sont combinées les dispo-

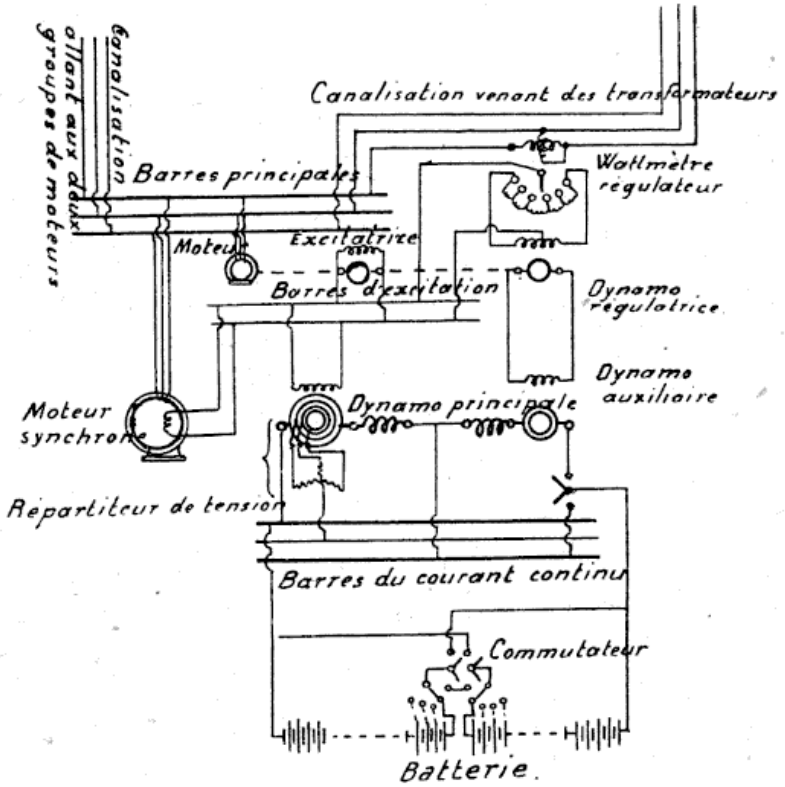


FIG. 1764.

sitions de protection contre les courants de trop grande intensité, ou solénoïdes qui agissent en sens contraire du mouvement du wattmètre dès que l'intensité admissible est dépassée. Le courant qui passe dans les bobines a une intensité proportionnelle à la chute de tension de l'enroulement des pôles compensateurs de la dynamo, et il est donc maximum quand les courants de charge ou de décharge sont, eux aussi, à leur maximum.

Pour atteindre la charge complète ou la surcharge, il faut monter les deux groupes d'éléments de la batterie en parallèle et, par mesure de précaution, la tension maxima du groupe égalisateur est choisie telle qu'une surcharge de la batterie ne puisse se produire quand cette dernière fonctionne en tampon.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une installation de ce genre a été réalisée à l'usine des établissements sidérurgiques de Sandviken comportant 120 moteurs, dont la puissance individuelle varie de 5, 30, 150, 225, 300, 500 et 600 HP, du type triphasé. Le groupe égalisateur sert à compenser les variations de charge de cette importante installation et à maintenir à cette charge une valeur sensiblement constante voisine de 1.570 kilowatts. Les variations de puissance avaient été reconnues atteindre 500 à 600 kilowatts. L'installation de l'égalisateur, qui a une capacité de 600 kilowatts, les a fait disparaître et a permis d'augmenter le nombre de moteurs alternatifs et continus. De plus, le groupe égalisateur alimente une partie de l'éclairage.

Les transformateurs destinés à une distribution triphasée à quatre fils ne peuvent pas être montés en étoile du côté à haute tension, à moins que cette distribution à haut voltage ne soit pourvue d'un neutre. Il est préférable d'adopter le primaire bobiné en triangle ; cela évite de ramener un quatrième fil à l'usine et conduit à des résultats un peu plus favorables.

Il faut réduire autant que possible la perte de tension en charge dans les transformateurs utilisés et il faut surtout veiller à ce que cette perte soit faible, même avec une charge inductive ; cela revient à réduire autant que possible la dispersion magnétique. Les premières spires des transformateurs, au point de vue de la sécurité des isolations, doivent être mieux isolées que les autres et pour les très hautes tensions (80 à 150.000 volts), on doit donner à la première spire d'un transformateur une forme appropriée et une section plus large que celle des autres. Une des précautions les plus élémentaires est d'employer des transformateurs plongés dans l'huile.

Les chiffres suivants, comme coefficients de sécurité, sont assez couramment admis :

2.000 volts (4,7), 3.000 volts (4,3), 5.000 volts (3,9), 10.000 volts (3,2), 15.000 volts (2,7), 20.000 volts (2,5), 30.000 volts (2,4) et 60.000 volts (2,3). Les récepteurs devront être peu inductifs, les inégalités de tension, provenant du déséquilibre des charges, croissant de façon très rapide quand le cos φ diminue. A ce point de vue, les récepteurs fortement inductifs doivent être alimentés par des transformateurs spéciaux. Toutefois, l'alimentation des moteurs triphasés peut parfois se faire par le réseau sans amener de troubles ; elle peut même, dans certaines conditions, jouer le rôle d'égalisateur de tension. Les moteurs triphasés asynchrones produisent sur le réseau deux effets opposés : d'une part, ils chargent également les trois phases, ce qui est favorable ; d'autre part, ils déphasent le courant, ce qui est défavorable. Si nous considérons, par exemple, un transformateur alimentant des lampes à incandescence, dont une phase est beaucoup plus chargée que les autres et que nous lui appliquions une charge fournie par des moteurs, la différence relative de charge entre les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trois phases va diminuer ; en outre, le cos φ des phases chargées par les moteurs seulement sera beaucoup plus faible que celui de la phase qui avait, dès le début, une charge de lampes. Il en résulte que la chute de tension va être augmentée sur les trois phases par l'adjonction de la charge de moteurs, mais que l'augmentation sera plus forte sur les phases qui avaient la tension la plus élevée. Donc l'égalité sera meilleure. Il est vrai que la tension aux bornes des récepteurs de la phase chargée sera diminuée aussi, ce qui est défavorable. En résumé, donc, les moteurs égalisent les tensions des trois phases, mais en les abaissant toutes, surtout lors du démarrage. Il y a lieu de rechercher, dans chaque cas particulier, si cette chute de tension n'est pas excessive : cela ne peut se faire qu'en connaissant toutes les données du transformateur employé. Il sera, en général, avantageux d'admettre des moteurs, pour former une partie de la charge si ces moteurs sont nombreux et de faible puissance, ne démarrant pas trop fréquemment.

La chute de tension se produisant simultanément sur les trois phases n'est pas toujours un inconvénient si l'on peut régler la tension primaire de chaque transformateur ; elle devient au contraire fort nuisible si tous les transformateurs sont alimentés par un même réseau. Cette considération doit aussi influer sur l'adoption de transformateurs spéciaux pour moteurs.

Dans tous les cas, il est évident que les moteurs triphasés synchrones, convenablement excités, ne peuvent être qu'excellents au point de vue des chutes de tension ; ils sont malheureusement très rares dans les réseaux d'éclairage.

Quand on emploie une canalisation secondaire de distribution avec couplage en parallèle de tous les transformateurs, on doit calculer les transformateurs, non pour la totalité de la puissance de l'installation, mais seulement pour la puissance moyenne, et, dans ce cas, les pertes des transformateurs sont diminuées en proportion.

D'après les données statistiques des usines d'électricité en Allemagne, les pertes par transformateurs atteignent environ 15 à 20 0/0 de la fourniture du courant annuel.

Pour les interrupteurs l'ouverture devrait se faire exactement au moment où l'intensité passe par zéro, condition la plus favorable, pour éviter les surtensions. L'emploi de l'huile est tout indiqué, car il réduit la durée de l'amorçage de l'arc. On peut placer en série avec l'interrupteur une résistance qui se met mécaniquement en circuit à l'ouverture et à la fermeture. Cette disposition est avantageuse dans les réseaux aériens à très haute tension, dans les réseaux à câbles ou lorsqu'ils commandent des lignes aboutissant à des moteurs synchrones, des commutatrices ou de gros moteurs d'induction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

614. Mise à la terre du point neutre dans un réseau triphasé. — Les avantages de la mise à la terre du point neutre d'un réseau triphasé sont : la tension entre chaque phase et la terre reste constante et égale à la tension simple du système ; écoulement libre des charges statiques ; réduction de la valeur de la capacité de la ligne par rapport à la terre ; mise à jour de défauts d'isolement par rapport à la masse ; équilibrage parfait des phases ; diminution des effets inductifs dans les lignes aériennes étrangères voisines, continuation du fonctionnement de l'installation au cas de rupture de fil dans une phase, si les stations réceptrices ont également le neutre à la terre. Au regard de ces avantages, on peut signaler les désavantages ci-après : plus grand danger pour la vie humaine si on vient à toucher le fil ; court-circuit direct au cas de contact entre masse et l'une des phases (pour éviter cet accident on peut relier le point neutre à la terre par l'intermédiaire d'un limiteur de tension à jet d'eau ou par une colonne d'eau, ou par une bobine de self-induction) ; répercussion dangereuse dans les canalisations téléphoniques souterraines. Si l'onde de tension a un harmonique dont le rang est un multiple de 3, il peut y avoir danger de résonance dans l'installation. Pour les très hautes tensions, la mise du réseau à la terre du point neutre est à peu près unanimement reconnue indispensable. En effet, ces tensions très élevées rendent difficiles la protection des lignes ainsi que la construction et l'installation des appareils. Dans la ligne elle-même il faut s'imposer un diamètre minimum pour les conducteurs afin d'éviter la déperdition d'électricité par surface, qui est cause d'une perte de puissance et d'une production d'acide nitrique qui endommagerait les isolants.

Avec les très hautes tensions, de légers défauts d'isolement dans les appareils de manœuvre peuvent avoir de sérieux inconvénients si le réseau n'est pas mis à la terre. Ainsi, s'il y a deux groupes d'alternateurs marchant indépendamment et qu'il existe un défaut d'isolement entre une borne de l'un et une borne de l'autre et aussi une légère perte au sol, la différence de potentiel entre la ligne et le sol sera par moment 3,5 fois plus élevée que si le point neutre était à la terre.

Dans un réseau non mis à la terre, presque toutes les perturbations donnent lieu à de graves dangers. Si, par exemple, un coup de foudre frappe un appareil quelconque, une ligne peut ainsi se trouver mise à la terre par l'intermédiaire d'une inductance, et le réseau est déséquilibré.

Le fil neutre d'un réseau triphasé doit être mis à la terre en un seul point à travers une résistance appropriée. On réalise ce mode d'installation en disposant un commutateur sur le fil de terre et en ne mettant en communication avec la terre que le point neutre d'un seul des alternateurs en service.

Dans les usines de grande puissance, où la manœuvre des interrupteurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est commandée à partir d'un tableau de contrôle installé dans une galerie ou même dans une salle spéciale, on peut établir des commutateurs spéciaux actionnés à distance pour opérer la manœuvre ci-dessus. Mais un appareil automatique du genre de celui imaginé par M. E.-V. Scharv, pouvant fonctionner avec le dispositif Westinghouse de commande à distance, répond beaucoup mieux aux besoins d'une pareille installation.

La commande automatique de terre se compose de deux parties : un commutateur de terre proprement dit et un commutateur supplémentaire gouverné par le même petit moteur électrique qui actionne le commutateur de terre. Celui-ci porte un anneau de contact relié directement à la résistance de terre, et extérieurement à cet anneau, autant de plots qu'il y a d'alternateurs dans la station, ces plots étant reliés chacun par un conducteur au point neutre de la génératrice à laquelle il est affecté. Un frotteur porté sur un arbre relie l'anneau central à un seul des plots à la fois, et cet arbre est actionné à l'aide d'un engrenage à vis sans fin par un moteur d'une puissance de 1 HP, qui peut faire faire au frotteur deux tours par minute.

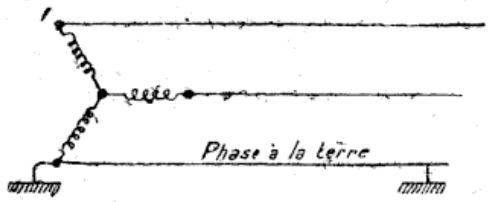


FIG. 1765. — Distribution d'après le système Vogelsang.

Le commutateur supplémentaire est semblable au commutateur principal, mais de construction plus légère, et son frotteur est porté sur le même arbre que le frotteur principal. Le contact annulaire disposé à la périphérie de ce commutateur supplémentaire est relié à la barre négative de contrôle et, chacun des contacts correspondants, à une des bornes de lampes pilotes. Cette série de contacts est mise en communication avec le contact annulaire de la périphérie par un frotteur à deux branches isolé du bras qui le porte. Le bras tournant porte également un second frotteur, isolé de l'arbre, qui met en communication le contact annulaire relié au moteur avec l'un des contacts fixés respectivement aux différents commutateurs pilotes (*fig.* 1766), placés sur l'interrupteur principal à huile affecté à l'une des génératrices.

Au point de vue de l'établissement des terres, pour les limiteurs de tension et les déchargeurs liquides, on réunit en général leurs circuits de terre aux conduites d'eau qui existent dans le poste, et en outre à plusieurs grandes plaques de cuivre de un mètre carré environ de superficie, placées verticalement dans des fosses qu'on remplit de coke concassé et situées non loin des rigoles d'écoulement des eaux pluviales. Il y a lieu en outre de réunir par des barres en fer plat, solidement boulonnées et de préférence par des barres de cuivre, tous les éléments métalliques de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

charpente générale de l'usine et des principaux organes qui y sont contenus ; ces barres de fer plat ou de cuivre devront ensuite être soudées à une ou plusieurs plaques de terre reliées à celles des parafoudres.

C'est par de telles barres qu'il faut aussi réunir les circuits de terre des transformateurs de courant et de potentiel, des compteurs, des wattmètres, des relais.

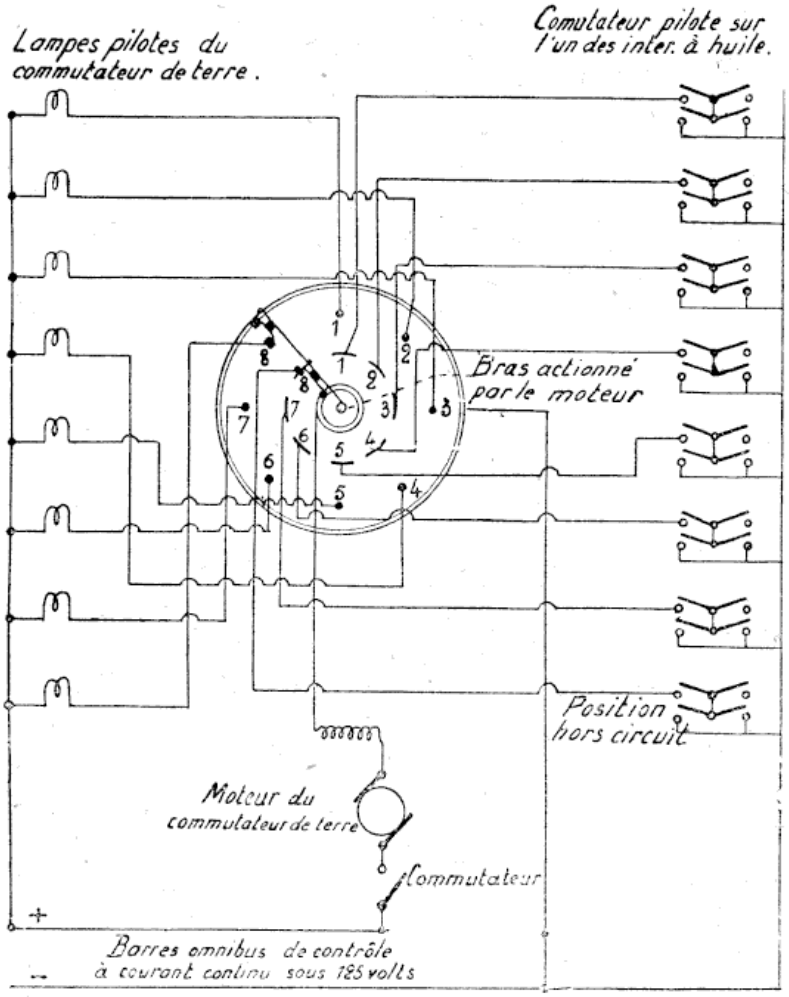


FIG. 1766.

Si le terrain sur lequel est édifiée l'usine est bon conducteur, on peut réunir entre elles les terres des circuits appartenant à des tensions différentes, sinon on doit maintenir une certaine distance entre les terres des différentes tensions régnant dans l'usine.

La *Pensylvania Wasler and C°* qui a son usine hydroélectrique à Holtwood et qui exploite un réseau à 70.000 volts, courant triphasé, 25 périodes, a mis le point neutre au sol à l'usine génératrice seulement. A cet effet deux transformateurs sont mis à la terre pendant les temps orageux et un seul en dehors de la saison des orages. La connexion au sol est faite par l'intermédiaire de résistances métalliques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur le réseau souterrain à 13.000 volts provenant de la sous-station de Baltimore on a mis tous les transformateurs à la terre, pour être sûr d'avoir un courant assez intense pour actionner les relais, qui, dans le but d'obtenir une action sélective entre les relais des diverses sous-stations, sont réglés pour une intensité assez forte.

A l'usine génératrice, on a relié les prises de terre à toutes les parties métalliques de l'usine et surtout celles qui sont en contact immédiat avec l'eau de la rivière, comme les grilles d'entrée. De plus les terres de l'usine sont reliées aux fils de terre aériens des lignes de transmission. Des mesures effectuées sur toutes les terres reliées en parallèle ont indiqué une résistance combinée d'environ 2 ohms.

On a reconnu que le principal avantage de la mise à la terre est son action sélective sur les relais, fonctionnement qui est tout à fait différent de celui de l'extincteur d'arcs Nicholson, lequel exige un fort courant à la terre pour la mise en action de son relais. Le courant qui circule normalement dans la connexion du neutre au sol est de moins d'un ampère ; on ne connaît pas sa fréquence.

La *Pacific Sighl and Power Corporation* qui possède un réseau à 150.000 volts, d'une longueur de 386 kilomètres, qui part de l'usine hydro-électrique de Big Creek, a mis le neutre au sol des enroulements à haute tension des transformateurs. Ces derniers sont montés en triangle-étoile à l'usine génératrice et en triangle-triangle à la station réceptrice.

La *Toronto Power C°* emploie la mise à la terre, ayant reconnu que ce système est excellent quand on dispose d'un bon relais de protection sélectif, et si les lignes doivent être exploitées en parallèle du côté à haute tension et si l'isolement de la ligne est peu sûr.

Au point de vue de la connexion avec le sol, les ingénieurs de cette Compagnie reconnaissent qu'elle doit être directe si l'isolement de la ligne est insuffisant et si le matériel est construit de façon à pouvoir supporter les efforts dus aux courts-circuits. Dans le cas contraire, ils préconisent une résistance dans la connexion au sol pour diminuer les chocs mécaniques causés par les courts-circuits sur une seule phase.

Par contre la *Utah Power and Light C°*, qui a un réseau à 130.000 volts, a partout le neutre isolé du sol. Mais sur le réseau à 44.000 volts partant de la sous-station qui reçoit la tension de 130.000 volts, la Compagnie a installé une mise à la terre au moyen d'un auto-transformateur, afin de pouvoir débrancher automatiquement les lignes endommagées et pour diminuer l'effort subi par les isolants.

La *Chicago and Interurban Traction C°* qui a une ligne de 72 kilomètres, courant triphasé 33.000 volts, 25 périodes, a les points neutres des transformateurs mis à la terre. Ceux-ci sont montés en étoile du côté secon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

daire. Les conducteurs de la ligne téléphonique sont transposés tous les cinq poteaux.

La mise à la terre est opérée tant à l'usine génératrice qu'à chaque sous-station. Un relais à maximum agissant sur le disjoncteur à huile est réglé pour le faire déclencher en cas de surcharge en service normal et on se sert du courant à la terre pour la marche à deux fils.

La *J. C. White Enginering Corporation*, pour les lignes au-dessus de 38.000 volts, la mise à la terre du neutre a été reconnue préférable à son isolement. Les ingénieurs de cette compagnie ont remarqué que le montage en triangle des transformateurs a moins d'influence sur les lignes téléphoniques ou toute ligne à courant faible. Ils estiment cependant qu'une installation bien isolée et avec emploi du montage en triangle peut très bien se comporter sans mise à la terre, et avec tous les avantages que ce mode de faire comporte par lui-même.

La *Norl Carolina Power C°* (66.000 volts) et la *Florida Power C°* (60.000 volts) fonctionnent avec le point neutre isolé.

615. Emploi de la terre comme partie d'un circuit électrique. — L'économie qui résulte du retour par la terre, dans un système de transport d'énergie électrique à grande distance, peut devenir considérable : en effet, à égalité de perte de charge, le poids du cuivre de la ligne est réduit au quart, le prix des isolateurs à moitié ; la hauteur, la résistance et le prix des appuis peuvent être notablement moindres, les difficultés d'isolement bien diminuées et les chances de court-circuit presque supprimées.

L'économie résultant du retour par la terre serait considérable pour les transports de grande longueur, et elle serait suffisante pour rendre viable financièrement une affaire qui ne le serait pas avec un circuit purement métallique.

Il n'est pas nécessaire d'ailleurs, pour obtenir ce résultat, de faire de la terre le retour complet permanent du courant. On peut employer le système à trois fils en remplaçant le fil neutre par la terre et le sol ne devant servir de retour complet qu'en cas d'avarie à l'une des deux lignes.

Les objections les plus délicates que l'on puisse élever contre l'emploi du retour par la terre sont les effets d'induction par les terres et d'induction électromagnétique, les autres inconvénients tels que la conservation des électrodes, les courants parasites, les effets d'électrolyse, d'induction électrostatique et les dérivations pouvant facilement être rendus inoffensifs par des précautions spéciales à prendre.

L'induction par les terres dans certains sols défavorables consiste essentiellement en ce fait que la prise de terre électrique porte le sol environnant à un potentiel différent de ce qu'il était antérieurement et de ce qu'il

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est encore à une distance suffisante. L'étude de cette induction par les terres, qui peut provoquer de graves accidents sur les lignes à signaux, est de toute première importance. Elle a fait d'ailleurs l'objet d'une série d'expériences effectuées à Lancey (Isère) en octobre 1903, par MM. Harlé, Pionchon et Barbillon, avec le concours de l'Administration des Postes et Télégraphes et du chemin de fer P.-L.-M. De l'examen des différents résultats recueillis, il résulte que le potentiel du sol à la distance R de la prise de terre par rapport au sol vierge se représente parfaitement par la formule empirique : $\frac{2200}{R}$ volts, R exprimé en mètres. Des essais du même genre ont été repris par des ingénieurs suisses en septembre 1906, mais sur une beaucoup plus grande distance. L'usine génératrice était celle de Saint-Maurice et la ligne employée un des fils de la ligne de transport Saint-Maurice-Lausanne avec terres à Bex et à Lausanne. Les potentiels étaient pris par rapport au potentiel du sol de Saint-Ligier, village situé non loin de Vevey. Le courant était de 150 ampères en courant continu ; les résistances constatées par les chutes de tension étaient de 7,8 ohms pour le conducteur métallique, 0,83 pour la terre de Bex et 0,70 pour la terre de Lausanne. Ces essais ont confirmé, d'une façon générale, dans la région homogène de 700 à 800 mètres de rayon où ont été faites les mesures les résultats obtenus à Lancey. Les essais se traduisirent par la formule : $19 + \frac{1059}{R}$, de même forme que celle de Lancey, à la constante près.

La chute de tension ainsi produite est loin d'être négligeable. On a constaté qu'elle pouvait atteindre 0,6 volt par kilomètre et peut donner lieu, dans certaines conditions, à des courants parasites pouvant gêner le fonctionnement des lignes télégraphiques. Mais il y a des moyens de parer à ces inconvénients lorsqu'on les a reconnus.

Pour déterminer les effets dus à l'induction électromagnétique, de nouvelles expériences ont été faites en 1906-1907 entre Grenoble et Lancey, sous l'impulsion du Comité d'électricité. L'on s'est efforcé de réaliser les expériences précitées dans des conditions se rapprochant le plus possible de la pratique industrielle. On a expérimenté principalement les effets inductifs produits sur des lignes induites déterminées au moyen d'une transmission d'énergie électrique alternative de 11.000 volts, 42 périodes. On mesurait, au moyen d'appareils, les courants induits dans les lignes d'expérience et, par la connaissance plus ou moins exacte de la résistance et de la réactance du circuit induit on passait de là à la connaissance de la tension induite. Des essais analogues ont été effectués, mais en moins grand nombre et dans des limites plus restreintes avec un courant inducteur continu.

Dans les récepteurs télégraphiques et téléphoniques, la sensibilité des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

récepteurs en jeu est très différente. En ce qui concerne les téléphones, l'induction a été supprimée dans bien des cas et toujours réduite par l'emploi, d'usage obligatoire maintenant, de lignes à doubles fils. D'ailleurs en équilibrant exactement les circuits d'aller et de retour et en les croisant avec soin, la suppression de l'induction est à peu près complète.

Il n'en est pas de même pour les lignes télégraphiques qui sont toutes unifilaires, dont par ce fait l'absence de sensibilité des récepteurs a permis d'échapper aux perturbations étrangères. Ces lignes sont particulièrement soumises aux influences d'un transport d'énergie à retour par le sol. Mais, comme le problème est complexe, il suffit d'envisager une solution approchée pour les besoins réels et suffisante pour le but pratique à atteindre. Ainsi, si on constate expérimentalement que les appareils récepteurs télégraphiques situés dans la région qui pourrait être influencée ne peuvent en aucun cas être troublés par un courant de un milliampère il devient tout à fait inutile de rechercher une précision plus grande. Si l'on constate une valeur supérieure, on saura qu'il y a des précautions à prendre de ce fait.

D'autre part, s'il s'agit de courants alternatifs, les récepteurs télégraphiques ont en général une forte impédance. Ceci simplifie le problème pour l'induction par courant continu, car, à ces résistances élevées, la résistance devient faible devant la réactance et il suffira en général de rechercher les forces électromotrices induites de l'ordre du volt. Puis il suffit d'étudier l'induction dans une zone de largeur restreinte, les lignes très éloignées ne subissant que des effets d'induction non gênants, ce qui facilite l'établissement d'une formule empirique. Enfin, en profondeur le problème est limité par ce phénomène que le courant alternatif se trouve pratiquement confirmé dans une zone assez peu profonde à partir de la surface du sol, phénomène appelé parfois *Skin effect*.

Dans les expériences de Lancey, signalées plus haut, les tensions induites ont pu être mesurées, généralement avec une grande précision. Par les résultats obtenus, l'on sait que la limite d'influence électromagnétique d'un transport à courant continu de grande longueur et de puissance ordinaire se tient à 4 ou 5 kilomètres de part et d'autre de la ligne ; ce qui restreint très étroitement le nombre de lignes télégraphiques pouvant être influencées, lorsqu'on aura choisi un tracé convenable pour la ligne inductrice.

La formule empirique établie par les expérimentateurs, qui permet de prévoir, avec une approximation admise comme suffisante, l'induction sur les lignes placées dans la zone dangereuse (1), est basée sur la concep-

(1) *Etude sur le retour, par la terre, des courants industriels. Expériences de Lancy* (Imprimerie Allier frères, à Grenoble).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion d'un retour fictif situé à 400 mètres environ de profondeur. Les essais qui ont été faits sur des lignes à circuits métalliques complets sans aucune terre ont permis de constater qu'on pouvait, d'un côté à l'autre d'une route, protéger complètement un circuit téléphonique sans terre au moyen d'un nombre restreint de croisements, judicieusement établis.

On est donc actuellement en présence de données de très grande valeur sur la possibilité de l'emploi du retour par la terre des grands transports d'énergie. Il faut donc espérer que des essais plus concluants, entrepris sur l'étendue entière d'une longue transmission, confirmeront les données de Lancey et, par suite, ouvriront l'ère des grands transports industriels avec retour par la terre.

616. Instructions sur le montage des installations électriques. — Un règlement d'administration publique concernant la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques a été mis en vigueur par les décrets du 11 juillet 1907.

Afin de faciliter l'application de ces règlements, les services électriques des Associations des propriétaires d'appareils à vapeur ont rédigé des instructions très complètes que nous reproduisons, mais en les limitant aux parties qui ont plus spécialement trait au transport de l'énergie.

DISPOSITIONS GÉNÉRALES CONCERNANT LA SÉCURITÉ DES PERSONNES. — *a*) Tous les moteurs, appareils ou organes sous tension non recouverts d'un isolant ainsi que les conducteurs isolés, doivent être protégés et disposés de façon qu'ils ne puissent être touchés, même accidentellement, par des personnes étrangères à leur service.

b) Dans les salles de machines, cabines de moteurs, postes de distribution, c'est-à-dire dans tous les emplacements qui ne sont normalement accessibles qu'à des personnes de service, les appareils, organes et conducteurs peuvent rester découverts, à condition qu'il y ait un plancher isolant et un espace suffisant.

c) Toutes les parties métalliques de la construction, qui peuvent par leur disposition être accidentellement mises sous tension (tels que supports, colonnes, etc.), doivent être reliées à la terre.

d) Les bâtis, cadres, enveloppes et, en général, toutes les pièces métalliques faisant partie de l'installation électrique et non parcourus par le courant doivent être traités de la même façon (c'est-à-dire mis à la terre) ou complètement isolés du sol. Dans ce dernier cas, les machines et appareils en question seront entourés d'un plancher isolant, et les pièces métalliques de construction, qui se trouvent à proximité, seront protégées par un revêtement isolant, de telle façon qu'on ne puisse les toucher en même temps que les machines et appareils.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

e) Un corps conducteur est considéré comme *mis à la terre* lorsque, dans le cas d'un contact direct et unique avec un conducteur sous tension, la différence de potentiel entre ce corps et la terre ne pourra devenir supérieure à 25 volts.

f) On devra éviter ou rendre inoffensif le passage de haute tension sur les circuits à basse tension, ainsi que, dans la mesure du possible, la production de surtensions par des moyens appropriés. On peut employer

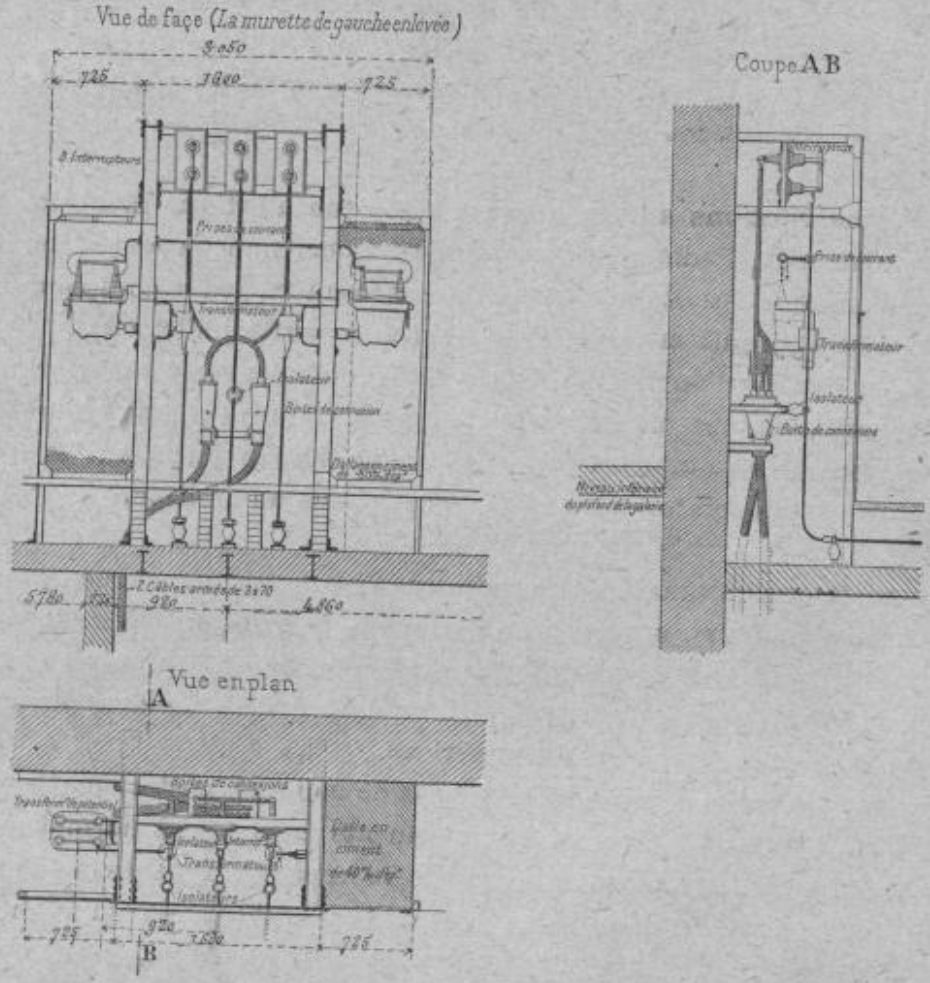


FIG. 1767. — Usine de la Brillanne. Poste de transformation. Arrivée d'un alternateur.

à cet effet la mise à la terre de certains points ou des appareils spéciaux tels que les limiteurs de tension.

g) Dans les locaux très humides ainsi que dans les industries dans lesquelles la résistance ohmique du corps humain se trouve être considérablement réduite, il y a lieu de prendre des précautions spéciales, même pour la basse tension.

On devra proscrire rigoureusement celui de la haute tension.

MACHINES, TRANSFORMATEURS ET MOTEURS. — *a*) Les machines, transformateurs ou moteurs à haute tension, ainsi que leurs appareils acces-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soires, ne pourront être placés dans des locaux ou emplacements normalement accessibles à des personnes autres que celles préposées au service de l'installation électrique, que s'il leur est réservé un emplacement spécial et clos.

b) Les excitatrices et autres machines auxiliaires des machines à haute tension devront être traitées comme les machines elles-mêmes, à moins d'être munies d'un dispositif empêchant ou rendant inoffensif le passage de la haute tension sur leurs enroulements.

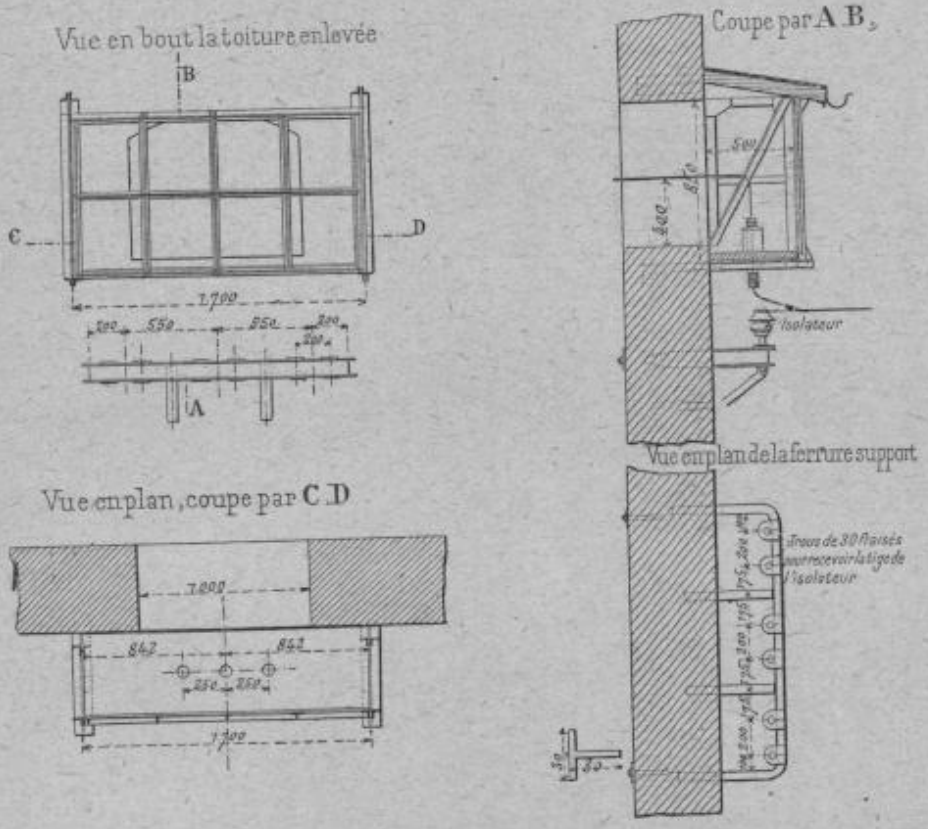


FIG. 1768. — Usine de la Brillanne. Poste de transformation. Sortie de la ligne à 13.500 volts.

c) Pour les transformateurs placés dans les cabines spéciales, on pourra se dispenser de la mise à la terre permanente du bâti et de l'enveloppe, à la condition d'installer un appareil réalisant automatiquement cette mise à la terre pendant toute la durée de la présence d'une personne dans la cabine, ou pendant tout le temps que le transformateur reste accessible.

ACCUMULATEURS. — Les salles de batteries de moyenne et de haute tension devront être accessibles seulement au personnel de service et les passages seront garnis d'un plancher isolant.

APPAREILS. — Ne pourront être admis comme isolants dans la construction des appareils pour la haute tension : l'ardoise et le marbre.

L'isolation des appareils, tant par rapport à la terre qu'entre leurs dif-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

férents organes devra être appropriée à la tension et aux locaux auxquels ils sont destinés. Leur construction sera telle que les conducteurs d'amenée soient écartés de la paroi d'appui.

COUPE-CIRCUITS A FUSIBLES OU ÉLECTROMAGNÉTIQUES.—*a*) Les coupe-circuits doivent être construits de telle façon que, lors du déclenchement ou de la fusion, il ne puisse se produire d'arc durable, de projection de métal ou d'explosion, même dans le cas d'un court-circuit.

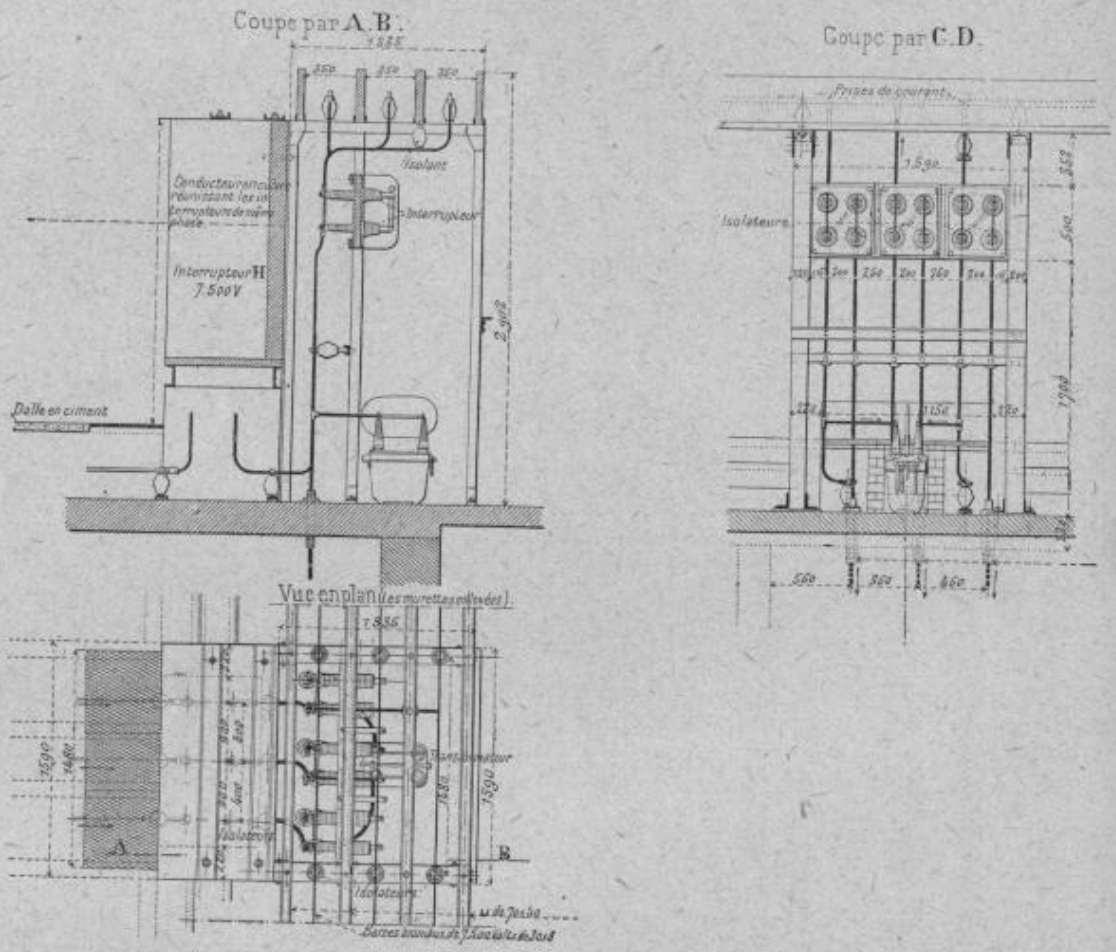


FIG. 1769. — Usine de la Brillanne. — Poste de transformation. Installation des barres-omnibus à 7.500 volts.

b) L'intensité normale de courant déterminant le calibre d'un coupe-circuit doit être égale et, en aucun cas, inférieure à son intensité minima de fusion (courant limite).

c) Les coupe-circuits électromagnétiques devront être réglables pour déclencher entre l'intensité normale et le double.

d) Au-dessus de 300 volts, les coupe-circuits seront construits de telle façon que les parties mobiles destinées à des tensions inférieures ne puissent s'y adapter.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

e) Les conducteurs neutres ou d'équilibre des systèmes à plusieurs fils ou des circuits polyphasés, ainsi que les conducteurs intentionnellement mis à la terre, ne doivent pas être munis de coupe-circuit.

f) On devra veiller à ce qu'un arc ne puisse s'allumer entre le coupe-circuit et un conducteur ou une pièce métallique voisine.

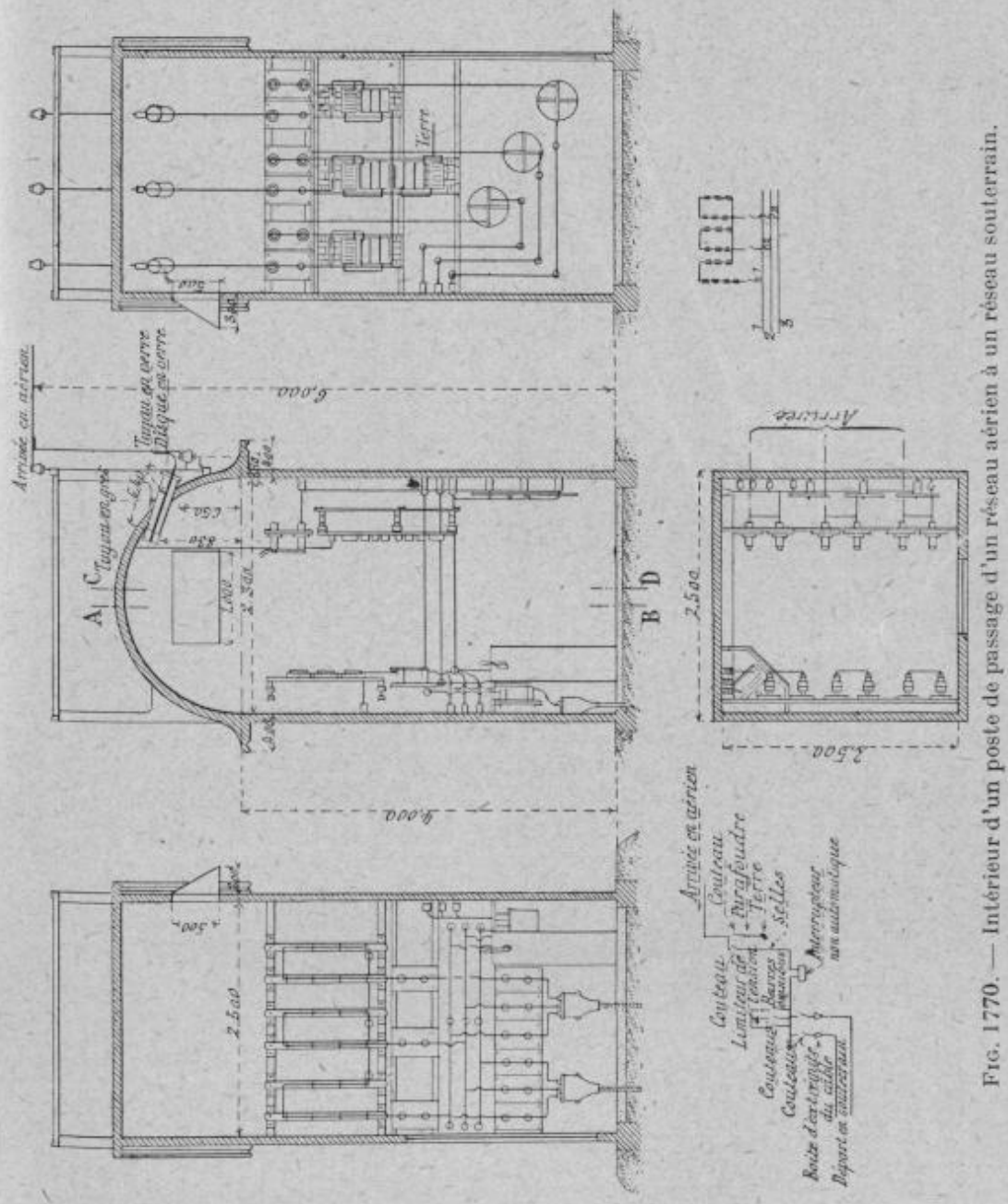


FIG. 1770. — Intérieur d'un poste de passage d'un réseau aérien à un réseau souterrain.

INTERRUPTEURS. — *a*) Les interrupteurs et commutateurs destinés à être manœuvrés en charge doivent être construits de telle manière qu'ils ne puissent être que complètement fermés ou ouverts, sans pouvoir stationner dans une position intermédiaire. On doit pouvoir se rendre compte facilement si un interrupteur est ouvert ou fermé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b) Tous les contacts doivent être à frottement.

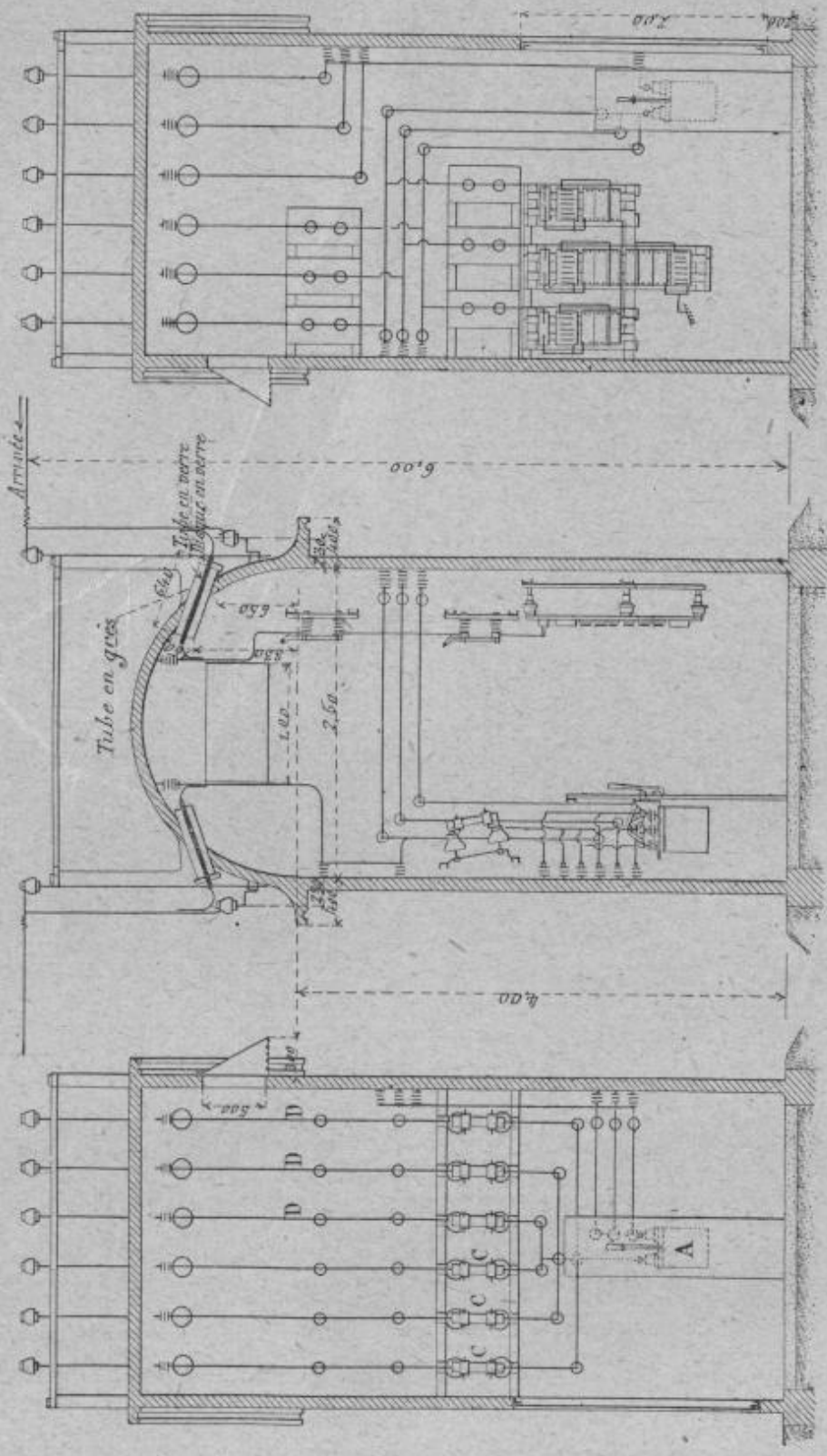


FIG. 1771. — Intérieur d'un poste de grande dérivation.

c) L'intensité normale et la tension limite doivent être indiquées sur l'appareil.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d) Les interrupteurs doivent être construits et protégés de façon à ce que leur manœuvre ne puisse donner lieu ni à un risque de contact avec une pièce sous tension, ni à un accident par formation d'arc.

e) La construction devra être telle qu'il y ait toujours entre la poignée et les organes sous tension une pièce isolante et une pièce métallique mise à la terre. Les boîtes et poignées métalliques devront également être mises à la terre.

f) Si le fil neutre ou d'équilibre d'un réseau comporte un interrupteur, ce dernier doit être solidaire de celui des pôles extrêmes, de manière que le fil ne soit jamais coupé avant les extrêmes.

g) On devra placer ces interrupteurs, coupant toute communication

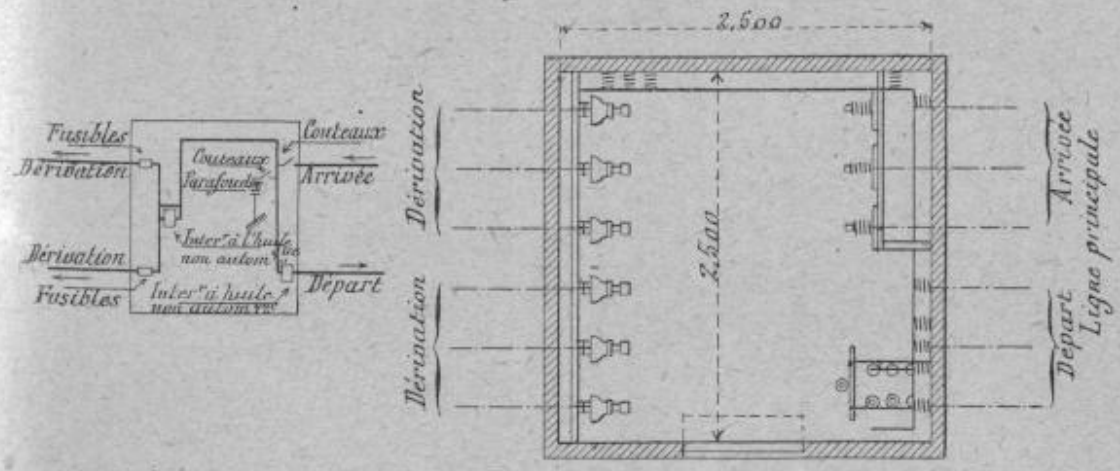


FIG. 1772. — Intérieur d'un poste de grande dérivation.

avec le réseau, aux embranchements principaux ainsi qu'à tous les appareils récepteurs et groupes de récepteurs en série.

RHÉOSTATS ET BOBINES DE SELF-INDUCTION. — *a*) Les rhéostats et bobines de self-induction dont l'échauffement peut dépasser 30° C. doivent être établis de manière qu'il ne puisse y avoir de contact des parties chaudes avec des matériaux inflammables ; l'échauffement des parties combustibles voisines ne doit pas être supérieur à 50° C.

b) Les rhéostats à refroidissement d'huile devront être écartés de tous matériaux combustibles et placés de façon que, dans le cas de débordement et d'inflammation, l'huile enflammée ne puisse s'épandre.

APPAREILS DE MESURE. — Tous les appareils de mesure dont les boîtiers ne sont pas suffisamment isolants pour pouvoir être touchés directement, ou insuffisamment isolés des organes intérieurs pour pouvoir être mis à la terre s'ils sont métalliques, devront être protégés par une enveloppe supplémentaire mise à la terre ou isolante.

Cette même prescription s'appliquera aux appareils branchés sur des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

transformateurs de mesure, si ces derniers ne sont pas munis d'un dispositif empêchant le passage de la tension primaire.

PARAFOUDRES ET LIMITEURS DE TENSION. — *a*) Les parafoudres devront être appropriés à la nature du courant et à la tension de la ligne à protéger. Ils devront rester efficaces après plusieurs décharges successives et ne pas donner lieu à des courts-circuits ou à des mises à la terre inopportunes.

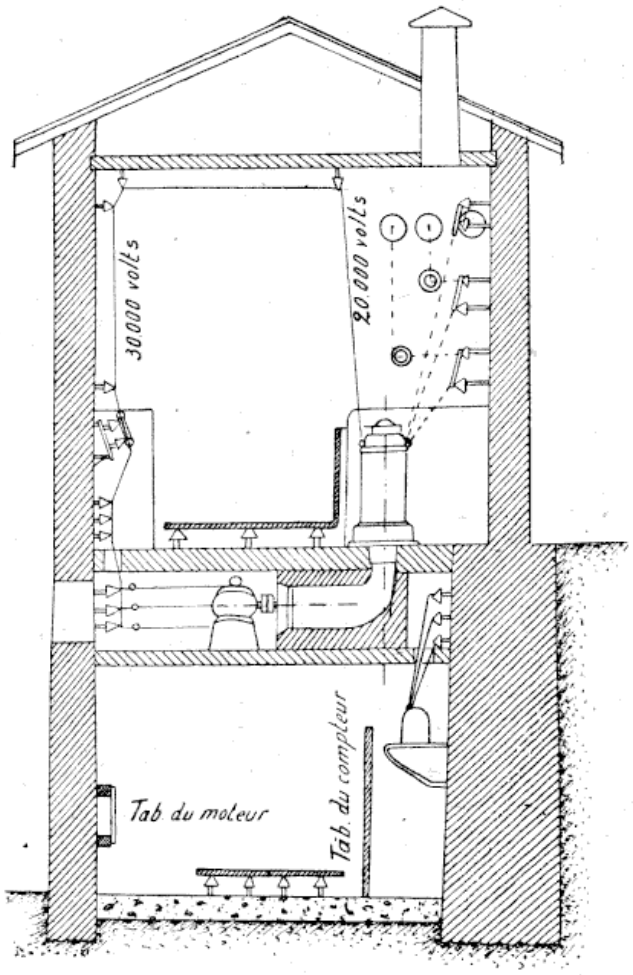


FIG. 1773. — Poste de transformateurs. (Transport de Thiers à Vichy. Usine de Sauviat.)

b) Les parafoudres de conducteurs à des potentiels différents auront des lignes et des prises de terre spéciales, ou bien, si l'on fait usage d'une prise de terre commune, les conduites à cette terre comprendront des résistances non inductives.

Les lignes de terre de parafoudres devront être protégées par une enveloppe ou couverture isolante (le bois est suffisant) dans toutes leurs parties accessibles. Elles doivent être séparées des autres lignes de terre.

c) Les lignes de terre des parafoudres devront être montées sur supports isolants.

GROUPEMENTS D'APPAREILS, TABLEAUX ET POSTES DE DISTRIBUTION. — *a*) Les coupe-circuits, interrupteurs, commutateurs, parafoudres et tous les appareils en général doivent être disposés et protégés de telle façon que leur fonctionnement ou leur manœuvre ne puisse occasionner aucun accident. Ils devront pouvoir être facilement inspectés au besoin en service.

b) Les pièces conductrices, les raccords et les contacts doivent avoir des dimensions telles que leur température maxima ne dépasse jamais de plus de 30° C. la température ambiante.

La température des rhéostats ne devra pas dépasser 200° C. ; leurs cadres ou enveloppes devront être incombustibles, et leur disposition sera

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

telle que les parties voisines ne puissent s'échauffer de plus de 50° C. au-dessus de l'ambiance.

c) Les appareils de manœuvre et de sécurité doivent être munis de plaques indicatrices.

Il est recommandable de distinguer les conducteurs de polarités ou de phases différentes par des signes ou une peinture en couleur.

Quand les connexions d'un tableau ou d'un groupement ne seront pas

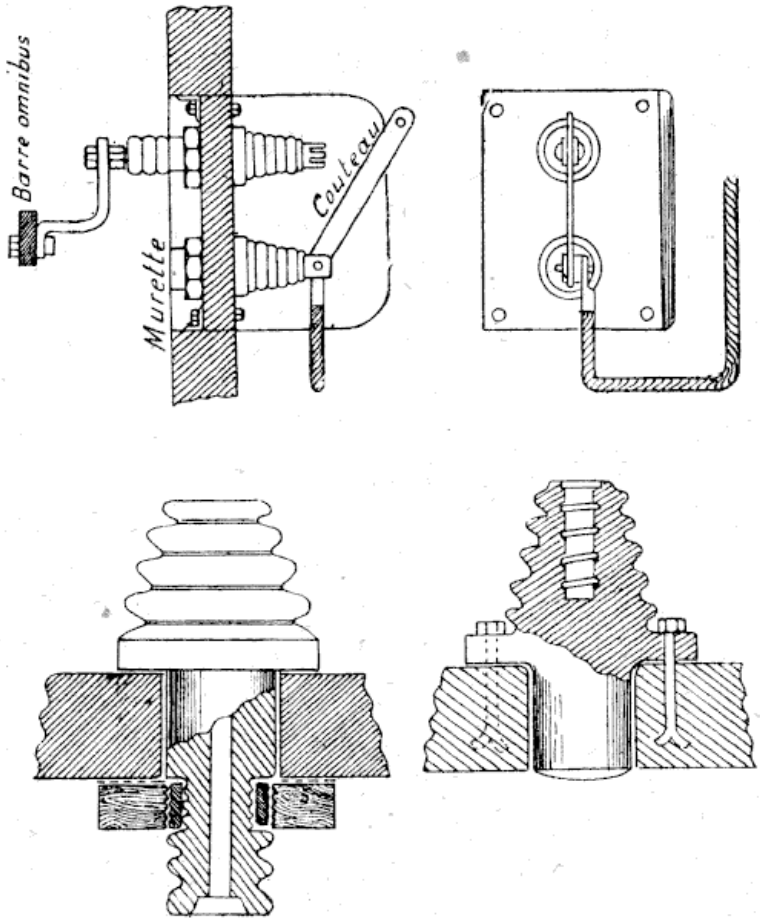


FIG. 1774. — Dispositif de montage d'un interrupteur à couteau.

évidentes *a priori*, il est indispensable d'afficher à proximité un schéma ou dessin schématique indiquant clairement toutes les connexions ainsi que la destination des différents départs.

d) S'il y a dans un même groupement des appareils à basse, moyenne et haute tension, chaque groupe doit être nettement séparé et différencié par des signes ou une peinture en couleur.

e) Il ne devra pas entrer de matières combustibles dans la construction des tableaux ou postes de distribution.

f) Les charpentes, garnitures et boîtes de protection métalliques devront être mises à la terre.

g) Toutes les pièces métalliques de la construction des postes de dis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

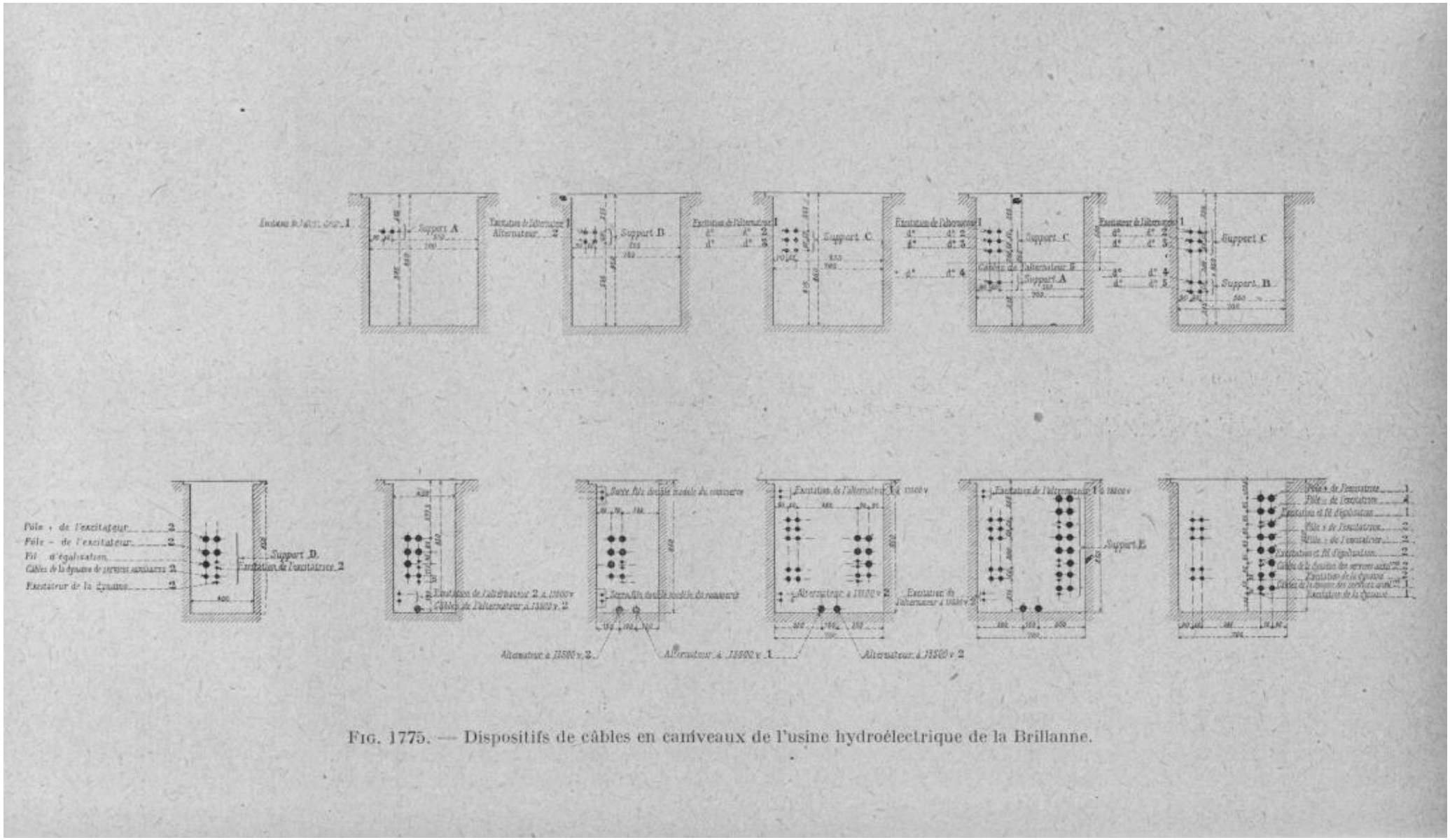


FIG. 1775. — Dispositifs de câbles en caniveaux de l'usine hydroélectrique de la Brillanne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tribution et en particulier les supports métalliques d'isolateurs, devront être reliés entre eux et mis à la terre.

h) Les tableaux doivent être disposés de telle façon qu'aucun conducteur ou appareil sous tension ne soit accessible des passages ou emplacements où se tient habituellement le personnel pour le service normal du tableau.

i) Les conducteurs et appareils sous tension, qui doivent être manœuvrés ou inspectés pendant le service, doivent être placés dans un local fermé et accessible seulement au personnel responsable.

Dans ces locaux, on doit réserver des passages libres d'au moins 1m,20 de largeur et 2 mètres de hauteur avec plancher isolant et non glissant.

j) Si, dans ces passages, il existe des conducteurs ou appareils sous tension des deux côtés, la largeur devra être portée à 1m,50 ; dans tous les cas, ils devront être établis de telle façon que le personnel appelé à y circuler ou à y travailler ne puisse venir accidentellement en contact avec des pièces sous tension.

S'il existe dans ces passages des balustrades ou mains-courantes, elles devront être isolées de terre.

k) Le plancher des passages où se tient habituellement le personnel pour le service normal du tableau doit être isolant.

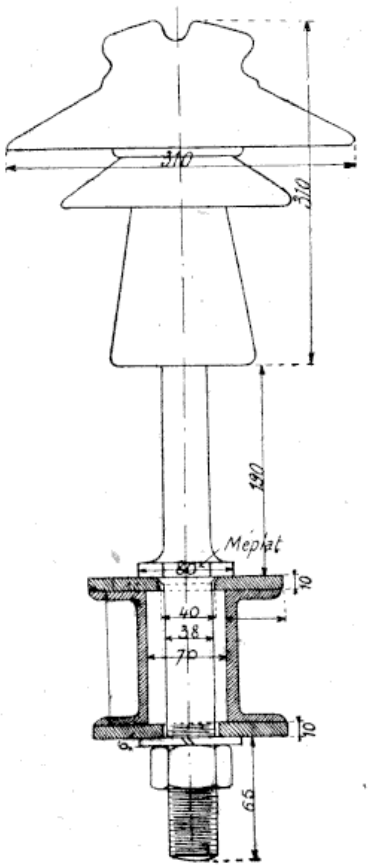


FIG. 1776. — Dispositif de montage d'un isolateur.

APPAREILLAGE. — Les appareils d'éclairage pourront être isolés s'ils ne peuvent être desservis que par des personnes isolées de la terre (plancher en bois). Au contraire, ils devront être mis à la terre dans les autres cas et en particulier dans les locaux humides, et à l'extérieur lorsqu'ils sont accessibles.

A moins d'être installés dans des locaux très secs et très isolants, les treuils des lampes à arc devront toujours être mis à la terre. Des dispositions spéciales doivent être prises pour que les lampes ne puissent être desservies sous tension. Les douilles à clef sont interdites ainsi que les lampes mobiles.

617. Instructions en cas d'accidents dus aux conducteurs d'énergie électrique. — 1° En cas d'accidents de personnes dus à des contacts avec les conducteurs d'énergie électrique, la *première mesure à*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prendre est de signaler ou de faire signaler par tous les moyens possibles et les plus rapides (téléphone, bicycliste, etc.) l'accident à l'usine génératrice pour que le courant soit coupé sur le circuit où a lieu ledit accident.

2° Si on ignore ou si on ne peut connaître ni la forme ni la tension du courant, il est prudent de *s'abstenir de toute opération jusqu'à interruption de celui-ci :* on se bornera à prendre des mesures pour atténuer la gravité de l'accident sans toucher aux conducteurs et même à la victime (matelas sur le sol si la victime est suspendue, etc.).

3° Si le courant est continu avec tension excédant 500 à 600 volts, ou alternatif avec tension à 3.000 ou 3.500 volts, la *même attitude s'impose.*

4° Au contraire, si le courant est continu et ne dépasse pas 500 à 600 volts, on écartera les conducteurs et on tirera à soi la victime en prenant les précautions suivantes :

A) Se protéger entièrement les mains au moyen de gants en caoutchouc ou d'une étoffe de laine épaisse et *bien sèche* ;

B) Se servir, pour écarter de la victime les conducteurs, d'objets en bois sec *d'au moins un mètre* de longueur ;

C) *S'abstenir formellement*, même avec soin, de toucher à la fois deux conducteurs ;

D) S'abstenir formellement et, dans quelques conditions que ce soit, de couper aucun des conducteurs, c'est-à-dire de les sectionner à droite et à gauche de la victime, cette mesure pouvant lui être fatale ;

E) S'abstenir formellement d'établir avec un objet quelconque, métallique ou autre, une liaison ou un contact entre deux conducteurs.

5° Si le courant est alternatif et ne dépasse pas 300 à 350 volts, on écartera les conducteurs, on tirera à soi la victime en se servant, à cet effet, d'un objet en bois sec *d'au moins un mètre* de longueur, ou d'une corde également bien sèche *d'au moins six mètres* de longueur. Si ce dégagement de la victime paraît difficile ou dangereux pour un motif quelconque, on coupera le ou les conducteurs, de part et d'autre de la victime, aux points les plus commodes et avec les précautions suivantes :

A) Se servir de préférence d'une hache à long manche de bois *bien sec* ;

B) S'envelopper les mains dans des tissus épais et bien secs, de préférence en laine ;

C) Éviter qu'au moment du sectionnement l'un des conducteurs aille toucher soit la victime, soit une personne présente, soit le sauveteur lui-même ;

D) S'abstenir de créer un court-circuit ou liaison quelconque entre les conducteurs électriques.

6° Une fois la victime dégagée, procéder immédiatement à l'application des prescriptions ci-après reproduites par l'Académie de médecine.

7° Dans tous les cas si quelque personne compétente se trouve à proxi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mité, elle devra être avisée sans retard et invitée à fournir les conseils et l'aide nécessaire.

Prescriptions de l'Académie de Médecine. — ARTICLE PREMIER. — Toute personne foudroyée par suite d'un contact accidentel avec des conducteurs d'énergie électrique devra toujours, *même dans le cas où elle présenterait les apparences de la mort*, recevoir avec la plus grande rapidité les soins indiqués ci-après :

a) Tout contact a cessé entre le corps de la victime et les conducteurs d'énergie électrique.

On appliquera immédiatement le traitement suivant :

On transportera d'abord la victime dans un local aéré où on ne conservera qu'un très petit nombre d'aides, trois ou quatre, toutes les autres personnes étant écartées.

On desserrera les vêtements et on s'efforcera, *le plus rapidement possible*, de rétablir la respiration et la circulation.

Pour rétablir la circulation, on peut avoir recours principalement aux deux moyens suivants : la traction rythmée de la langue et la respiration artificielle.

1° *Méthode de la traction rythmée de la langue.* — Ouvrir la bouche de la victime, et, si les dents sont serrées, les écarter en forçant avec les doigts ou avec un corps résistant quelconque : morceau de bois, manche de couteau, dos de cuiller ou de fourchette, extrémité d'une canne, etc.

Saisir solidement la partie antérieure de la langue entre le pouce et l'index de la main droite (nus ou revêtus d'un linge quelconque, d'un mouchoir de poche par exemple pour empêcher le glissement), et exercer sur elle de fortes tractions répétées, successives, cadencées ou rythmées, suivies de relâchement, en imitant les mouvements rythmés de la respiration elle-même au nombre d'au moins 20 par minute.

Les tractions linguales doivent être pratiquées sans retard et avec persistance durant une demi-heure, une heure et plus s'il le faut sans se décourager.

2° *Méthode de la respiration artificielle.* — Coucher la victime sur le dos, les épaules légèrement soulevées, la bouche ouverte, la langue bien dégagée.

Saisir les bras à la hauteur des coudes, les appuyer assez fortement sur les parois de la poitrine, puis les écarter et les porter au-dessus de la tête décrivant un arc de cercle ; les ramener ensuite à leur position primitive en pressant sur les parois de la poitrine.

Répéter ces mouvements environ 20 fois par minute, en continuant jusqu'au rétablissement complet qui peut durer quelquefois plusieurs heures.

Il conviendra de commencer toujours par la méthode de la traction de la langue, en appliquant en même temps, s'il est possible, la méthode de la respiration artificielle.

D'autre part, il conviendra concurremment de chercher à ramener la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

circulation en frictionnant la surface du corps, en flagellant le tronc avec les mains ou avec des serviettes mouillées, et jetant de temps en temps de l'eau froide sur la figure, en faisant respirer de l'ammoniaque ou du vinaigre.

618. Assurances contre l'incendie et la foudre applicables aux réseaux électriques. — Contrairement à ce qui existe en plusieurs pays d'Europe, et notamment en Angleterre et en Suisse, la France n'a pas encore de législation spéciale aux assurances terrestres (1).

Les Compagnies d'assurances établissent elles-mêmes les conventions qui tiennent lieu d'une législation pour régler les rapports entre l'assureur et l'assuré, fixer leurs droits et obligations respectifs et déterminer les conditions auxquelles elles consentent à garantir le risque d'incendie. Ces conditions sont loin d'être identiques d'une Compagnie à l'autre.

En ce qui concerne les bâtiments, il est de règle générale que les caves ou sous-sols et les fondations doivent être comprises dans l'assurance, mais il peut y avoir intérêt parfois, pour les usines d'électricité, à exclure de l'assurance les substructions dont l'édification a exigé une grosse dépense et dont la garantie donnerait lieu, par suite, à une lourde prime, alors que leur situation en sous-sol les met à l'abri d'une destruction radicale par le feu. Les Compagnies consentent cette exclusion moyennant une majoration de 10 0 /0 de la prime appliquée à la valeur d'ensemble des constructions assurées au-dessus du niveau du sol. Mais, dans ce cas, il convient de stipuler que le matériel qui pourra s'y trouver sera quand même garanti.

Pour le matériel, l'assureur ne répond que des dommages d'incendie proprement dits ; il exclut de sa garantie les détériorations causées aux dynamos et à leurs accessoires, ainsi qu'aux distributeurs ou transformateurs, par un courant d'intensité anormale résultant d'un défaut d'isolement, d'une erreur de réglage ou de toute autre cause inhérente au fonctionnement de l'appareil.

Les Compagnies assurent, outre les dommages d'incendie, les dégâts que la chute ou l'explosion de la foudre peut occasionner aux objets assurés, lors même qu'il ne s'ensuivrait pas d'incendie. Cette assurance est consentie aux conditions suivantes pour les usines d'électricité, selon que les usines sont sans ou avec circuit aérien. Dans le premier cas, les dommages non suivis d'incendie sont garantis sans surprime, en ce qui concerne les bâtiments et leur contenu, sauf pour la cheminée monumentale sur la valeur de laquelle il est perçu une surprime de 0,20 pour 1.000. Pour les usines ayant un circuit aérien, soit total ou partiel, la garantie de

(1) Rapport de M. E. Doucerain présenté au Congrès de l'Exposition d'Électricité de Marseille.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'assureur porte sur l'ensemble de l'usine et donne lieu à la perception d'une surprime de 0 fr. 50 par 1.000 francs assurés sur les bâtiments et leur contenu, ainsi que sur la cheminée.

En matière industrielle, le même taux de prime est appliqué uniformément aux bâtiments et à leur contenu : matériel et marchandises. En ce qui concerne les usines productrices d'électricité, les Compagnies d'assurances les divisent, pour la tarification à appliquer au risque d'incendie, en deux classes établies d'après la tension du courant produit, savoir : 1° jusqu'à 550 volts, prime 1 fr. 50 par 1.000 francs assurés ; 2° au-dessus de 550 volts, prime 2 fr. 50 par 1.000 francs assurés.

Ces taux supposent des bâtiments construits en matériaux durs : pierre, briques, fer et vitrages.

Les exploitants de stations centrales peuvent être responsables, en vertu des articles 1382 et suivants du Code civil, des suites d'incendie causés chez les tiers, abonnés ou non, lorsque ces incendies ou explosions sont dus à un défaut de surveillance, à un excès de tension, ou à une cause quelconque imputable à l'exploitant. Ceux qui font les installations ou réparations chez les abonnés peuvent être recherchés également, en cas de dommages causés aux tiers par des incendies dus à un défaut d'installation des appareils électriques dans l'étendue du réseau desservi. L'assurance de ce risque est couverte par une police d'ordre spéciale dite de « responsabilité civile ». Celle-ci est couverte d'ordinaire à raison de 100.000 francs par sinistre et par vingt-quatre heures, moyennant une prime fixée par 1.000 hectowatts-heures débités par an par l'usine génératrice, soit à raison de 0 fr. 15 ou de 0 fr. 25 par 1.000 hectowatts-heures, suivant que le fournisseur d'électricité fait ou non les installations et les réparations chez les abonnés.

Ce mode de tarification, s'il peut offrir des avantages aux usines ayant une production modérée, amène une prime très élevée quand il s'agit d'une usine importante ayant un fort débit annuel. Il présente, en outre, ce désavantage pour les usines de tout rang de constater le nombre d'hectowatts-heures débités annuellement par l'usine, déclaration qui, étant faite dans un acte authentique, peut, dans certains cas, présenter des inconvénients pour l'assuré, étant données les tendances fiscales à l'égard de l'industrie électrique.

Il serait préférable de traiter au moyen d'un contrat qui, mieux adapté aux intérêts de l'exploitant d'usines d'électricité, n'aurait point égard à la production annuelle des usines et n'en ferait point l'énonciation, mais tiendrait compte de l'étendue du réseau exploité, du chiffre global de sa population, du nombre et de l'importance des principales communes desservies, de la longueur des canalisations aériennes. Une prime forfaitaire serait fixée à raison de ces diverses éventualités.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — LES GRANDS RÉSEAUX DE LA FRANCE

619. Représentation cartographique des distributions d'énergie électrique. — Il a apparu au ministère des Travaux publics l'uti-

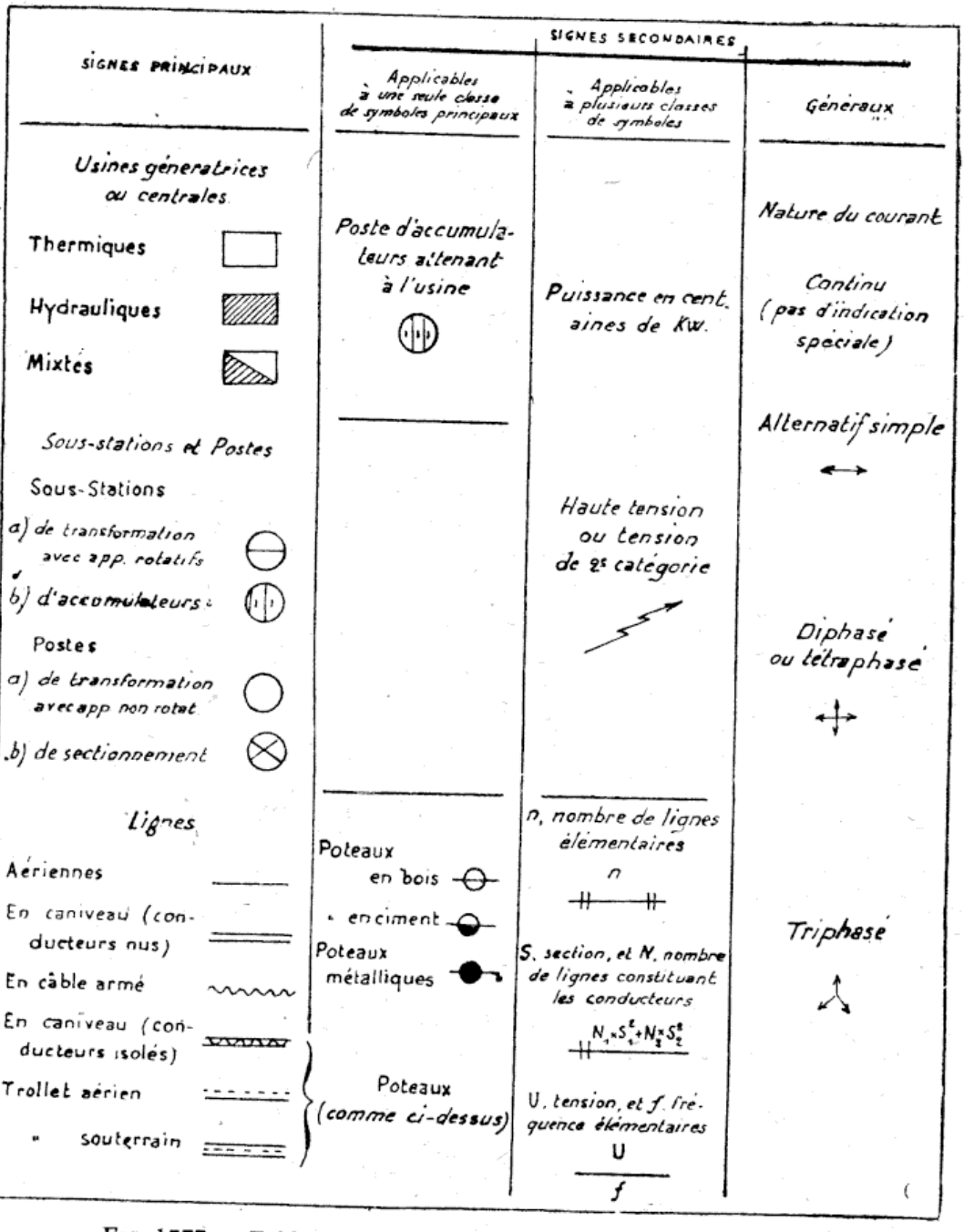


FIG. 1777. — Tableau synoptique des symboles cartographiques.

lité de représenter avec une précision de détails suffisante les installations électriques sur les cartes existantes. La Société Internationale des Électriciens, pressentie à ce sujet, a étudié la question et nous donnons

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ci-après un tableau résumant les symboles cartographiques qu'elle a proposés (*fig.* 1777).

La carte (*fig.* 1778) illustre un exemple d'application de ces symboles.

Les principales Sociétés de distribution d'énergie électrique sont énu-

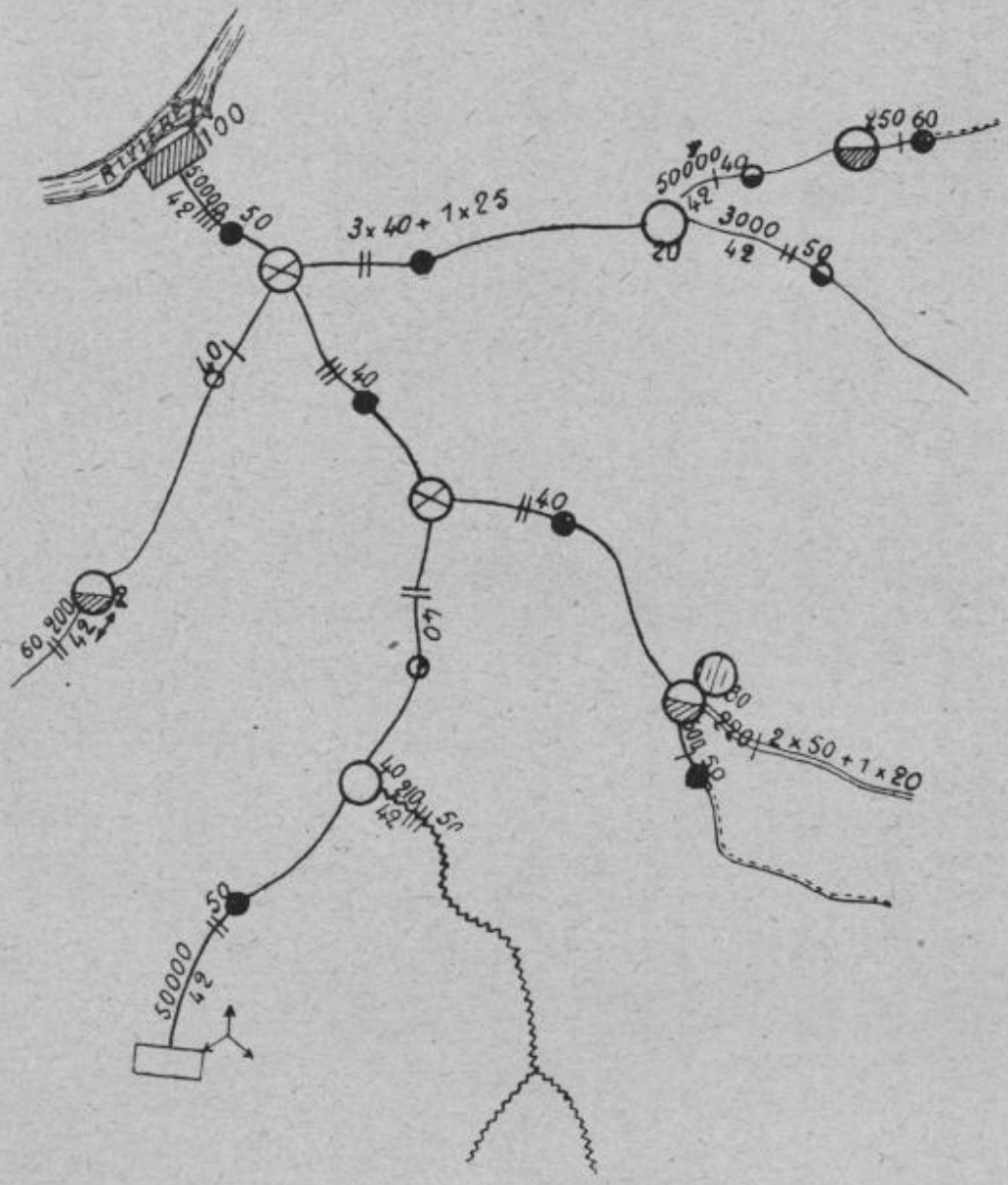


FIG. 1778. — Réseau avec indication des symboles.

mérées ci-après : 1. Société Méridionale de Transport de Force ; Société Biterroise de Force et Lumière. — 2. Société Pyrénéenne d'Énergie Électrique. — 3. Sud-Électrique. — 4. Énergie Électrique du Littoral méditerranéen. — 5. Compagnie d'Électricité de Marseille ; Société du Gaz et de l'Électricité de Marseille. — 6. Société de Fure et Morge et Vizille ; Société Électrique du Haut-Grésivaudan ; Société générale de Force et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lumière ; Société des Forces motrices du Vercors. — 7. Union Électrique. — 8. Énergie Électrique du Centre et de la Loire ; Société des Forces motrices de l'Auvergne. — 9. Société Lyonnaise des Forces motrices du Rhône ; Gaz de Lyon. — 10. Société des Forces motrices du Refrain. — 11. Société des Houillères de Ronchamp. — 12. Société Vosgienne d'Électricité et Station du Pont-du-Gouffre. — 13. Compagnie Lorraine d'Électricité. — 14. Énergie Électrique de Meuse et Marne. — 15. Société Meusienne d'électricité. — 16. Secteur Vilgrain. — 17. Énergie-Éclairage. — 18. Société d'Éclairage et de Chauffage par le Gaz de Reims. — 19. Est Électrique. — 20. Ardennes Électriques. — 21. Électricité et Gaz du Nord ; Compagnie générale pour le Chauffage du Gaz du Nord. — 22. Énergie Électrique du Nord de la France. — 23. Compagnie Électrique du Nord. — 24. Société Artésienne. — 25. Station centrale d'Amiens. — 26. Sociétés et Secteurs Parisiens. — 27. Compagnie Centrale d'Énergie Électrique. — 28. Compagnie d'Électricité de Brest et extensions. — 29. Société Nantaise d'Éclairage et de Force par l'Électricité. — 30. Compagnie d'Électricité d'Angers et extensions. — 31. Énergie Électrique du Sud-Ouest. — 32. Société Hydro-Électrique des Hautes-Pyrénées.

Les réseaux de la plupart de ces sociétés sont décrits en cours de cet ouvrage.

620. Réseau de la Société d'Énergie électrique du littoral méditerranéen. — Fondée en 1900, au capital de 4 millions de francs, la Société aménagea d'abord l'usine du Loup, noyau de son développement, puis acheta à la Compagnie des Tramways de Nice l'usine de La Mescla sur le Var et la ligne à 10.000 volts qui la reliait aux Tramways de Nice. Elle accepta donc, pour son usine du Loup, 10.000 volts, 25 périodes.

Pour racheter à la Société des Forces motrices des Alpes-Maritimes son usine de Plan du Var et sa clientèle, le capital fut porté au chiffre de 8 millions de francs. Les 5.000 volts, 50 périodes des Forces motrices furent transformés en 10.000 volts, 25 périodes. La Société avait ainsi créé son réseau des Alpes-Maritimes, et adopté 10.000 volts pour ce réseau.

Pour alimenter les tramways de la Compagnie de Toulon et de la Compagnie provençale de Tramways électriques, ainsi que les réseaux d'éclairage de nombreuses villes et agglomérations, elle acquit les droits nécessaires à l'installation de l'usine d'Entraygues (§ 322) sur l'Argens et de La Siagne (§ 406) sur la rivière de même nom. Ce fut l'origine du réseau du Var, qui commença de fonctionner, avec l'usine d'Entraygues, fin de l'année 1904. La tension de ce réseau fut fixée à 30.000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

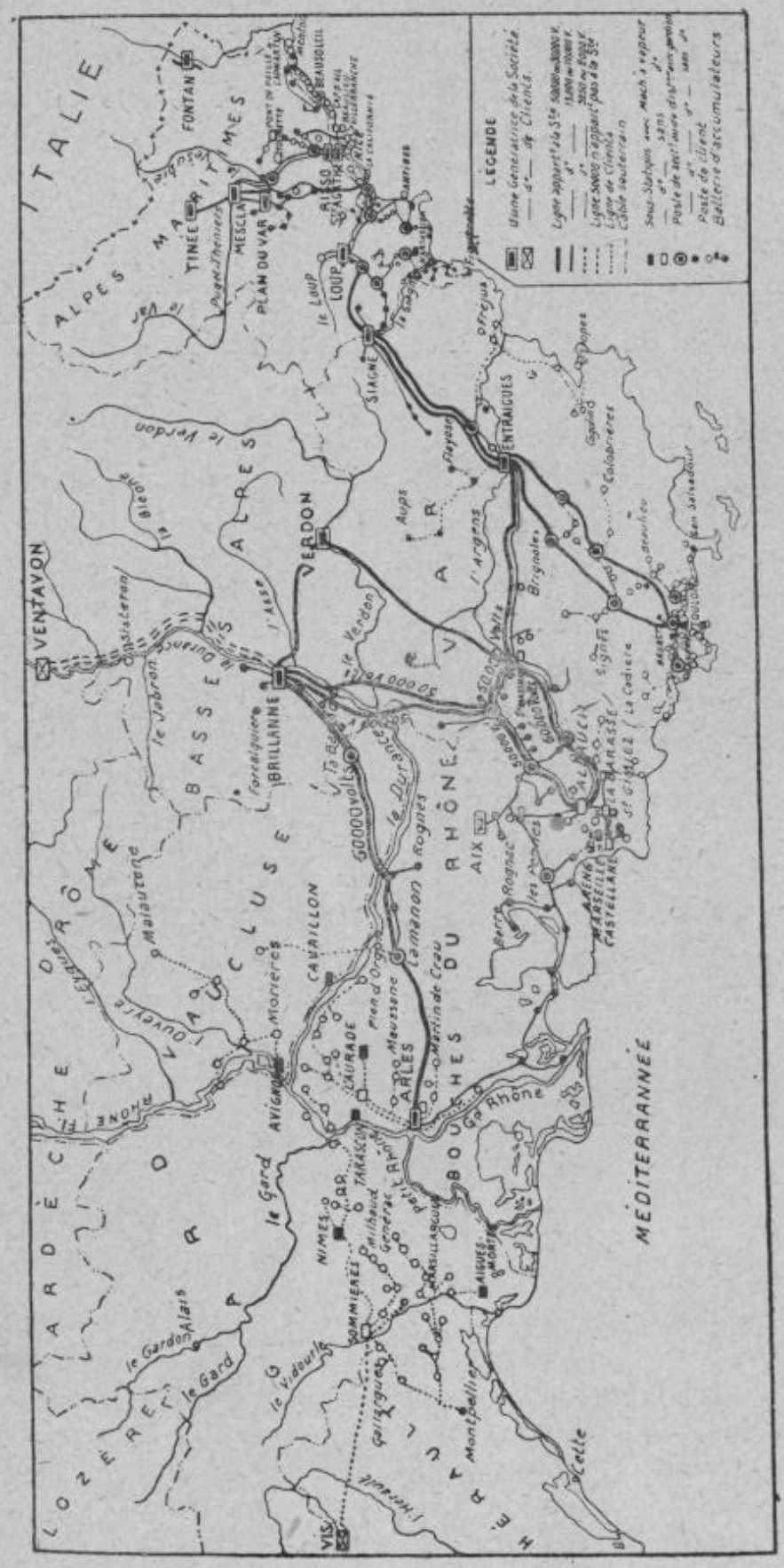


Fig. 1779. — Réseau du Littoral Méditerranéen et du Sud-Électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Désireuse d'alimenter les tramways de Marseille, et de créer un réseau des Bouches-du-Rhône, pour répondre aux nombreuses demandes émanant de cette région, la Société porta son capital le 28 mars 1904 de 8 à 16 millions de francs ; en même temps fut décidée la création de l'usine de La Brillanne-Villeneuve (§ 325), ainsi que des lignes de transport d'énergie électrique haute tension destinées à la desservir. La tension fut arrêtée à 50.000 volts.

Quant à l'adjuvant dont on avait besoin pour les Bouches-du-Rhône,

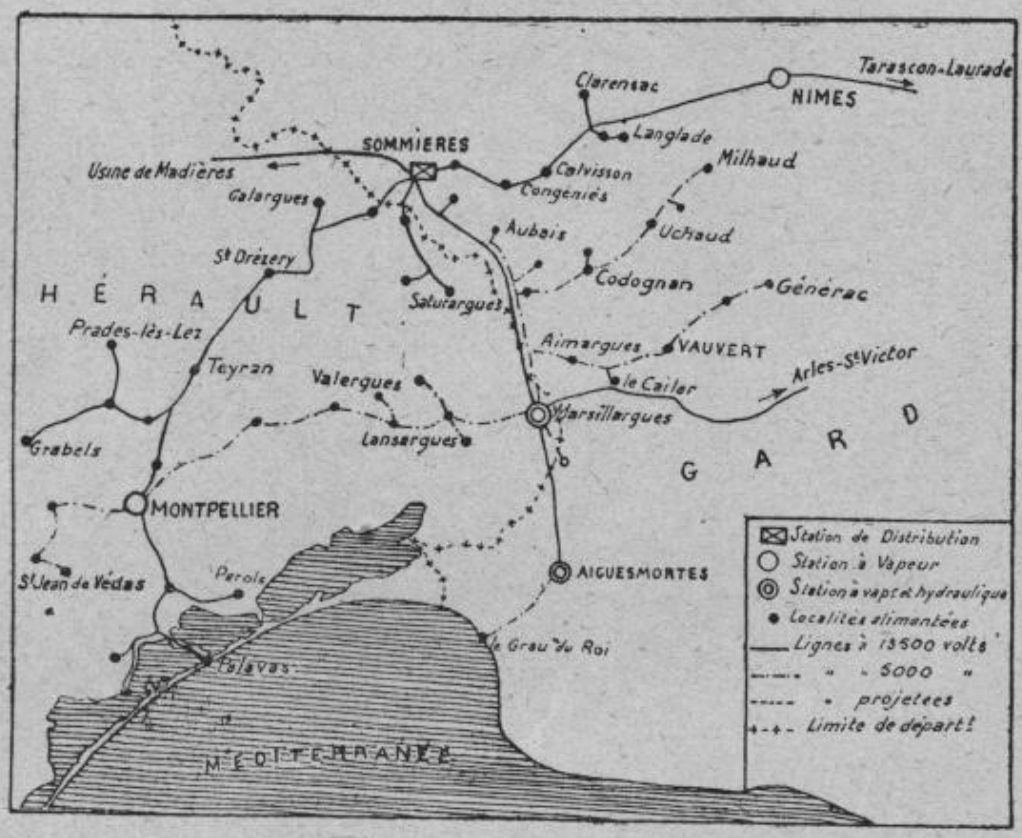


FIG. 1780. — Réseau de Sommières. (Le Sud-Électrique.)

l'usine de La Siagne le fournit au moyen de transformateurs surélevant la tension de 30,000 à 50.000 volts.

La Société reçut enfin une grosse demande de puissance de la Société du Sud-Électrique, dont l'objet est d'alimenter, en énergie électrique, le Comtat-Venaissin et la Camargue. Pour répondre à cette demande elle acquit la chute du Verdon et les droits à l'installation de l'usine de Ventavon (§ 341), dont le courant est fourni comme à La Brillanne-Villeneuve, à la tension de 50.000 volts. Le capital fut porté à 32 millions de francs.

Le tableau ci-après renseigne sur les puissances des diverses usines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

USINES	PUISSANCE disponible en kilowatts	CHUTE utile en m.	DÉBIT à l'étage en m³ : s.	DÉBIT moyen en m³ : s.	TENSION de distribution en volts	TURBINES installées puissance en kilowatts
Fontan	3.000	100	»	»	»	»
Saorge	3.000	»	»	»	»	»
Tinée	»	»	»	»	»	»
Mescla	1.500	10	15	20	10.000	3 × 600
					10.000	3 × 750
Plan du Var	3 750	27	15	20	basse tension	3 × 750
Loup	2.250	250	1	1,5	11.000	4 × 750
						4 × 1875
Siagne	6 000	350	1,5	2 à 2,4	30.000	2 × 110
Entraignes	1 500	19	»	8	30.000	3 × 750
						5 × 2600
La Brillanne	10.500	23,50	35	50	50.000	3 × 260
Verdon	15 000	140	»	»	»	»
Ventavon	15.000	50	»	»	»	»
	61.500					

En principe ces usines ne marchent pas en parallèle ; elles assurent chacune le service d'un secteur indépendant, ce qui facilite le réglage de la tension et permet de localiser les accidents ; mais dans les principales usines et dans les postes de transformation il y a des interrupteurs permettant de faire passer les feeders d'une ligne à l'autre afin de parer aux accidents ou pour régulariser la charge. Les usines peuvent cependant marcher en parallèle. Tout le réseau est à 25 périodes par seconde.

La situation des usines a cet heureux avantage de leur permettre d'être alimentées par des rivières à des régimes différents, quant aux époques de basses eaux, telles que la Durance et le Var d'origine glaciaire, d'une part et d'autre part la Siagne, l'Argens et le Verdon dont l'étiage se produit en été. Il en résulte une notable atténuation de la puissance globale du réseau.

L'existence de centrales à vapeur assure la marche d'un régime donnant satisfaction sous tous les rapports.

Les clients les plus importants sont alimentés par deux lignes et aussi par deux usines distinctes ; c'est ce qui arrive pour les tramways de Nice et la Compagnie du gaz de cette même ville. Dans les stations de transformation de ces deux Compagnies, des postes de sectionnement, avec interrupteur à deux directions, permettent de brancher les feeders sur l'une quelconque des usines.

621. Réseau des Pyrénées. — M. Pinot classe cette région au point de vue des forces hydroélectriques par la réunion des départements

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des Basses et Hautes-Pyrénées, du Gers, de l'Ariège, de la Haute-Garonne, des Pyrénées-Orientales, de l'Aude, et d'une partie du Tarn-et-Garonne.

La puissance aménagée dans cette partie de la France atteindra, dans un avenir très prochain près de 180.000 kilowatts dont près des trois quarts actuellement en fonctionnement.

Si on englobe dans cette région les départements du Tarn, de l'Hérault et de la Dordogne, on arrive aux chiffres respectifs de 160.000 et de 250.000 kilowatts.

Dans les Pyrénées-Orientales on rencontre l'usine de Villefranche-de-Conflent qui emprunte les eaux des rivières Le Têt et son affluent La Fuilla. La première accuse un débit de 1.200 litres en basses eaux, 3.000 litres en eaux moyennes et 6.000 litres en hautes eaux. La Fuilla roule entre 200 et 2.000 litres, avec une moyenne de 800 litres. Les deux chutes de Villefranche-de-Conflent qui atteignent 16 mètres (Têt) et 21 mètres (Fuilla) actionnent trois turbines de 230 kilowatts et une de 120. L'usine thermique de réserve a une puissance installée de 480 kilowatts.

L'usine de Pas-du-Loup, à Arles sur le Tech, utilise les eaux du Tech, dont le débit oscille entre 1.400 et 3.000 litres avec 2.000 litres de moyenne. Un canal de dérivation de 3km,500 crée une chute de 57 mètres. La puissance de l'usine est de 750 chevaux transportés à la tension de 15.000 ou 7.500 volts. Elle marche en parallèle avec l'usine de Villefranche.

L'usine d'Olette, sur le Têt, utilisera une chute de 200 mètres, sous un débit de 2.500 à 6.000 litres. Le canal de dérivation, d'une longueur de 6 kilomètres, prendra en route les eaux de la Cacanza, affluent du Têt. La puissance aménagée est de 4.400 kilowatts.

L'usine de Vinca, sur le Têt permet, sous 20 mètres de chute, la production de force pendant sept à huit mois, l'usine thermique de secours étant installée à Perpignan même.

Dans le département de l'Aude, on trouve l usine de Saint-Georges créée par la Société Méridionale de Transport de force, par la captation de l'Aude au-dessus de Gesse. La description de cette usine est donnée au (paragraphe 390.)

L'usine d'Aguzon, transformée, en amont d'Axiat, utilise une hauteur de chute de 185 mètres, avec un canal de 12km,500 et fournit une puissance de 8.000 kilowatts. Une usine thermique de secours comporte deux groupes de 2.500 chevaux avec des alternateurs de 500 kilowatts.

La Société Méridionale projette la création d'un vaste réservoir aux sources de l'Aude d'une capacité de 25 millions de mètres cubes.

La Société Biterroise possède à Truscas une usine qui emprunte les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

eaux de l'Orb. Le débit moyen de la rivière est de 2.000 litres environ. Un canal d'amenée de 2.676 mètres dont 1.915 mètres, en tunnel et 468 mètres en conduite forcée amènent l'eau, sous 46 mètres de charge, sur quatre turbines d'une puissance totale de 2.000 chevaux.

Deux lignes de transport, à 32.000 et 16.000 volts, rayonnent dans l'Hérault.

La Société Pyrénéenne d'Énergie électrique a mis en valeur trois groupes de chutes : celui d'Orlu et celui de Siguer dans l'Ariège, et celui d'Oo près Luchon dans la Haute-Garonne.

L'usine d'Orlu, qui utilise les eaux du lac de Naguilhes, est décrite au (paragraphe 426.)

La Société Pyrénéenne a englobé dans son réseau diverses petites usines de plaine, situées dans le Tarn : usines d'Arthez, près d'Albi (1.000 chevaux), de Marssac (400 chevaux) et de Bessuires (400 chevaux), toutes à basses chutes, qui dans l'avenir pourront débiter 35.000 chevaux. Au groupe d'Oo, les forces du lac d'Oo sont seules aménagées pour l'instant. Elles empruntent les eaux de la Neste, de l'One et d'Oo à 1.500 mètres de Luchon, sous une chute de 100 mètres, qui approvisionne d'énergie la ligne de Superbagnères.

La chute d'Oo atteindra 500 mètres et le lac de Séculèze servira de bassin régulateur ; on pourra disposer de 9.000 chevaux environ.

Le groupe de Siguer comprend les chutes de Broquenat et de Gnouré, à une vingtaine de kilomètres de Tarascon-sur-Ariège, hautes respectivement de 640 et 830 mètres. La puissance atteint 7.000 chevaux. La Société Pyrénéenne a ainsi à sa disposition une magnifique cavalerie hydraulique de 45.000 chevaux.

Dans la Haute-Garonne, deux usines occupent une place importante : l'usine du Bazacle à Toulouse et celle de Luchon.

L'usine du Bazacle a été absorbée par la Société Pyrénéenne. Elle est alimentée par la Garonne sous une hauteur de chute de $4^{m},20$, avec un débit de 30 mètres cubes moyen. Le fleuve est barré dans toute sa longueur. Cette usine comporte dix turbines pouvant fournir plus de 3.000 chevaux et une installation thermique de 900 chevaux. Elle est en outre reliée au réseau d'Orlu et à l'usine des Sept-Deniers qui comprend trois groupes de turbos à vapeur de 1.000 kilowatts chacun actionnant des alternateurs triphasés tournant à 1.500 tours. Quatre batteries d'accumulateurs de 1.500 ampères-heures sous 240 volts fournissent le courant au moment des pointes.

L'usine de Luchon, emprunte ses eaux à la rivière d'One, qui débite 1.800 litres à l'étiage. Un canal d'amenée de 1.750 mètres et une conduite forcée de 250 mètres de long et $0^{m},80$ de diamètre, sous une chute de 100 mètres, débitent l'eau nécessaire à l'actionnement de deux tur-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bines de 500 chevaux et une de 250 chevaux. Une chute de 200 chevaux va être aménagée pour servir de secours.

La Société du Lac Bleu, à Bagnères-de-Bigorre, a aménagé le ruisseau de ce nom pour produire une force de 1.000 chevaux. Elle possède en outre des chutes sur l'Adour (chute de 227 mètres), sur l'Adour et le Lac Bleu (92 mètres), sur l'Ardalos (300 mètres) pouvant donner 2.400 chevaux.

L'usine de Montgaillard, qui utilise les eaux de l'Adour et de divers ruisseaux formant 5 à 6 mètres cubes à l'étiage et 8 à 9 moyens, a été aménagée au moyen d'un canal d'amenée de 800 mètres de longueur. Sous une chute de $7^{m},30$, on récolte environ 500 chevaux. Une turbine de même force permettra de doubler cette puissance.

L'usine d'Arras, sur le Gave de Pau, fait appel aux eaux du Gave d'Arrens, dont le débit oscille entre 4 et 20 mètres cubes (10 en moyenne). Une conduite forcée de 100 mètres amène, sous 23 mètres de chute, les eaux sur deux turbines de 500 chevaux. La construction d'un bassin de réserve de 40.000 mètres cubes permettra de doubler la puissance de l'usine.

La Société Pyrénéenne d'Énergie électrique a son artère principale à 50.000 volts, qui a 230 kilomètres de longueur, d'Orlu à Toulouse, avec embranchements sur Lavelanet et Castres. Des lignes secondaires, à 25.000, 13.300 et 10.000 volts envoient le courant dans la Haute-Garonne, dans le Gers, dans le Tarn-et-Garonne, dans le Tarn et l'Aveyron.

Près de 150 communes sont desservies fournissant un contingent de 500.000 habitants. Les postes de réception les plus importants sont ceux de Lavelanet, Laroque, Graulhet, Albi, Castres, Castelsarrazin, Mazamet et Courtensour.

La Société Pyrénéenne est raccordée au réseau de la Société Méridionale à Labastide-Rouairoux et à celui du Bazacle à Toulouse.

La Société du secteur de Montgaillard a en projet l'aménagement d'une chute de 150 mètres, au voisinage de l'usine d'Arras. Un débit moyen de 8 mètres cubes permettra d'utiliser 3.500 à 4.000 chevaux de force.

Dans les Pyrénées occidentales, la Société électrique des Pyrénées dispose de quatre usines toutes alimentées par le Gave de Pau.

Ce sont : l'usine de Nay qui utilise une chute de $2^{m},90$ avec un débit constant de 10 mètres cubes ; l'usine de Belleris avec un débit de 6 mètres cubes et une hauteur de chute de $2^{m},70$; l'usine de Bezunos, 6 mètres cubes et chute de 2 mètres ; enfin l'usine de Claracq, débit de 8 mètres cubes et chute de $2^{m},50$. La force totale représente 800 chevaux.

Les chutes d'Isaby et Passpich, à Villelongue, hautes de 730 mètres,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec un débit de 400 à 2.000 litres a été aménagée pour recueillir 5.000 chevaux, dont 1.400 de secours.

La Société hydro-électrique des Basses-Pyrénées vient d'édifier à Banca (§ 367) une usine qui emprunte les eaux de la Nive des Aldudes, torrent pouvant assurer une force de 3.700 chevaux maximum. Un canal d'amenée de 4.700 mètres, dont 1.200 en tunnel et 3.000 en ciment armé et des conduites forcées de 180 mètres de long et $1^{m},40$ de diamètre amènent les eaux, sous une chute de 100 mètres, sur les arbres des turbines, du type Francis de 1.500 chevaux chaque.

Les alternateurs triphasés de 860 kilowatts fournissent du courant à 5.000 volts alimentant au moyen de transformateurs élévateurs de tension une ligne de transport de 30.000 volts aboutissant à une station installée aux portes de Bayonne. Un groupe thermique de secours avec moteurs Diesel complète cette installation.

622. Réseau de la Compagnie Lorraine d'électricité. — La Compagnie exploitante de ce réseau a été fondée en 1910 avec pour expectative de la fourniture de l'énergie électrique dans les vallées industrielles de la Meurthe jusqu'à Saint-Dié et de la Moselle jusqu'au delà d'Épinal et de la Valogne. La clientèle accessible pourrait être alimentée par une ligne à haute tension formant un triangle dont les sommets sont approximativement : Nancy, Saint-Dié et Épinal, comportant 100.000 chevaux d'industries diverses.

Les études préalables conduisirent à adopter : 1° L'établissement d'une station centrale à vapeur à Vincey, entre la Moselle, le canal et le chemin de fer auquel il est raccordé ;

2° Des accords pour l'achat d'énergie avec la Société des mines de la Houve, la Société de Markolstein et la Société des houillères de Ronchamp.

Un réseau ainsi alimenté de divers côtés par des sources d'énergie différentes, sans influence les unes sur les autres, ne peut qu'assurer à l'ensemble de la distribution une sécurité encore renforcée par les précautions prises dans les installations.

En raison des demandes d'énergie importantes provenant d'industriels des régions de la Marne et de la Meuse, avoisinant Saint-Dizier, Bar-le-Duc, Ligny, Joinville, Vitry, etc., une société dénommée « Énergie électrique de Meuse et Marne » fut créée pour y distribuer l'énergie électrique.

En outre la Compagnie Lorraine d'Électricité a été appelée à renforcer la situation de la Société « Énergie et Éclairage » existant déjà dans le bassin de Briey. Enfin la Société Marcel Vilgrain et C^ie^ qui exploite une distribution d'énergie importante entre le bassin de Briey et la région

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nancéenne a également conclu avec la Compagnie Lorraine d électricité des arrangements intéressants pour les deux entreprises.

Usine thermique de Vincey. — Les chaudières du système Babcock-Wilcox, au nombre de huit, peuvent produire chacune 12.000 à 16.000 ki-

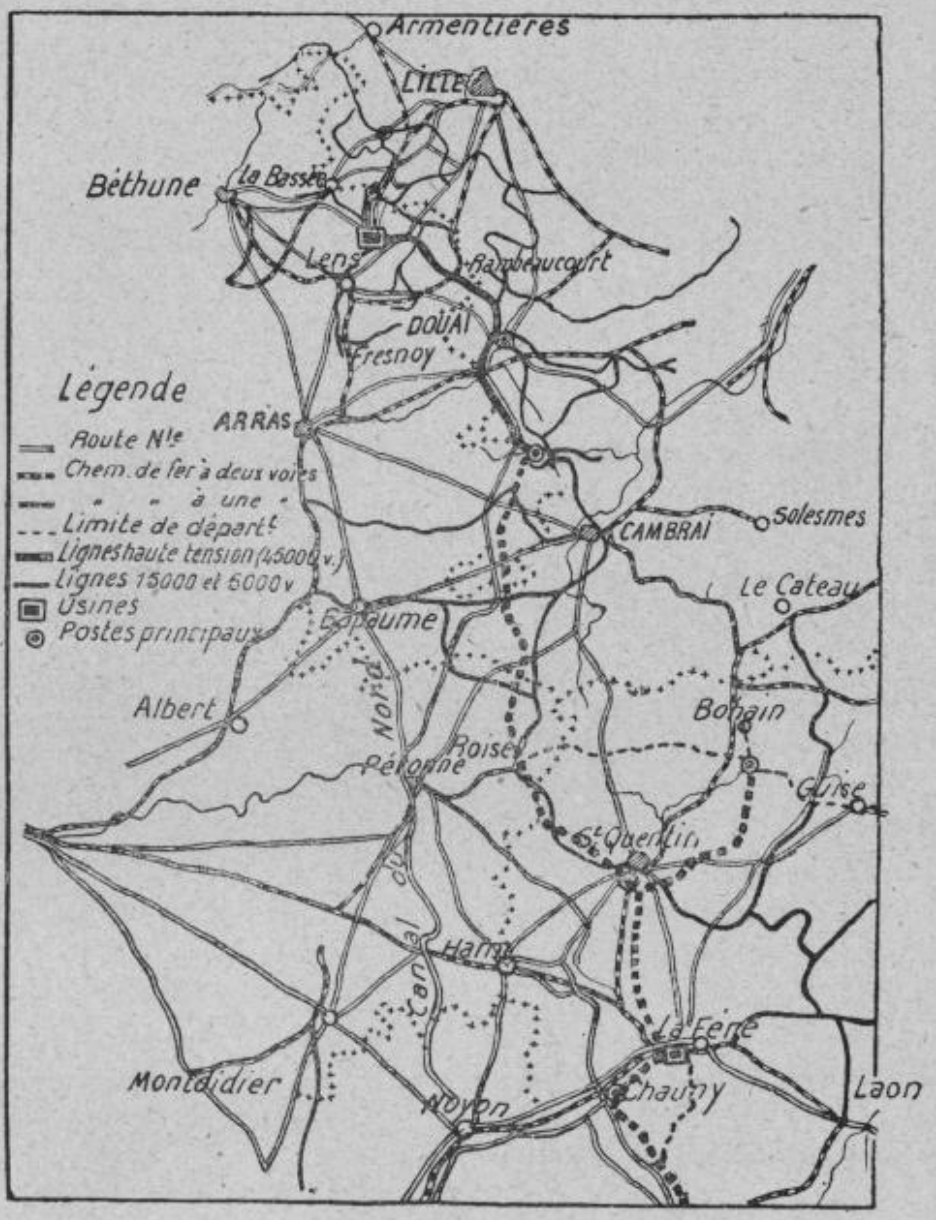


FIG. 1781. — Réseau de la Cie Électrique du Nord.

logrammes de vapeur à l'heure et chaque chaufferie alimente une unité de 15.000 kilowatts. Ces groupes produisent directement le courant à 11.000 volts, 50 périodes, dont une partie est surélevée à 65.000 volts par des transformateurs liés intimement aux alternateurs et de même puissance que ces derniers.

Les chaudières de l'usine comportent des surchauffeurs de vapeur à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

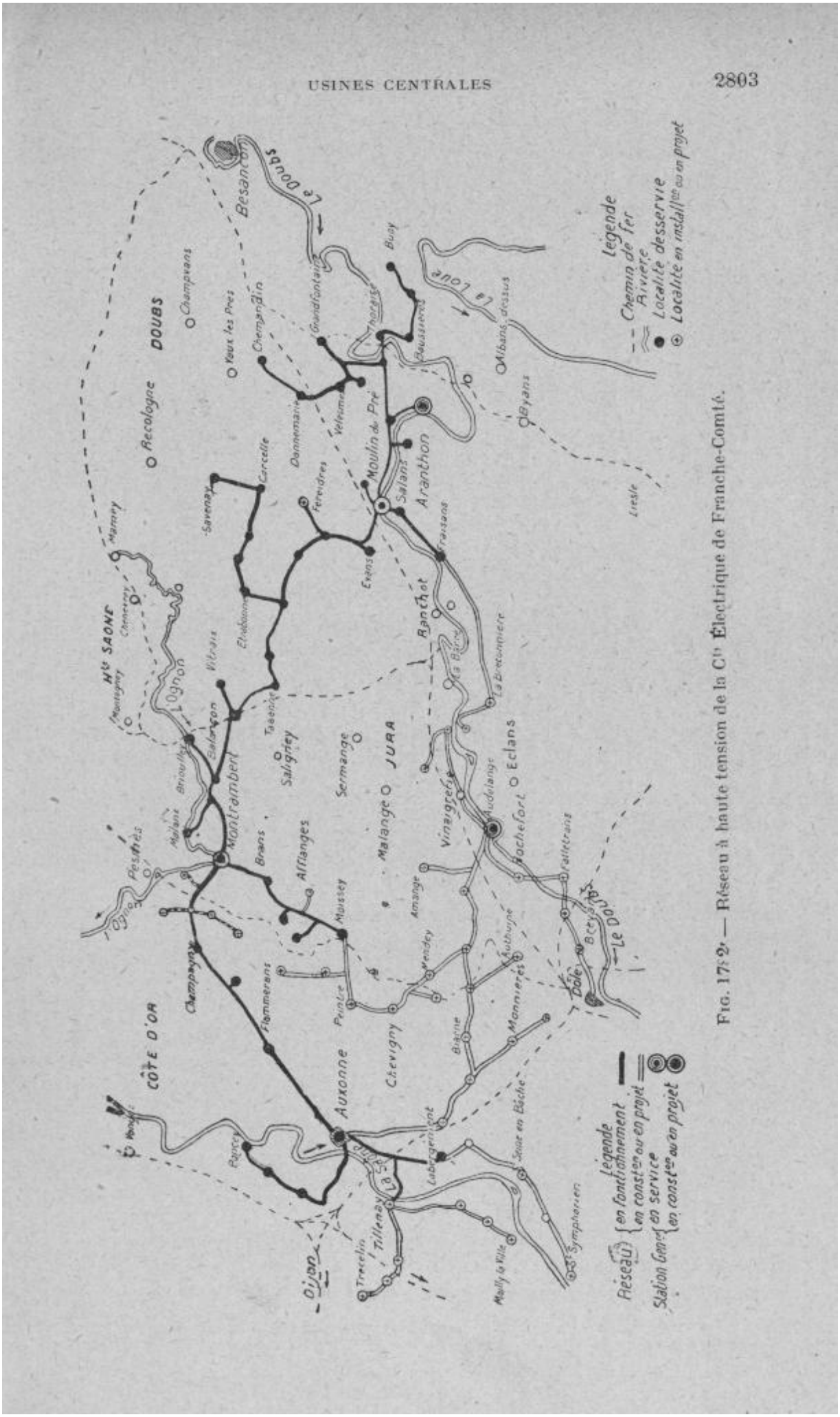


FIG. 1752. — Réseau à haute tension de la Cie Électrique de Franche-Comté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

350° et des économiseurs de vapeur. Les foyers mécaniques permettent la suppression complète de la chauffe et du décrassage à la main. L'enlèvement des scories se fait aussi mécaniquement et une annexe de l'usine permettra leur traitement et leur transformation en matériaux de construction.

Les groupes turbo-alternateurs du système Zoelly, construits par la Société Alsacienne de constructions mécaniques, sont à condensation par surface. L'usine est disposée pour recevoir trois ou quatre groupes de 15.000 kilowatts et plus en outre de ceux installés. On espère obtenir, en cours d'exploitation bien réglée, le kilowatt-heure à bas prix avec une consommation industrielle de combustible de 8.000 calories.

Lignes de transport. — On a envisagé les tensions de 30.000 volts et 65.000 volts ; cette dernière solution a été adoptée par la raison qu'elle permettait une économie totale de 3.300.000 francs. De plus cette tension permet dans l'avenir d'étendre le réseau en nécessitant moins de canalisations.

Les lignes à 65.000 volts sont constituées par trois fils de cuivre haute conductibilité de 80/10 de diamètre, avec charge de rupture de 40 kilogrammes par millimètre carré, et pouvant véhiculer normalement 6.000 kilowatts.

La disposition en boucle et les précautions prises dans la conception et dans l'exécution des postes donnent une très grande sécurité à l'ensemble de la distribution.

Sur le parcours de Laneuveville, Étival et Void, les lignes ont été établies de façon à permettre le doublement de la puissance ultérieurement transportée. Une artère directe de 44 kilomètres raccordera dans la suite l'usine de Vincey au poste de Laneuveville. Enfin, un poste de renforcement partant de Vincey pourra rejoindre le poste d'Étival en passant par Rambervillers.

Tous les supports sont métalliques et ont $14^{m},50$ de hauteur, sauf entre Laneuveville et Hériménil où ils sont en ciment armé. La portée normale est de 120 mètres et la distance entre fils de $1^{m},80$.

La longueur prévue des lignes à 65.000 volts est de 448 kilomètres, dont les trois quarts sont actuellement construits.

Les isolateurs sont en porcelaine, sauf une ligne, à titre d'essai, munie d'isolateurs en verre. Ils ont été essayés à 150.000 volts à sec pendant quarante minutes et sous une pluie de 15 millimètres par minute, inclinée à 15° : l'arc ne doit pas jaillir avant la tension de 100.000 volts.

Sur des supports indépendants du conducteur à 65.000 volts, sont établies des canalisations à 11.000 volts sur lesquelles se branchent les gros abonnés et les postes de villes et de villages.

Les principales lignes peuvent être alimentées par deux sous-stations

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de transformation. Des postes de coupure et des sectionneurs aériens convenablement répartis offrent le moyen d'obtenir l'isolement des tronçons, en cas d'essais, d'accidents ou de travaux. Les pylônes des lignes à 11.000 volts sont du type flexible, avec portées normales de 80 mètres et l'écartement des conducteurs est de $0^m,90$. La longueur de ces lignes est de 11 kilomètres dont les trois quarts sont aussi construits.

Les sous-stations de transformation, toutes établies sur le même schéma, peuvent être alimentées par deux arrivées différentes de lignes de transport.

En cas d'accident sur un tronçon, la partie avariée est éliminée automatiquement et sans interruption de service.

Les commandes des interrupteurs à haute tension se font à distance, soit à la main, soit automatiquement au moyen de relais mis en action par des transformateurs d'intensité. Chaque pénétration de ligne dans le poste est pourvue de sectionneurs permettant la mise à la terre du circuit, de bobines de self et d'un interrupteur automatique pour le raccordement sur les barres générales du poste.

Avant et après la bobine de self, des parafoudres à cornes, à sensibilités différentes, munis de résistances hydrauliques, sont intercalés sur chaque conducteur et constituent une protection contre les décharges atmosphériques.

Sur les barres générales sont, en outre, branchés des limiteurs à écoulement d'eau.

Les transformateurs à bains d'huile, logés dans des cellules, sont protégés, du côté primaire et secondaire, par des interrupteurs automatiques. Le refroidissement est assuré par ventilateur pour les types de 1.000 kilowatts et par circulation d'eau, pour ceux de 2.000 kilowatts et plus.

Les poids des transformateurs de 7.500 kilowatts (Vincey) atteint 25 tonnes y compris 6 tonnes d'huile.

Chacun des appareils à 11.000 volts est muni des mêmes appareils de protection et de commande que pour les arrivées primaires, mais appropriés à la tension correspondante.

623. Réseau de la Société l'Énergie électrique du Centre. — L'Énergie électrique du Centre exploite, outre le secteur du Cher, les réseaux de Saint-Étienne (30.000 volts) et du Roannais (20.000 volts) au moyen de courant triphasé, 50 périodes, fourni par différentes usines hydrauliques ou thermiques situées dans le bassin de la Loire.

Pour étendre et compléter ce réseau elle a fait construire par MM. A. Giros, Loucheur et Fougerolle frères, la ligne Dauphiné-Centre, qui permet de transporter jusqu'aux régions de la Haute-Loire et du Roannais l'énergie produite notamment par les usines de la Roizonne et de l'eau d'Olle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces deux dernières alimentent à la tension de 26.000 volts des lignes qui aboutissent à Grenoble, à la sous-station de transformation du Drac, point de départ de la ligne Dauphiné-Centre. Cette ligne s'étend sur 117 kilomètres. Elle prend le courant à la sous-station de Grenoble à 60.000 volts et aboutit au poste de Saint-Chamond où cette tension est abaissée à 30.000 volts, tension du secteur stéphanois.

Puis la ligne de Chazelles-sur-Lyon à la Vourdiat a assuré la jonction entre les secteurs de Saint-Étienne et du Roannais, par le poste de transformation 30.000/20.000 volts installé à l'usine de la Vourdiat. Depuis cette époque, ces deux réseaux sont alimentés partiellement par les usines génératrices des Alpes, en se prêtant un mutuel appui.

Ligne de transport d'énergie de Grenoble à Saint-Chamond. — Cette ligne s'étend sur une longueur de 117 kilomètres, entre la sous-station de Grenoble et celle de Saint-Chamond.

Sur toute cette ligne il n'existe qu'un seul poste de coupure pourvu d'interrupteurs à huile, situé à la côte Saint-André à peu près au milieu du parcours. Deux autres postes de coupure à Tullins et à Auberives, ne fonctionnent pas en charge. Des pylônes de sectionnement sont placés aux points dangereux, cols de Parmenie, col de Pavezin et à Cour.

La ligne aérienne se compose de deux circuits triphasés capables de transporter une puissance de 15.000 HP à 60.000 volts et disposés en trois nappes horizontales de deux conducteurs. La distance horizontale des deux conducteurs d'une même nappe varie de $1^{m},50$ à $1^{m},80$ et la distance verticale entre deux nappes est de $1^{m},50$ au minimum.

Cette ligne est établie avec des conducteurs en aluminium.

Sous-station de transformation de Saint-Chamond. — Le but de cette usine est de ramener la tension de 52.000 volts de la ligne Dauphiné-Centre à 30.000 volts, tension du réseau stéphanois. L'installation comporte : les arrivées des deux lignes de Froges (7.000 volts) et de Grenoble, les transformateurs 52.000-57.000 volts, les départs de 30.000 volts vers Saint-Étienne et les transformateurs 30.000/10.000 volts ou 30.000-7.500 et leurs départs correspondants.

Chacune des deux arrivées 57.000 volts de Grenoble est protégée contre les décharges atmosphériques et les surtensions comme au départ du poste de Grenoble par des limiteurs à jet d'eau, des parafoudres à cornes et des parafoudres à rouleaux genre Wurtz.

Un interrupteur tripolaire dans l'huile permet de coupler en parallèle les deux arrivées. Celles-ci débitent sur trois transformateurs monophasés Allioth du type dans l'huile à refroidissement par circulation d'eau. Chaque transformateur est d'une puissance de 1.200 k. v. a. et d'un rapport de transformation 30.000/17.300 volts. Ils sont branchés au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

primaire et au secondaire en étoile et forment ainsi un groupe triphasé de 3.600 k. v, a., 52.000 /30.000 volts, 50 périodes.

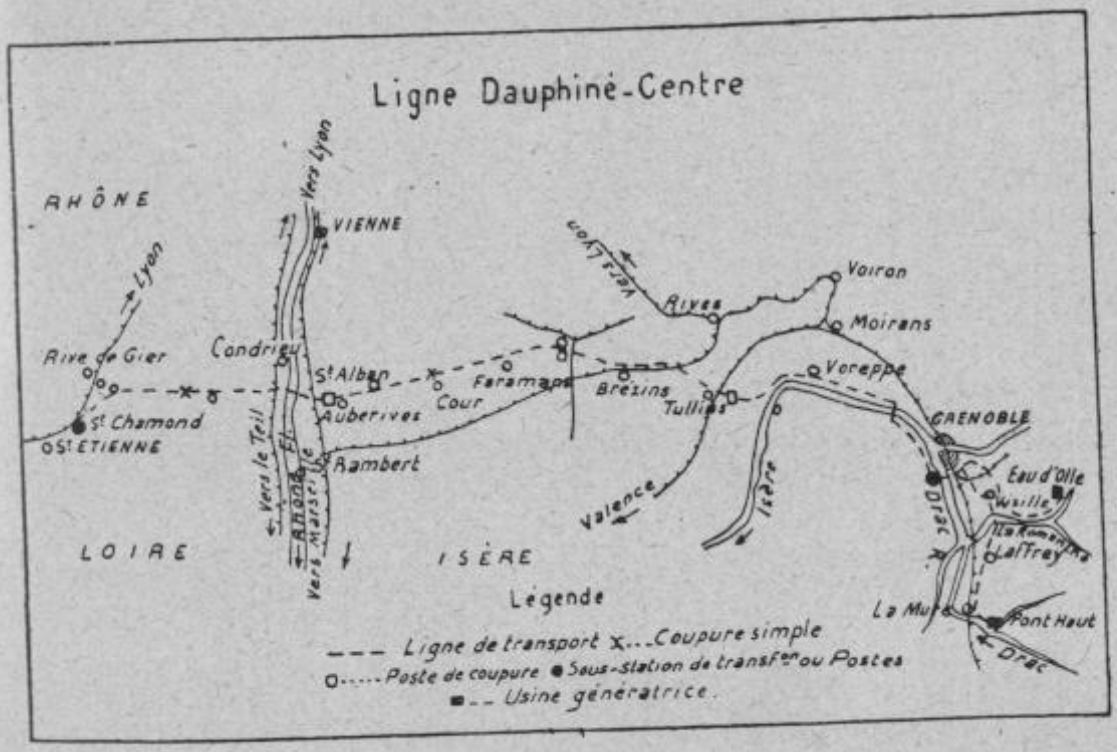


FIG. 1783. — Réseau Dauphiné-Centre.

Ils peuvent supporter une surcharge de 15 0/0 pendant trois heures. Ils ont supporté à l'essai 4.500 volts pendant dix minutes entre le primaire et le secondaire et entre le secondaire et la masse, 80.000 volts entre primaire et masse (à chaud).

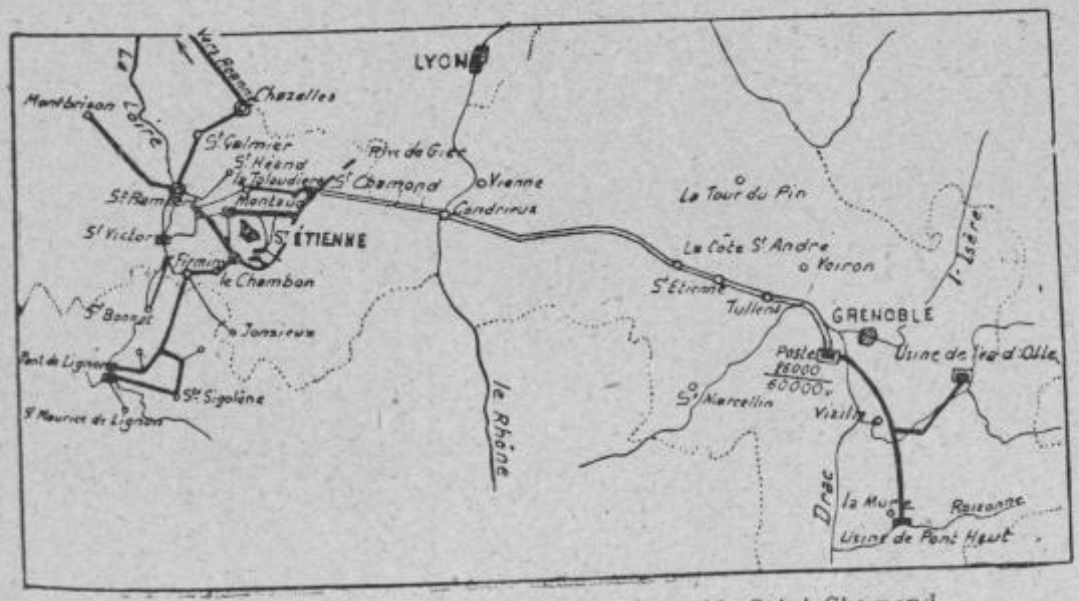


FIG. 1784. — Réseau de Saint-Etienne-Grenoble-Saint-Chamond.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

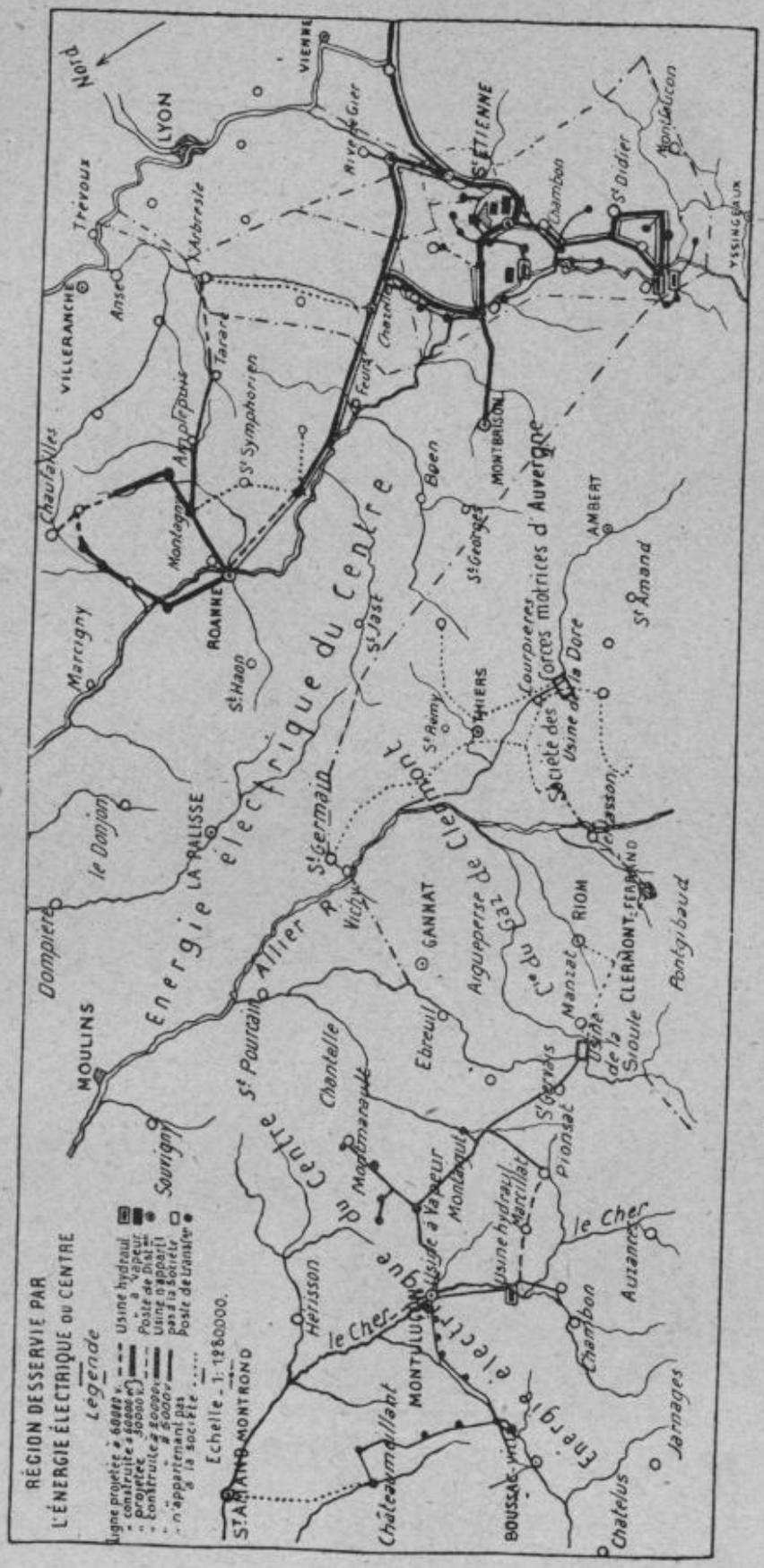


Fig. 1785. — Réseau desservi par l'Énergie électrique du Centre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les rendements ont été trouvés, avec cos $\varphi = 1$, 98 0/0 à pleine charge et 97,5 0/0 à demi-charge. Les chutes de tension entre marche à vide et pleine charge, 1,2 0/0 pour cos $\varphi = 1$ et 3,5 0/0 pour cos $\varphi = 0,8$.

Les interrupteurs des circuits primaires et secondaires (interrupteurs tripolaires 30.000 volts et unipolaires 52.000 volts) sont du type à huile commandés par le même dispositif d'enclenchement. Le déclenchement s'opère à l'aide de relais à maxima et à action différée réglables Alioth, qui ferment les bobines de déclenchement des interrupteurs sur une source auxiliaire de courant continu obtenue à l'aide d'une petite batterie d'accumulateurs et de son groupe moteur asynchrone génératrice de transformation.

Les caractéristiques de fonctionnement de la ligne Dauphiné-Centre sont les suivantes :

Résistance ohmique d'un conducteur à + 28° C. = 41,5 ohms ; coefficient d'induction mutuelle et de self-induction totale = 0,1789 henry ; impédance à + 28° C. = 69,8 ohms. La perte de puissance est de 9 0/0 et la chute de tension en ligne de 12 0/0, pour une puissance livrée à Saint-Chamond de 10.000 kilowatts environ avec un facteur de puissance à l'arrivée, cos $\varphi = 0,85$.

Les usines hydroélectriques locales situées à Pont-de-Lignon (sur le Lignon (Haute-Loire), à Saint-Victor et à la Vourdiat (sur la Loire), com-

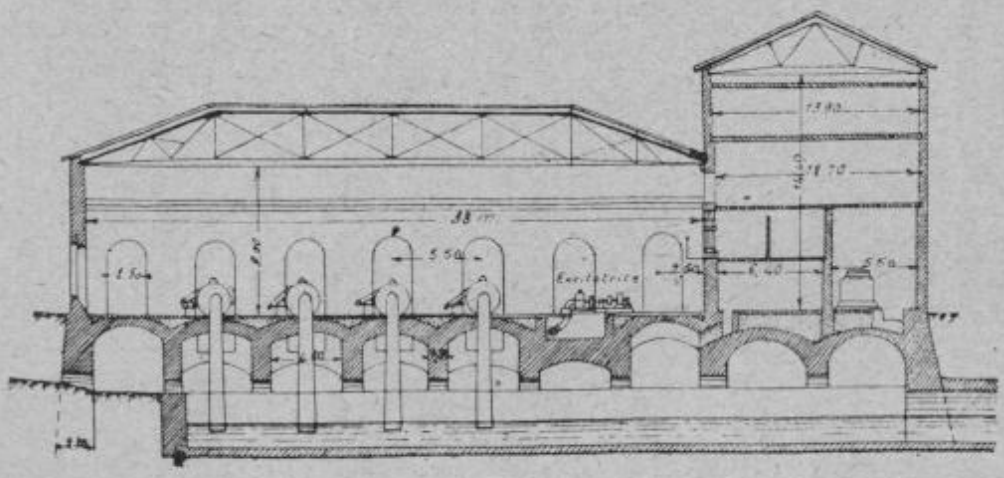


Fig. 1786. —Coupe verticale de l'usine hydroélectrique de Château-du-Lignon.

pensent d'une façon fort heureuse la faiblesse des débits des usines des Alpes pendant l'hiver, de sorte que le secteur de Saint-Étienne ne produit à la vapeur que le strict minimum d'énergie nécessaire.

L'usine à vapeur de Montluçon a été établie pour une puissance de 3.000 chevaux. La ligne de Montluçon à l'usine hydroélectrique de la Sioule traverse les centres très importants de Nérys, Commentry, Saint-Éloi-les-Mines. Ces communes, ainsi que Montluçon, sont desservies par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les deux usines hydroélectriques : Teillet-Argenty (§ 328) et la Sioule (§ 406).

L'usine à vapeur de Roanne est établie pour produire 5.000 chevaux.

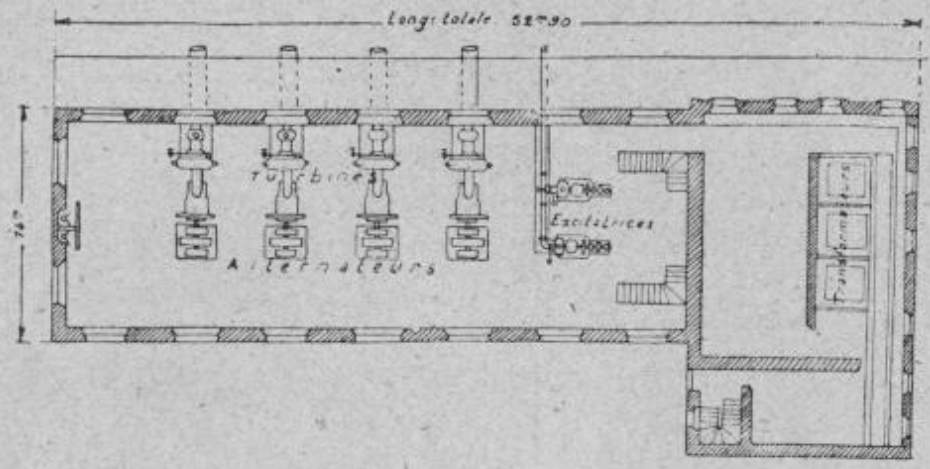


FIG. 1787. — Plan de l'usine de Château-du-Lignon.

De cette usine part une ligne aérienne à 20.000 volts allant à Montagny.

Une ligne à 30.000 volts relie Monthaud à Saint-Chamond par le Dever et Terre-Noire (6 fils) et de l'usine de Saint-Chamond part le réseau de 10.000 volts desservant la vallée du Gier. Une seconde ligne à 30.000 volts relie Monthaud à Saint-Chamond par la Talaudière (3 fils).

624. Réseau de la Société Méridionale. — La Société Méridionale a capté en premier lieu l'Aude à 60 kilomètres de sa source, au-dessus de Gesse, où elle dispose d'un débit variant entre 2,5 et 5 mètres cubes. L'usine de Saint-Georges (§ 371) a été créée dans les montagnes du Midi.

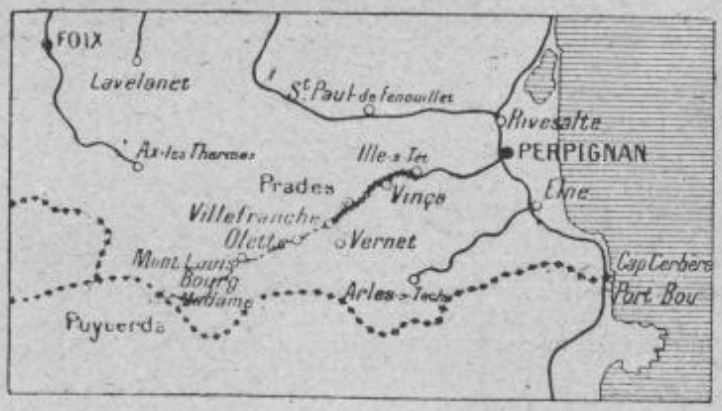


FIG. 1788. — Réseau de Perpignan.

Ensuite est venue l'usine d'Aguzon, qui utilise une chute de 185 mètres de hauteur en amont d'Axiat et peut fournir 8.000 kilowatts. Deux groupes thermiques de 2.500 chevaux complètent cette installation.

Le courant produit à Axiat est envoyé sous 25.000 volts à Fabrezan, d'où trois lignes le conduisent à Carcassonne, à la Nouvelle, à Narbonne, à Castelnaudary, Nissan et Perpignan. Son réseau s'étend sur près de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1.500 kilomètres et il dessert plus de 250 communes et il lui sera facile de doubler sa clientèle.

La Société la Biterroise a ouvert en 1905 l'usine hydroélectrique de Trusca (§ 338) sur l'Orb, avec un débit moyen de 2 mètres cubes et une hauteur de chute de 46 mètres fournissant ainsi 2.000 chevaux.

Deux lignes primaires à 32.000 et 16.000 volts transportent l'énergie dans le département de l'Hérault. La ligne principale relie la station génératrice de Trusca à Béziers par Bédarieux. De cette artère se détachent des rameaux allant vers Graissessac, Lamalou, Thezan et Lignan, Servian, Agde, Cette, Frontignan et les salins du Midi.

La Biterroise, avec le concours de la Société de l'Agoût, dessert près de 70 communes et son réseau s'étend sur plus de 400 kilomètres.

625. Réseau Électrique du Sud-Ouest. — Le plan du réseau

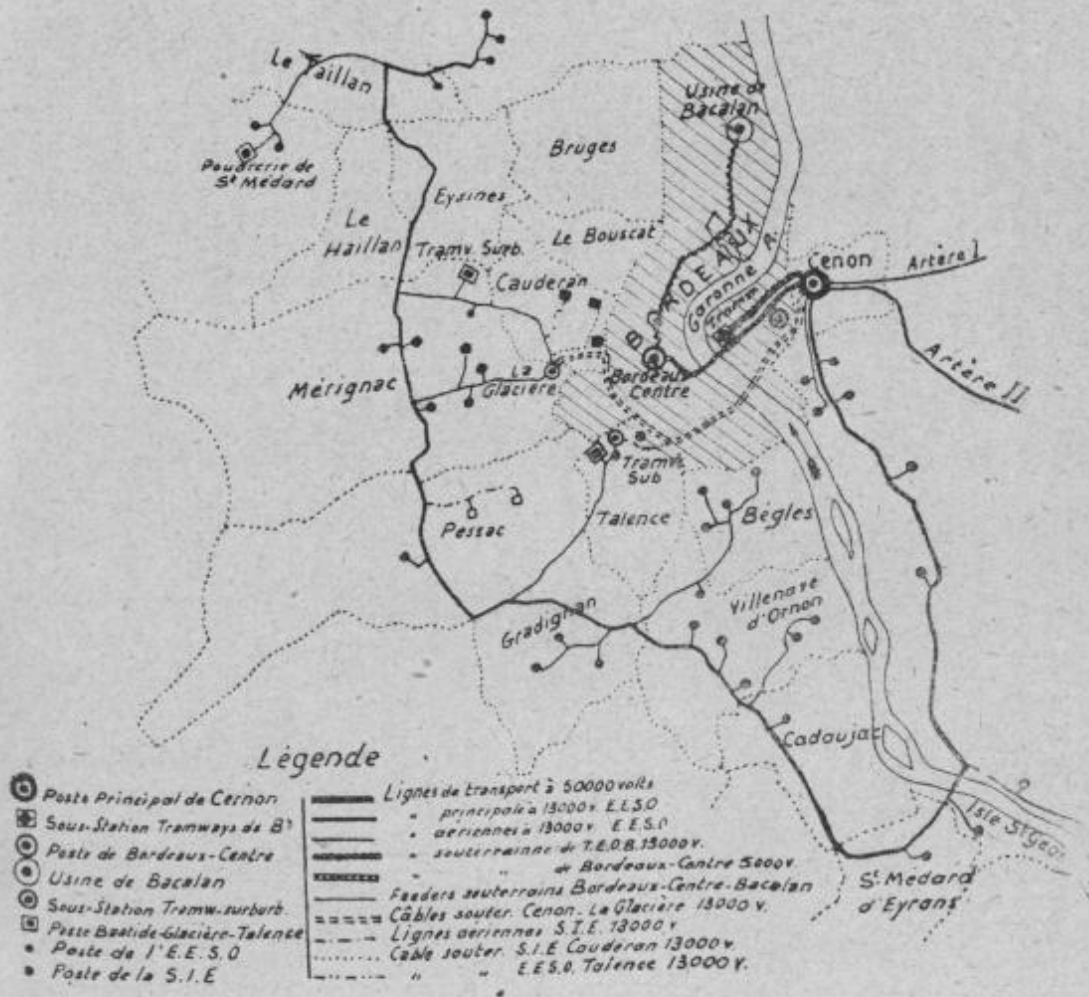


FIG. 1789. — Réseau de Bordeaux et de sa région.

urbain (*fig.* 1789) donne une idée du développement de la distribution de l'énergie de ce secteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La puissance totale de l'énergie électrique nécessaire à la ville de Bordeaux et de sa banlieue est fournie par la remarquable usine hydroélectrique de Tuilière, établie sur la Dordogne. Cette énergie est trans-

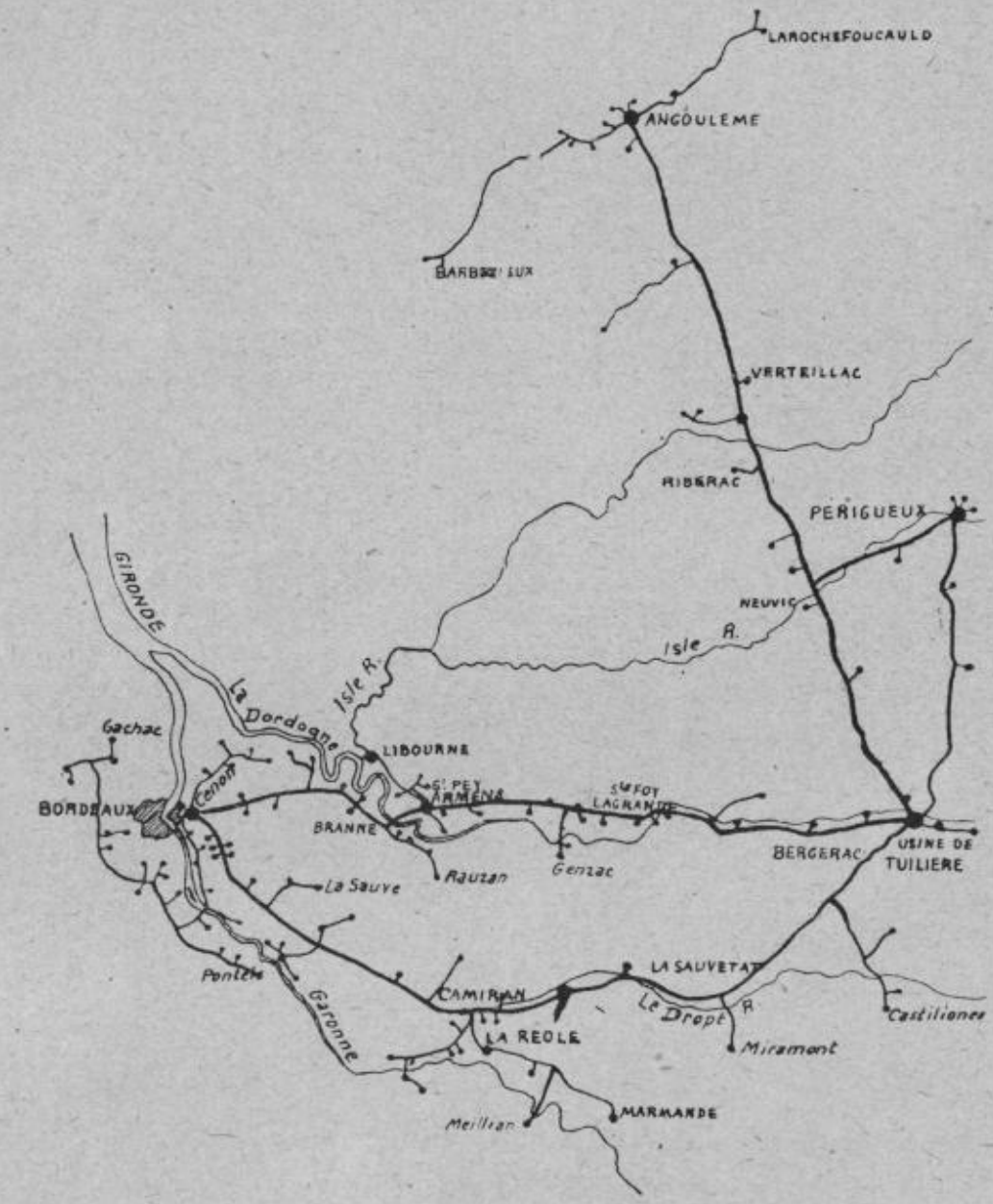


FIG. 1790. — Réseau du Sud-Ouest.

mise en courant triphasé à 50.000 volts, aboutissant à un poste de transformation installé à Cenon-Bordeaux.

Les usines à vapeur de Bacalan, du Temple, celle de la Compagnie Générale des Tramways et Omnibus de Bordeaux fournissent un appoint de 8.000 chevaux. Le courant à 50.000 volts est transformé au poste de Cenon à la tension de 13.500 volts. En temps normal chaque artère à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

50.000 volts fonctionne d'une manière indépendante et est destinée à alimenter deux groupes distincts de transformateurs mais avec couplage selon les besoins.

La distribution dans Bordeaux est assurée par quatre lignes aériennes et quatre souterraines, toutes à la tension de 13.500 volts. Indépendamment de la distribution urbaine, très importante, la plus grande partie des

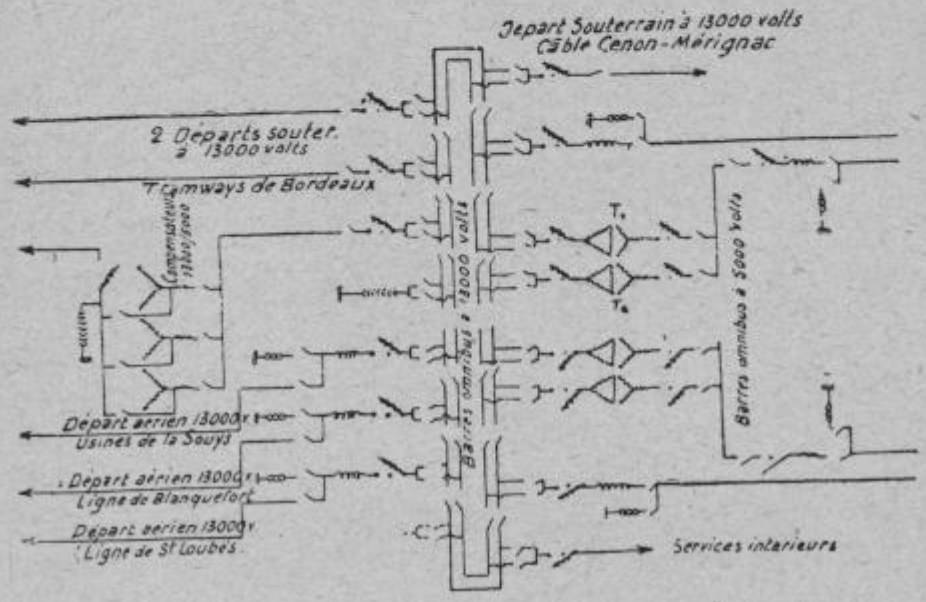


FIG. 1791. — Schéma des lignes de transport d'énergie électrique de la région de Bordeaux.

communes suburbaines et de la grande banlieue sont desservies par de nombreux postes de transformateurs reliés par un réseau primaire souterrain et aérien, largement établi.

626. Ligne de transmission de la Central Georgia Transmission C° (Amérique du Nord). — Cette entreprise a pour but de vendre l'énergie dans la Georgia moyenne en se rattachant au réseau de la Central Georgia Power C°.

Le courant adopté est du triphasé 66.000 volts, 60 périodes.

Sur les parcours droits, les pylônes supportent les canalisations de deux circuits à l'aide de bras latéraux situés de part et d'autre du pylône. Les trois fils d'un même circuit sont décalés à cause de leur rebondissement quand ils se déchargent des neiges qu'ils reçoivent.

Les arbres ont été coupés à 30 mètres de distance de chaque côté de la ligne.

La portée moyenne est de 175 mètres et atteint parfois 300 mètres et plus.

Les câbles, en aluminium, ont 7 fils donnant une section totale de 85 millimètres carrés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les canalisations ont été établies en admettant une vitesse de vent égale à 50 kilomètres à l'heure à 0° Fahrenheit et une charge de glace de $9^{mm},5$ d'épaisseur.

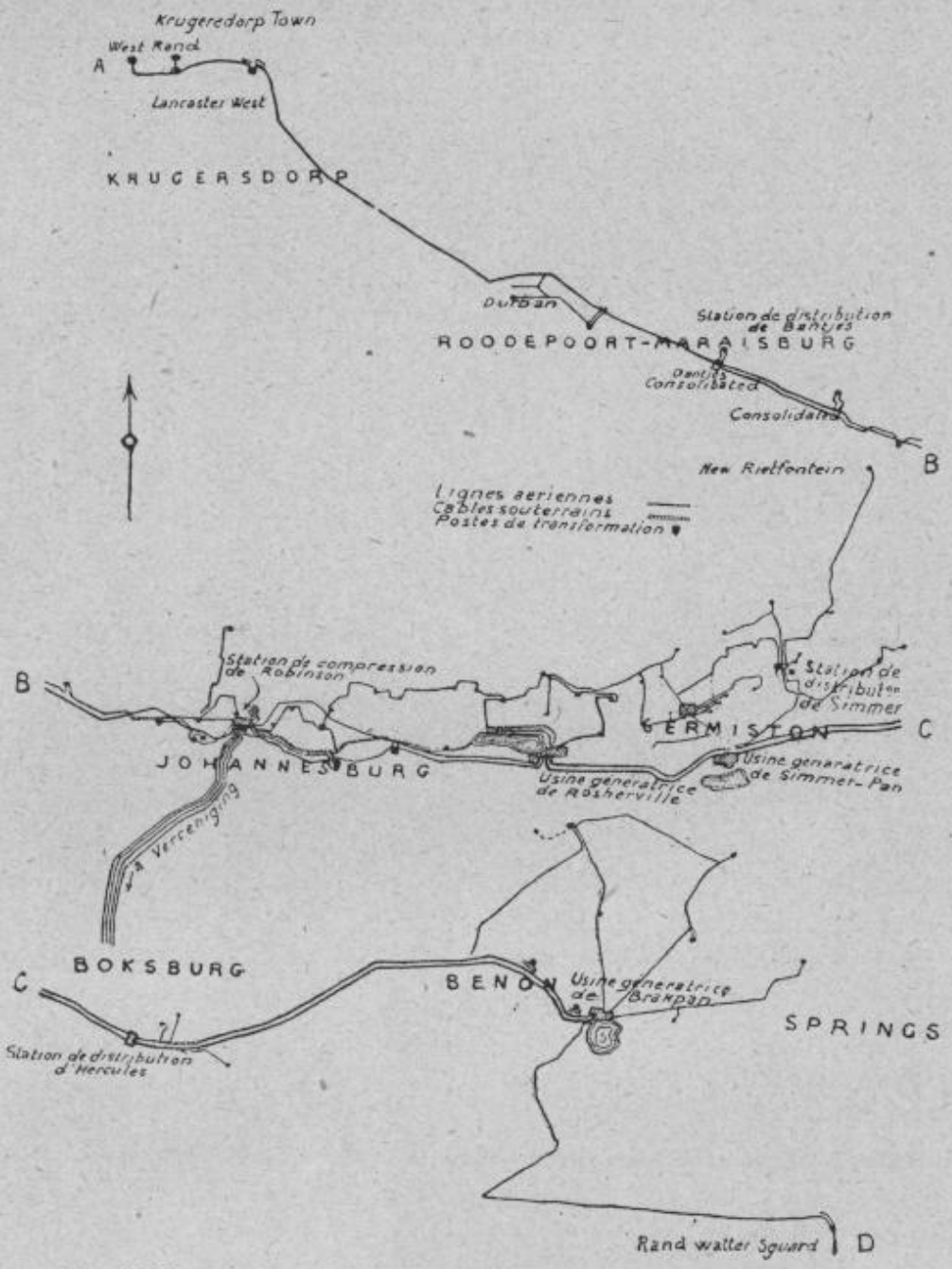


FIG. 1722. — Réseau du Rand, de la Victoria Falls and Transversaal Power Company.

Deux fils d'acier Siemens-Martin servent de protection contre les coups de foudre. Les permutations dans le parcours s'effectuent à l'aide de pylônes normaux munis de bras spéciaux. On fait effectuer aux canalisations du circuit de droite une permutation tournante dans le sens des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aiguilles d'une montre; pour le circuit de gauche, une permutation en sens inverse. Cette manœuvre s'effectue trois fois dans toute l'étendue de la canalisation.

Les isolateurs sont du type à maillons. Les poteaux pour alignements droits sont calculés pour un effort horizontal de traction de 5.000 kilogrammes au point d'intersection de l'axe du pylône avec le bras intermédiaire, cette traction s'exerçant dans la direction de la ligne ou dans une direction perpendiculaire ; en chaque point de suspension des trois canalisations d'un même côté du pylône, on suppose un effort horizontal de 900 kilogrammes. Chaque point de suspension est établi en tablant sur une charge verticale de 540 kilogrammes et en chaque point de suspension des fils protecteurs contre la foudre, on a supposé un effort horizontal de 675 kilogrammes dans la direction de la ligne ou dans une direction perpendiculaire. Le poids d'un pylône établi dans ces conditions est de 1.450 kilogrammes. Les pylônes tendeurs sont établis pour un effort de traction horizontal de 6.750 kilogrammes et leur poids est de 1.700 kilogrammes.

La sous-station à Hampton est construite pour une capacité de 900 kilowatts et comprend trois transformateurs dans l'huile à refroidissement naturel, de 300 kilowatts, 66.000 /2.300 volts.

La protection contre les surtensions est installée à l'air libre ; elle est constituée par des parafoudres électrolytiques, des parafoudres à cornes servant d'interrupteurs pour la charge et de bobines de self à isolement d'air.

La tourelle de couplage élevée complètement à l'air libre est disposée de telle sorte qu'à chacune de ses extrémités les canalisations puissent être mises hors circuit et que l'on puisse facilement alimenter la sous-station par l'un ou l'autre circuit.

La sous-station d'Atlanta comporte sept transformateurs dans l'huile d'une puissance unitaire de 1.500 kilowatts et 66.000 /11.000 volts. Le bâtiment de cette sous-station construit en briques et ciment armé est complètement incombustible. Sur l'un des côtés du rez-de-chaussée se trouvent disposés les transformateurs, sur l'autre les sectionneurs et les disjoncteurs.

Tous les interrupteurs sont établis pour permettre la commande par solénoïdes ; les bobines de commande sont alimentées par le courant d'une batterie d'accumulateurs. Le courant passe à travers les sectionneurs, les disjoncteurs dans l'huile pour se rendre à un système double de barres omnibus tronçonnées par des sectionneurs. Ces barres omnibus sont connectées à un parafoudre électrolytique situé à l'extérieur du bâtiment. Chacun des groupes de trois transformateurs est relié à une moitié des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

barres omnibus ; celles-ci sont installées dans le sous-sol du bâtiment en briques et ciment.

Les parafoudres sont disposés à l'intérieur. La seconde partie de l'installation haute tension, indépendante de celle que nous venons de décrire, a sa sous-station située à Monticello. La capacité est de 900 kilowatts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

QUATRIÈME PARTIE

APPLICATIONS DU COURANT ÉLECTRIQUE

TRACTION ÉLECTRIQUE
ÉLECTROCHIMIE — ÉLECTROMÉTALLURGIE

CHAPITRE XXXI

TRACTION ÉLECTRIQUE

I. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA TRACTION ÉLECTRIQUE

627. Causes de la supériorité de la traction électrique. — Dans ces dernières années la traction électrique a fait des progrès immenses, grâce auxquels on a pu réaliser le transport des foules dans des conditions de célérité inconnues jusqu'alors. L'industrie électrique appliquée à la traction a pris un développement prodigieux dans tous les pays du monde, mais principalement en Amérique où on compte près de 150.000 kilomètres de voies mises en œuvre électriquement, lesquelles ont absorbé près de trente milliards de francs.

En France, à l'heure actuelle, toutes les villes y sont dotées de services de transports en commun à traction mécanique, où l'électricité joue un rôle prépondérant.

Il est clair que le moment est venu où la substitution de l'électricité à la vapeur comme force motrice peut être entreprise avec la certitude que les dépenses d'installation seront couvertes par les économies pour ce qui concerne les réseaux desservant en Europe des pays à population dense.

La préférence donnée à cette dernière est en effet justifiée par les nombreux avantages qu'elle présente, tels que la rapidité des démarrages, les surcharges accidentelles brusques et répétées que le moteur électrique peut supporter sans inconvénient, la facilité des manœuvres de mise en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

marche et d'arrêt, l'instantanéité d'arrivée du courant, l'économie réalisée dans la centralisation en une seule station de toute la production nécessaire aux besoins d'une exploitation, d'où résulte une réduction de frais de main-d'œuvre, d'entretien et de surveillance.

Au point de vue des chemins de fer la traction électrique permet de faire face à une augmentation de trafic irréalisable avec la vapeur ; de réaliser une économie toujours plus grande sur les dépenses d'exploita-

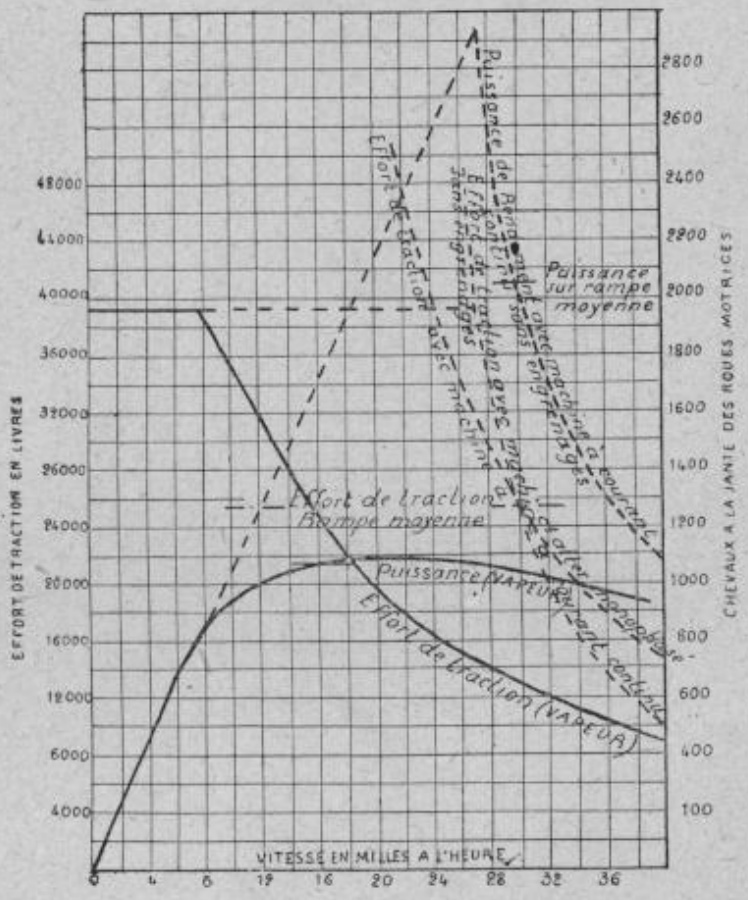


FIG. 1793. — Caractéristiques de la locomotive à vapeur et de la locomotive électrique.

tion ; d'utiliser des forces hydrauliques encore sans emploi et de rendre les pays qui n'ont pas de charbon, telle que la Suisse, plus indépendants de l'étranger ; de contribuer à la prospérité des industries du pays par des commandes importantes de matériel et la mise en œuvre de travaux de grande importance.

La comparaison de la traction électrique avec celle à vapeur montre que l'adhérence des locomotives à vapeur est faible en proportion de leur poids total, ce qui entraîne à multiplier les essieux moteurs. Mais une telle organisation ne peut se faire qu'au détriment du rendement mécanique du système, qui limite ainsi la puissance motrice, laquelle est déjà bornée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du fait de la chaudière (1). La locomotive électrique, au contraire, possède un couple moteur très élevé au démarrage — ce qui supprime les lenteurs de mise en marche — et un grand rendement en raison de l'indépendance de tous les essieux, que l'on peut multiplier sans trop d'inconvénient et qui servent par suite à augmenter l'adhérence. Les (*fig.* 1793 et 1794) permettent de juger rapidement des conditions générales de fonctionnement des locomotives à vapeur et électrique.

A puissance égale ou même supérieure le poids des locomotives électriques est nettement inférieur à celui des locomotives à vapeur. D'autre part l'effort de traction par tonne de poids total est beaucoup plus élevé avec les locomotives électriques.

Aussi, contrairement à la vapeur, l'électricité est sensiblement indépendante de la vitesse, cause qui, avec la vapeur, crée une dépense d'autant plus grande que le courant d'air formé par l'échappement de vapeur est plus rapide. D'autre part, la locomotive à vapeur, quoique portée à son maximum de perfectionnement, a un faible rendement mécanique, et l'effet utile de la vapeur décroît rapidement aux grandes vitesses quand le degré d'admission augmente. Enfin, pour répéter ce que tout le monde sait, la locomotion électrique permet la suppression des mouvements de lacets, de la fumée, du bruit, des flammèches et des escarbilles.

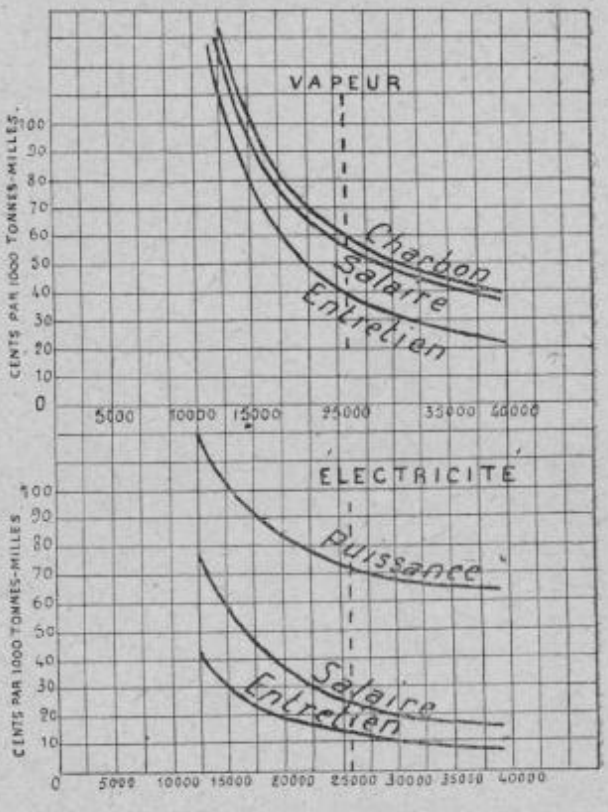


FIG. 1794. — Effort de traction en livres. Dépenses moyennes de charbon ou de puissance, d'entretien et de salaire.

Les propriétés du moteur électrique ont pour la traction deux conséquences capitales : il n'y a aucun inconvénient pour les voyageurs à ce que

(1) Afin d'augmenter la capacité de la locomotive on est forcé d'augmenter le tender, de façon à éviter de trop fréquents arrêts pour l'alimentation. On est ainsi pris entre les deux difficultés opposées d'augmenter à la fois la puissance de la machine et le poids des trains ; actuellement déjà, pour le service des voyageurs à la vitesse de 100 kilomètres à l'heure, environ la moitié de la puissance est employée à la propulsion de la machine même et l'autre moitié à la traction du train.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les essieux des voitures où ils prennent place soient actionnés par des moteurs électriques et on peut répartir les moteurs, c'est-à-dire l'effort de traction sur tous les essieux d'un convoi. La commande est faite d'un point quelconque du train et par la manœuvre d'un seul appareil au moyen d'un des systèmes de contrôle, dits à « unités multiples ».

L'équipement « Sprague Thomson-Houston » permet de remorquer des trains lourds sur les lignes à arrêts fréquents où il est nécessaire, pour obtenir une vitesse commerciale élevée, de démarrer avec une accélération très grande, et aussi de faire varier à volonté la capacité des trains

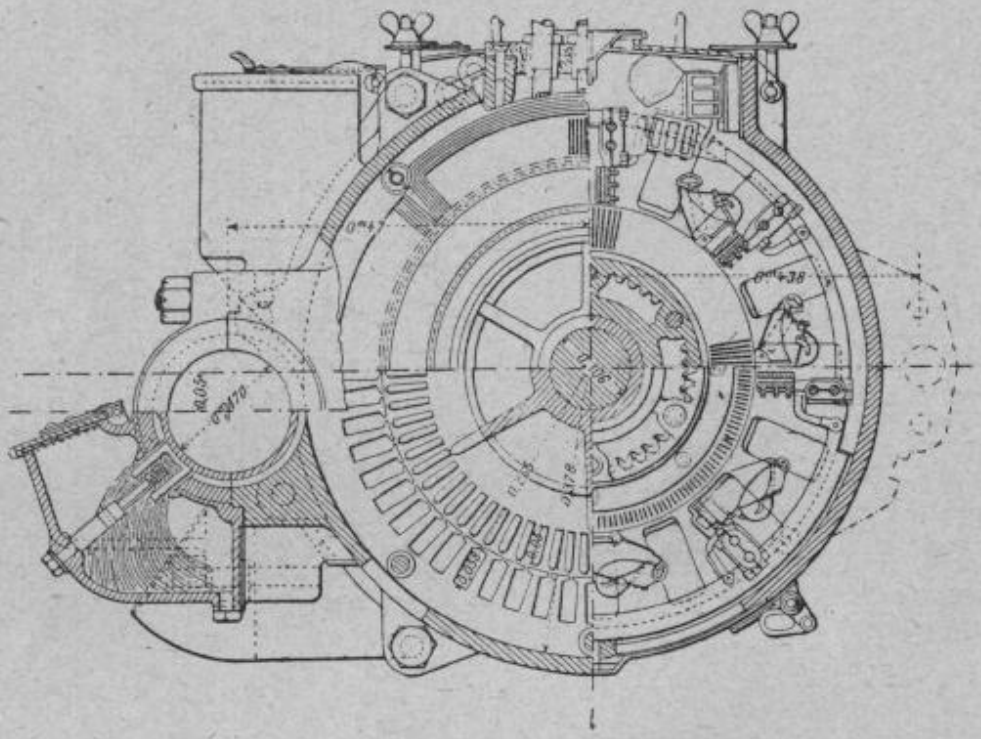


Fig. 1795. — Coupe transversale d'un moteur de traction.

suivant les exigences du trafic en accouplant une ou plusieurs unités motrices, de façon que chaque unité travaille toujours à pleine puissance et, par conséquent, avec un bon rendement.

Pour éviter un poids mort considérable, on a cherché à utiliser pour l'adhérence le poids des voitures du train et à diviser la puissance motrice en un certain nombre d'éléments agissant simultanément. Avec le système à unités multiples, on peut mettre autant d'essieux moteurs qu'on le désire et on peut même au besoin réaliser l'adhérence totale du train. Ces équipements peuvent être prévus pour fonctionner automatiquement, ce qui permet d'obtenir au démarrage une courbe d'intensité très régulière et par conséquent une accélération très douce. Un autre avantage non moins important au point de vue de l'exploitation, c'est que leur con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duite est simple et leur entretien facile. Leurs organes sont en effet robustes et disposés de façon à être visités rapidement. Ces considérations font qu'on adopte ces équipements sur des locomotives munies de moteurs puissants, même lorsque ces locomotives ne sont pas destinées à être accouplées à d'autres. Ils sont, suivant les exigences des services, de quatre types différents : automatiques, semi-automatiques, à contrôleur automatique et enfin à relais automatiques.

Tous ces types d'équipements sont établis pour que la transmission entre le couplage en série et le couplage en parallèle s'effectue sans interruption du courant. On utilise pour cela la méthode du pont. Grâce à ce dispositif, qui n'était pas employé dans les équipements primitifs à unités multiples, l'effort de traction oscille régulièrement entre deux valeurs constantes pendant la période de démarrage.

Les équipements semi-automatiques sont spécialement établis pour les locomotives dans lesquelles il est nécessaire que le contrôleur n'exige qu'une manœuvre très facile ; ils diffèrent des équipements non automatiques en ce que le contrôleur est muni d'un frein électromagnétique. Avec ce dispositif, si le wattman exerce un effort constant sur la manette, le démarrage obtenu est pratiquement aussi bon que s'il se faisait automatiquement.

Les équipements à contrôleur automatique trouvent leur application dans les réseaux métropolitains et sur les lignes à arrêts très fréquents où il est, par suite, nécessaire d'obtenir le maximum possible d'accélération, sans que ce maximum soit dépassé au détriment de la bonne conservation des moteurs. On peut, si on le désire, transformer aisément des équipements non automatiques en équipements à contrôleur automatique, ainsi que l'a fait la Compagnie Thomson-Houston pour les tramways de Nice et du Littoral, qui ont de nombreux équipements à un contrôleur automatique.

Tandis que, dans les installations à contrôleur automatique, le contrôleur est relativement compliqué, dans les équipements à relais automatiques, il est au contraire excessivement simple et de dimensions très réduites ; ici l'automaticité est réalisée par l'action combinée d'un relais et de contacts auxiliaires reliés mécaniquement par groupes plus ou moins nombreux aux différents contacteurs. Ce sont des équipements de ce dernier type qui sont appliqués au métropolitain de Paris ainsi qu'au chemin de fer Nord-Sud.

Dans les équipements à relais automatiques, le contrôleur joue le rôle d'un simple commutateur qui a pour but de vérifier les phases principales du démarrage, c'est-à-dire le sens de marche, la mise en marche, l'arrêt et les couplages des moteurs, mais le démarrage proprement dit, c'est-à-dire le shuntage progressif des résistances, est gouverné automatiquement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans chaque automotrice par un relais d'accélération. Ce relais est connecté en série avec un moteur et son réglage est fait de telle sorte que le courant de démarrage des moteurs oscille entre deux valeurs absolument constantes ; au moyen d'une première série de contacts auxiliaires on ver-

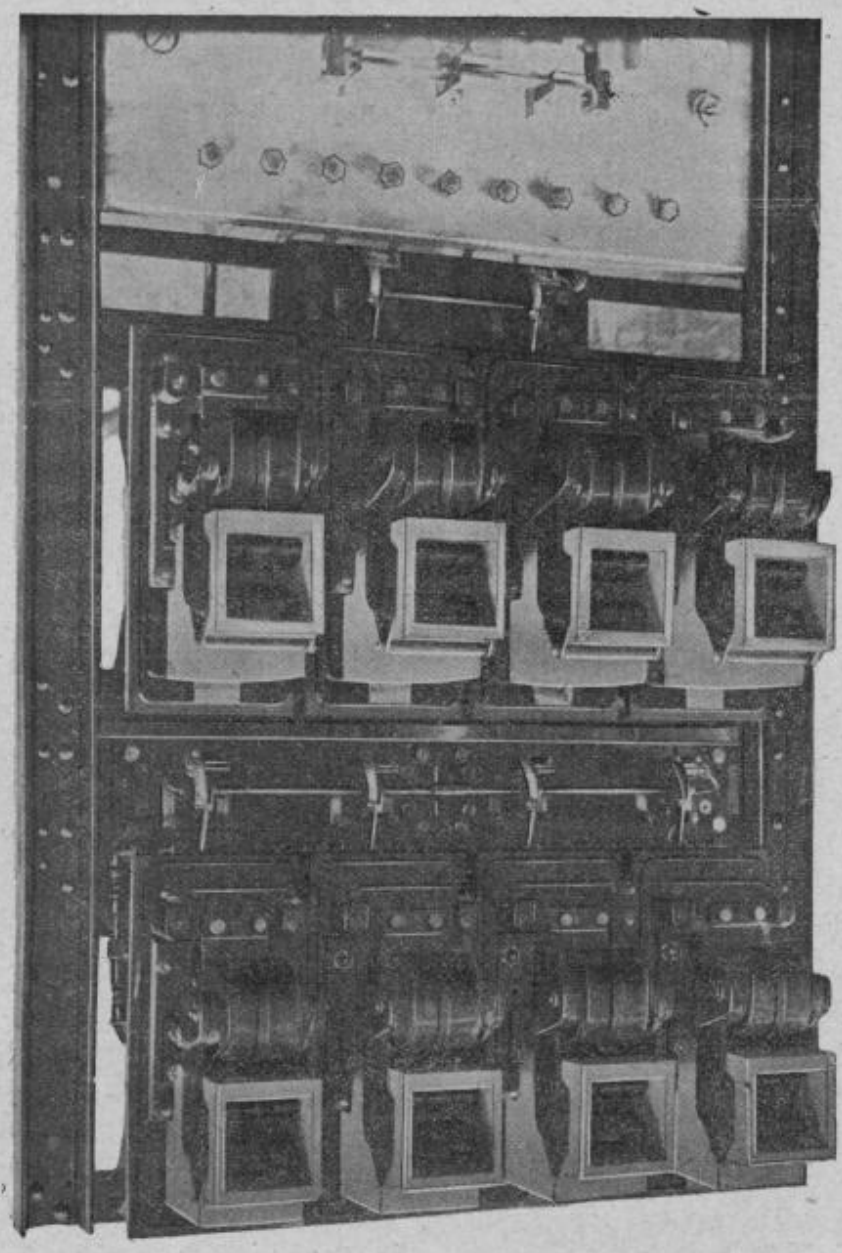


Fig. 1796. — Tableau de contacteurs. Automotrices des chemins de fer d'intérêt local du Haut-Rhin. (Société de Constructions mécaniques.)

rouille électriquement les contacteurs entre eux, de telle sorte que ces contacteurs agissent successivement et toujours dans le même ordre. Tous les contacteurs du train sont contrôlés simultanément par le contrôleur en ce qui concerne l'interruption et le rétablissement du courant, mais le démarrage est réglé sur chaque motrice par son relais particulier ; il dépend donc

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du réglage de ce relais, qui a été réglé pour le courant requis sur chaque motrice particulière.

Les nouveaux équipements à unités multiples des chemins de fer de l'État Français ont été conçus dans le but d'utiliser au mieux la capacité, les efforts moteurs et l'adhérence. Avec ce système, un train d'une composition quelconque a toujours un poste de commande à chaque extrémité, et il suffit au conducteur de se transporter d'un poste à l'autre pour éviter la manœuvre de changement de direction dans les gares.

Dans cette combinaison, le relais automatique joue un rôle prépondérant qui se substitue au contrôleur dans une partie des attributions que celui-ci centralisait auparavant.

Dans les installations de tramways existantes, qui ne sont pas disposées pour la marche à unités multiples, on peut avec avantage et à peu de frais augmenter la puissance du train, en vue de transports extraordinaires et immédiats, utiliser le système Colona, dit à « double traction ». Ici toutes les manœuvres simultanées sur les deux automotrices s'effectuent à la main, d'après les indications des ampèremètres, et la mise en parallèle et autres couplages se font très aisément.

L'électricité s'adaptant bien aux fortes rampes, on peut, de ce chef, abréger les tracés, et, en particulier, le matériel à boggies a l'avantage de passer facilement dans des courbes de 50 mètres de rayon. Au Fayet-Chamonix, on a pu adopter un tracé à très fortes rampes et à faible rayon, plus économique d'établissement. Dans certains cas, cette économie compense tous les frais supplémentaires pour l'installation des stations génératrices et des lignes de transmission.

Il est reconnu, d'autre part, que l'adoption de l'électricité permet : 1° de réduire de plus de moitié l'espace aujourd'hui nécessaire dans les gares terminus ou à proximité de ces gares, pour loger les locomotives à vapeur, les ateliers de réparations, les réserves de charbon, les châteaux d'eau, les plaques tournantes ; 2° d'avoir un écoulement plus facile du trafic, la locomotive électrique étant toujours prête à fonctionner d'une minute à l'autre, tandis que la locomotive à vapeur nécessite, au préalable, la mise en pression, d'où des frais préliminaires appréciables de combustible, de main-d'œuvre ; 3° d'atténuer l'usure rapide à laquelle sont aujourd'hui exposées, sous l'action de la vapeur et des gaz, les locomotives ordinaires, les ponts métalliques généralement nombreux sur les chemins de fer suburbains ainsi que les carcasses en acier portant les vitrages des halls sous lesquels accèdent les trains.

Lorsqu'on compose un train électrique sans le secours de locomotive et avec un certain nombre de voitures, on peut rendre moteurs tous les essieux ou simplement ceux de la première voiture, qui utilise alors une charge utile pour l'adhérence. D'une manière générale, avec l'électricité,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le poids réparti sur les roues motrices est mieux utilisé, l'énergie dépensée pour parcourir un même espace dans un même temps est moindre et, pour effectuer un même déplacement dans un même temps, le moteur électrique n'a pas besoin de conserver aussi longtemps sa vitesse maxima. La vitesse moyenne sur le même parcours et dans le même temps est plus grande qu'avec la vapeur et la vitesse maxima plus petite, par suite la dépense d'énergie est moindre. Le relèvement de la vitesse commerciale a été constaté sur la généralité des lignes électriques (1).

En résumé, la traction électrique peut lutter économiquement avec la vapeur ; les cas les plus favorables sont les lignes urbaines et suburbaines, les lignes à trafic dense ou celles dont les trafics ne pourraient pas être développés à la vapeur sans installations nouvelles, enfin les lignes à longs tunnels et à fortes rampes. Pour ne citer qu'un cas entre tant d'autres, sur la ligne de Milan à Porto-Ceresio, de 130 kilomètres de longueur avec trains de 70 tonnes, accélération de $0^m,35$ par sec. : sec., vitesse de 90 kilomètres, le remplacement de la vapeur par l'électricité a accru le nombre des voyageurs de deux fois et demie, le parcours en trains-kilomètres de quatre fois, et le nombre des trains est passé de 20 à 120.

Sur des lignes à fort trafic et sur certains chemins de fer secondaires, l'augmentation des facilités de transport dues à la traction électrique peut amener des accroissements de recettes importants. Il en est de même pour les lignes où la capacité est atteinte.

A un autre point de vue, la traction électrique possède une multiplicité de moyens de freinage qu'on ne trouve pas ailleurs, savoir : les freins purement mécaniques, le freinage par mise en circuit des moteurs sur des résistances ou sur la ligne, si celle-ci présente une continuité de rampe suffisante (moteur à courant continu), le freinage par réversibilité des moteurs asynchrones fonctionnant en génératrices sur la ligne. Ce dernier mode ne permet pas l'arrêt, il est vrai, mais il donne en pente une vitesse régulière et supérieure de 5 à 6 0 /0 environ à la vitesse en rampe. Le renversement du sens de rotation du champ tournant offre aussi le moyen de freiner, mais le réglage des résistances à introduire dans les circuits du rotor pour obtenir le couple résistant maximum à chaque instant nécessite des tâtonnements. Les moteurs polyphasés peuvent être, d'autre part, adaptés au freinage si l'on excite leur stator avec du courant continu, le rotor se comportant sur des résistances comme un induit d'alternateur ; le réglage de ce freinage est néanmoins délicat. Enfin on peut caler sur l'arbre des moteurs une dynamo à courant continu dont on se

(1) Avec les locomotives à vapeur, la vitesse commerciale est en pratique de 50 0 /0 environ de la vitesse de marche. Avec la locomotive électrique, comme l'on ne doit pas s'arrêter pour faire du charbon ou de l'eau, la vitesse commerciale atteint au moins 60 0 /0 de la vitesse de marche.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sert, soit comme frein direct en branchant son induit sur des résistances, soit comme excitatrice des inducteurs des moteurs polyphasés fonctionnant en alternateurs de freinage à la descente.

La traction électrique met en évidence les avantages de ce mode de traction sur les lignes les plus chargées de la banlieue des grandes villes. Les véhicules automoteurs, faciles à accoupler et à désaccoupler, marchant indifféremment dans les deux sens et démarrant avec une accélération de $0^m,40$ à $0^m,50$ sec. : sec., dégagent rapidement les abords des gares et permettent de multiplier les départs. De cette façon, les gares centrales se doublent pour la banlieue d'un véritable service métropolitain électrique, adapté aux conditions spéciales des communes suburbaines. L'invention du contrôle multiple a d'ailleurs merveilleusement facilité le développement de l'électrification des nouveaux moyens de communications.

L'asservissement automatique, qui tend de plus en plus à se répandre, est surtout réalisé grâce à l'appareil dit « régulateur » que comportent maintenant tous les systèmes. Cet appareil fait dépendre la succession du mouvement du contrôleur ou des contacteurs d'une voiture de l'intensité du courant qui traverse les moteurs de cette même voiture. Il permet de réaliser le démarrage plus rationnel d'un train comportant plusieurs automotrices, et dans des conditions de douceur remarquables.

628. Examen des divers systèmes de traction. — Au point de vue de leur fonctionnement proprement dit, les moyens de traction se divisent en tramways à contacts aériens (tramways urbains et suburbains), en tramways par trolleys souterrains, à contacts superficiels ou à plots (tramways urbains et suburbains), en tramways à contacts au niveau du sol ou troisième rail (tramways interurbains, métropolitains et chemins de fer). En dehors de cette classification, on trouve les tramways à accumulateurs, les chemins de fer à crémaillère et les funiculaires.

L'exploitation des tramways urbains et suburbains est caractérisée par l'emploi de voitures automotrices isolées ou accompagnées de une ou deux remorques légères. Les départs des trains sont fréquents, les arrêts nombreux, et les voitures demandent un démarrage facile et une rapide obtention de la vitesse de régime.

Les lignes de tramways interurbains, qui servent à réaliser les communications entre les grandes villes et leurs agglomérations voisines, utilisent soit le trolley, soit le troisième rail. Dans ce système, on a intérêt à faire un service de trains aussi fréquents que possible, comportant 200 à 250 voyageurs par exemple, que l'on amène sans transbordement au centre des grandes villes par un simple raccordement avec les tramways intérieurs de ces villes. Les réseaux interurbains de Cleveland (Ohio), de Milan-Monza, de Milan-Gallarate (Italie) et de Versailles aux Moulineaux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(France), par exemple, répondent à ce type d'exploitation. Quelques-unes de ces lignes, comme celle de Cologne à Bonn par les bords du Rhin, sont établies à l'instar des lignes de chemins de fer, de façon à assurer un service très régulier et rapide : passages à niveau fermés, plate-forme spéciale, signaux, etc.

Les chemins de fer électriques sont caractérisés par l'emploi de trains lourds composés de plusieurs voitures, ayant des départs relativement espacés, une vitesse commerciale plus élevée que celle des tramways et un nombre beaucoup moins grand d'arrêts. Ces lignes peuvent emprunter partiellement le sol des voies publiques, mais plus généralement circulent sur un accottement ou une plate-forme indépendante. On sait que ce que l'on recherche principalement dans l'application de l'électricité aux chemins de fer, c'est l'augmentation de la vitesse de marche. Mais, pour obtenir ces grandes vitesses en service courant, il faut surtout que le contact entre les prises de courant et les conducteurs puisse être assuré d'une façon irréprochable et que la voie soit très solide.

En locomotion, la tendance actuelle est de substituer, aux trains remorqués par une locomotive, des trains constitués par des voitures toutes automotrices. De cette façon, l'adhérence utile est augmentée par la multiplicité des parties rendues motrices et on se débarrasse du poids mort de la locomotive.

Le courant continu et le courant monophasé n'exigent qu'un seul conducteur de prise de courant, le courant de retour s'effectuant par les rails. Quand la tension ne dépasse pas 500 à 600 volts (courant continu), on peut employer comme conducteur de courant un troisième rail placé parallèlement aux rails de la voie de roulement. C'est le système le plus économique et le seul applicable pour de fortes intensités ; mais il y a lieu de limiter la chute de tension dans les rails de retour à une faible valeur, à cause des courants vagabonds qui produisent des effets d'électrolyse. Au sujet de ces derniers, les moyens utilisés de nos jours pour les éviter consistent à assurer aux voies la plus faible chute de potentiel possible et à maintenir en des points fixes un potentiel constant légèrement positif par rapport à celui du sol. L'emploi simultané de survolteurs au pôle (+) et de sous-volteurs au pôle (—) permet de faire fonctionner les moteurs sous des tensions égales à celles des génératrices et avec un potentiel négatif égal à celui du sol. Avec les courants monophasés, on ne doit employer que de faibles fréquences, à cause de la résistance des rails en fer [1].

---

[1] L'impédance du troisième rail est en raison du phénomène d'aimantation de sa masse qui se transmet par une distribution non uniforme du courant qui afflue presque exclusivement à sa périphérie, de sorte qu'un rail de 25 kilogrammes transportant un courant de 300 ampères à la fréquence 25 manifeste une impédance 5,4 fois supérieure à sa résistance ohmique et un rail de 40 kilogrammes, une impédance 9 fois supérieure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le courant triphasé exige deux conducteurs aériens, les rails de roulement servant de troisième conducteur (ligne de la Valteline), ou bien trois conducteurs aériens superposés (Zossen). Avec ce système de traction, les aiguilles sont relativement compliquées, et on est obligé de les passer généralement sans courant. Le trolley à roulette convient jusqu'à des vitesses de 80 kilomètres à l'heure et pour des intensités de courant inférieures à 200 ampères et des tensions au-dessous de 1.000 volts.

L'archet est plus commode pour les grandes vitesses, les hautes tensions, et permet de recueillir le courant sur plusieurs fils superposés.

En Allemagne, on emploie généralement l'archet, en Amérique, et en Angleterre et en France, le trolley est très répandu. Les avantages de l'archet sont : une faible usure des conducteurs du courant, l'absence d'interruption de contact avec la ligne aérienne, un arrangement plus simple des fils tendeurs, dans les courbes et aux aiguillages. Les inconvénients sont : une usure rapide de l'archet, la pression contre le conducteur insuffisante à grande vitesse (pour l'augmenter, on emploie la prise de courant en forme de parallélogramme), et enfin l'intensité ne doit pas dépasser une certaine valeur par contact (50 ampères normalement et au plus 150 ampères au démarrage). On évite, il est vrai, cet inconvénient, en disposant plusieurs fils conducteurs en parallèle.

Un des reproches que l'on fait au système à courant triphasé est l'obligation de laisser, aux points d'aiguillage, des parcours assez grands isolés et entre les deux prises de courant de la motrice, un espace encore plus grand pour ne pas interrompre l'arrivée de courant à la ligne. De cette façon les prises de courant peuvent être facilement pressées vers le haut et se coincer.

Cet inconvénient peut cependant être évité avec le dispositif imaginé par Kalman von Kando (*fig.* 1797) où, au lieu d'une simple tige pour prise de courant, on emploie deux tiges 1 et 2 qui peuvent tourner à leur extrémité inférieure dans des articulations et à leur extrémité supérieure réunies aussi par des leviers articulés au trolley. Avec ce dispositif, lorsque la hauteur de la ligne 2-3 varie, comme il ressort de la position pointillée, le galet se déplace sur une courbe très aplatie, qui pratiquement se confond avec la verticale *cc'*. On peut donc, en combinant la longueur des

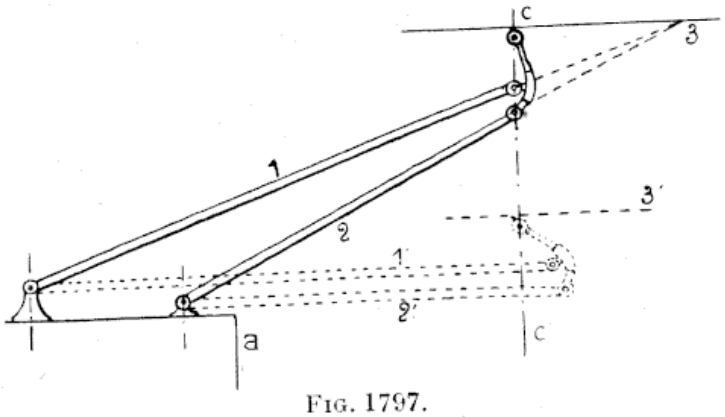


FIG. 1797.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiges 1 et 2, obtenir une portée quelconque *ac'* au delà de l'extrémité du toit de la locomotive.

L'emploi du courant continu, pour les lignes importantes, conduit à l'établissement de sous-stations convertissant les courants de transmission triphasés à haute tension en courant continu à la tension de 500 à 700 volts. Parfois la distribution à 3 fils est employée. Sur la ligne de la Mure, les moteurs de 600 volts sont montés en série (2 × 600 volts par pont). On peut pratiquement réaliser 2 × 1.500 volts, soit 3.000 volts et plus, mais il faut deux organes de prise de courant.

Les convertisseurs tournants de ces stations sont coûteux et exigent une surveillance constante ; mais le matériel générateur travaille dans de bonnes conditions, surtout si l'on prévoit des batteries-tampons.

Les moteurs série compensés à collecteur et les moteurs à répulsion monophasés ont, par leurs qualités spéciales, attiré l'attention des Compagnies de chemins de fer et de traction sur l'usage du courant alternatif simple, courant qui peut subir les mêmes transformations que le courant triphasé et, par conséquent, se plier aux mêmes modes de distribution. De grandes lignes ont adopté ce mode de traction : lignes du Grand Trunk Railway (Michigan et Ontario), ligne entre Warren et Jameston (Ohio) (1), lignes de Tombétoda à Vartau (Suède), d'Oerlikon-Wetingen (Suisse), de Cinta-Castellana (Italie), etc.

La traction dans le tunnel de Saint-Clair est opérée à l'aide de locomotives de 1.500 HP pouvant fournir 2.000 HP. Le poids total atteint 67,2 tonnes uniformément réparti sur les trois essieux. Le courant de ligne de 3.300 volts est abaissé à 235 volts pour l'actionnement des moteurs. La conséquence de l'introduction de l'électricité est que le tunnel ne limite plus le trafic admissible ; sa capacité est même supérieure à celle des gares terminales. On a constaté en service pratique que les locomotives peuvent facilement remorquer des convois de 1.000 tonnes à une vitesse de 10 à 23 kilomètres à l'heure sur les rampes de 2 0/0.

La ligne de Bloomington, Pontiac et Soliet, de 135 kilomètres, a 3.300 volts sur le fil de trolley. La dépense totale par voiture-kilomètre est de 50 centimes. Les voitures pèsent plus de 30 tonnes, et la vitesse horaire moyenne est de 30 kilomètres à l'heure ; chaque voiture fait un trajet de 270 kilomètres par jour. La consommation d'énergie moyenne ne dépasse pas 1.300 watts-heures par voiture-kilomètre et 41 watts-heures par tonne kilométrique. La ligne Boston-Worcester possède des rampes de 5 à 8,5 0/0 et des courbes de faible rayon ; la consommation d'énergie

(1) Les lignes de 100, 200 et 250 kilomètres, en Amérique, sont actuellement assez nombreuses et servent à relier entre elles des villes importantes concurremment avec les chemins de fer à vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

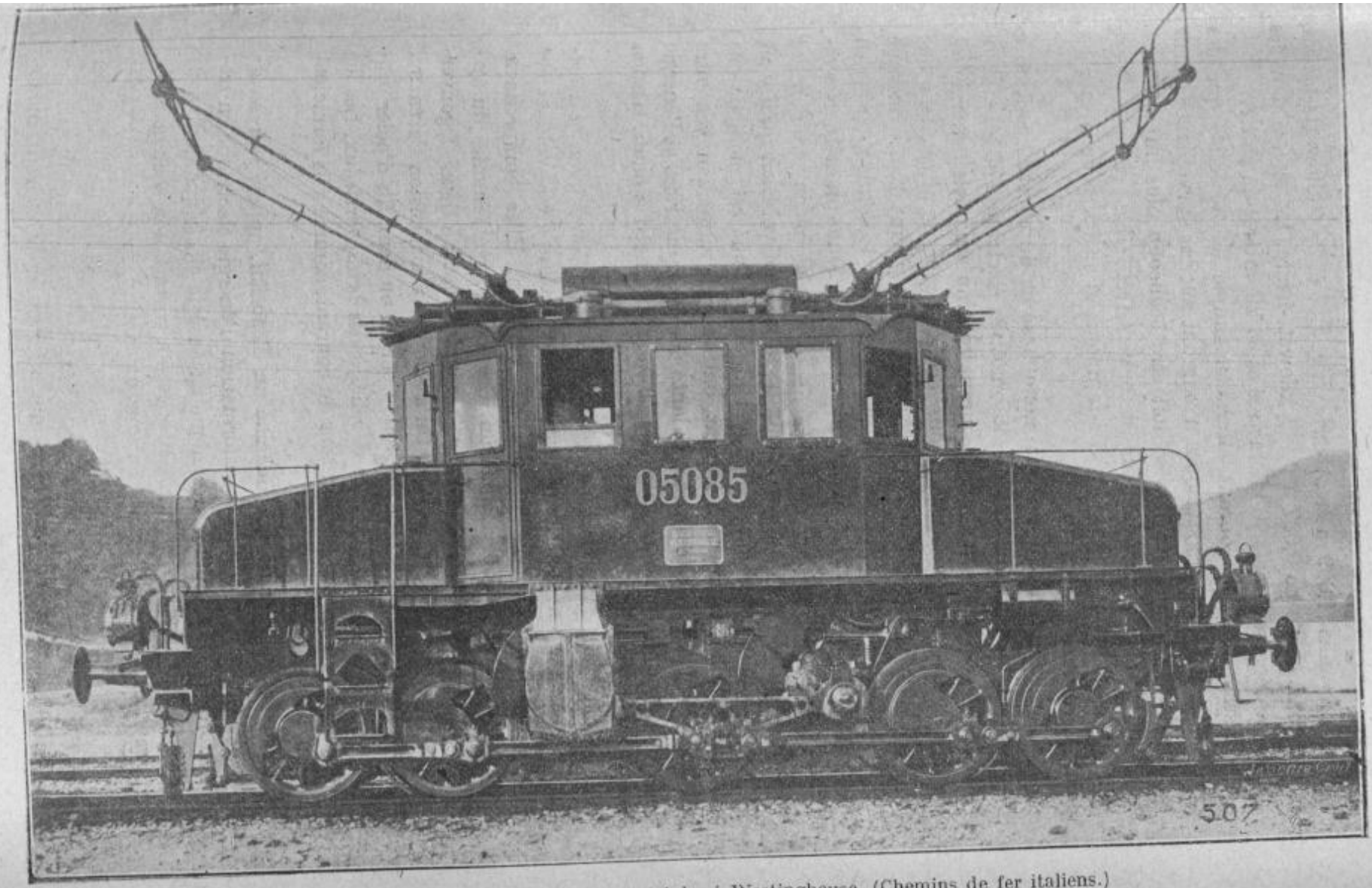


Fig. 1798. — Locomotive à courant triphasé Westinghouse. (Chemins de fer italiens.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par voiture-mille (1.609 mètres) varie entre 1,96 et 2,04 kilowatts-heures, et par tonne-mille de 0,087 à 0,143 kilowatt-heure. La vitesse dans les pentes ne dépasse jamais 90 kilomètres et 64 kilomètres en palier.

La distribution du courant alternatif simple ne nécessite que des groupes transformateurs statiques n'exigeant aucune surveillance ; mais le matériel de l'usine génératrice doit être beaucoup plus important, à cause du facteur de puissance qui est souvent très faible ; en outre, il est impossible d'employer les batteries-tampons, si utiles pour passer les pointes brusques d'intensité.

L'emploi simultané du courant monophasé et du courant continu a reçu son application dans certaines locomotives électriques où les essieux sont actionnés par des moteurs à courant continu auxquels l'énergie est amenée depuis la station centrale sous forme de courant alternatif à une phase au moyen d'un seul conducteur aérien, le deuxième étant constitué par les rails de la voie. On peut ainsi faire courir sur le conducteur aérien un courant de haute tension monophasé, lequel actionne un moteur asynchrone qui fait tourner une dynamo dont le courant est envoyé dans les moteurs à courant continu des essieux de la locomotive. Bien qu'il y ait une double transformation, le rendement du système est meilleur que dans une installation directe à courant continu, et le rapport moyen entre la puissance mécanique mesurée à la jante des roues motrices et l'énergie électrique produite dans la centrale à courant alternatif à haute tension peut atteindre 65 0/0.

Les locomotives de la Compagnie de New-York New-Haven et Hartford Railway peuvent fonctionner sur courant continu à 600 volts et sur courant monophasé à 11.000 volts, 25 périodes. Elles comprennent 4 essieux moteurs de 250 HP chacun. Ces locomotives, munies du système à unités multiples, peuvent être accouplées deux à deux et gouvernées d'un seul poste de manœuvre. On a adopté la suspension Caténaire, qui consiste à supporter les fils de trolley par un ou deux fils d'acier pendus sur les isolateurs des potences et reliés à des brins verticaux. Les fils d'acier et les fils de cuivre portent tous du courant, comme s'ils formaient un conducteur unique.

MM. Auvert et Ferrand ont imaginé un dispositif, appelé *redresseur-régulateur*, qui évite la double transformation d'énergie électrique en travail mécanique et du travail mécanique en énergie électrique dont nous avons parlé plus haut. L'appareil en question permet non seulement de transformer du courant alternatif en courant continu, mais aussi de régler à volonté la tension de ce courant, tout en faisant constante la tension du courant alternatif reçu, comme nous l'expliquons d'autre part.

Ce système permet d'allier l'économie offerte par le courant monophasé aux avantages du moteur à courant continu pour la traction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le courant triphasé permet d'adopter, pour la tension de transmission et pour la tension d'alimentation, des valeurs très différentes, dépendant des conditions spéciales de chaque cas particulier. Le courant d'alimentation des voitures peut être celui fourni par des convertisseurs rotatifs, ainsi que nous l'avons déjà expliqué, soit un courant à haute tension triphasé lancé directement dans les moteurs des voitures, soit un courant de même nature, mais abaissé à une tension de faible valeur par l'intermédiaire de transformateurs statiques disposés sur les véhicules.

La nouvelle locomotive Auvert et Ferrand, d'une puissance de 2.000 HP, comprend un moteur unique, une commande par faux essieux et bielles

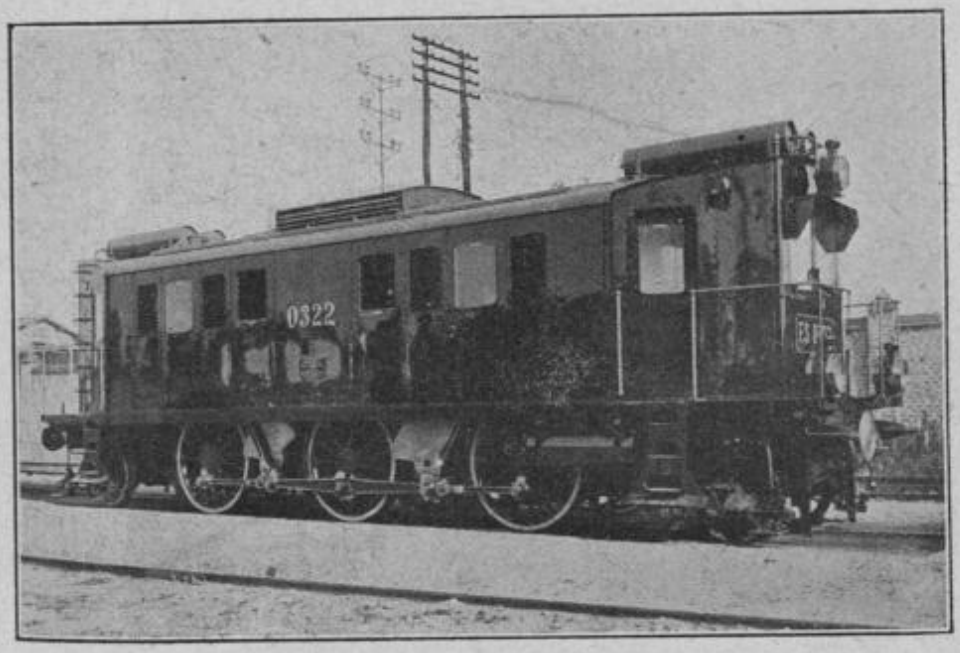


FIG. 1799. — Locomotive équipée avec deux moteurs à courant continu de chacun 1.000 chevaux. (Cie Électro-Mécanique.)

d'accouplement. Il n'existe plus de bogies extrêmes ; il y a deux essieux porteurs et quatre essieux moteurs. Il n'y a aussi qu'un seul redresseur de courant et un seul transformateur. Le poids est de 95 tonnes.

Comme mode de transmission entre le moteur et les roues motrices, le système le plus employé est la commande par engrenages ; mais la double réduction n'est utilisée que dans certains cas particuliers (un train d'engrenages peut effectuer au minimum 8.000 et au maximum 20.000 kilomètres). Pour les chemins de fer, on tend à adopter de plus en plus la commande directe des roues par les moteurs (locomotives à essieux couplés) et le meilleur alors est de monter l'induit sur un faux arbre creux qui assure l'entraînement des roues, et de suspendre le moteur par des ressorts. La maison Ganz, pour ses locomotives de la Valteline, a combiné un mode d'accouplement par bielle et manivelle analogue à celui des loco-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

motives à vapeur. Les moteurs asynchrones triphasés sans collecteur fonctionnent à la tension de 3.000 volts.

Au Simplon, les locomotives sont alimentées par du courant triphasé (double fil) à 3.000 volts et 16 périodes.

Il y a deux moteurs par locomotive, et leur réglage est opéré par changement du nombre de pôles et par des résistances dans le rotor (méthode de M. Leblanc). Les moteurs donnent une puissance de 900 HP, laquelle peut atteindre 2.500 HP. Le poids adhérent est de 42 tonnes et le poids

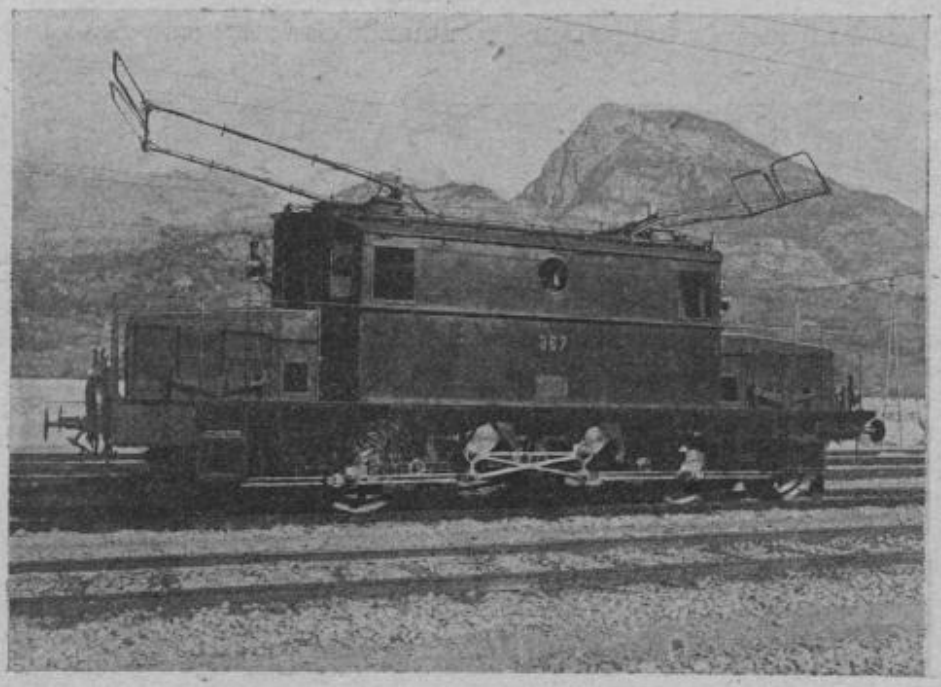


FIG. 1800. — Locomotive triphasée, 1.300 chevaux, 3.000 volts, 50 périodes, 4 vitesses de la ligne du Simplon. (Cie Électro-Mécanique.)

total de 62 tonnes. On a adopté deux vitesses, l'une de 34 kilomètres et l'autre de 68 kilomètres (1).

Les chemins de fer fédéraux suisses ont complété l'équipement du Simplon par des tracteurs à 4 essieux moteurs à adhérence totale, dont la partie électrique comprend deux moteurs à la fois à changement de pôles dans le stator, avec rotor hexaphasé, et à changement de connexions dans les rotors, de manière à avoir quatre vitesses de régime au lieu de deux comme pour les locomotives citées plus haut.

L'analogie des locomotives à essieux couplés avec les locomotives thermiques s'est complétée par le choix de locomotives articulées sur les lignes du New-York-New-Haven et Hartford-Raillways. La Société Westin-

(1) Comme on le verra plus loin, les nouvelles locomotives sont à quatre vitesses et avec moteurs triphasés en court-circuit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ghouse a livré des locomotives à essieux couplés, à deux moitiés articulées. Les chemins de fer de Pensylvanie utilisent des locomotives aussi à deux moitiés accouplées ; chacune d'elles repose sur deux essieux moteurs et un boggie-porteur. Un moteur de 1.250 HP par demi-locomotive actionne par bielle et manivelle un faux arbre entraînant lui-même les roues motrices.

Les locomotives des chemins de fer de l'État prussien sont à deux essieux moteurs, un essieu porteur et un boggie porteur pour les locomotives à voyageurs et quatre essieux couplés, un moteur unique avec transmission par bielles-manivelles, pour les machines à marchandises.

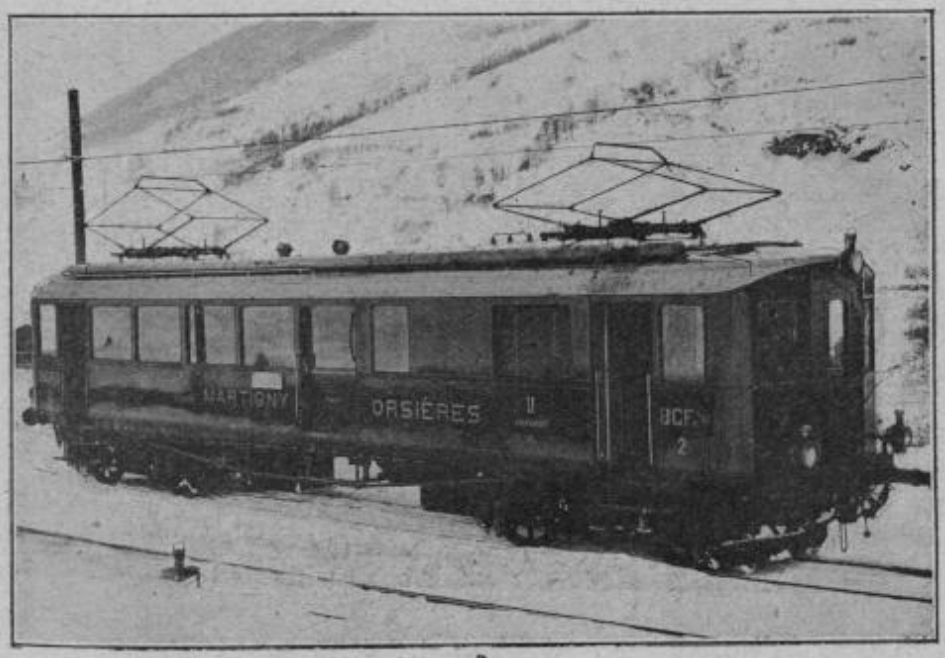


FIG. 1831. — Locomoteur à courant monophasé 8.000 volts à la ligne de contact et 15 périodes. (Cie Électro-Mécanique.)

Les locomotives des chemins de fer badois (ligne de Wiesenthal) sont à deux moteurs, trois essieux couplés et enfin celles de l'État suédois sont disposées comme suit : voyageurs, deux essieux couplés et deux boggies-porteurs et machines à marchandises, deux demi-locomotives accouplées chacune avec un moteur et trois essieux couplés.

Le développement continu des puissances concentrées sur les unités motrices électriques a fait surgir de nouveaux modes de commande des essieux par les moteurs à l'effet d'éloigner le moteur le plus possible du sol.

Ainsi la tendance actuelle consiste à utiliser le châssis pour recevoir le ou les moteurs avec commande des essieux par bielle ou par arbres intermédiaires, si les réductions de vitesse le rendent nécessaire. On a un rendement meilleur et un moindre coût d'établissement.

Selon la vitesse plus ou moins grande des moteurs de châssis on recourt

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à la commande directe, par bielle ou manivelle, des essieux moteurs, ou à la commande par l'intermédiaire d'un étage d'engrenages. Sur le réseau Spiez-Frutigen, des essais faits avec une locomotive Oerlikon avec un

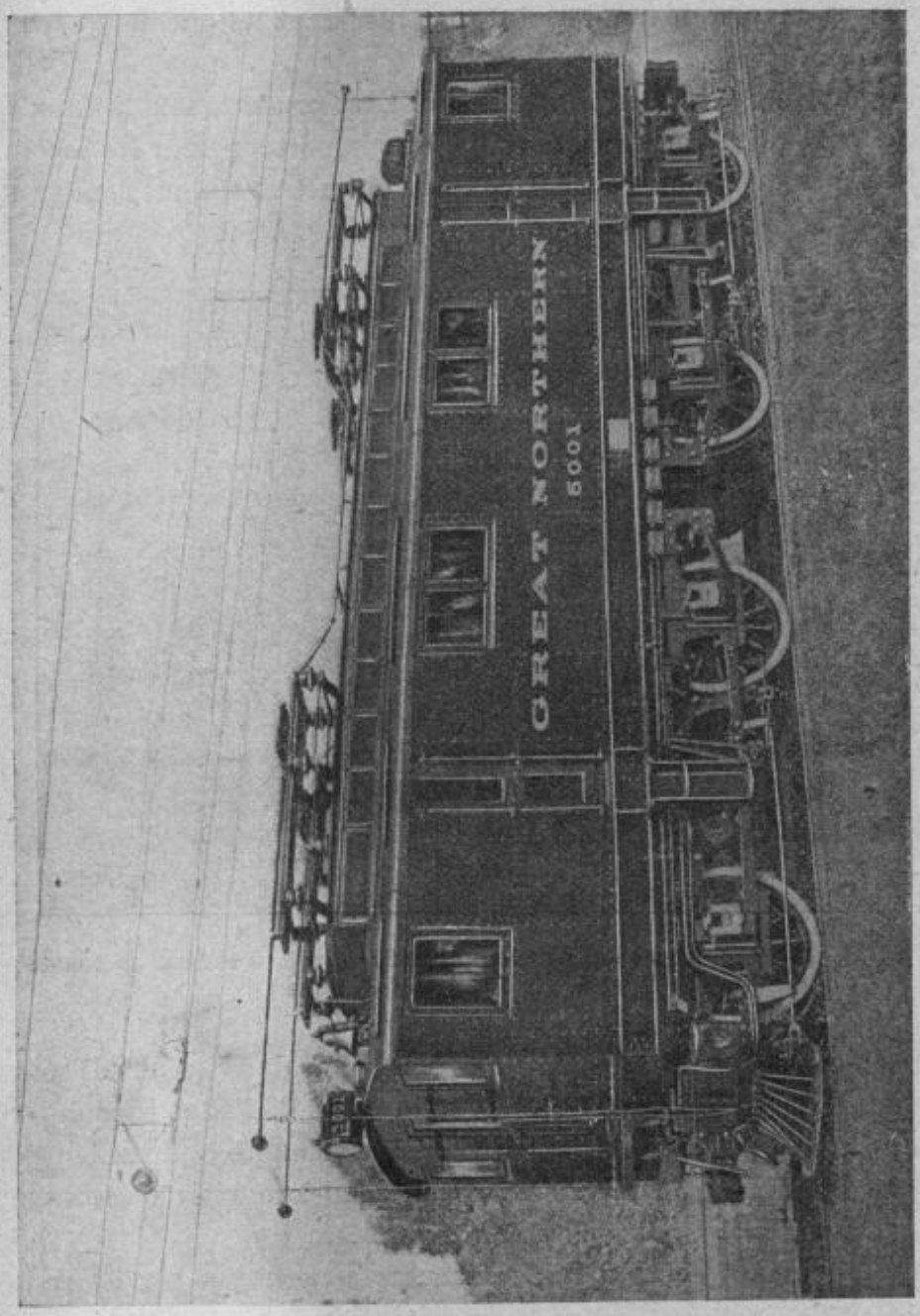


Fig. 1862. — Locomotive électrique du Great Northern.

moteur à engrenage par châssis a donné des résultats très satisfaisants, pour des vitesses de 60 kilomètres-heure.

Les locomotives Oerlikon du Loetschberg sont à deux boggies à trois essieux et une caisse en une seule partie et deux postes de commande. Les essieux sont commandés par deux moteurs avec renvoi par bielle et manivelle et engrenages intermédiaires. On a fixé sans aucune suspension

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au châssis des boggies les trains d'engrenages et les deux moteurs. Le poids total de la locomotive est de 86 tonnes. Sur la même ligne, les locomotives A. E. G. comportent deux unités accouplées suivant le mode

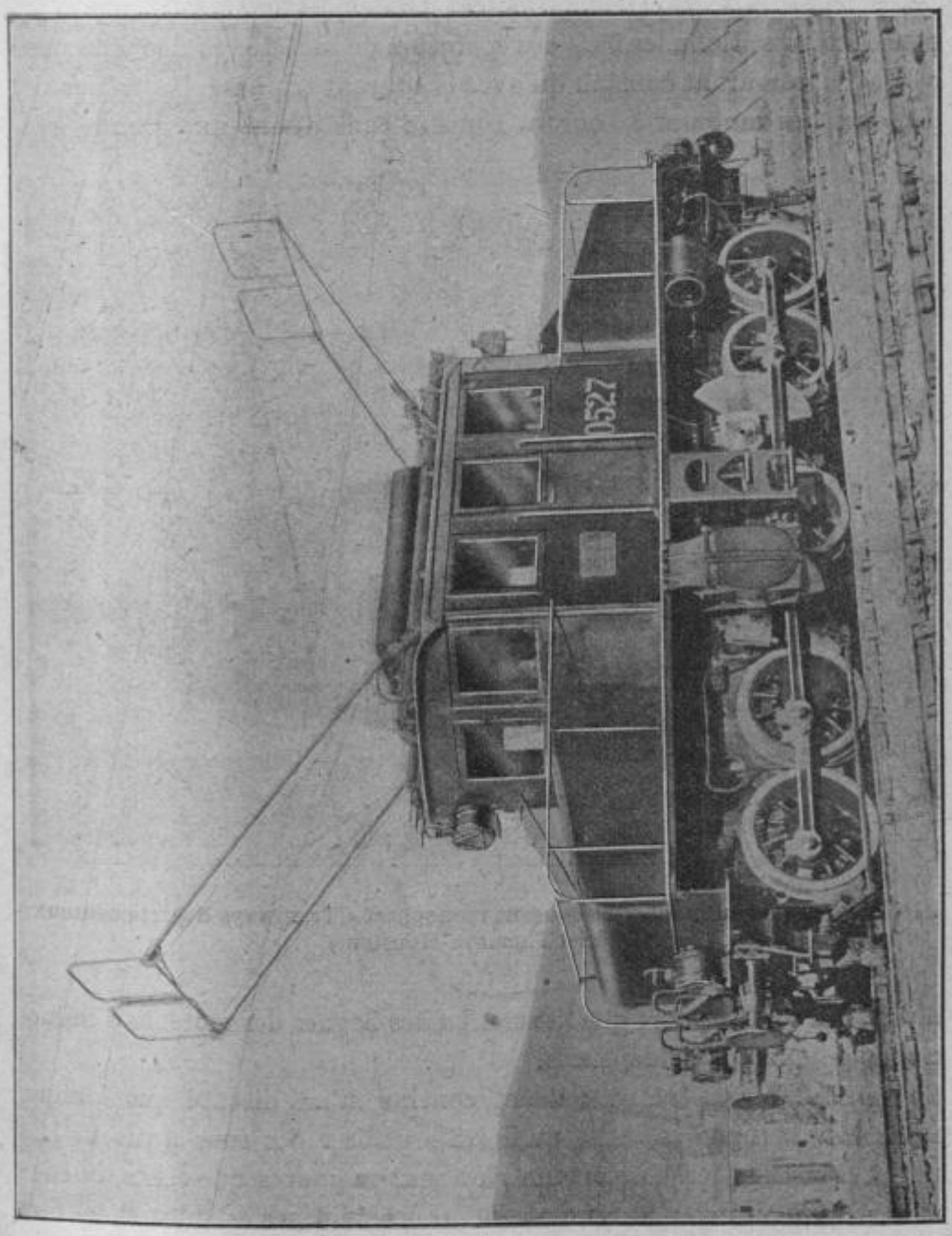


Fig. 1803. — Locomotive électrique de la ligne de Giovi.

locomotive-tender avec possibilité de déplacement vertical et latéral. Par moitié de locomotive, un moteur de 800 HP actionne ses deux essieux moteurs par bielle, manivelle et faux arbre intermédiaire. Le moteur est disposé au-dessus du châssis dans une cabine. Le poids total de la machine est de 93 tonnes, dont 68 adhérentes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rendement du système triphasé est supérieur au continu partout où la ligne présente de fortes déclivités et où la production de l'énergie est coûteuse.

Les pertes d'énergie dans les sous-stations rotatives représentent 15 à 20 0/0, et les frais du personnel de ces usines pèsent lourdement sur les dépenses totales. Enfin les frais de réparation du matériel roulant sont plus élevés avec le courant continu qu'avec le courant triphasé, l'entretien des collecteurs des moteurs à courant continu constituant une grande frac-

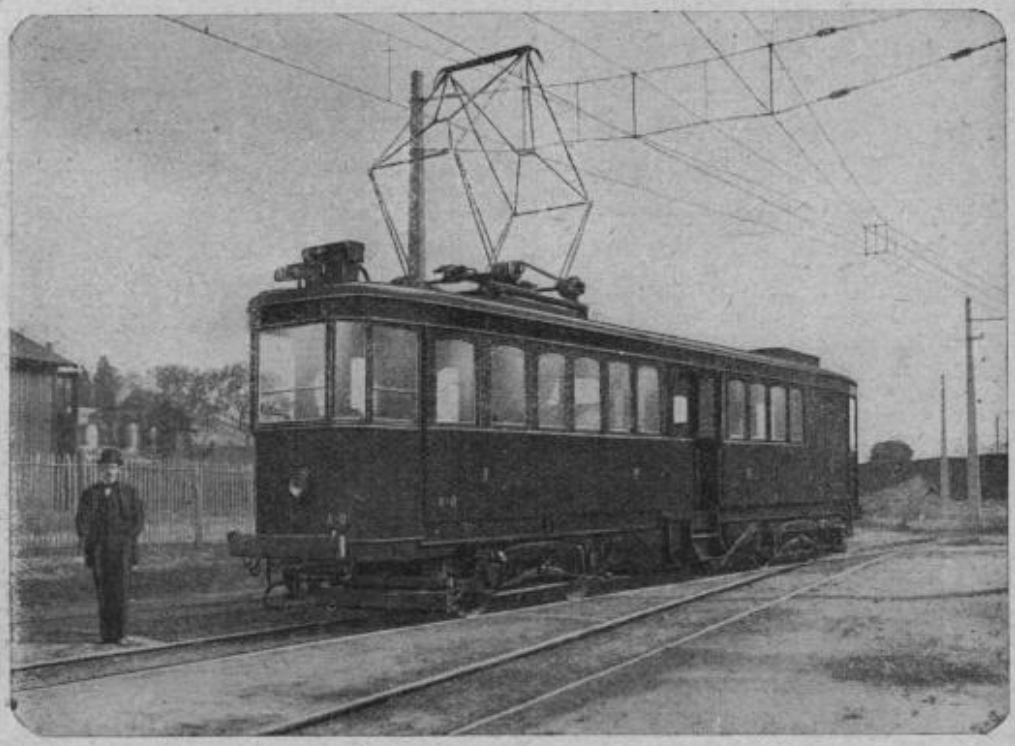


Fig. 1804. — Voiture automotrice à courant monophasé. (Tramways départementaux.) (Matériel Thomson-Houston.)

tion des frais totaux, alors que l'entretien des bagues des moteurs d'induction n'exige que peu de dépenses.

En résumé le système à courant continu n'est discuté que lorsque l'étendue de la ligne est telle qu'il faille utiliser des sous-stations. Les dépenses d'installation des locomotives sont moindres que celles du courant alternatif simple ; le rendement des locomotives est plus élevé que celui des locomotives monophasées ; le démarrage est plus facile et il offre moins de danger qu'avec le courant triphasé.

Le système monophasé a à son actif : la puissance du couple de démarrage, la possibilité de faire varier à volonté la vitesse dans des conditions plus économiques qu'avec le système triphasé. Les essais en vue de l'électrification de la ligne du Saint-Gothard ont montré que l'équipement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

monophasé réalise une économie de 20 0/0 par rapport au système triphasé et 33 0/0 par rapport au système à courant continu. En Italie, où le courant triphasé est très utilisé, l'électrification a donné un résultat inattendu à savoir l'économie sur l'entretien de la voie telle qu'elle suffit à compenser l'intérêt du capital de premier établissement de la station centrale et des lignes de transmission (tunnel de Giovi). Ici l'efficacité de la récupération a fait réaliser une économie de 17 0/0 sur la dépense de charbon à l'usine.

A défaut du système par courant continu, la traction par courant triphasé paraît devoir être plus économique que la traction par courant monophasé dans l'exploitation des lignes à grand trafic, malgré les progrès considérables réalisés dans la construction du matériel roulant de ce dernier mode de traction. D'ailleurs le système triphasé a donné dans ces dernières années des preuves de bon fonctionnement dans des conditions particulièrement difficiles et il a fait ses preuves dans l'exploitation des lignes électriques les plus chargées d'Europe, au Simplon et sur le réseau de l'État Italien.

629. Conditions économiques et techniques de l'établissement des chemins de fer électriques. — Par l'application de l'électricité aux chemins de fer, l'on recherche d'une façon toute particulière l'augmentation de la vitesse de marche des trains. Les retentissants essais de Zossen ont démontré la possibilité d'atteindre des vitesses dépassant 200 kilomètres, au moyen d'automotrices à 2 boggies, à 4 essieux et à 1 moteur par boggie.

Le système de traction par courant alternatif simple permet facilement d'équiper des locomotives de 1.000 kilowatts, la tension d'alimentation du fil de trolley pouvant être portée à 15.000 volts. On trouve bien là une solution pratique de l'électrification des chemins de fer à grand trafic et à fort tonnage.

Entre autres résultats obtenus, entre Rotterdam et Scheveningue on fonctionne à 10.000 volts et la vitesse atteinte est de 75 kilomètres à l'heure ; une locomotive Westinghouse à moteurs monophasés a fourni une vitesse de 165 kilomètres à l'heure. On a mis en circulation sur le chemin de fer de New-York-Philadelphie-Pittsburg des trains électriques qui marchent à une allure d'environ 190 kilomètres à l'heure.

Quant au côté économique du problème, le chemin de fer électrique peut parfaitement lutter avec le chemin à vapeur. Sur la ligne de Baltimore (où l'électricité permet de remorquer des trains pesant plus de 1.600 tonnes), on a reconnu que la locomotive électrique a donné lieu à une économie de 25 0/0 sur la traction à vapeur. La tonne kilométrique revient, en effet, à 0 fr. 715, alors que la moyenne des frais entraînés par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la traction à vapeur des trains de marchandises de plusieurs Compagnies américaines ressort à 0 fr. 815.

Il résulte des calculs minutieux auxquels s'est livrée la Commission des

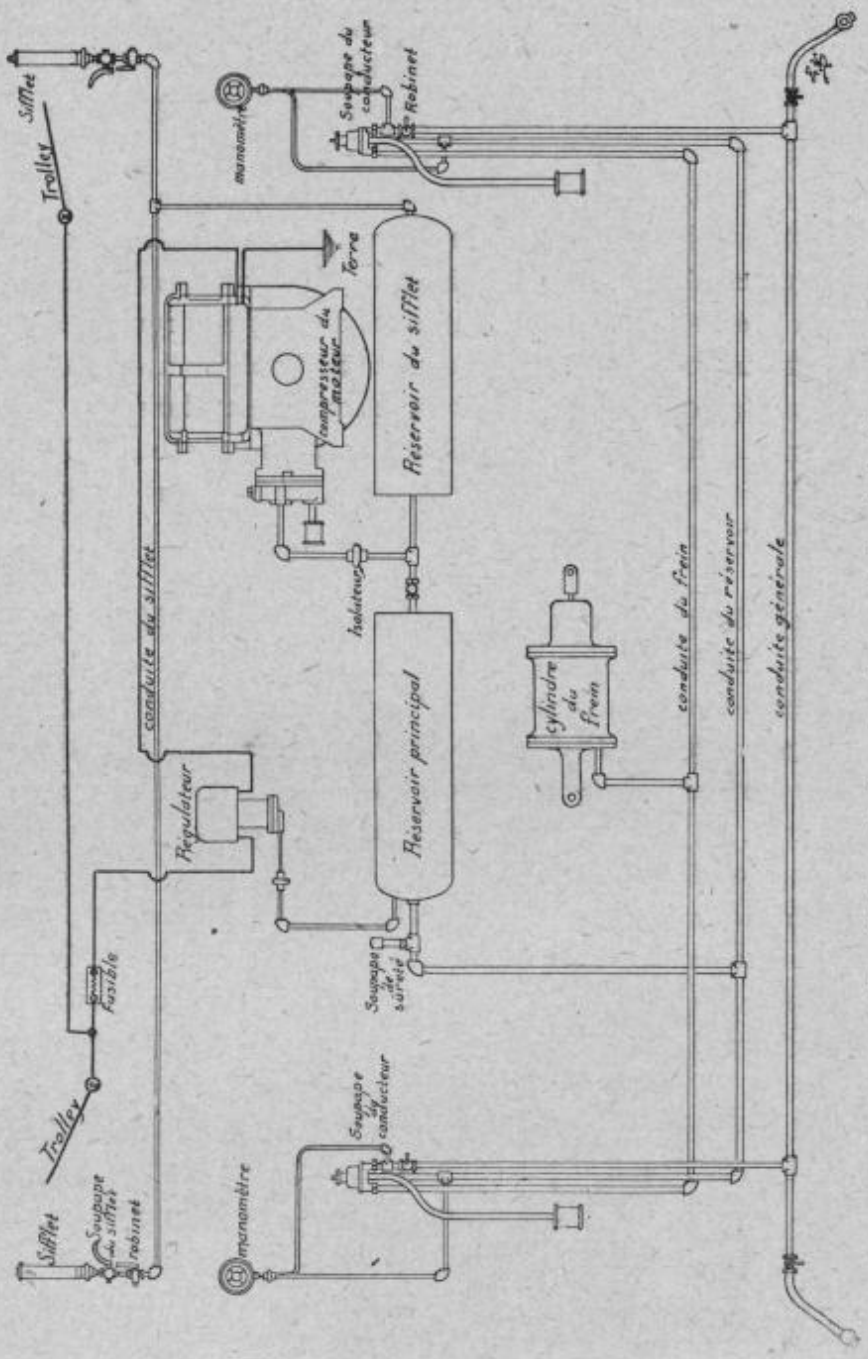


FIG. 1865. — Freinage à air comprimé automatique.

Études suisses que le coût du kilomètre-locomotive est, avec la vapeur, 1 fr. 27 en moyenne pour la section Erstfeld-Bellinzone, alors que dans les mêmes conditions on trouve pour la traction électrique 0 fr. 73.

L'étude des conditions économiques auxquelles pourra se faire l'alimentation en énergie électrique des lignes existantes de chemins de fer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constitue un problème très important et dont la solution sera de longue haleine. Les usines hydroélectriques sont, de ce fait, appelées à profiter de la transformation qui s'opérera insensiblement sur nos grandes lignes de transport. Ces usines ont déjà permis l'établissement de lignes de montagne, de chemins de fer d'intérêt local qui n'auraient pas vu le jour sans elles et en plus grand d'usines importantes dans la région des Pyrénées pour la traction des chemins de fer de la Cie du Midi.

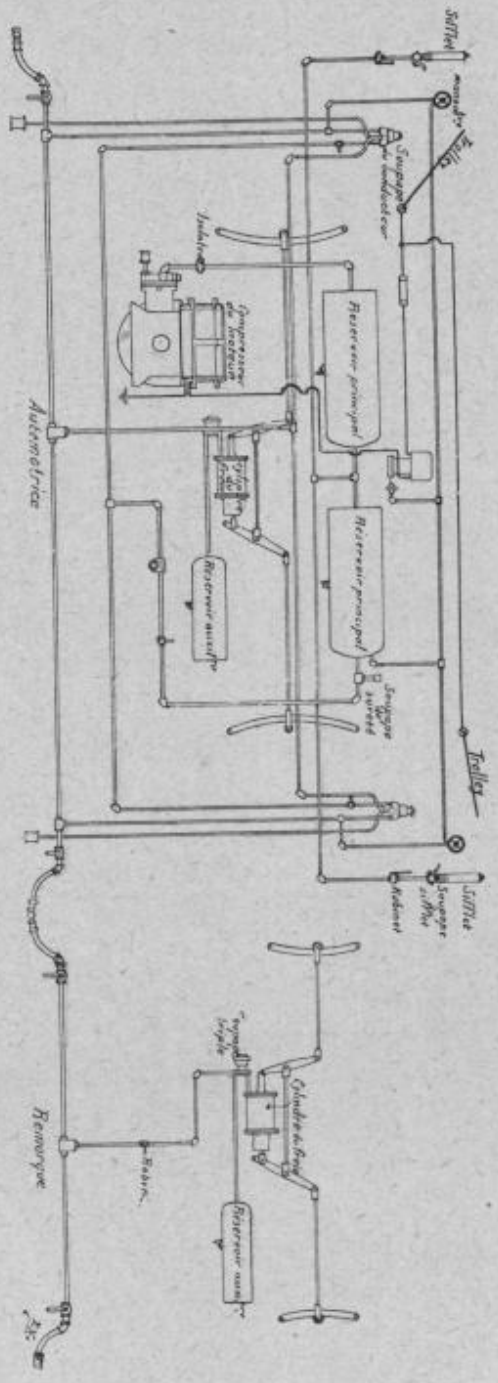


FIG. 1806. — Freinage à air comprimé automatique.

La substitution de la traction électrique ne sera à peine influencée par le renchérissement du charbon, et une élévation générale des salaires aura beaucoup moins d'effet que sur la traction à vapeur. Une solution que l'on peut envisager avec une certaine assurance de succès consisterait à faire fournir aux grands réseaux situés dans les zones d'action de la houille blanche la puissance moyenne par des chutes d'eau et à passer les pointes par des usines génératrices à vapeur placées au voisinage des limites de ces zones, enfin à opérer la traction sur les autres parties de ces réseaux au moyen de centrales électriques à houille noire. De cette façon, la traction des chemins de fer français, par exemple, ne demanderait guère plus que de 200.000 à 300.000 HP hydrauliques. Les ingénieurs qui se sont spécialement occupés des questions des trains rapides préconisent l'installation d'usines électriques de 10.000 HP, réparties tous les 150 à 200 kiloëmtres le long de la voie des chemins de fer. On estime que la voie avec rails de 45 à 50 kilogrammes le mètre coûterait 50.000 francs le kilomètre, l'équipement 15.000 francs, la quote-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

part de la station centrale 13.500 francs, soit ensemble 80.000 francs par kilomètre de voie, dépense correspondant approximativement à celle du chemin de fer à vapeur.

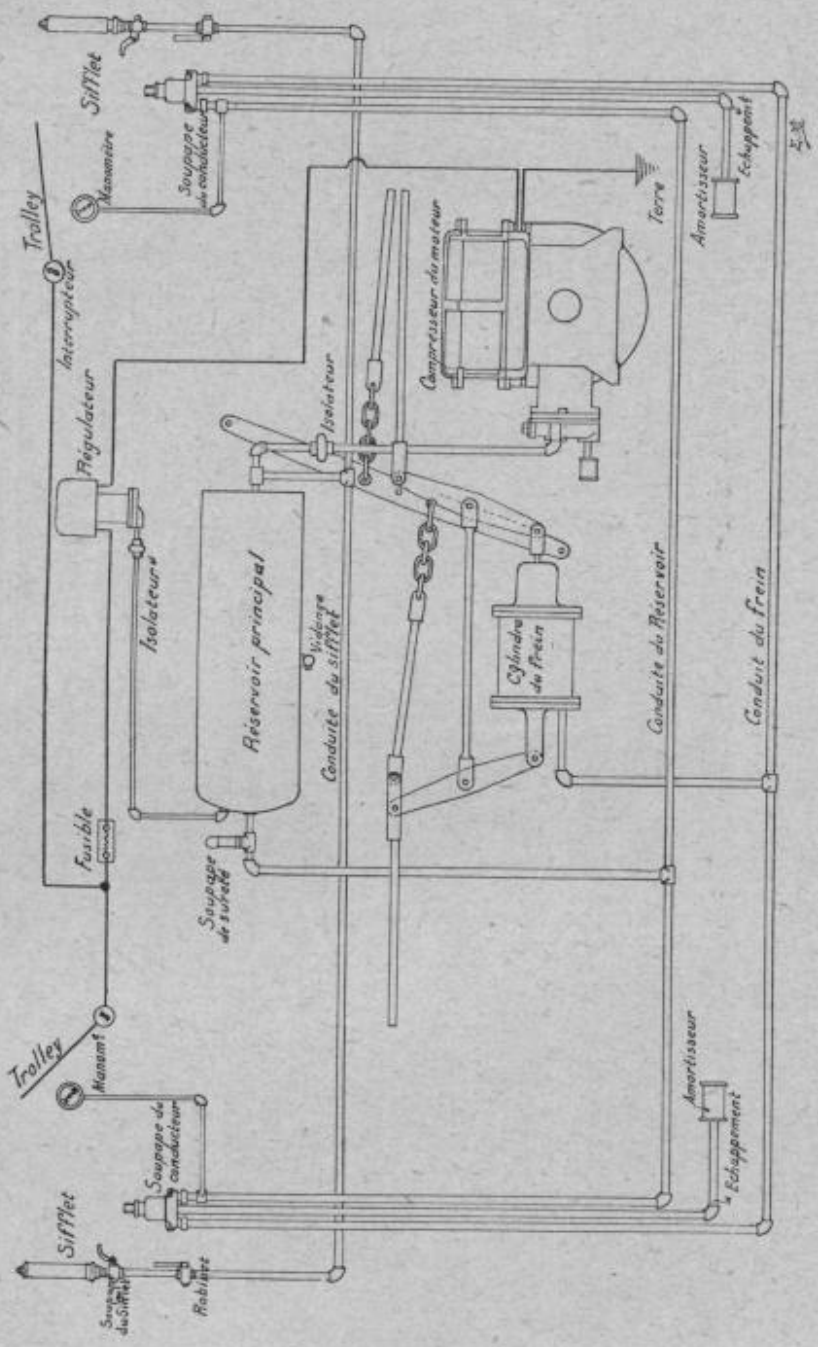


FIG. 1807. — Frein à air comprimé automatique pour locomotive électrique.

Pour les trains à grande vitesse, la Société d'études de chemins de fer à grande vitesse préconise la formule ci-après, permettant de déterminer la résistance totale W d'un train entier, exprimée en kilogrammes :

$$W = G_1 (a_1 + b_1 V) + G_2 (a_2 + b_2 V) + 0{,}0052 V^2 F;$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

G_1, poids du wagon moteur électrique, en tonnes ;
G_2, poids des véhicules remorqués, en tonnes ;
V, vitesse en kilomètres à l'heure ;

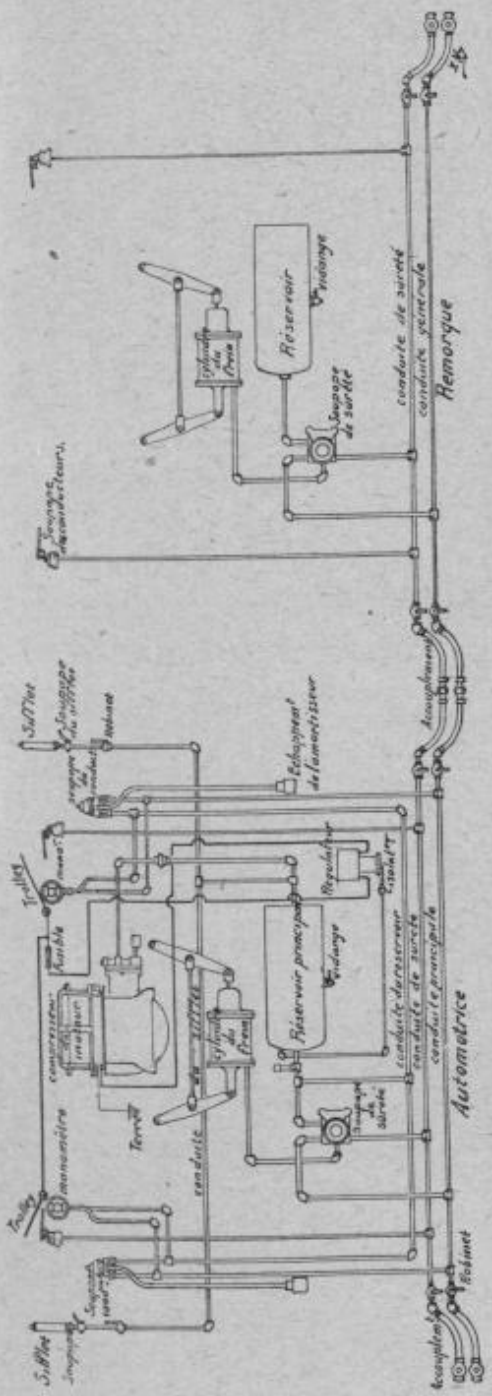


FIG. 1508. — Freinage à air comprimé automatique.

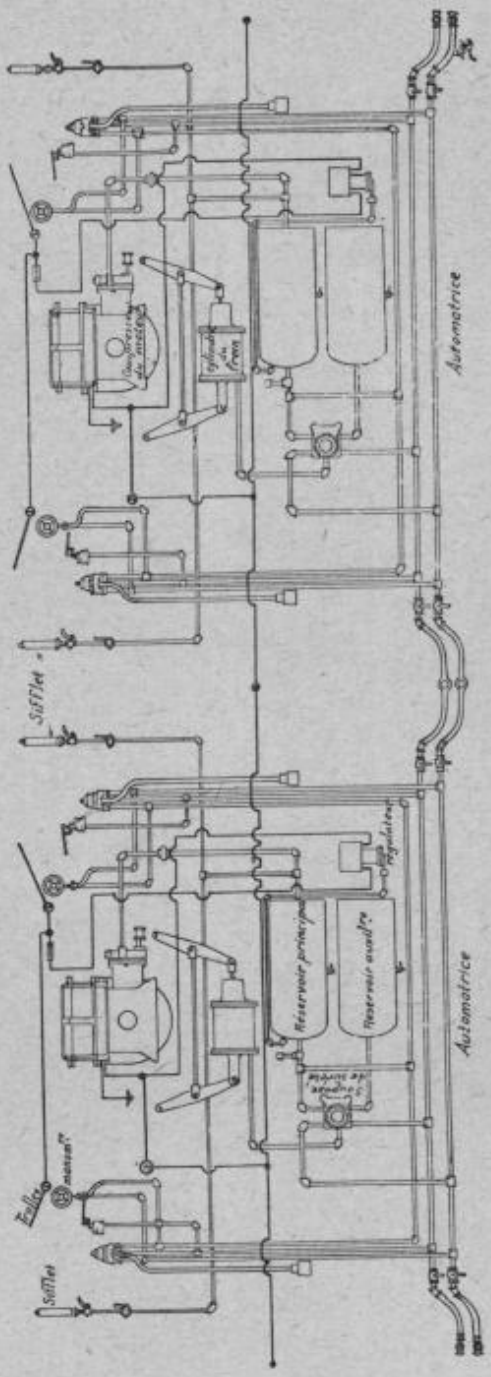


FIG. 1509. — Freinage à air comprimé automatique.

F, surface de front considérée, à déterminer par le calcul, en admettant que la surface de front d'un wagon moteur en coupe-vent = $7^{m2},5$, et celle de chaque véhicule remorqué = 1 mètre carré.

Le coefficient a_1 pour les wagons moteurs = 1,8 et b_1 = 0,0067 ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le coefficient a_2 pour les véhicules remorqués = 1,3 et b_2 = 0,0067.

En considération des intempéries, vents contraires, etc., il est bon d'augmenter de 20 la vitesse V en kilomètres à l'heure, correspondant à

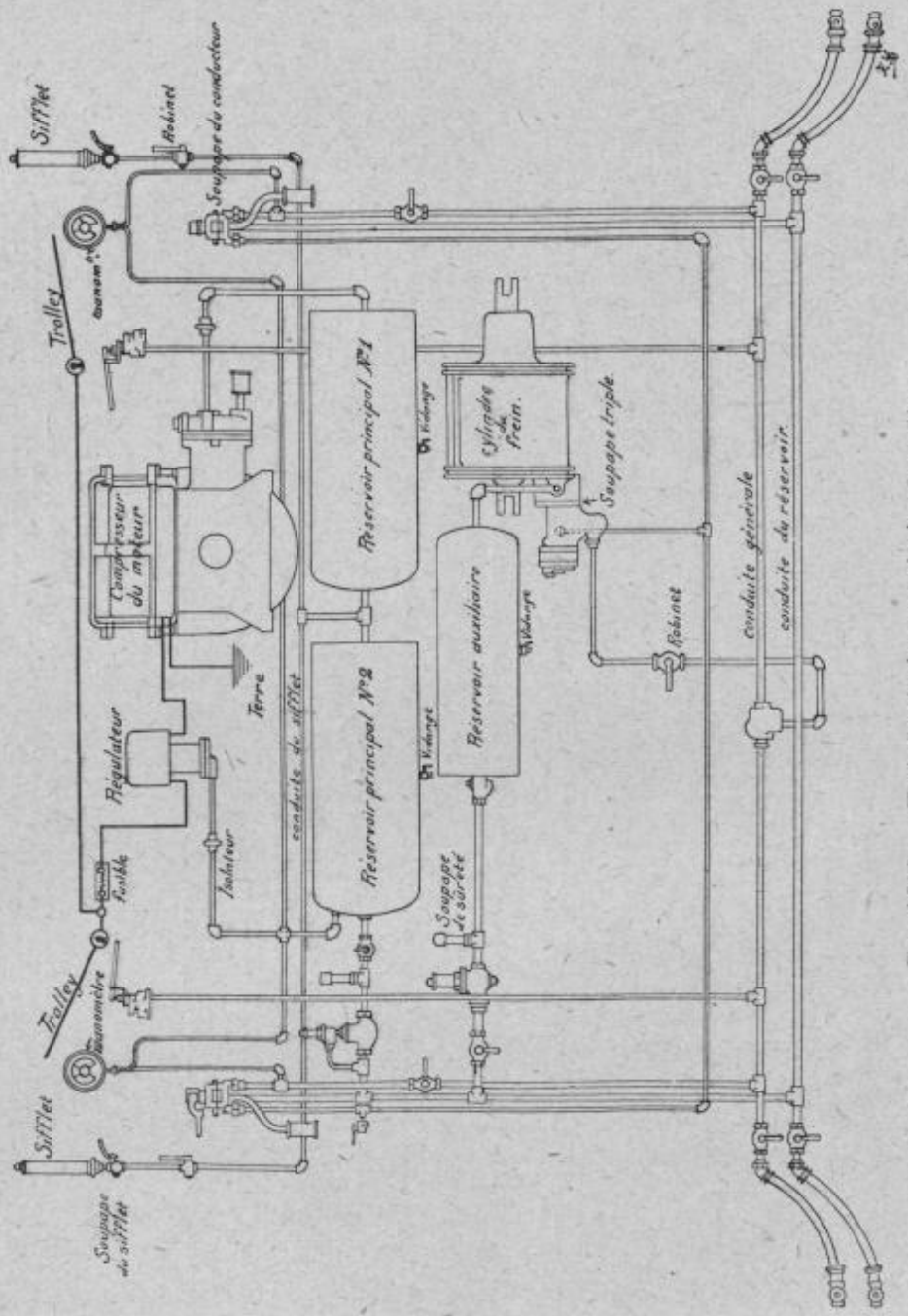


FIG. 1810. — Freinage à air comprimé automatique.

une vitesse du vent de 5 à 6 mètres à la seconde, cela lorsqu'on considère la vitesse maxima.

Pour le même objet, les formules de M. Franck ci-après présentent un intérêt spécial.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'effort z_1 pour mouvoir le poids d'une tonne en palier, est fourni par l'expression :

$$z_1 = 2{,}5 + \frac{V^2}{K} \text{ kilogrammes;}$$

V, vitesse en kilomètres à l'heure ; K, constante = 10.000 pour les trains légers, 2.000 pour les trains de voyageurs et 2.500 pour les express.

L'effort total z sur une rampe de s 0/0 est :

$$z = G(z_1 \pm s) \text{ kilogrammes;}$$

G est le poids adhérent.

Pour tenir compte des courbes, il faut ajouter les résultats donnés par la formule :

$$r = \frac{d}{R}\left(180 - \frac{1000d}{R}\right) \text{ kilogrammes,}$$

pour trains de marchandises.

Dans cette expression, on remplace $1.000d$ par $2.000d$ quand il s'agit de trains de voyageurs ; d est la distance en mètres entre les essieux des voitures ou des boggies, R le rayon de courbure en mètres.

L'effort maximum est :

$$z_{max} = \frac{1}{3{,}5} G.$$

D'autre part, l'effort est limité par la résistance des attelages ; en Suisse, on admet 10.000 kilogrammes.

Enfin la puissance P d'une locomotive mesurée à la circonférence des roues motrices a pour valeur :

$$P = \frac{GV}{75{,}36}\left(2{,}5 + \frac{V^2}{K} \pm s\right), \text{ en chevaux.}$$

L'expérience prouve que, quand l'accélération pendant les mises en vitesse est de $0^m{,}50$ sec. : sec., l'effort de traction correspondant est de 50 kilogrammes à la jante des roues par tonne de train. Si on ajoute 5 kilogrammes pour la résistance au roulement, on a 55 kilogrammes.

Avec le courant continu ou avec le courant triphasé, on peut compter sur un coefficient d'adhérence d'au moins 1/5. Dans ces conditions, le patinage commencera à se produire pour un effort de 200 kilogrammes par tonne de poids adhérent ; il faudra donc avoir au minimum le tiers du poids total du train sur les essieux moteurs. En pratique, il n'est pas rare de trouver des installations dans lesquelles on a rendu moteur la moitié des essieux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La répartition des essieux moteurs sur un certain nombre des essieux du train a pour conséquence de réduire dans une notable proportion la fatigue des voies par suite de la diminution du poids supporté par chaque paire de roues motrices (1).

L'effort moyen à exercer par train pour des vitesses de 60 à 80 kilomètres serait environ de 7.500 kilogrammes, soit une dépense de 3,5 kilowatts-heures par kilomètre-train mesuré au tableau de la station génératrice. Si on prend 0 fr. 045 à 0 fr. 05 par kilowatt-heure pour la dépense d'exploitation, comprenant le combustible, le personnel de l'usine, le graissage, l'entretien des machines, les frais généraux divers, le personnel des sous-stations et les frais de graissage et d'entretien de ces dernières, on obtient une dépense de 0 fr. 17 par kilomètre-train, inférieure de près

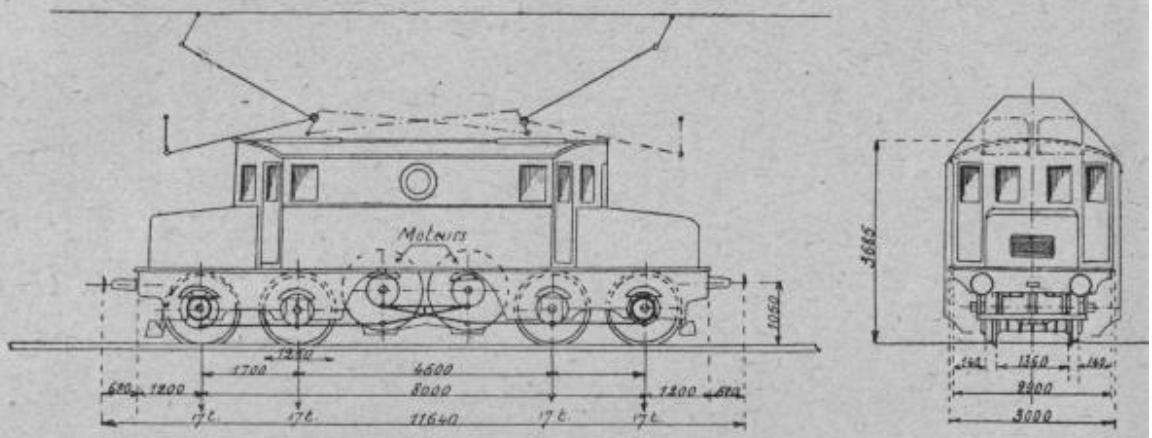


FIG. 1811. — Locomotive électrique.

de 0 fr. 10 à celle de la locomotion à vapeur. Une grande accélération absorbe évidemment une énergie totale en joules moindre pour le démarrage qu'une faible accélération, mais elle exige, par contre, une puissance instantanée bien plus grande, ce qui conduit à augmenter l'importance du matériel générateur. Lorsque les stations sont très rapprochées, il est plus pratique d'atteindre rapidement une grande vitesse et de marcher le plus longtemps possible sans courant avant l'arrêt.

Pour le calcul de la résistance ohmique offerte par les rails de retour du courant, il faut compter pour les joints 30 0/0 en plus. Dans le cas du courant monophasé, la résistance électrique varie avec la périodicité. Le coefficient de self pour rails à profil moyen a le même ordre de grandeur qu'un conducteur en cuivre de 50 millimètres carrés de section dont le calcul de l'impédance n'offre pas de difficulté ainsi ramené. Dans ce cas,

(1) La Commission suisse d'études pour la traction électrique des chemins de fer a indiqué dans son rapport le chiffre de 4kg,3 par tonne (moyenne) comme *résistance au roulement* pour des trains à voyageurs, avec un poids moyen de 200 à 250 tonnes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le rapport de la résistance offerte au courant alternatif à la résistance présentée par le courant continu, pour une ligne de contact monophasée, varie de 6,78 à 9,83, avec les périodicités ordinaires (15 et 25). Pour la ligne de contact seule, ces mêmes rapports sont de 1,10 à 1,20.

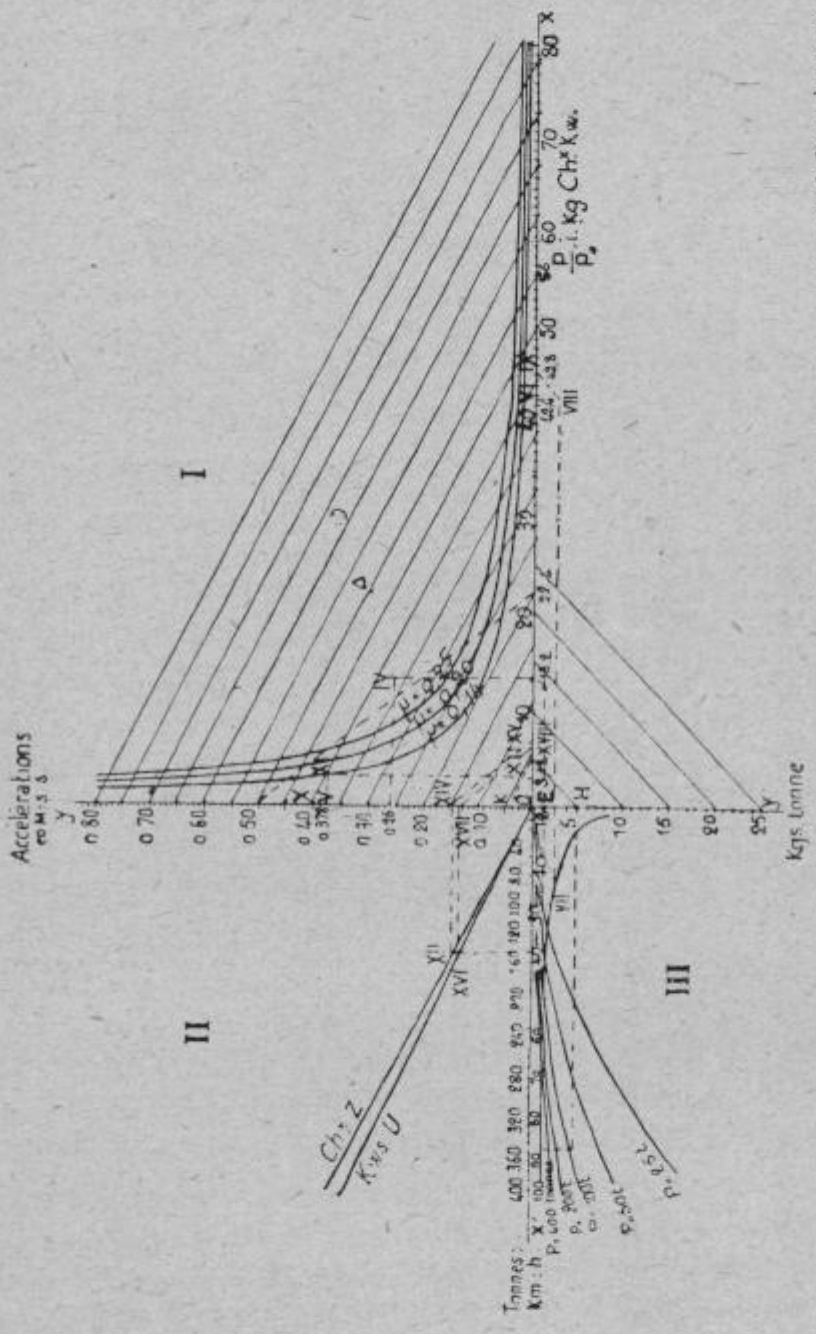


Fig. 1812. — Graphique de la résistance au mouvement d'un train électrique, des efforts et de la puissance à développer pour sa remorque. (Méthode René Martin).
(μ, coefficient d'adhérence moyenne sur la voie.)

Quant à la chute de tension, avec le courant triphasé, elle est plus forte dans la ligne aérienne que dans les rails, et le décalage est moins grand ; les pertes de charge maxima sont en moyenne de 20 0/0 pour tous les systèmes de traction ; comme perte moyenne, on peut admettre 8 à 12 0/0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La puissance instantanée que doit produire une centrale est la totalisation des puissances absorbées par les divers trains à l'instant considéré et qui sont elles-mêmes dépendantes de la position momentanée des trains sur la ligne, de leur direction et de leur vitesse ; ces positions sont déterminées par les profils et les horaires. L'énergie absorbée par chacun des trains dépend du poids et de divers facteurs dont il est difficile de tenir compte dans le calcul, comme les retards, les démarrages, les arrêts, les conditions climatériques, etc.

Si, pour un tramway très important, la charge de l'usine reste sensible-

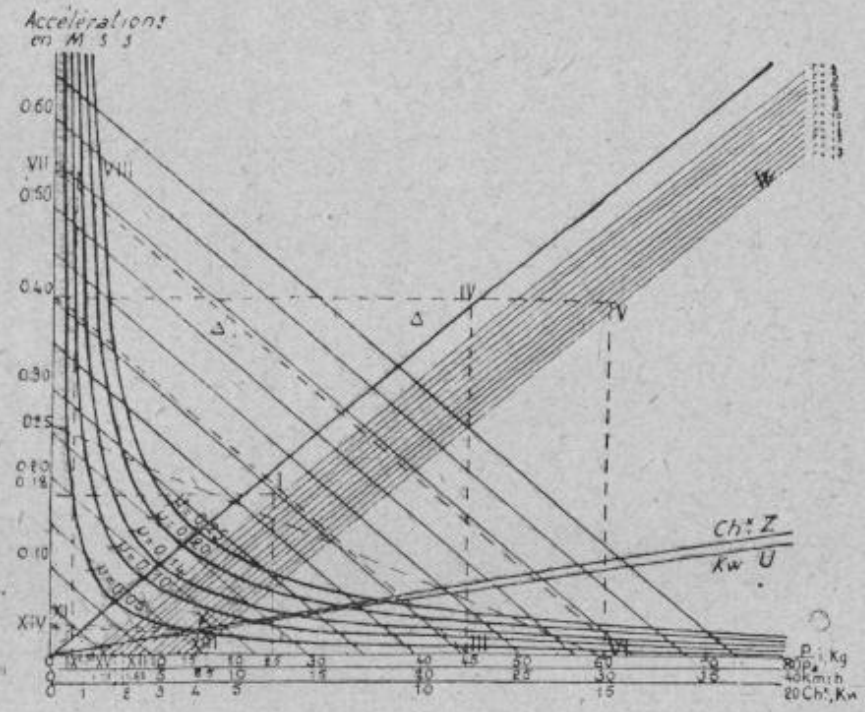


FIG. 1813. — Graphique de la résistance au mouvement d'un train électrique, des efforts et de la puissance à développer pour sa remorque.

ment constante, il n'en est pas de même pour les lignes de chemins de fer parcourues par des trains lourds relativement peu nombreux ; ici les usines sont soumises à de fortes variations de charge. Le rapport de la charge maxima à la charge moyenne d'un centre d'alimentation peut varier de 4 à 2 selon le nombre de tonnes-kilomètres par jour et selon que l'on a affaire à des trains lourds roulant sur fortes rampes ou à des trains à trafic léger et faibles rampes. Il apparaît que, pour des réseaux dépassant 100 à 150 kilowatts dont le trafic dépasse 2 millions de tonnes-kilomètres, il faut recourir déjà à deux centres d'alimentation.

La consommation d'énergie en watts-heures par tonne kilométrique à l'usine varie de 37 à 138, de 35 à 115 pour courant triphasé et 29 à 60 pour courant monophasé et pour courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quant aux usines hydrauliques, au point de vue du tamponnage, elles doivent pouvoir faire face aux pointes par l'accumulation d'eau en réservoir. Ce tamponnage hydraulique est moins rapide que le tamponnage électrique ; la consommation d'eau des turbines pendant la marche à vide joue un rôle important. Il faut, en moyenne, compter à ce jour sur environ 25 0/0 de la consommation.

Dans le système de traction à courant continu, les stations transformatrices du courant de ligne sont espacées de 6 à 14 kilomètres et exceptionnellement 20 kilomètres (courant continu à basse tension, 800 ou 1.000 volts). Elles sont généralement munies de batteries d'accumulateurs jouant le rôle de batteries-tampons ou de réserve. Le rendement de ces usines varie de 0,75 à 0,85.

Les sous-stations pour courant alternatif se réduisent à l'installation de transformateurs statiques si la périodicité n'est pas changée. Quand il y a changement de fréquence, les convertisseurs servent à améliorer le facteur de puissance par l'usage de moteurs synchrones surexcités. Pour le courant triphasé et une tension de 3.000 volts sur la ligne de travail, on peut compter sur une sous-station par 11 kilomètres environ. Avec le courant monophasé et pour 15.000 volts sur la ligne de contact, la distance entre les centres d'alimentation peut être de 50 kilomètres pour une exploitation normale.

En résumé, dans les systèmes mono et triphasé, les sous-stations sont les plus simples, s'il s'agit seulement de la transformation de la tension.

Les dépenses d'exploitation dans les sous-stations sont les plus élevées pour le courant continu, puis le courant triphasé et enfin le monophasé.

Pour les lignes de contact, l'avantage est au monophasé pour l'entretien, l'intérêt et l'amortissement.

Au point de vue de l'influence des lignes électriques des chemins de fer sur les installations à courant faible (lignes téléphoniques et lignes télégraphiques), le système à courant continu est supérieur aux systèmes à courant alternatif.

Le courant monophasé, par suite de la haute tension de la ligne de contact, induit des tensions statiques plus élevées, et, par conséquent, des perturbations plus fortes. Mais il existe, comme nous le verrons plus loin, des moyens préventifs, aussi bien du côté du courant fort que du côté du courant faible pour éliminer les effets d'induction statique dynamique.

L'application des permutatrices à la traction permet de donner un réglage facile de la vitesse des moteurs avec un excellent couple au démarrage, si on leur applique la force électromotrice correspondant à la vitesse de rotation qui leur est demandée, et cela sans l'emploi de résistances sur courant continu, sans avoir à faire varier la tension alternative. Ce but

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est atteint en utilisant une alimentation alternative, tant monophasée que polyphasée, et à une fréquence comprise entre 15 et 50 périodes.

La tension de la machine décroît, pour un calage donné, très régulièrement avec la charge. Ces chutes de tension sont un avantage pour un appareil de traction, car elles augmentent la souplesse de la manœuvre en empêchant le courant d'atteindre des valeurs dangereuses, par exemple en cas d'arrêt du moteur par suite du serrage des freins, d'un grippement ou d'une rupture d'engrenage, et elles empêchent, en outre, le courant de prendre brusquement une valeur exagérée au moment du démarrage.

La permutatrice « Rougé et Faget », en service à l'Exposition de Milan, a donné de bons résultats. On a reconnu que le système s'applique particulièrement bien aux trains comportant plusieurs motrices, et il suffit d'une ligne continue de deux câbles desservant les motrices du train pour appliquer à toutes ces motrices la tension variable fournie par la permutatrice. L'équipement électrique se réduit aux appareils destinés à assurer la sécurité, et ils ne sont jamais manœuvrés quand la permutatrice entre en charge.

Il a été constaté, en principe, qu'il y a avantage à employer le courant polyphasé en cours de route et le courant monophasé dans les gares, démarrage compris. Ainsi on bénéficie de la simplicité des lignes monophasées toutes les fois que cela est nécessaire, sans renoncer aux avantages que procure le courant triphasé, lorsque la puissance spécifique entre en ligne de compte.

Le redresseur régulateur Auvert et Ferrand, qui transforme le courant monophasé en courant continu, diffère des permutatrices en ce que les balais sont fixes et les commutateurs tournants. Mais, comme dans les permutatrices, le moteur qui produit la rotation des commutateurs n'absorbe qu'une faible quantité d'énergie. Ce système permet d'effectuer le réglage de la tension du courant fourni aux moteurs du train et, par conséquent, de régler la vitesse de ceux-ci sans l'emploi de rhéostats, et simplement en modifiant la position des balais du régulateur-redresseur.

Combiné avec des bobines de self, ce dernier peut, sans inconvénient, alimenter des moteurs à courant continu à excitation séparée d'un type courant, ainsi que des moteurs continus série, mais à carcasse magnétique feuilletée.

Les démarrages s'opèrent sans résistances auxiliaires et sans occasionner de surcharge à l'usine génératrice ; le réglage de la vitesse des locomotives est obtenu avec une très grande souplesse, et le poids des appareils correspond environ à $12^{kg},5$ par kilowatt.

L'adoption des basses fréquences diminue les effets nuisibles de l'induction dans les canalisations, dans les lignes de transport de force, les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lignes d'alimentation et de contact, et surtout dans les rails de retour du courant.

Mais, par contre, l'action utile de l'induction sur les génératrices des

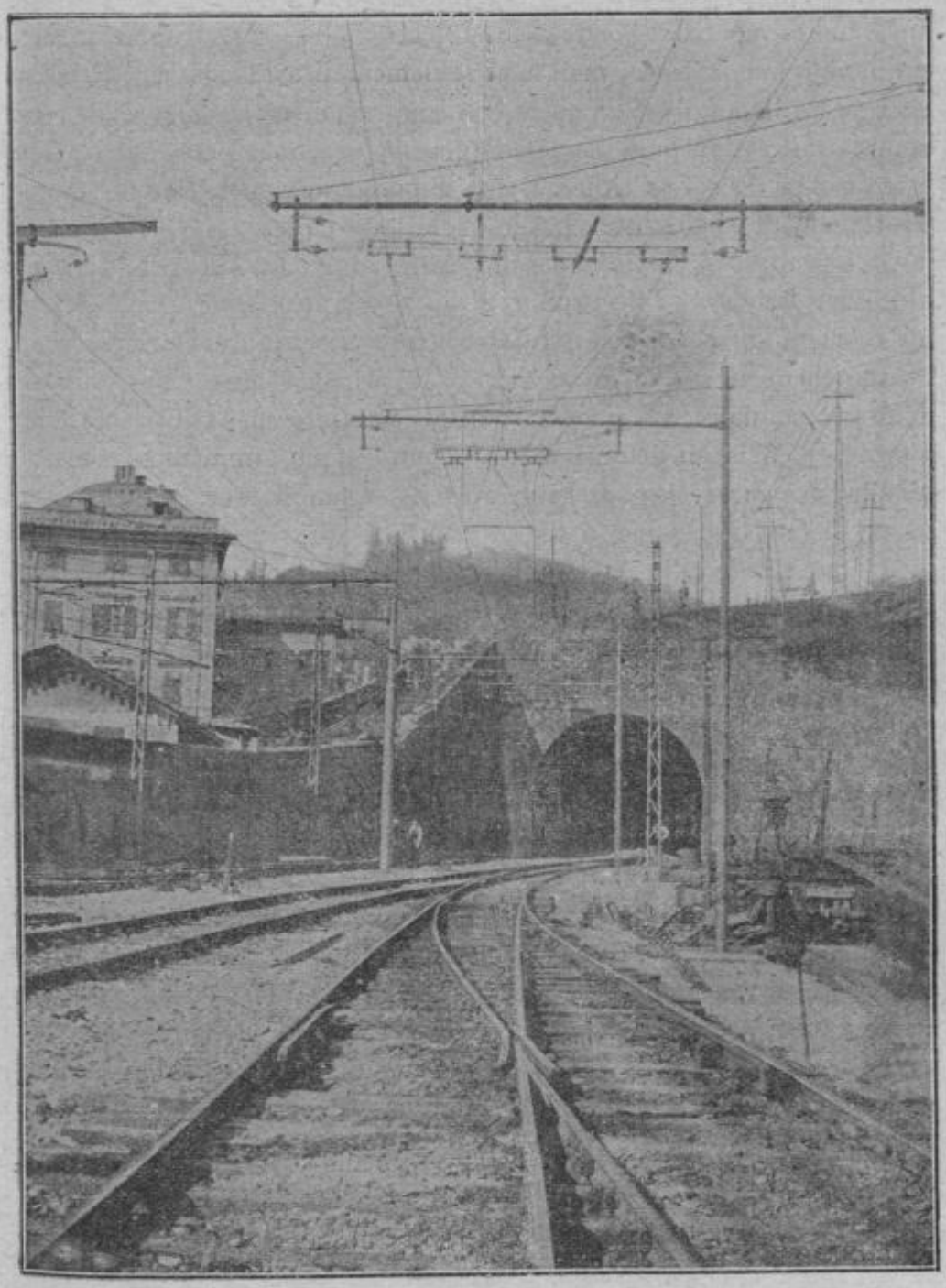


FIG. 1814. — Permutation de fils aériens (ligne de Pontedecimo-Busalla).

centrales, les transformateurs, les régulateurs d'induction est diminuée d'autant.

Le prix d'établissement du transformateur à 15 périodes est plus élevé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 25 à 30 0 /0 que celui du transformateur à 25 périodes. Mais le prix des génératrices n'est pas plus élevé, sauf pour les turbo-alternateurs très puissants auxquels on est obligé de donner un nombre minimum de pôles.

Le doublement des conducteurs télégraphiques constitue un mode de protection très efficace, mais non seulement il a l'inconvénient de surcharger les lignes, il est en outre très coûteux, même avec un fil de retour commun; il est en plus dangereux pour le personnel, parce que les lignes étant isolées du sol se trouvent être exposées aux effets électrostatiques. Pratiquement ce n'est donc pas une solution à envisager.

On a proposé et employé des dispositifs compensateurs destinés à produire sur les lignes télégraphiques des forces électromotrices égales et directement opposées aux forces électromotrices perturbatrices, tel que l'embrochement sur le fil de retour du primaire d'un transformateur, dont le secondaire est convenablement connecté sur le fil télégraphique à protéger. Mais, en définitive, le problème le plus immédiat consiste à prendre des mesures pour soustraire les appareils aux influences nuisibles. Il faut s'attacher dans ce cas à ce que les dispositifs utilisés soient montés de telle sorte qu'il y ait résonance entre la capacité et la self sous la fréquence du courant perturbateur et que la résistance de la self soit égale à la résistance additionnelle.

De tels appareils ont été installés sur les lignes des Alpes-Maritimes (6.000 volts, 25 périodes), de la Haute-Vienne (10.000 volts, 25 périodes) et des Pyrénées-Orientales (12.000 volts, 25 périodes).

On peut aussi agir sur les lignes en fortifiant leur isolement par de bons isolateurs et par un entretien sérieux et en les antiinductant tous les 125 mètres par exemple.

Enfin on doit veiller à ce que l'isolement des installations antérieures soit soigneusement fait. De ce fait on éliminera totalement les parafoudres à charbon, en les remplaçant par des appareils à pointe ou des paratonnerres à vide. A l'effet d'éviter les secousses, il faut mettre les lignes à la terre par des bobines de décharge (bobines Cailho). Les bobines Perego conviennent mieux pour les lignes à haute tension.

Les lignes de traction monophasées supportent des troubles très graves du fait des communications télégraphiques et téléphoniques. Il apparaît que les modifications qu'une pratique récente a indiquées sont difficiles à réaliser sur les lignes existantes. D'après M. Girousse, ingénieur des télégraphes, nous allons signaler ces modifications qui permettent d'obtenir, avec une dépense assez faible, des résultats satisfaisants pour l'amélioration des communications télégraphiques et téléphoniques.

Ces modifications portent soit sur les lignes perturbatrices, c'est-à-dire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur les lignes de traction, soit sur les lignes troublées, c'est-à-dire les lignes à courant faible.

Dans le premier cas il y aurait lieu d'agir sur la fréquence, la disposition des conducteurs aller et retour et enfin sur les points d'alimentation.

Au point de vue de la fréquence, il est indiqué d'adopter celle de 16 2/3 au lieu de 25 périodes, qui d'ailleurs convient mieux pour le fonctionnement des moteurs. De plus il permet de choisir des machines, alternateurs, moteurs et transformateurs réduisant au minimum les harmoniques, tel que le procédé Marguerre, qui consiste à monter en dérivation aux bornes des alternateurs, par exemple, des circuits, self capacité en résonance pour les différentes fréquences des harmoniques qu'on veut combattre.

Au point de vue de la disposition des conducteurs, il semble difficile de modifier dans un sens favorable la position du conducteur d'aller, mais, pour celui de retour, on diminuerait dans une très forte proportion le retour par le sol en isolant à peu près la voie de roulement et en la mettant franchement à la terre de distance en distance. On peut aussi installer au voisinage immédiat des lignes à faible courant un conducteur auxiliaire servant de voie de retour.

Il conviendrait enfin de diminuer la longueur des lignes d'alimentation, par exemple en augmentant le nombre des postes de transformation, c'est-à-dire des points d'alimentation, en faisant ces postes aussi simples que possible pour ne pas augmenter la dépense.

Comme améliorations d'aménagement des lignes à courant faible à simple fil, si on veut attirer par déplacement des lignes existantes, il ne faut pas oublier qu'elles doivent être reportées à au moins 2.000 mètres des voies électrifiées.

La mise en souterrain des lignes à courant faible constitue un mode de protection très efficace, mais cela est coûteux et en outre les communications télégraphiques sont difficiles à grande distance avec des lignes souterraines même en pupinisant les câbles.

630. Étude comparative des divers systèmes de traction. — *a*) *Courant continu.* — La traction par courant continu à potentiel constant a lieu soit par la production directe du courant dans les usines à la tension utilisée par les moteurs, soit par la production dans les usines de courant alternatif ou continu à intensité constante transformée en courant continu en potentiel constant par des commutatrices placées le long de la ligne ou sur le train.

Le moteur à courant continu, sous la tension de 500 à 600 volts employée communément, n'est plus acceptable dès que la longueur de la ligne à desservir dépasse une quinzaine de kilomètres. A l'effet d'éviter les chutes de tension dans les conducteurs, pour les lignes à trafic intense,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on est conduit à multiplier les points d'alimentation ou sous-stations dans les réseaux un peu étendus (groupes moteurs-générateurs ou transformateurs et commutatrices). Les dépenses de premier établissement de ces sous-stations sont nécessairement élevées, de même que les frais d'entretien et de surveillance.

Mais, sous ce rapport, l'emploi des turbines à vapeur et les progrès introduits dans la construction des génératrices à courant continu à haute tension sont aptes à remédier d'une façon très heureuse aux inconvénients que nous venons de signaler. Les grandes vitesses périphériques obtenues avec les turbines à vapeur et l'emploi de pôles de commutation donnent aujourd'hui le moyen de construire des dynamos à haut voltage sans trop de difficultés, comme nous l'avons expliqué au (§ 486).

Ainsi la firme Siemens-Schuckert a pu édifier avec succès des génératrices à courant continu de 3.200 volts, et M. Hobart a envisagé sans crainte l'adoption de machines de 4.000 kilowatts à 400 volts et 500 tours, par minute. Nombre de lignes fonctionnent avec des tensions de 1.500 et 2.000 volts sur le fil de travail. La tension de la ligne de contact peut être doublée par la mise en série de deux moteurs, ce qui conduit à 3.000 et 4.000, et avec le système à deux ponts, comme à la Mure, on arrive à 2×3.000 et 2×4.000. Il apparaît ainsi que le système à courant continu serait jusqu'ici la solution la plus satisfaisante pour les trains lourds (1).

Le système de traction à courant continu présente un désavantage,

---

(1) M. K. Siebner cite les chiffres suivants : pour le chemin de fer métropolitain et de la banlieue de Berlin, avec adoption du système à 3 fils $\pm$ 2.000 volts, à courant continu, comparativement au système à courant alternatif.

	Courant alternatif en fr.	Courant continu en fr.
Dépenses d'établissement :		
Deux centrales de 60.000 kw respectivement 42.000 kw.	26.250.000	18.750.000
Sous-station pour 50.000 kw respectivement 100.000 kw.	3.750.000	7.500.000
Canalisation de prise de courant à l'intérieur de la ville (30 km)	625.000	750.000
Canalisations de prise de courant à l'extérieur de la ville (180 km)	4.508.000	5.000.000
Feeders	1.625.000	7.450.000
120 trains	63.000.000	52.500.000
Totaux	99.750.000	89.250.000
Frais d'exploitation :		
I. Personnel	6.875.000	6.875.000
II. Autres dépenses :		
a. Dépenses de courant	5.000.000	4.250.000
b. Entretien des trains	4.375.000	3.675.000
c. Entretien des canalisations y compris transformateurs, accumulateurs	212.500	737.500
d. Entretien des voies, gares, arrêts, etc	1.662.500	1.662.500
Somme de II	11.250.000	10.325.000

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lorsque le service comporte de fortes unités de traction, c'est la présence d'un troisième rail au lieu du fil de travail et le remplacement de la roulette du trolley par de puissants frotteurs à ressort. Le troisième rail est souvent cause d'interruptions de service, notamment dans les pays sujets à de fréquentes chutes de neige. D'autre part, il ne peut être installé sur les lignes d'intérêt local, qui souvent empruntent l'accotement des routes.

Au point de vue exploitation, la courbe caractéristique intéressante est celle qui donne l'effort de traction, en fonction de la vitesse ou réciproquement. Le moteur série est particulièrement précieux, à cet égard, tant qu'il n'y a pas de surcharges en rampes, car, dans ce dernier cas la vitesse horaire ne peut plus être maintenue à moins que de faire usage de survolteur placé sur le véhicule. Quant à la marche en parallèle de moteurs actionnant des essieux différents d'un même véhicule, elle est réalisable sans inconvénient. Enfin la répartition de la puissance totale sur plusieurs locomotives ou automotrices n'offre pas de difficultés. Mais les dépenses d'exploitation des usines à courant continu sont en général plus élevées que dans les autres systèmes.

Les nombreuses transformations de l'énergie dans le système continu à 600 volts abaissent forcément le rendement. Par contre, les moteurs à courant continu présentent un rendement supérieur à celui des autres moteurs et sont les plus économiques au point de vue des pertes au démarrage. Des essais personnels entrepris par Hobard, il résulterait que, pour un même poids du moteur, une même vitesse périphérique et un même échauffement, la puissance développée sous courant continu est au moins double de celle développée sous courant monophasé (1).

Toujours dans le cas du système à courant continu à 600 volts, l'équipement du matériel roulant n'est pas très coûteux ; cependant la présence des collecteurs exige des révisions fréquentes et conduit à un entretien relativement élevé.

Mais si on emploie la traction à courant continu à haute tension, il

III. Amortissements :		
a. Installations mécaniques	4.000.000	3.575.000
b. Voies	1.562.500	1.562.500
c. Bâtiments	687.500	687.500
Somme de III	6.250.000	5.825.000
IV. Intérêts :		
4 pour 100 de 99.750.000 fr. respectivement 89.250.000 fr.	3.900.000	3.570.000
Somme de dépenses de I à IV	28.365.000	28.595.000

C'est-à-dire que les dépenses, dans le cas d'emploi du courant continu à ± 2.000 volts, sont de 7 pour 100 environ moins élevées qu'avec du courant alternatif.

(1) Cette appréciation de Hobard est basée sur un travail à pleine charge des moteurs pendant la durée du service. Or la comparaison devrait plutôt porter sur la puissance moyenne des moteurs (la consommation moyenne d'énergie nécessaire à la propulsion d'une voiture motrice ou d'un train ne représentant que le quart de la puissance prévue) que sur leur normale, et alors la défaveur s'accentue encore pour le moteur à courant alternatif simple.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

semble que les frais totaux d'équipement et de matériel de roulement soient inférieurs à ceux du système monophasé, quand la ligne ne dépasse pas une trentaine de kilomètres. Quant aux frais d'exploitation, abstraction faite de la dépense d'énergie électrique, ils sont à peu près du même ordre que pour le système monophasé. Il offre en outre un très bon rendement.

En tant que propriétés particulières, quand les arrêts doivent être fréquents, ce qui nécessite un grand couple au démarrage pour obtenir une bonne vitesse moyenne, il faut donner la préférence au moteur-série à courant continu. Pour que l'exploitation soit rémunératrice, il est nécessaire que le trafic soit intense.

b) *Courant triphasé.* — La traction par l'emploi du courant triphasé a lieu par les moyens suivants : production dans les usines de courant triphasé à la tension et à la périodicité utilisée par les moteurs ; production de courant triphasé à haute tension et transformation à la tension des moteurs, la périodicité restant la même et les transformateurs étant ou répartis le long de la voie ou placés sur le train ; production de courant triphasé à haute tension et transformation de la tension et de la périodicité dans les sous-stations et transformateurs rotatifs à la tension et à la périodicité des moteurs.

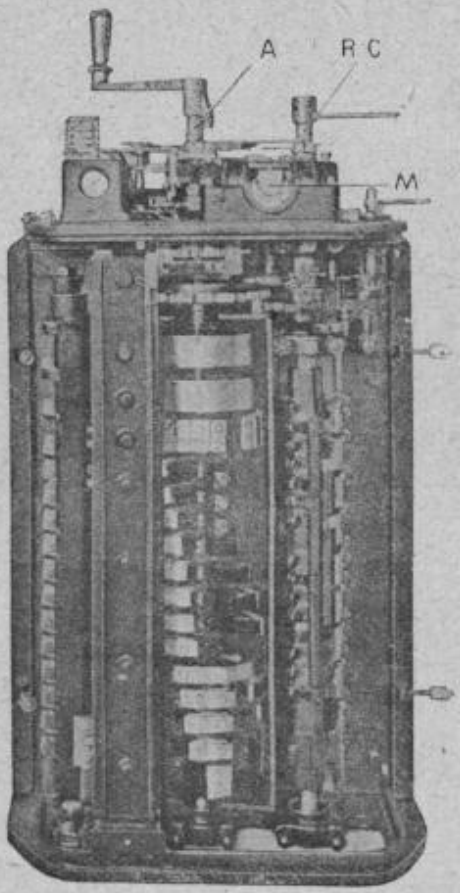


FIG. 1815. — Manipulateur, appareil d'asservissement et de mise en marche. (Construction H. Guénod, S. A.).

Les résultats obtenus sur la ligne de la Valteline (§ 507), la première installation de traction électrique à courant triphasé, ont montré que ce système offre, au point de vue des frais d'installation et d'exploitation, une économie sensible par rapport au système à courant continu. L'augmentation de dépenses résultant de l'entretien d'une ligne aérienne double est sensiblement inférieure à l'économie réalisée sur le matériel roulant. Les frais d'équipement de la ligne et du matériel roulant sont, d'après M. de Valbreuze, de 40 à 45 0/0 inférieurs aux frais d'équipement relatifs au cas du courant continu.

Avec le système triphasé, le rendement de la ligne est bon ; le rende-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment de l'ensemble (depuis le tableau de l'usine jusqu'aux roues motrices) est supérieur au rendement du système à courant continu à 600 volts, et le rendement total se trouve encore amélioré par le fait de la récupération. Celle-ci en général atteint 2 à 3 0/0.

Pour un service de montagne, où la récupération joue un rôle important, et où il n'y a généralement pas un trafic considérable, il y a avantage à recourir au système triphasé. Pour la remorque des trains lourds sur une ligne à trafic restreint, le système triphasé peut lutter avec le système monophasé. En effet, il permet l'emploi de moteurs excessivement robustes, de grande puissance, ne nécessitant que très peu d'entretien et il présente dans son ensemble un très bon rendement.

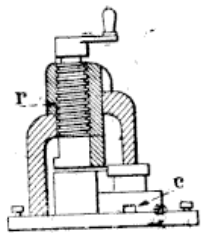


FIG. 1816.

Sur la ligne de la Valteline on a utilisé une tension de 3.000 volts et sur la ligne d'essai de Zossen à Marienfeld on a marché sous une tension directe de 11.000 volts. Aujourd'hui on envisage couramment des voltages de 5.000 volts et plus aux bornes des moteurs des locomotives. Dans les applications modernes, la périodicité a été abaissée jusqu'à 15 périodes, pour la facilité des organes de transmissions, engrenages ou bielles. Pour la marche des moteurs on arrive à obtenir des variations de vitesse (trois à quatre vitesses différentes) par la mise en cascade de deux moteurs ou par une modification du nombre de pôles. Le facteur de puissance est d'environ 0,93 à pleine vitesse et 0,77 à demi-vitesse. En général les locomotives à courant triphasé construites récemment se rapprochent de celles à courant continu au point de vue des conditions imposées par l'exploitation sans toutefois être arrivées à les remplir aussi bien.

L'entretien de la ligne est plus élevé que dans les autres systèmes, mais celui du matériel roulant est inférieur à tous les autres.

c) Courant monophasé. — On produit le courant dans les usines directement à la tension de la ligne de contact, ou bien à basse tension et élévation par transformateurs statiques à la tension de la ligne de contact. Dans les deux cas, la tension de la ligne de contact est abaissée par transformateurs sur la locomotive. Ou enfin on produit un courant triphasé, à haute tension, que l'on transforme en courant monophasé à périodicité plus basse à la tension de la ligne de contact dans des sous-stations à transformateurs rotatifs.

La complication de l'équipement, aérien surtout, qu'exige le système triphasé, a incité les ingénieurs à étudier l'application du courant alternatif simple à la traction électrique, qui permet l'emploi d'un seul fil de travail, comme pour le courant continu.

Les travaux de Winter, d'Echeberg et de Latour montrèrent tous les avantages que l'on pouvait espérer des moteurs monophasés modifiés en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vue de leur adaptation à la propulsion des véhicules. Dès lors le système monophasé se répandit avec une grande rapidité.

Ce système de traction permet d'employer des tensions élevées dans le fil de travail, ce qui est indispensable lorsqu'il s'agit d'électrifier dans de bonnes conditions une ligne de chemin de fer. Expérimentalement on a reconnu que cette tension ne peut en général être inférieure à 8.000 à 16.000 volts pour que la chute de tension dans les rails ne soit pas trop élevée. La tension appliquée actuellement aux moteurs ne dépasse pas 350 volts et les difficultés que l'on rencontre pour obtenir convenablement l'enroulement inducteur et une bonne commutation au collecteur rendent problématique la construction de moteurs monophasés pour des tensions plus élevées. Cependant des constructeurs ont envisagé sérieusement la construction de moteurs de 1.000 HP à 600 et 750 volts de tension.

Les moteurs, série monophasés, peuvent fonctionner aussi bien sur courant continu, ce qui permet de raccorder les lignes interurbaines et suburbaines aux réseaux urbains. En outre le réglage de la vitesse est effectué par des procédés simples, offrant le moyen d'avoir une graduation aussi sensible que l'on veut ; toutes les vitesses sont également économiques et aucune énergie n'est perdue dans les résistances.

La chute de tension dans une longueur déterminée de rails est plus importante dans le cas du courant monophasé que dans celui du courant continu. En outre, des difficultés que présente le retour du courant par les rails, dans le cas du système monophasé, ce dernier implique une augmentation du poids du matériel roulant et, de plus, nous rappellerons que le moteur à courant alternatif simple, comporte un faible facteur de puissance et un mauvais rendement. Le poids élevé du moteur à courant monophasé emporte nécessairement un encombrement important : par ces motifs on ne peut construire un moteur monophasé de grande puissance à faible vitesse de rotation.

D'après Dodd, le poids de l'équipement électrique des locomotives à courant continu varie entre 23 et 36 kilogrammes par cheval (dans quelques cas, il est descendu à $11^{kg},5$) ; avec le système triphasé ce poids est le même que pour le système à courant continu, et pour les locomotives monophasées, il varie entre 38 et 50 kilogrammes par cheval.

L'adjonction d'un transformateur-abaisseur de tension sur la voiture automotrice et autres appareils accessoires, rend le poids de la totalité de l'équipement électrique environ 1,5 fois plus élevé que le poids des moteurs seuls, alors que ce rapport dans le cas de la traction à courant continu n'est que de 0,4 au plus. Ainsi, avec un équipement de quatre moteurs de 200 HP, par exemple, le poids total de l'équipement électrique est de 33,6 tonnes pour le courant monophasé et de 15,7 tonnes pour le courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais pour le moteur monophasé l'effort de traction pour lequel les roues commencent à patiner est relativement minime ; il varie d'ailleurs avec la périodicité du courant d'alimentation ; pour 12 périodes à la seconde, il est moitié de celui développé par un moteur à courant continu, et pour 25 périodes, il lui est encore inférieur de 25 0 /0. Donc, pour obte-

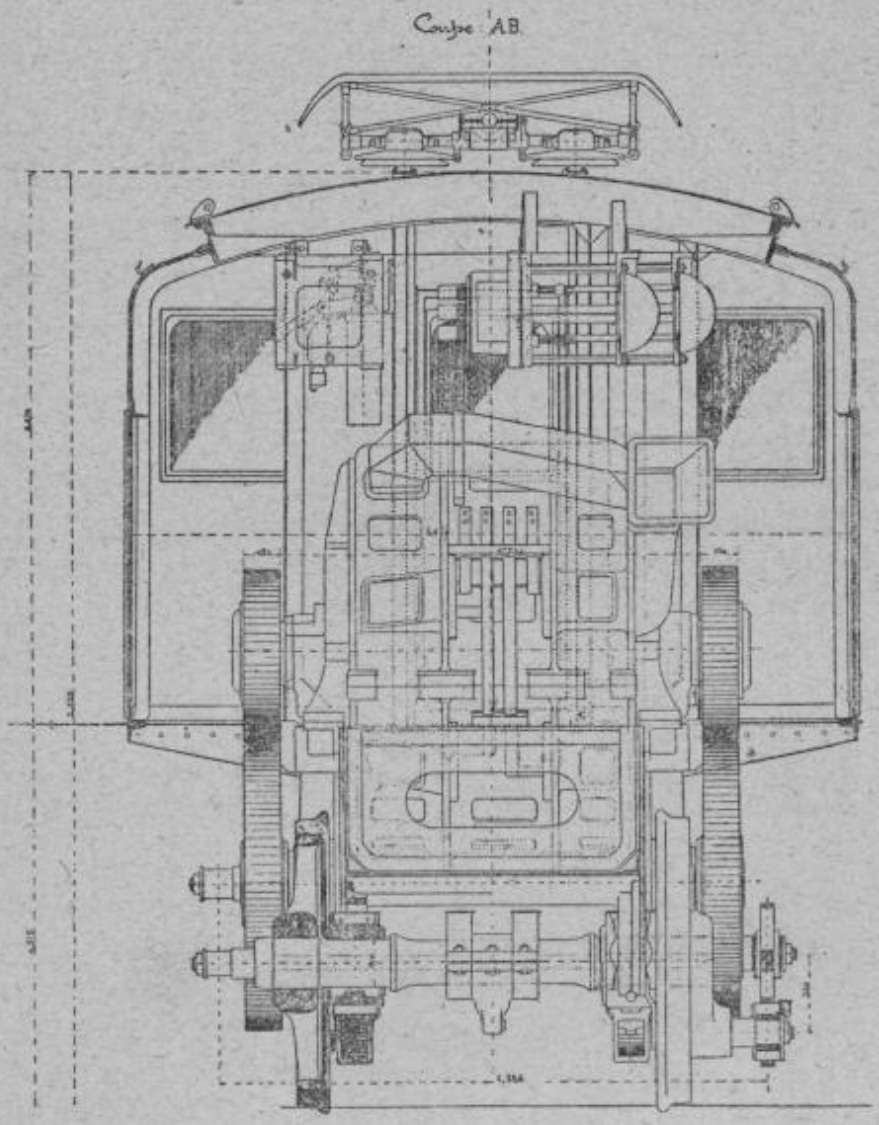


FIG. 1817. — Vue arrière d'une locomotive électrique.

nir de bons démarrages avec le moteur monophasé, il est désirable de posséder une périodicité élevée; mais, d'autre part, ce moteur est d'autant moins bon qu'il fonctionne à fréquence élevée. Les périodicités usuelles sont 25 et 15 périodes.

Avec le moteur monophasé à collecteur, on peut obtenir n'importe quelle vitesse, indépendamment de la chute de tension de la ligne de contact. Il répond ainsi le mieux aux exigences de la traction des chemins

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de fer. Il peut marcher en parallèle et il se prête à la récupération de l'énergie par le moyen d'un transformateur de réglage. Les démarrages se font très économiquement. En résumé la locomotive monophasée est celle qui remplit le mieux à ce jour les conditions imposées par l'exploitation et la surveillance (1).

Au point de vue des frais d'équipement de la ligne et du matériel roulant, les premiers sont légèrement inférieurs à ceux que nécessite le système triphasé, par conséquent très inférieurs à ceux du système à courant continu à 600 volts ; mais les seconds sont beaucoup plus coûteux que ceux correspondants au courant continu. Au total, le bénéfice en faveur du courant monophasé pourrait être, d'après M. de Valbreuze (2), de 10 à 15 0 /0, par comparaison avec le courant continu. L'entretien et la surveillance de la ligne avec le système monophasé sont moins élevés que dans tous les autres systèmes ; mais par contre l'entretien du matériel roulant avec moteurs à collecteur, transformateurs et organes à haute tension est supérieur à celui du matériel roulant à courant continu. Le rendement de la ligne, dans le système monophasé, est aussi bon que dans le cas du système triphasé ; mais le rendement des moteurs, aux basses charges, est beaucoup moins bon qu'avec les moteurs à courant continu. Le rendement de l'ensemble serait néanmoins en faveur du courant monophasé.

Le système monophasé s'applique plus particulièrement aux lignes où le trafic n'est pas trop intense et où les frais d'exploitation doivent être bas (jonctions interurbaines, chemins de fer secondaires ou vicinaux) ; même pour l'exploitation de lignes importantes, ce système est fréquemment utilisé et les nombreuses installations qui ont été faites, quoique d'origine toute récente, semblent l'appeler à un grand avenir ; à moins que le système à courant continu à haute tension ne devienne pour lui un concurrent redoutable peut-être dans un avenir très prochain.

Quoi qu'il en soit, en rapprochant les digressions de ce paragraphe de celles contenues aux paragraphes (514 et suivants), concernant les moteurs, on peut se former une idée assez exacte de l'état actuel de la traction électrique, à l'aide des systèmes actuellement en usage.

Nous terminerons cette étude par les tableaux ci-après qui donnent

---

(1) M. Deri a imaginé un perfectionnement remarquable. Il emploie deux groupes de balais ; l'un est fixé suivant les axes polaires du stator, l'autre est réglable de façon à faire avec les balais fixes des angles variables. Le déplacement des balais produit un effet analogue à celui qu'on observe avec un moteur série à courant continu lorsqu'on modifie la tension aux bornes : ainsi, en réglant la position des balais, on règle par là même le couple et la vitesse. Cette propriété rend précieux le moteur Deri dans le cas où l'on a besoin d'une régulation délicate de vitesse. Le premier essai de ce moteur a été fait sur le chemin de fer triphasé d'Engelberg, en n'utilisant qu'une phase. Le démarrage et le réglage de l'effort de traction et de la vitesse s'effectuent simplement en déplaçant les balais à l'aide d'un volant à main qui agit par l'intermédiaire d'engrenages.

(2) *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, janvier 1907.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quelques chiffres relatifs au rendement des différents systèmes de traction et aux coûts d'exploitation.

TABLEAU I

OPÉRATEURS	SYSTÈME					
	CONTINU		TRIPHASÉ		MONOPHASÉ	
	avec	sans	avec	sans	avec	sans
Locomotive	»	0,75-0,80	0,68-0,85	0,68	0,70-0,87	0,70-0,75
Ligne de contact	Sensiblement le même rendement pour les trois systèmes 0,88 à 0,92					
Commutatrices ou transformateurs	»	0,75-0,90	0,68-0,72	0,68-0,72	0,75-0,80	0,75-0,80
Ligne primaire	Sensiblement le même rendement pour les trois systèmes 0,95					
Rendement total jusqu'à la sortie de l'usine	»	0,50-0,65	0,42-0,56	0,42-0,46	0,47-0,63	0,47-0,55

TABLEAU II

	COURANT CONTINU Berlin-Grosslichterfeld	COURANT MONOPHASÉ Hambourg-Altona	COURANT CONTINU Paris à Juvisy
Trafic annuel en TK	111.858.390	247.979.467	186.245.626
Trains km	692.101	2.011.960	781.750
Longueur de la ligne	9,24	26,6	23,00
Vitesse maxim. en kmh	50	50	70
Poids moyen des trains	160 t	123 t	238 t
Distance moyenne entre stations		1.660	2.555
Durée de marche (arrêts déduits)		44 minutes	30 minutes
Nombre de stations		17	10
		Ces deux services correspondent à des consommations théoriques d'énergie à la jante presque identiques.	
Consommation d'énergie HT à la centrale par TK y compris chauffage et éclairage	36,1 wh non compris l'éclairage	52,8	48
DÉPENSES PAR 100 TONNES KILOMÉTRIQUES			
Energie électrique	0,230	0,34625	0,3720
Ligne de transformation		0,03125	
Ligne de contact	0,03375	0,08	
Entretien du matériel roulant électrique	0,205	0,3425	0,0590
Personnel de conduite	0,05	0,05375	0,0840
Matériel divers	0,03125	0,055	0,0086
	0,550	0,90875	0,5236

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tableau III

Chutes de tension approximatives correspondant à l'emploi de différentes natures de courant

	MONOPHASÉ 7.500 V.	CONTINU 3.600 V.	CONTINU 2.400 V.
Ligne de contact : aller	1 fil Cu 100 mm²	1 fil Cu 300 mm²	1 rail 52 kg
— retour	2 rails 46 kg	2 rails 46 kg	1 rail 52 kg
Résistance ohmique par km :			
Conducteur aller	0,17	0,057	0,017
— retour	0,018	0,018	0,017
Résistance apparente totale :	0,30 à 0,40	0,077	0,034
Courant correspondant à une puissance de 1.500 kw	220	420	625
Chute de tension par km de ligne en volts	66 à 88	31,5	21
Distance en kilomètres entre points d'alimentation correspondant à une chute de tension de 25 % environ	25 km	28,5	28,5

Tableau IV

Résultats d'exploitation de la ligne de Camden à Atlantic City

	1910	1909	1908	1907
Énergie produite en KWh à la centrale	23.312.500	23.551.200	22.887.600	21.118.800
Énergie débitée par les sous-stations en kilowatts-heures	21.972.300	—	—	—
Rendement de la transformation	0816	0784	0738	0722
Prix de la tonne de combustible, en francs	12,60	—	—	—
Prix du KWh à la centrale, en centimes	2,8	2,85	3,06	3,5
Consommation de combustible par kilowatt-heure, en kilogrammes	1,47	1,50	1,52	1,67
Nombre annuel de voitures-km (3,5 voitures par train)	7.350.000	6.600.000	—	—
Prix total de revient par voiture-km en francs : électricité	0,58	0,60	0,65	—
Prix total de revient par voiture-km en francs : vapeur	0,80	—	0,71	—

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU V

Dépenses d'exploitation en courant continu et monophasé

	1911
1. RELEVÉ DES DÉPENSES D'EXPLOITATION ÉLECTRIQUE DU NEW-YORK CENTRAL ET HUDSON RIVER RAILROAD	
Courant continu	
	Francs
§ 16. Entretien des transmissions électriques	511.637,05
§ 32. — locomotives	223.561,50
§ 36. — automotrices	93.889,65
§ 58. — stations centrales électriques	183.391,50
§ 96. Électriciens-conducteurs	670.722,05
§ 104. Conduite des usines	1.198.116,60
§ 105. Énergie achetée au dehors	10.868,25
Total	2.891.436,60
2. RELEVÉ DES DÉPENSES D'EXPLOITATION ÉLECTRIQUE DU NEW-YORK NEW-HAVEN HARTFORT RAILROAD	
Courant monophasé	
	Francs
§ 16. Entretien des transmissions électriques	529.965,90
§ 32. — locomotives	847.901,15
§ 36. — automotrices	164.413,75
§ 58. — stations centrales électriques	153.485,45
§ 96. Électriciens-conducteurs	819.216,55
§ 104. Conduite des usines	1.225.586,70
§ 105. Énergie achetée au dehors	780.667,90
Total	4.521.267,40
3. RELEVÉ DES DÉPENSES D'EXPLOITATION ÉLECTRIQUE DU PENNSYLVANIA RAILROAD	
Courant continu	
	Francs
§ 16. Entretien des transmissions électriques	93.934,20
§ 32. — locomotives	132.427,10
§ 36. — automotrices	2.399,90
§ 58. — stations centrales	94.662,15
§ 96. Électriciens-conducteurs	360.271,30
§ 104. Conduite des usines	436.627,30
§ 105. Énergie achetée au dehors	63.023,25
Total	1.193.345,25

Lignes de contact et de transport. — Accessoires des véhicules. — Dans le type de construction ordinaire des lignes de tramways à trolley, le fil de travail se trouve supporté directement sur les consoles ou sur les trans-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

versaux, et l'espacement des poteaux est déterminé en alignement par la condition d'obtenir une valeur acceptable pour la flèche prise par le fil du trolley. C'est en raison de cette flèche que la roulette doit être appliquée contre le fil de contact avec une pression assez élevée pour en maintenir le contact permanent.

D'autre part, les lignes à grand parcours, à grande vitesse et à haute tension, surtout celles fonctionnant en courant alternatif, nécessitent une parfaite horizontalité de la ligne quelles que soient les températures, une solidité exceptionnelle pour résister aux à-coups des vitesses énormes sur les aiguillages, bifurcations, etc., enfin une certaine fixité dans le sens horizontal et une certaine flexibilité dans le sens vertical. De plus sur les lignes à haute tension à courant alternatif on emploiera toujours le double

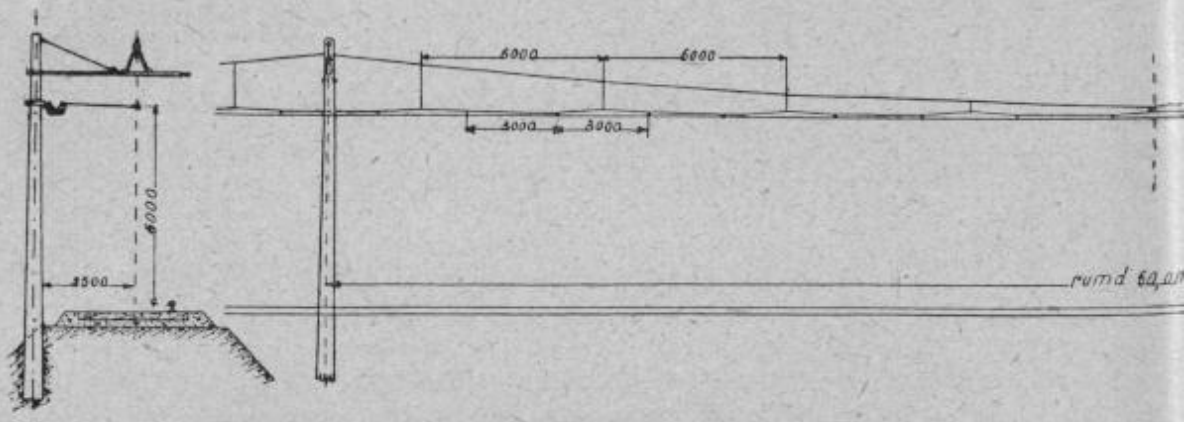


Fig. 1818. — Suspension caténaire avec fil porteur auxiliaire.
(Système Siemens-Schucker.)

isolement. On a donc été sollicité à modifier le système aérien par une disposition réalisant ces desiderata ; de là la venue de la suspension caténaire simple et multiple.

Dans la construction caténaire, l'espacement entre poteaux en alignement reste uniquement fonction du poids que chacun d'eux peut supporter ainsi que de la flèche admissible pour le câble porteur. L'expérience a montré en effet que, même dans le cas de poteaux en bois, cet espacement peut être porté à 45 mètres sans accroître outre mesure la hauteur des poteaux et la résistance que ceux-ci doivent présenter.

Le système caténaire consiste en un câble porteur en acier, tendu entre les poteaux de ligne avec une flèche appréciable, et auquel est suspendu à son tour le fil de trolley pr l'intermédiaire de brins verticaux espacés à intervalles réguliers (*fig.* 1818).

L'espacement des brins de suspension peut être choisi soit de façon à supprimer pratiquement la flèche du fil de trolley, soit simplement à la réduire dans des limites acceptables avec les vitesses à réaliser. Dans le premier cas, on fait usage de la suspension à deux points par portée de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

45 mètres et dans le second de la suspension à trois points pour la même portée.

Il est à remarquer qu'un faible espacement des brins de suspension tend à réduire le danger résultant d'une rupture du fil sous tension, car si l'on considère en effet la longueur de 4 mètres qui sépare deux brins voisins dans la suspension à deux points, on voit facilement que même dans ce cas de la rupture la plus défavorable, l'extrémité la plus longue du fil rompu pendra à un niveau au-dessus du sol qui sera toujours supérieur à 2 mètres, puisque le fil de trolley est posé normalement à une hauteur de 6 mètres au-dessus de la voie.

C'est cette dernière raison qui a fait que la Compagnie Thomson-Houston conseille l'adoption de la suspension à deux points pour les lignes établies sur routes et la suspension à trois points dans les parties en déviation.

On voit, d'après cet exposé, que le système caténaire offre, au point de vue mécanique : 1° l'avantage de permettre un plus grand écartement des poteaux de ligne que le système ordinaire ; 2° celui de maintenir le fil de trolley à une hauteur parallèle au niveau de la voie ferrée et sans flèche appréciable; 3° d'écarter tout danger provenant du fait de la rupture du fil de trolley.

Dans les parties en alignement, le fil de trolley est suspendu librement au câble porteur ; dans les parties en courbe, on est, au contraire, conduit à ramener le fil de contact vers l'axe de la voie ferrée. On fait usage dans

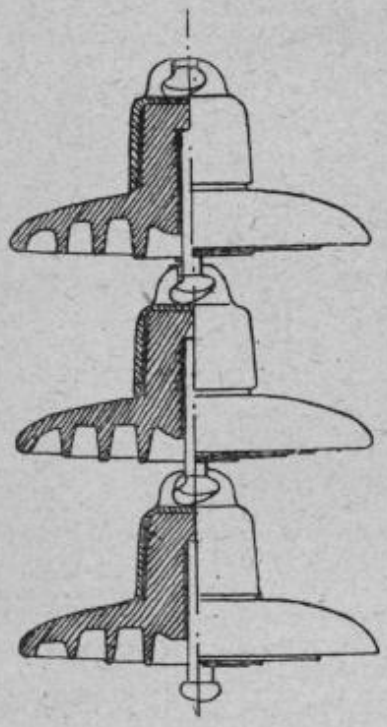


Fig. 1819. — Isolateur de suspension à chapeaux avec boulons scellés.

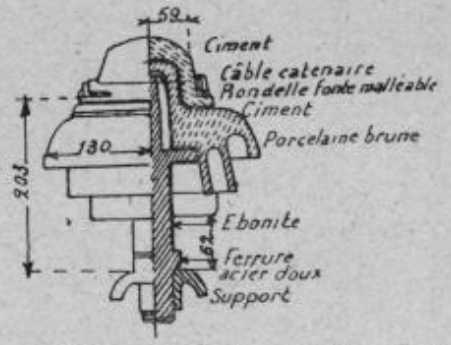


Fig. 1820. — Isolateur de support de fil porteur. (Ligne du Midland Railway).

ce dernier cas de dispositifs de rappel appropriés, agissant sur l'ensemble de la suspension caténaire. Dans les lignes en voie double, avec poteaux placés entre les deux voies, on peut, dans certains cas, éviter l'implantation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de poteaux supplémentaires en courbe, par l'emploi de bras d'écartement doubles qui ramènent l'ensemble des deux lignes dans le sens voulu, tout en maintenant entre elles un écartement invariable.

L'isolation des lignes unipolaires à haute tension n'offre pas de difficultés, surtout pour la suspension multiple ou caténaire ainsi que pour

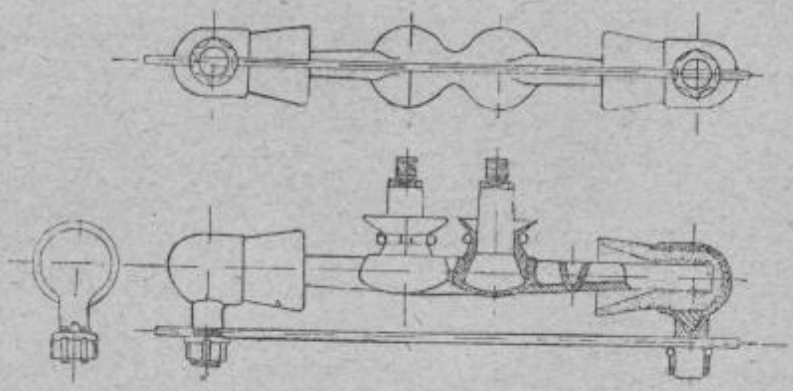


FIG. 1821. — Isolateur double des Giovi.

la suspension de côté du type Oerlikon. Les inconvénients des lignes bipolaires (triphasée ou continue à deux ponts) sont l'impossibilité de transmettre et de recueillir de grosses intensités de courant, les chances plus nombreuses d'interruptions du fait des décharges atmosphériques et la réduction du trafic pendant les réparations dans les tunnels.

Les lignes de contact, soit qu'elles soient constituées par un troisième rail, soit par des fils aériens, même celles à haute tension (15.000 à

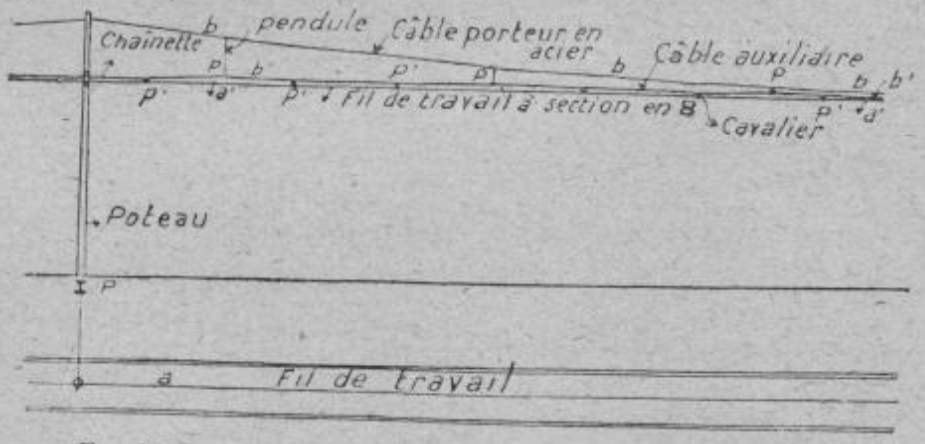


FIG. 1822. — Suspension Thomson-Houston à double chaînette.

20.000 volts) ne mettent en jeu aucun problème de solution embarrassante ; la pratique a montré qu'elles se prêtaient aisément à la marche des trains de grande vitesse.

Le fil conducteur de (8mm,2 de diamètre) est en bronze phosphoreux ou silicieux. Il est généralement supporté par l'intermédiaire de petites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

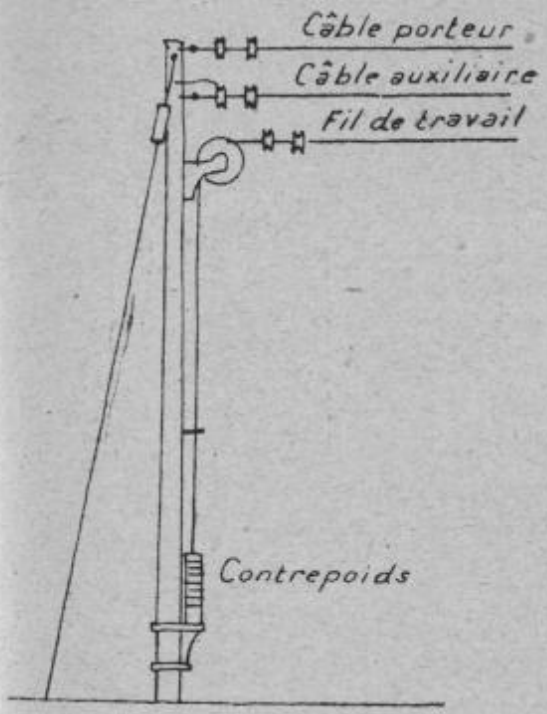
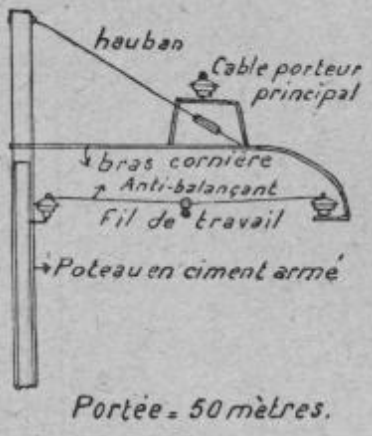
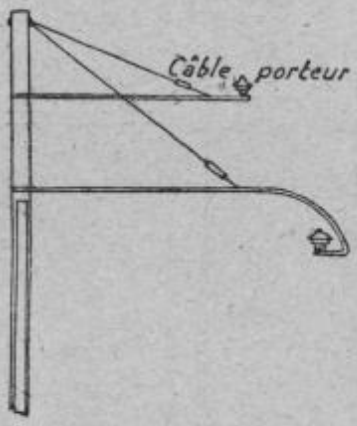


FIG. 1823. — Poteau de tension.
(Thomson-Houston).



Portée = 50 mètres.



Portée = 100 mètres.

FIG. 1824.
Poteau Thomson-Houston.

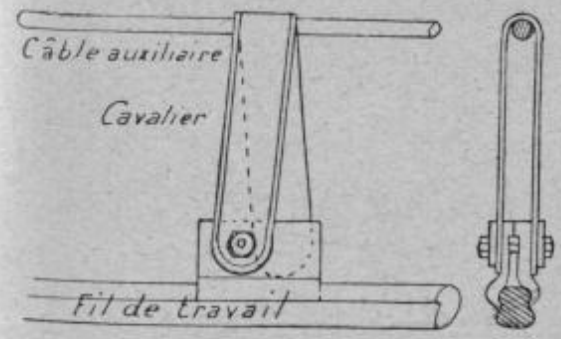


FIG. 1825. — Suspension du fil de travail.
(Thomson-Houston).

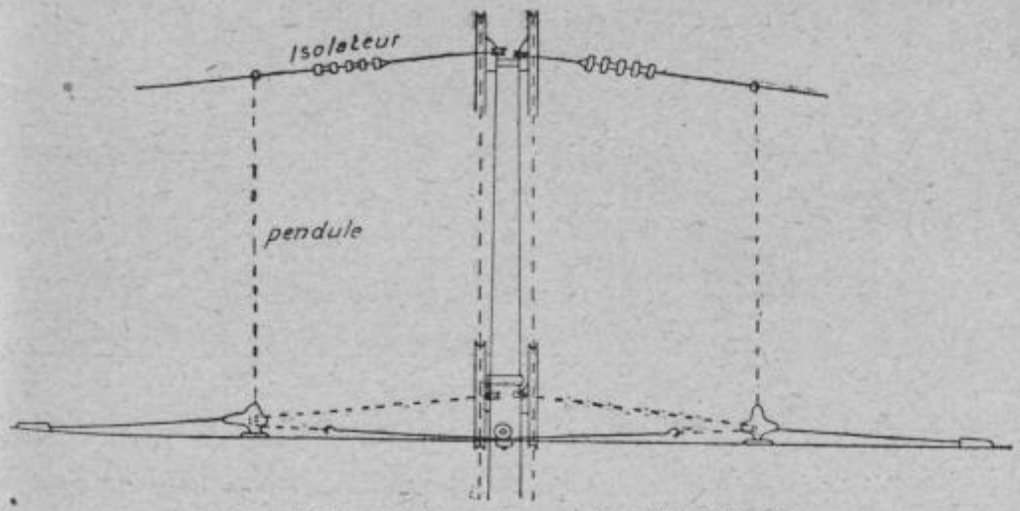


FIG. 1826. — Poteau de rappel système Bergès.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

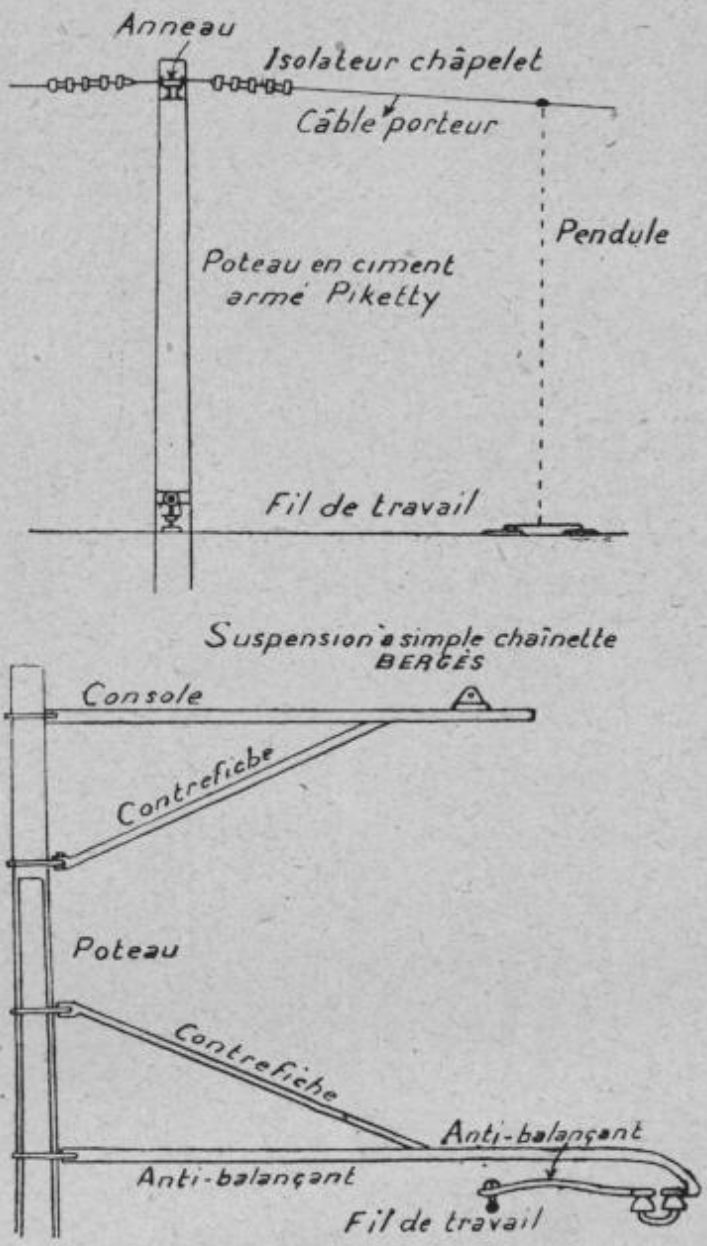


FIG. 1827. — Poteau Bergès pour les courbes.

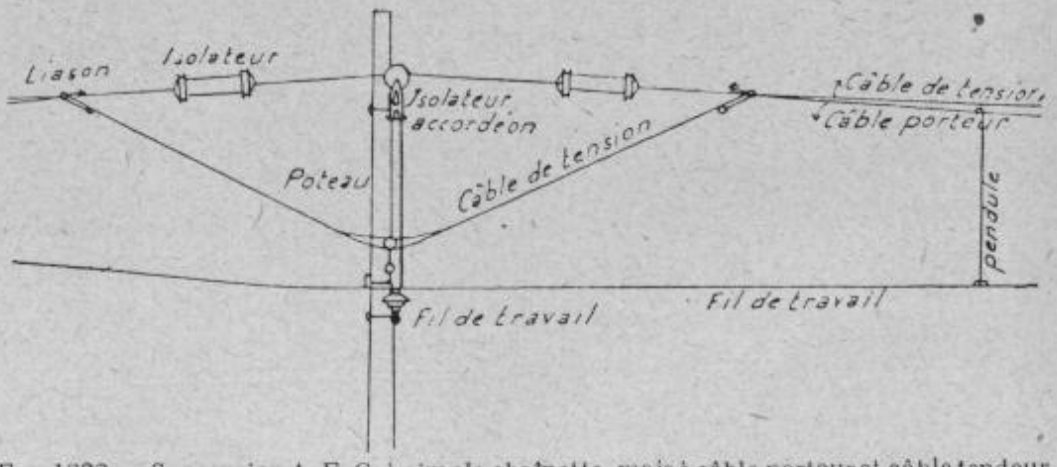


FIG. 1828. — Suspension A. E. G. à simple chaînette, mais à câble porteur et câble tendeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

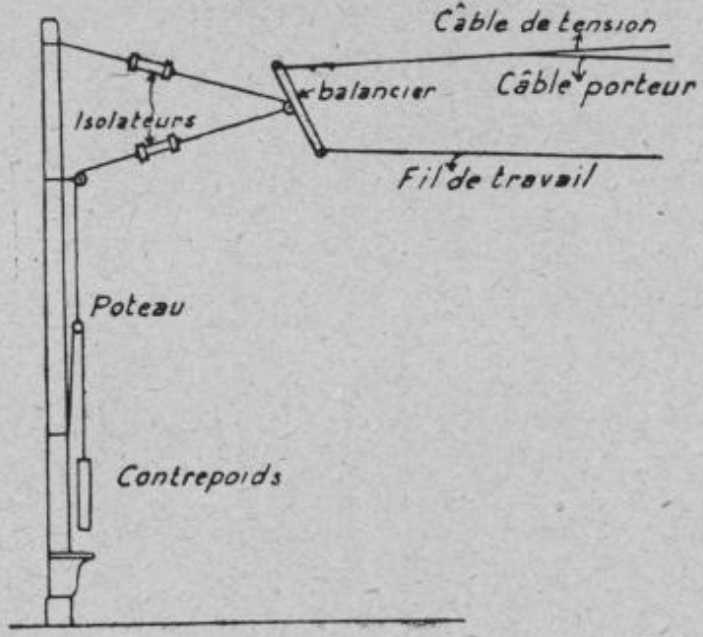


FIG. 1829. — Poteau de tension de la suspension A. E. G.

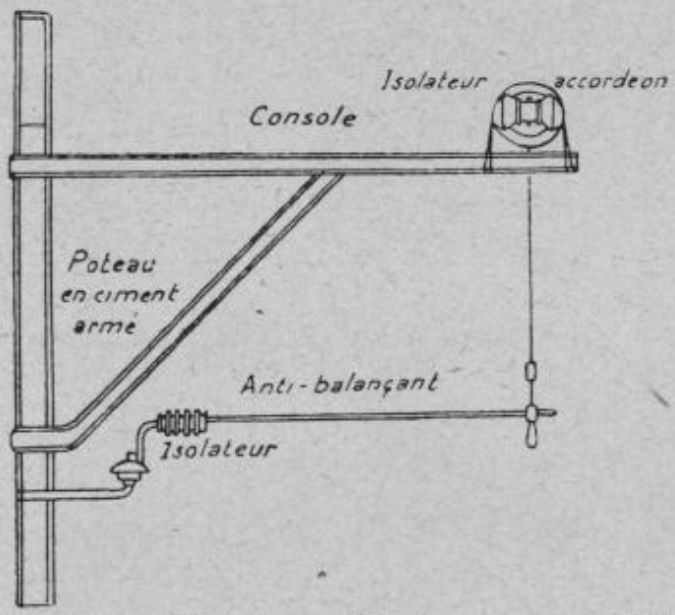


FIG. 1830. — Vue transversale de la suspension A. E. G.

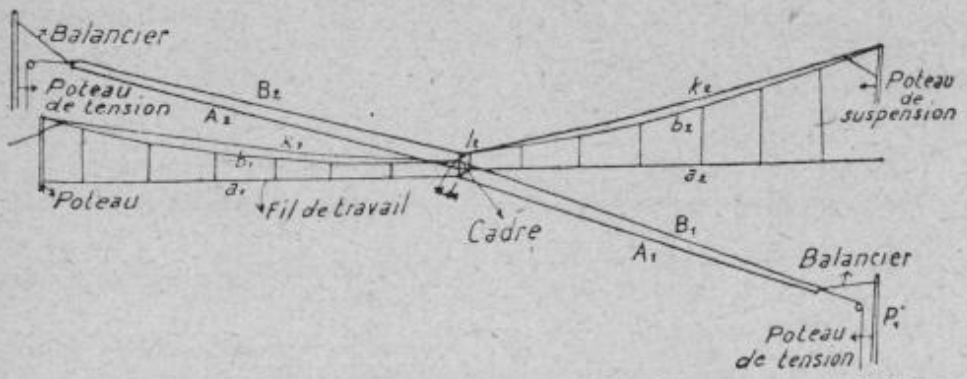


FIG. 1831. — Passage d'un tronçon au suivant dans la suspension A. E. G.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cloches isolantes munies de pinces ou oreilles que l'on rabat au maillet

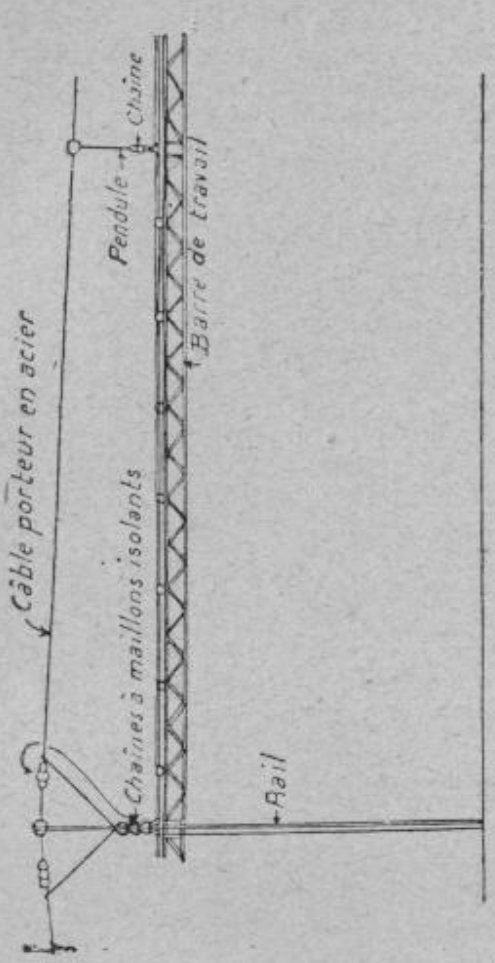


FIG. 1832. — Suspension rigide à chaînette type Midi.

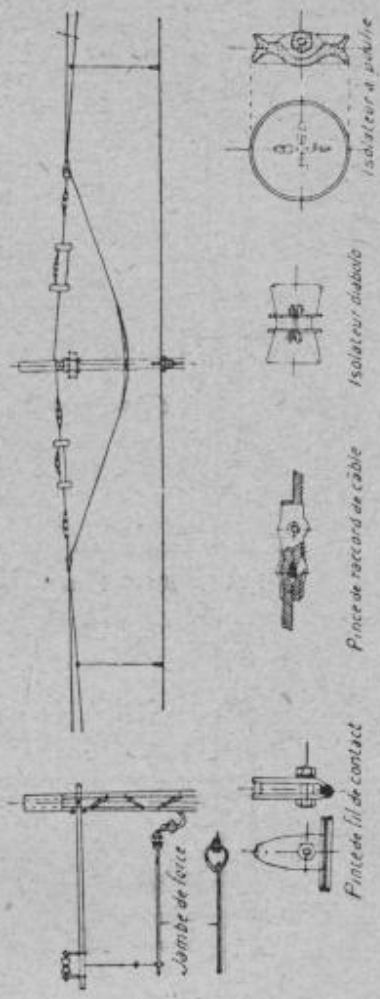


FIG. 1834. — Ligne de Dessau à Bitterfeld (monophasé).

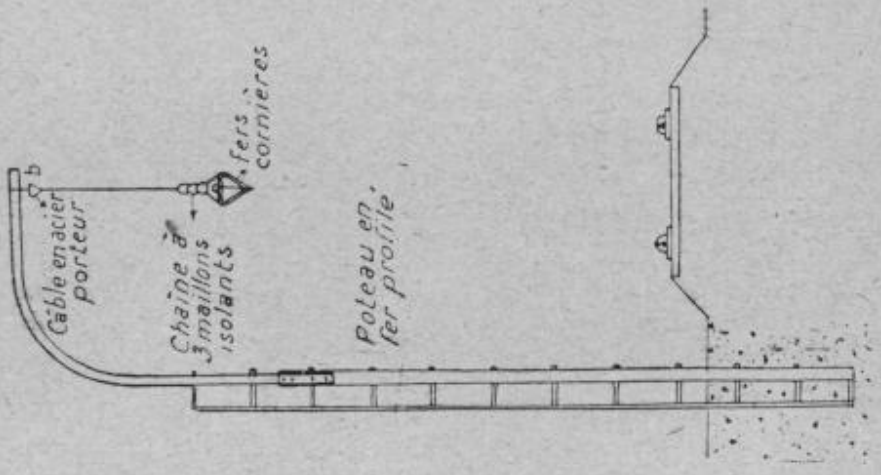


FIG. 1833. — Ligne de la Compagnie du Midi.

sur le fil ou que l'on sonde. On donne de l'élasticité au système en supportant la cloche par un fil transversal d'acier relié au support de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cloche par des colliers. Ce fil est un câble d'acier de 7 à 12 conducteurs

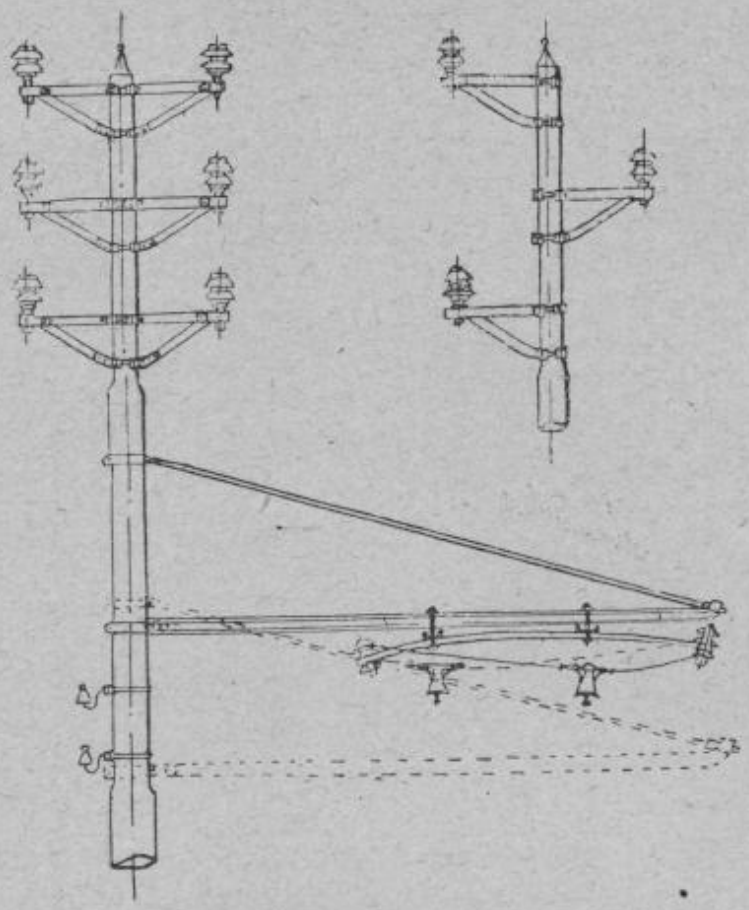


FIG. 1835. — Support de ligne bipolaire. (État italien.)

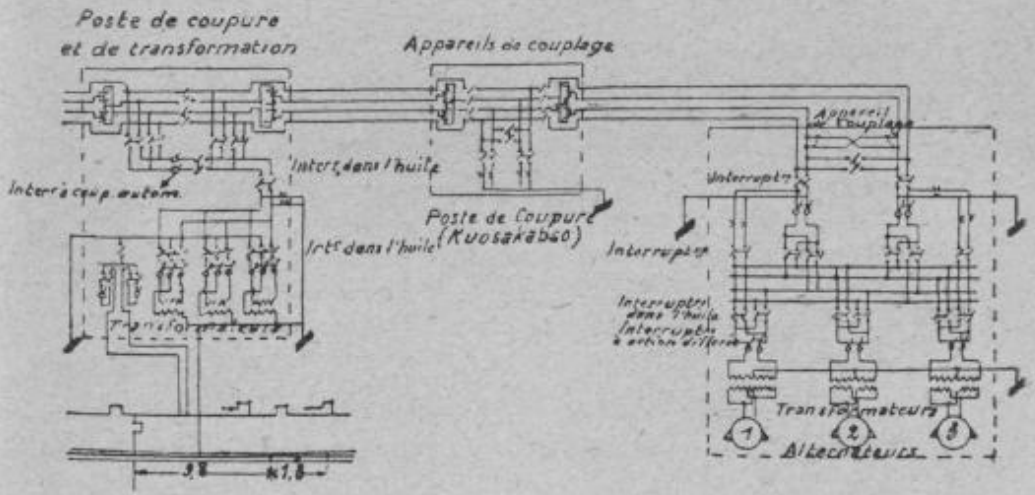


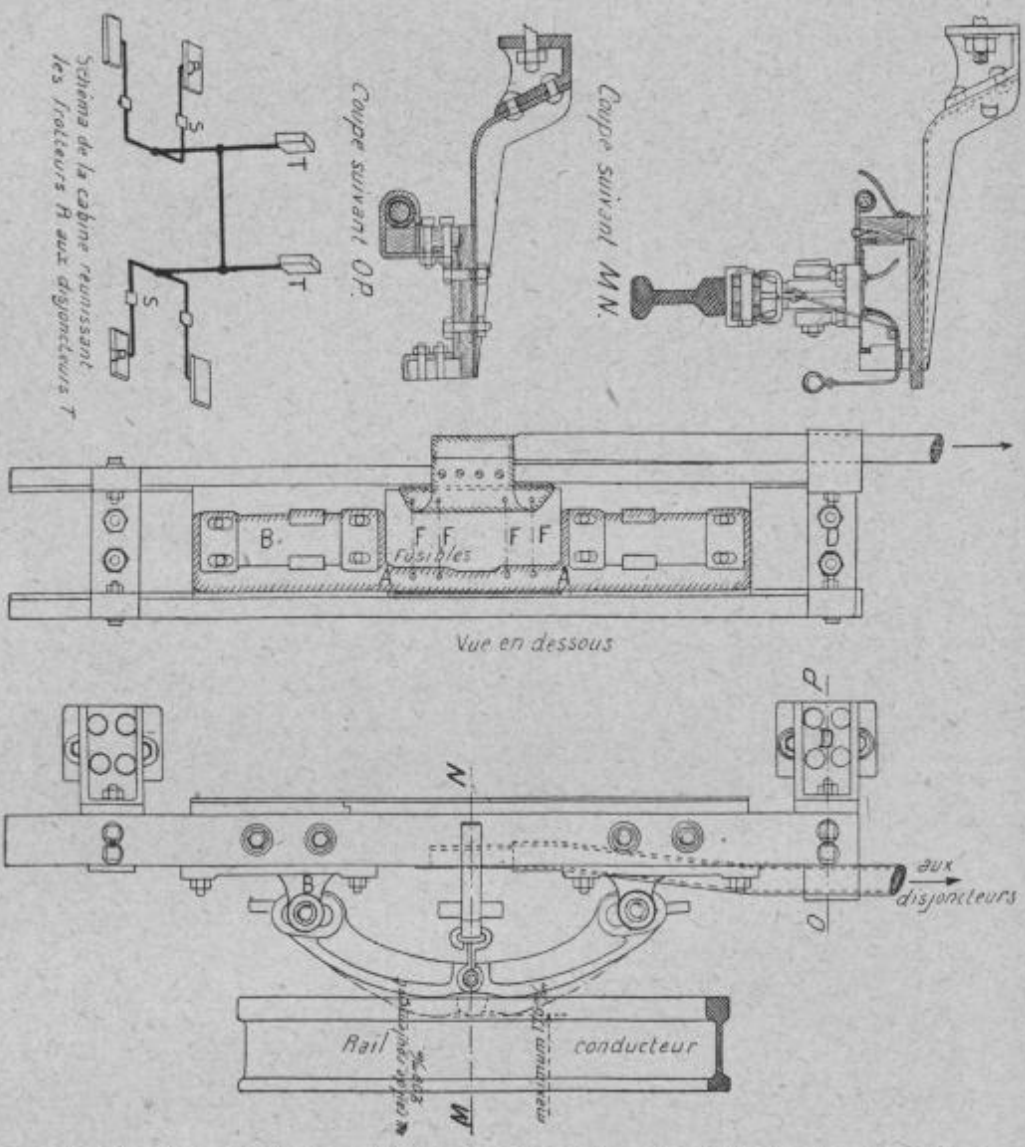
FIG. 1836. — Schéma des connexions de l'usine génératrice de Porjus et des stations de coupure de transformation.

prévu pour une charge de rupture de 100 kilogrammes par millimètre carré.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur ce dernier on interpose des isolateurs en porcelaine à deux gorges rectangulaires.

Le trolley à poulie et à perche convient pour les tensions jusqu'à 3.000 volts. Les contacts glissants à pantographe s'emploient pour les



A, pièce de cuivre réunissant électriquement les deux chapes B et la pièce C coudée à l'extrémité du câble. — FF, fusibles.

FIG. 1837. — Frotteurs de prise de courant (Ligne des Invalides à Versailles).

locomotives et pour tensions au-dessus. La suspension caténaire simple ne semble pas convenir pour des vitesses supérieures à 45 kilomètres à l'heure.

La prise de courant par antenne (Oerlikon) peut être manœuvrée soit à la main, soit automatiquement. Ce mode ne permet qu'un isolement simple et une vitesse ne dépassant pas 60 kilomètres à l'heure, en raison de la flèche relativement considérable du fil.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour la manœuvre des archets, une amélioration indiquée consiste à effectuer la commande des archets sur la voiture directrice avec la main ou au moyen de l'air comprimé et en actionnant les archets des autres voitures à l'aide du courant pris derrière l'archet de la voiture directrice. On peut manœuvrer les coupleurs principaux de la même manière, c'est-à-dire que la commande du coupleur principal de la voiture directrice se fait à la main ou à l'aide de l'air comprimé et que les coupleurs des autres voitures sont gouvernés au moyen du courant électrique prélevé derrière le coupleur de la voiture directrice.

Pour éviter les ruptures aux angles aigus déterminés aux points de suspension par suite des dilatations en périodes de chaleur, on a employé des dispositifs qui permettent soit de retendre automatiquement le fil porteur, soit de retendre automatiquement le fil de contact et de supprimer les ondulations dans ce dernier.

Ces installations exigent trois fils, le câble porteur principal en acier, les pendules verticaux et un câble porteur auxiliaire, le fil de contact étant suspendu à ce dernier au moyen de cavaliers qui peuvent glisser sur lui dans le sens de la longueur et le fil est tendu à l'aide de contrepoids. Le câble porteur principal est interrompu à chaque poteau et relié à un système d'isolateurs à double isolement.

La compensation automatique appliquée de cette façon n'a qu'une valeur relative si la ligne présente des courbes nombreuses et brusques à cause des frottements importants dans l'ensemble; en outre, ce système n'offre pas une sécurité entière contre la rupture.

L'A. E. G. a, la première, fait application d'isolateurs à maillons dans l'établissement des lignes de traction. Pour éviter à ce que les fils verticaux de suspension s'opposent au déplacement relatif des points d'attache du fil porteur et du fil de contact, l'un par rapport à l'autre, cette firme fixe les deux extrémités d'un des pendules porteurs verticaux au câble porteur principal et l'on suspend librement à cette sorte de boucle la suspension du fil de contact. Les déplacements relatifs de ce dernier et du fil porteur sont alors possibles dans tous les cas sans inconvénient, les points du fil de contact se déplaçant sur un arc d'ellipse par rapport aux deux points de suspension sur le fil porteur.

Les avantages du troisième rail (exclusivement employé pour les moteurs à courant continu) sont indéniables; cependant, pour des tensions au-dessus de 1.000 volts, l'isolation devient difficultueuse et l'entretien des protections en bois coûteux. En outre il y a à considérer le danger de contact pour le personnel et les interruptions en cas de fortes chutes de neige et les formations de verglas, surtout pour les prises de courant en dessus.

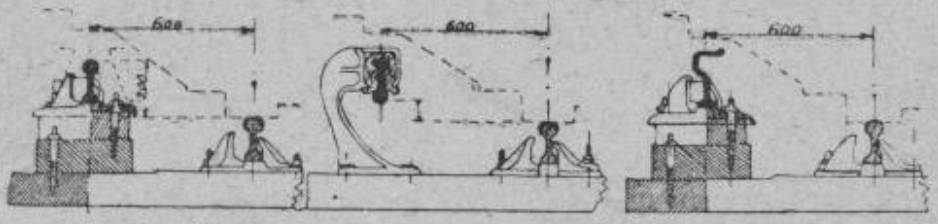
On sait que dans le système à contact supérieur le 3e rail est disposé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soit dans l'axe de la voie, soit le plus généralement à l'extérieur. La première disposition est dangereuse en raison des courts-circuits possibles et de la difficulté des aiguillages.

Le système à contact inférieur ou à rail renversé permet de conserver convenablement l'isolement jusqu'aux tensions de 1.200 volts, mais il est plus coûteux et exige un encombrement plus grand.

On sait que le circuit électrique de retour est destiné à ramener au pôle négatif de l'usine la plus grande partie du courant utilisé par les moteurs. Il est généralement constitué par les rails de roulement pourvus de connexions électriques à l'effet de réduire la résistance des joints. Les connecteurs en cuivre utilisés se font de différentes façons. Mais, en dernier lieu, on a eu souvent recours à l'emploi des rails soudés (procédé Falk) qui donnent d'excellents résultats. Le procédé à l'aluminothermie, qui con-



Type Invalides. Type New-York Central. Type de la banlieue R. D.

FIG. 1838. — Rail conducteur de courant.

siste à couler dans un moule un mélange de sesquioxyde de fer et d'aluminium chauffé à 3.000° est supérieur au procédé Falk. Les méthodes par la soudure électrique sont aussi excellentes mais naturellement plus coûteuses.

Au point de vue de la diminution de la chute de tension dans les voies de retour par rails, la plupart des installations actuelles un peu importantes comprennent un certain nombre de feeders de retour pourvus chacun d'un sous-volteur.

En ce qui concerne l'éclairage et le chauffage des véhicules, l'avantage est en faveur du courant continu à cause de la facilité de la transformation en basse tension.

631. Coûts de premier établissement des systèmes de traction. — *a) Lignes de contact.* — Simple voie monophasée, 15.000 volts : 13.700 francs, en alignements, et 15.000 francs en courbes, le kilomètre. Double voie monophasée : 25.000 et 27.000 francs. Simple voie triphasée, 5.000 volts : 21.000 et 26.000 francs ; double voie triphasée : 38.000 et 48.000 francs. Ces prix s'entendent pour une section du fil de contact de 100 millimètres carrés avec poteaux en fer placés à une distance moyenne de 50 mètres et suspension caténaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Coût d'installation par kilomètre de lignes de contact (section du fil de contact = 100 mm².)

DISPOSITION DE LA LIGNE TYPE DU SUPPORT	COURANT				DIFFÉRENCE EN FAVEUR DU TRIPHASÉ	
	sans cuivre	avec cuivre	sans cuivre	avec cuivre	sans cuivre	avec cuivre
	francs	francs	francs	francs	0/0	0/0
a) *Grandes lignes :*						
1° Simple voie, consoles; en alignement	9.200	13.700	13.200	21.500	44	57
2° Simple voie, consoles; en courbe de 300 mètres	10.500	15.050	17.900	26.400	70	76
3° Simple voie, jougs; en alignement	14.100	»	17.350	»	24	»
4° Simple voie, jougs; en courbe de 300 mètres	15.700	»	26.280	»	67	»
5° Double voie, jougs; en alignement	18.000	25.400	24.900	38.300	38	51
6° Double voie, jougs; en courbe de 300 mètres	20.200	27.600	34.500	48.100	71	74
b) *Lignes secondaires :*						
1° Simple voie, consoles; en alignement	7.440	10.800	»	»	»	»
2° Double voie, consoles; en alignement	9.690	13.100	»	»	»	»
c) *Installations de gare :*						
1° Grandes voies avec 10 0/0 de voie de transit	11.300	13.650	14.700	18.550	30	36
2° Petites gares avec 30 0/0 de voie de transit	15.000-16.000	18.600	19.700-20.500	25.650	30	38
d) *En tunnels :*						
1° Simple voie	5.000	10.950	7.000	16.750	40	53
2° Double voie	7.900	16.750	12.900	27.750	63	66

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b) *Lignes d'alimentation.* — 1° Lignes montées sur poteaux spéciaux Système monophasé : 2 fils, 2.570 à 2.630 francs le kilomètre ; 4 fils, 3.390 à 3.510 francs. Système triphasé : 3 fils, 1.370 à 1.430 francs ; 6 fils, 4.210 à 4.390 francs.

Lignes établies sur les poteaux de la ligne de contact. Système monophasé : 2 fils, 1.370 à 1.430 francs ; 4 fils, 2.215 à 2.335 francs. Système triphasé : 3 fils, 1.9051 à 945 francs ; 6 fils, 3.060 à 3.240 francs.

c) *Matériel roulant.* — Courant monophasé : puissance supérieure à 1.000 HP ; 125 francs par cheval de locomotive ; puissance inférieure à 1.000 HP, 190 francs. Courant triphasé : dans les mêmes conditions, 125 et 150 francs. Courant continu : 125 francs. Avec des automotrices : courant monophasé, 30 francs et 105 francs ; courant triphasé, 35 et 122 francs ; courant continu, 28 et 98 francs.

d) *Sous-stations.* — On se trouve en présence de deux types d'usines : celles destinées à la transformation de la haute tension en basse tension d'une même forme de courant et celles qui ont pour objet la transformation de la nature du courant. Dans les deux cas, on peut avoir à opérer une transformation de la périodicité.

Le prix d'une sous-station de transformation de tension et de périodicité et batterie-tampon, pour une puissance de 2.000 kilowatts, est pour du courant triphasé 45.000/15.000 volts, de 2.150.000 francs et pour courant monophasé, dans les mêmes conditions, 1.800.000 francs.

Pour des puissances de 3.000, 5.000, 7.500 kilowatts dans les mêmes conditions, les prix ci-dessus doivent être multipliés respectivement par 1,5, 2,4 et 3,5.

Quant aux sous-stations sans batterie-tampon et transformation seule de la tension, on peut compter, pour une puissance de 2.000 kilowatts : courant triphasé 25.000/5.000 volts, 190.000 francs ; courant monophasé 45.000/15.000 volts, 180.000 francs. Comme ci-avant on multipliera par 1,25, 1,70 et 2,3.

Il convient de noter que, dans les installations à courant alternatif, la distribution d'énergie et surtout les dimensions des installations sont influencées par le décalage qui exige des conducteurs d'une section plus forte et par suite plus coûteux. Le facteur de puissance de l'installation atteindra une valeur moyenne donnée par l'ensemble des lignes, des locomotives en fonctionnement, etc. Le facteur de puissance total est en moyenne de 0,8 à 1 pour courant continu, 0,6 à 0,7 pour courant triphasé et 0,5 à 0,7 pour courant monophasé.

On pourra se rendre compte des frais d'installation par les détails que nous donnons sur la ligne à 66.000 volts de 69 kilomètres de longueur, de Twiner-Falls à Springfield (Amérique).

Les pylônes sont en acier pesant chacun 1.800 kilogrammes, reposant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

directement sur le bon sol par des traverses de 2m,10 de longueur, et dans les endroits marécageux sur des blocs de béton de 60 centimètres de côté et 2m,40 de hauteur. La portée normale est de 146 mètres et la ligne comprend six fils de 8 millimètres carrés. La hauteur de chaque pylône est de 9m,30 et son empattement de 5m,20, dans chaque sens. Le conducteur est fixé à des isolateurs suspendus à quatre éléments.

Préparation de l'emplacement	69.490 fr.
Frais généraux	45.755
Transport de matériaux	30.360
Fouiles pour pylônes normaux	74.505
Pose des pylônes normaux	52.115
Pylônes en acier	367.630
Montage des pylônes	114.305
Isolateurs montés	102.680
Conducteurs	636.610
Petit matériel	32.785
Modifications	34.015
Total	1.559.410 fr.

Soit environ 22.600 francs par kilomètre de ligne normale ou 3.360 francs par support. A ces chiffres il faut ajouter :

Traversées de rivières	176.090 fr.
Pylônes spéciaux des postes	13.135 fr.
Fondations spéciales de pylônes	65.285 fr.

Les tableaux ci-après renseignent sur toutes les circonstances de fonctionnement de la traction par courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU I. — Sous-stations

COURANT CONTINU	A		B		C		D	
	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.
Nombre de sous-stations	6	14	4	9	3	6	3	5
Puissance nécessaire en kw	1.440	1.320	448	416	370	300	250	200
Nombre d'unités	2	2	2	2	2	2	2	2
Coût de chaque sous-station, en fr	300.300	280.000	132.000	120.000	100.000	92.009	87.000	78.000

TABLEAU II. — Puissance consommée

COURANT CONTINU	A		B		C		D	
	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.
Énergie en kilowatts-heures par jour aux voitures	33.500	32.400	8.640	8.400	5.670	5.470	3.240	3.060
Facteur de charge moyen	0,31	0,13	0,44	0,19	0,58	0,28	0,45	0,25
Rendements :								
Sous-station	0,836	0,69	0,87	0,76	0,89	0,82	0,87	0,80
Distribution secondaire	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Transmission	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Transformateurs statiques	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Rendement total	0,722	0,595	0,745	0,632	0,761	0,705	0,748	0,688
Énergie en kilowatts-heures fournis par jour	46.500	54.500	11.600	13.300	7.450	7.750	4.330	4.440
Dépense annuelle à 1 cent par kw-h (0,0521 fr.)	980.490	1.036.790	220.904	253.206	141.712	146.922	82.318	84.402

A, Ligne à trafic intense. — B, Service interurbain très chargé. — C, Service interurbain à trafic faible. — D, Service à trafic très faible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tableau III. — Comparaison des systèmes

COURANT CONTINU	A		B		C		D	
	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.	1200 v.	600 v.
Frais de premier établissement :								
Voies	12.500.000	12.500.000	9.000.000	9.000.000	9.000.000	9.000.000	9.000.000	9.000.000
Sous-stations	1.800.000	3.920.000	530.000	1.080.000	305.000	550.000	255.000	390.000
Distribution	4.940.000	6.425.000	1.685.000	1.820.000	1.700.000	1.905.000	1.650.000	1.690.000
Équipement des voitures	4.800.000	4.200.000	862.500	750.000	680.000	595.000	500.000	450.000
Totaux	24.040.000	27.045.000	12.077.500	12.650.000	11.685.000	12.050.000	11.405.000	11.530.000
En faveur du 1200 v	3.005.000	»	572.500	»	365.000	»	125.000	»
Dépenses annuelles (y compris amortissement à 7 p. 100 des voies)	5.685.000	6.200.000	2.070.000	2.145.000	1.680.600	1.750.000	1.472.500	1.502.500
En faveur du 1200 v	515.000	»	75.000	»	70.000	»	30.000	»

A, Ligne à trafic intense. — B, Service interurbain très chargé. — C, Service interurbain à trafic faible. — D, Service à trafic très faible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

632. État actuel de l'électrification des chemins de fer. — Le couple constant du moteur électrique permet, à poids égal, de développer un effort de traction 30 à 40 0/0 plus fort avec une locomotive électrique qu'avec une locomotive à vapeur. Beaucoup de temps et de travail sont économisés dans les réparations et le nettoyage des locomotives électriques.

Le torque des locomotives électriques est plus régulier que celui des locomotives à vapeur. D'autre part la suppression de la vapeur dans les tunnels diminue la condensation de l'humidité qui réduit le coefficient de frottement sur les rails.

L'effort de traction des locomotives n'est pas influencé par la variation de tensions si fortes soient-elles (courant monophasé). De plus la marche des moteurs n'est pas influencée par des variations de la périodicité atteignant jusqu'à 20 0/0 et leur réglage est des plus économiques.

L'emploi d'un transformateur réglable permet de compenser facilement sur le côté secondaire des variations de la tension sur le côté primaire, et, en cas de retard, d'augmenter la tension des moteurs. Le freinage électrique est réalisable facilement au moyen d'une résistance *ad hoc* et la récupération peut se faire en admettant une complication un peu plus grande de l'appareillage, qui souvent, cependant, n'est pas recommandable étant donné le faible avantage de la récupération dans la plupart des cas.

La transmission du mouvement du moteur aux roues au moyen d'engrenages a donné d'excellents résultats.

La commande par bielles n'exige qu'un petit nombre de moteurs et, de ce fait, favorise la sécurité de bon fonctionnement en service; la disposition générale des appareils électriques sur le châssis facilite l'accès de chacun d'eux et, par suite de l'élévation du centre de gravité, diminue la fatigue de la voie. Les moteurs à engrenages placés très bas sont une cause de fatigue de la voie, non seulement parce que le centre de gravité de la machine est bas, mais encore parce que le poids des parties non suspendues se trouve augmenté de celui des moteurs.

Le poids total des gros moteurs, tournant lentement et transmettant leur mouvement à l'aide de bielles et de manivelles n'est pas sensiblement plus grand que celui des moteurs de même puissance établis avec transmission par engrenages.

Les plus gros alternomoteurs avec engrenages, construits jusqu'à ce jour, ont une puissance de 350 chevaux et pèsent environ $16^{kg},5$ par cheval. Avec ce coefficient il est très possible d'établir des moteurs de même puissance, tournant lentement et transmettant leur mouvement à l'aide de bielles et de manivelles.

Ajoutons que la commande par bielles de masses à mouvement alter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

natif demande à être équilibrée et que les manivelles, les tourillons, les bielles motrices et d'accouplement sont animés d'un mouvement circulaire et peuvent être équilibrés par des contrepoids convenablement calculés.

Les locomotives électriques modernes ont trois, quatre, cinq ou même six essieux, selon leur puissance. Néanmoins, depuis quelques années, on constate un retour vers les bogies porteurs extrêmes et vers les trucs Bissel et analogues. La tendance actuelle consiste à utiliser le châssis pour disposer le ou les moteurs le plus haut possible, avec commande des essieux par bielles ou arbres intermédiaires lorsque les réductions de vitesse l'exigent. Le centre de la locomotive est ainsi très surélevé. De même on constate un retour, dans les unités puissantes, à la disposition à moteurs uniques ou conjugués, attaquant par double réduction. Les locomotives articulées et formées de deux moteurs accolés et les locomotives articulées et doubles sont très prisées, surtout pour les fortes puissances.

Lorsque les moteurs sont à réduction, la suspension par le nez est presque toujours employée ; les moteurs sans réduction (50 à 60 kilomètres et au-delà) utilisent le système de suspension par un arbre creux ; l'essieu avec ses roues chaussées et calées à la presse, tourne dans un manchon formant l'arbre de l'induit. Un intermédiaire élastique est interposé entre l'induit et la roue.

Les prises de courant dites troisième rail sont employées sous la forme dite supérieure et sous la forme dite renversée. Les lignes caténaires sont utilisées pour les lignes à haute tension alternatives, en raison de leur horizontalité parfaite et de leur solidité. La prise de courant par rouleaux paraît être excellente pour les voitures à vitesse moyenne. Enfin l'archet présente certains inconvénients qui lui font préférer le pantographe articulé pour les grandes vitesses.

Le problème de la transmission aux essieux de l'effort moteur a pris une importance très grande par suite des puissances de plus en plus grandes que l'on demande aux locomotives destinées aux grandes lignes de chemins de fer.

La transmission par bielles, renouvelée des machines à vapeur, permet de répartir, à l'aide de bielles d'accouplement, la puissance sur les essieux moteurs. Des installations importantes ont été effectuées dans ce sens.

D'autre part, on a cherché à adapter le moteur à engrenages aux nouvelles exigences de la traction électrique sur les grandes lignes. On s'est efforcé, en particulier, de placer les moteurs au-dessus des essieux, de manière à conserver au centre de gravité une position assez élevée.

Certains constructeurs ont adopté une transmission mixte par engrenages et par bielles. En particulier l'emploi de deux paires d'engrenages symétriques a été un des perfectionnements les plus caractéristiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ce dernier cas, l'arbre du moteur est relativement faible et une légère torsion est admissible et l'équilibrage des forces se fait automatiquement.

Pour les grandes vitesses, on monte les pignons sur un arbre creux dont les paliers sont fixés à la carcasse du moteur et la transmission du mouvement de l'arbre creux aux essieux moteurs se fait par divers dispositifs. La transmission élastique a été une des meilleures solutions.

On semble reconnaître que l'emploi de plusieurs moteurs avec transmission par engrenages est préférable à celui d'un seul moteur avec transmission par bielles ; si le nombre de moteurs est choisi judicieusement par rapport à la puissance totale, les locomotives ne sont pas plus lourdes que les locomotives mêmes d'un seul moteur avec transmission par bielles ; il en est de même du prix de revient et de l'entretien qui tout compte fait est moins élevé pour le premier cas.

La proportion du poids adhérent au poids total est bien plus favorable avec les locomotives électriques qu'avec les locomotives à vapeur. Les locomotives du Loestchberg à courant monophasé de 15.000 volts, développant 13.000 HP et pèsent 105 tonnes. Elles développent un effort de 16.000 kilogrammes au crochet. Ces locomotives pèsent 36 kilogrammes, par cheval et sont capables de remorquer des charges de 650 tonnes à 32 kilomètres à l'heure, sur des rampes de 27 à 30 0/0.

Elles ont un poids adhérent de 83 tonnes, soit 18,5 0/0 de leur poids total.

Ces locomotives ont deux essieux porteurs, tandis que les usines américaines ont construit beaucoup de locomotives ayant toutes les essieux moteurs, telles que les locomotives de la Compagnie de New-York-New-Haven and Hartford, qui ont 7 essieux moteurs à courant monophasé dont le poids total adhérent est de 72 tonnes.

Sur cette même ligne de Loetchberg, avec son tunnel de 14,6 kilomètres, on a reconnu que l'usure des collecteurs après 55.000 kilomètres de parcours a été d'environ un millimètre en diamètre et l'usure des charbons de 5 à 6 0/0 après un service de 30.000 kilomètres. Le rendement entre la prise de courant et les rails est d'environ 80 0/0 et le facteur de puissance pour toutes les vitesses en exploitation normale est supérieur à 90 0/0.

La locomotive électrique monophasée Westinghouse, du chemin de fer du Midi, possède deux moteurs et deux transformateurs ventilés par un caniveau à air desservi par deux ventilateurs électriques.

Ces moteurs peuvent développer chacun 600 chevaux en absorbant 1.350 ampères sous 410 volts. Ils peuvent supporter jusqu'à 2.300 ampères, et développer un effort de 16.000 kilogrammes au démarrage.

Ils sont placés au centre du véhicule et leur induit porte deux pignons dentés engrenant avec une roue donnant une démultiplication de 45 : 7.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La roue est calée sur un faux essieu et celui-ci porte une manivelle réunie par une petite bielle d'accouplement horizontale qui elle-même donne le mouvement à une grande bielle sur laquelle sont fixées trois manivelles actionnant les essieux moteurs.

Les deux archets de la locomotive réunis en parallèle conduisent le courant à 12.000 volts et 16 2/3 périodes, pris sur la ligne de travail, à un disjoncteur à huile accroché au milieu en haut de la caisse. Ce courant à haute tension se rend aux transformateurs placés sur le plancher de la caisse de chaque côté des moteurs ; ils ont chacun une puissance de 600 kilowatts.

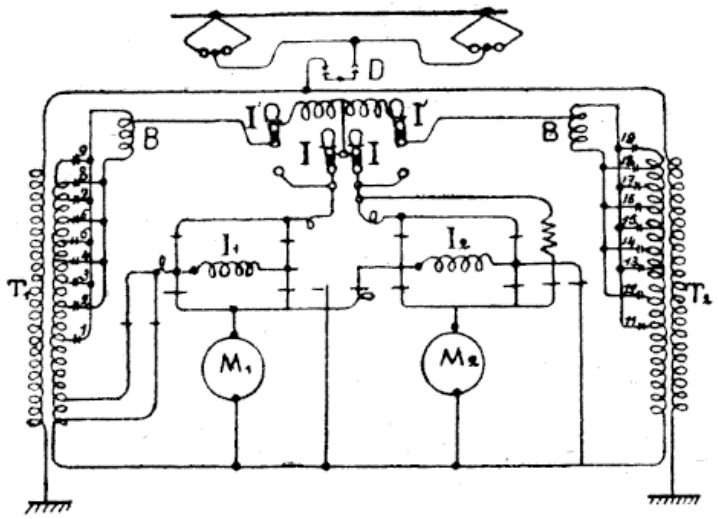


FIG. 1859. — Schéma simplifié des connexions de la locomotive Westinghouse des chemins de fer de la Compagnie du Midi.

Le démarrage et l'arrêt des moteurs s'exécutent sans intercalation de résistances principales, par augmentation ou diminution progressive de la tension appliquée à leurs bornes, les deux moteurs étant constamment couplés en parallèle. L'opération est effectuée automatiquement par une série de contracteurs électropneumatiques commandés par l'un ou l'autre des manipulateurs disposés aux extrémités de la caisse. Le courant de commande des valves pneumatiques est fourni par une prise au secondaire des transformateurs et la fermeture des contacteurs est opérée par l'air comprimé et leur ouverture par l'action de puissants ressorts. Le passage d'une touche à l'autre des transformateurs se fait au moyen de bobines préventives ou bobines doubles de self.

Les nouvelles locomotives triphasées à grande vitesse commandées par l'État italien à la Société italienne Westinghouse offrent comme caractéristiques celles ci-après.

Elles sont à trois essieux accouplés, avec bissel à l'avant et bissel à l'arrière. Les deux bissels sont réunis aux essieux extrêmes, au moyen d'un levier système Krauss-Helmhoz avec renvoi élastique du pignon Zara. Les trois essieux ont un déplacement latéral de 20 millimètres, ce qui donne une parfaite inscription dans les courbes. Le diamètre des roues principales est de $1^m,630$ et les diamètres des bissels, $0^m,950$. Les distances des essieux sont les suivantes, $2^m,400$, $1^m,800$, $1^m,800$ et $2^m,400$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les moteurs peuvent être enlevés par le haut. Ils ont quatre vitesses :

A 37	km : h.,	un effort de traction de		9	tonnes
50	—	—	—	9	—
75	—	—	—	9,5	—
100	—	—	—	6,5	—

Le poids total des locomotives est de 65 tonnes. Elles sont alimentées par du courant triphasé 16 2/3 périodes seconde, 3.000 volts, au moyen de deux fils de contact aérien.

Le contrôle comporte un rhéostat liquide de dissolution de carbonate de sodium qui a donné des résultats satisfaisants.

Une difficulté très sérieuse est celle que l'on rencontrait dans la traction électrique sur fortes rampes pour la construction des locomotives capables d'exercer de gros efforts de traction à des vitesses plutôt réduites. Ce problème de nos jours peut être considéré comme résolu. Nous avons vu plus haut que les locomotives du Loetchberg développaient un effort de 16.000 kilogrammes au crochet et pouvant remorquer 650 tonnes à 32 kilomètres à l'heure.

Pour la traction des trains de marchandises, les avantages de ces locomotives sont encore plus accusés, lesquels sont :

a) De remorquer au double de la vitesse réalisable par les locomotives à vapeur les charges maxima admises par les règlements.

b) D'avoir, si c'est nécessaire, tous les essieux couplés, de sorte que tout le poids de la locomotive électrique est disponible pour l'adhérence, tandis que le poids par essieu est sensiblement réduit ;

c) Que les wattmen peuvent conduire facilement toutes les locomotives électriques, ce qui n'est pas le cas pour les mécaniciens des locomotives à vapeur ;

d) De pouvoir parcourir environ deux fois autant de trains-kilomètres par an, en partie à cause du temps moins long passé en réparations ;

e) L'économie réalisée sur le charbon dépensé par la locomotive à vapeur pour la mise en feu, les arrêts, etc., est très importante, de sorte que si l'énergie électrique ne coûte pas plus de 5 centimes le kilowatt-heure, la dépense de courant n'est pas supérieure à celle du charbon et de l'eau.

La prise de courant par troisième rail au moyen d'un rail renversé isolé par-dessus, avec contact par en dessous, qui n'est pas gêné par les neiges et le givre, évite tout danger d'accident et de court-circuit. Pour les lignes de trolley, la tendance actuelle est d'adopter la suspension à chaînette, qui permet au fil de travail de rester presque horizontal sur toute sa longueur en le suspendant, entre les poteaux, par plusieurs chaînettes verticales, à un fil tendeur en acier, placé juste au-dessus de lui, dans la sus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pension simple, ou relié lui-même à un autre câble tendeur placé encore au-dessus de lui, dans la suspension double à chaînettes.

La traction peut être faite avec des moteurs à courant continu, triphasé ou monophasé ; chaque système a des avantages et des inconvénients ; mais il semble bien que, pour les grandes lignes, les moteurs à courant alternatif à tension élevée sont les seuls possibles. Ainsi le Gouvernement italien a inscrit dans son dernier budget un crédit de 70 millions pour l'électrification de 540 kilomètres de lignes, sur lesquelles on utilisera le matériel roulant ordinaire, qui sera remorqué par des locomotives électriques du poids de 60 tonnes qui porteront deux moteurs de 1.000 HP actionnant cinq essieux couplés. Les moteurs seront alimentés par du courant triphasé, 3.000 volts et 15 périodes provenant d'une usine centrale à 25.000 volts. On espère ainsi pouvoir tripler la capacité des lignes électrifiées.

En Suisse, le Gouvernement a nommé une commission chargée d'étudier la question d'électrification de tous les chemins de fer helvétiques et le Conseil fédéral a passé, dans le courant de l'année 1907, en vue de l'électrification des voies ferrées, deux conventions, l'une avec le canton du Tessin, l'autre avec le canton d'Uri, pour fixer les conditions auxquelles ces cantons mettraient une partie de leurs forces motrices hydrauliques au service de la Compagnie du Gothard.

La statistique fédérale des chemins de fer suisses, pour l'année 1905, accusait 792.837 kilomètres de lignes exploitées (chemins de fer et tramways) représentant un capital de 118 millions. Depuis d'autres lignes importantes ont été mises en exploitation, entre autres le tunnel du Simplon.

A l'instigation de M. Tissot, il a été institué une commission [1] en vue d'étudier l'introduction de la traction électrique sur les chemins de fer suisses en utilisant les forces hydrauliques disponibles.

Cette commission a été amenée, à la suite d'études préliminaires, à admettre, comme coefficients moyens de résistance au roulement, 6 kilogrammes par tonne pour les lignes à voie normale et 10 kilogrammes par tonne pour les lignes à voie étroite et à ne pas tenir compte de la récupération de l'énergie sur les pentes. Les poids des trains ont été déterminés à l'aide des tableaux statistiques des chemins de fer fédéraux pour les trois catégories de trains : internationaux, omnibus et de marchandises, tant pour les trois mois d'été que pour les mois d'hiver.

Elle a trouvé que l'énergie, journellement nécessaire à la traction de

---

[1] Les fonds nécessaires au fonctionnement de cette commission d'études sont formés par les subventions du département fédéral des chemins de fer fédéraux, des usines de construction et les cotisations ordinaires et extraordinaires des membres de l'Association suisse des Électriciens.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tous les trains suisses à vapeur et mesurée à la circonférence des roues motrices, est de 1.200.000 HP. Avec un rendement de 0,40, l'énergie à produire journellement par les turbines des usines génératrices pour l'électrification desdits trains, serait donc de 3 millions de chevaux-heures. La puissance moyenne répartie sur vingt-quatre heures ressortirait donc à 125.000 HP ; en hiver, elle serait réduite à 100.000 HP.

Pour la puissance instantanée maxima qui détermine l'équipement des usines et sert de base au calcul des lignes de transport, en combinant l'alimentation de plusieurs lignes et déplaçant légèrement les horaires, on a pu admettre le rapport 5 entre la puissance maxima et la puissance moyenne. Les usines devront donc pouvoir donner jusqu'à 5 fois la charge moyenne, et on voit par là que les usines à haute chute, qui permettent une accumulation de l'eau pendant les faibles charges, se prêtent bien à ce service.

Les ingénieurs attachés à la commission ont examiné sur place la plupart des chemins de fer du continent et des États-Unis. Ces visites ont donné lieu à autant de rapports examinés sérieusement par la commission et qui ont soulevé un grand nombre de questions intéressantes d'ordre purement technique et surtout électrique. Une comparaison d'abord technique des systèmes dira lequel ou lesquels sont admissibles pour la traction, tandis que le choix définitif ne pourra se faire qu'après avoir établi le coût de premier établissement et les frais d'exploitation afférents à ces systèmes.

Toujours d'après M. Tissot, les usines hydroélectriques doivent être installées de telle sorte que le rapport de la puissance maxima à la puissance moyenne soit 2,6, c'est-à-dire que les usines doivent pouvoir fournir un maximum instantané à 2,6 fois la puissance moyenne et c'est sur ce maximum que doit s'établir le coût des usines, des lignes de transport, etc. Comme ce coefficient de variation de charge ne devient intéressant que pour de grandes forces hydrauliques pouvant s'adapter à un diagramme de consommation tout autre que ceux des réseaux d'éclairage.

Parmi les grandes forces hydrauliques qu'on peut disposer, il faudra chercher celles pour lesquelles l'adaptation de la production d'énergie à la demande du réseau peut se faire dans les conditions techniques les meilleures et les plus économiques en choisissant celles permettant d'accumuler l'eau non utilisée pour le service afin d'arriver autant que possible à un idéal de réglage qui peut être défini comme suit : donner presque instantanément un débit d'eau proportionnel à la demande d'énergie du réseau. Si, en même temps, ces chutes ont un bassin d'accumulation assez grand pour disposer pendant toute l'année d'une puissance et d'une énergie suffisantes pour faire face à la demande on sera dans les conditions désirées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme combinaison on peut s'adresser soit à une haute chute avec bassin naturel d'accumulation ou artificiel en amont pouvant répondre à toutes les conditions de l'exploitation, soit une chute à basse pression et gros débit sans accumulation fournissant la partie constante de l'usine avec une chute à haute pression pour les pointes avec accumulation immédiate fournissant la partie variable.

En Suisse, on a utilisé pour le premier cas, les forces hydrauliques de la Julia (canton des Grisons), chute de 600 mètres et accumulation de 60 millions de mètres cubes et, pour le second cas, l'usine de Beznau, chute 3 à 6 mètres, 14.000 HP hydrauliques, reliée électriquement à l'usine du Loutsch, chute 340 mètres, réserve 50 millions de mètres cubes, puissance 48.000 HP. La marche en parallèle des deux usines n'offre aucune difficulté.

Dans cet esprit, en France, les forces hydrauliques des Alpes, qui donnent une puissance supérieure en été, pourraient être avantageusement combinées avec des forces du régime du plateau central et du Jura.

Les usines aménagées par la Compagnie des chemins de fer du Midi dans la région pyrénéenne ont été basées sur le minimum des cours d'eau utilisés avec réservoirs pour accumulation journalière et grandes chambres d'eau formant volant pour parer aux irrégularités momentanées, démarrage des trains, simultanéité d'ascension de courtes rampes par plusieurs trains, etc.

De telles usines sont donc de construction coûteuse dont le prix de revient ne peut être mis en comparaison avec celui des usines ordinaires.

En Suisse, après examen, on a reconnu qu'il convenait que les Compagnies de chemin de fer exploitent elles-mêmes les usines hydroélectriques, et en France on a adopté ce système. En Allemagne, l'État assure lui-même la marche des usines. En Autriche et en Italie, ce sont l'État et des entreprises privées qui se chargent de l'exploitation.

On estime que par l'État la sécurité sera plutôt assurée et le prix de revient plus réduit. On admet que le personnel des usines doit être soumis à la même discipline que celui des Compagnies de chemins de fer et en cas de guerre, le personnel restant mobilisé aux usines. En tous cas, États et Compagnies privées ont reconnu la nécessité d'avoir leurs propres usines.

Concernant les dépenses d'exploitation, la commission suisse d'études, signalée plus haut, a établi la répartition suivante :

Frais de personnel 12 0/0 ; matières de consommation, entretien et réparations courantes 12 0/0 ; droits d'eau, assurances et divers 16 0/0 ; intérêt du capital 50 0/0 ; versements au fonds de renouvellement 10 0/0.

En Suède, l'électrification des chemins de fer a fait aussi un grand pas, car l'État vient d'acquérir un grand nombre de chutes d'eau, pour les-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quelles la dépense est inscrite au budget pour une somme de 5 millions de couronnes (1).

Les chemins de fer d'État italiens ont décidé d'employer des locomotives à courant triphasé sous 3.000 volts (sans transformateurs sur la locomotive) développant 3.000 HP, pesant 80 tonnes et pouvant marcher à 75 kilomètres et même 100 kilomètres à l'heure.

L'État prussien a fait étudier un projet d'ensemble pour l'électrification de ses chemins de fer, et un essai a été décidé sur la ligne allant d'Essen à Dusseldorf, dont le trafic est très important.

En Amérique, l'électrification des chemins de fer a fait de très grands progrès. La General Electric Company a construit des locomotives qui pèsent 90 tonnes pouvant développer un effort de traction de 13.500 kilogrammes, lesquelles ont remplacé des locomotives à vapeur de 145 tonnes.

En France, la Compagnie des chemins de fer du Midi a adopté la traction électrique pour trois lignes d'intérêt général représentant une longueur d'environ 120 kilomètres. En vue de cette exploitation, elle a créé diverses usines hydroélectriques spécialement destinées à fournir l'énergie nécessaire (2). Sur la ligne de Villefranche à Marquixanes fonctionne une locomotive, construite par la Compagnie Thomson-Houston, qui comporte deux moteurs du type monophasé à collecteur à une seule ligne de balais par pôle, pouvant fonctionner en moteur-série compensé et en moteur-série répulsion. La puissance de chaque moteur en régime continu est de 600 HP. La locomotive est alimentée par du courant monophasé à 16,6 périodes et 11.000 volts. Cette tension est abaissée sur la locomotive par un transformateur d'une capacité de 1.200 kilowatts au régime d'une heure. L'A. E. G. a fourni un type de locomotive monophasée à 10.000 volts, munie de deux moteurs Winter-Eichberg pouvant donner, pendant une heure, une puissance de 1.600 HP.

La ligne de Villefranche-de-Conflans, d'une longueur de 57 kilomètres, est alimentée par l'énergie électrique provenant d'une usine hydro-électrique établie à la Cassagne. Deux lignes triphasées à 20.000 volts et 25 périodes distribuent le courant à cinq sous-stations réparties le long des voies de fer. Dans chacune d'elles deux groupes composés d'un transformateur-réducteur et d'une commutatrice de 550 à 600 kilowatts normaux, pouvant en supporter le double pour un à-coup de deux minutes, transforment finalement le courant triphasé en courant continu à la tension d'utilisation de 800-850 volts.

---

(1) D'après M. Dalhander, ingénieur électricien en chef de l'État suédois, l'électrification de 2.400 kilomètres, lesquels exigeraient une dépense de 104 millions, non compris le prix des locomotives, donnerait en 1920 une économie annuelle de 5 millions sur la traction à vapeur.

(2) Usines d'Eget, de Soulom, de Porte, de Fontpedrouse dont l'ensemble dépasse 50.000 chevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dépenses d'exploitation (en 0/0). — Chemins de fer électriques (Société Westinghouse)

LIGNES	ENTRETIEN des voies, ouvrages d'art et stations	ENTRETIEN des usines génératrices et du matériel roulant	DÉPENSE de production d'énergie	SALAIRE du personnel des lignes et des stations	FRAIS GÉNÉRAUX	TOTAL des frais d'exploitation en p. c. des recettes	ENTRETIEN de l'équipement électrique des voies	ENTRETIEN de la ligne électrique
A	7.09	9.46	7.690	56.990	18.770	53.13	3.370	2.839
B	»	»	15.247	»	»	69.07	3.427	1.920
C	»	»	18.884	»	»	63.74	4.819	1.803
D	2.363	12.400	17.030	48.450	19.740	75.06	5.730	1.239
E	6.480	8.500	15.160	51.700	18.160	60.12	3.100	1.495
F	6.984	10.154	23.914	39.990	18.962	67.36	4.173	1.337
G	13.030	13.258	15.364	43.874	14.474	68.55	5.130	3.057
H	7.871	10.159	8.805	53.613	19.802	71.94	4.950	1.829
I	11.164	9.162	19.163	40.975	19.536	86.39	3.446	2.564
J	10.117	12.433	19.301	42.071	16.078	73.79	4.887	2.715
K	6.408	14.176	14.123	50.736	14.552	55.35	5.667	2.012
L	6.967	8.393	15.966	52.299	16.375	61.03	3.116	1.584
M	10.207	12.996	18.732	47.278	10.787	76.99	3.585	2.374
N	10.146	12.665	19.218	47.457	10.514	78.00	4.593	2.168
O	10.127	14.117	13.284	47.587	14.885	68.70	4.528	2.311
P	5.674	13.447	18.251	43.380	14.284	58.90	5.473	2.451
Q	5.895	11.245	18.783	42.523	21.554	65.07	2.745	2.280
R	7.500	14.651	12.310	32.906	32.633	55.20	»	»
S	5.720	11.418	22.632	40.705	19.525	62.13	3.521	2.201
T	4.382	14.416	15.441	45.845	19.916	59.86	4.950	1.576
U	4.869	12.967	»	»	»	59.80	»	»
V	6.146	8.067	34.336	43.326	8.125	55.80	»	»
Moyenne	7.457	11.704	17.314	45.879	17.298	65.72	4.332	2.093

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dépenses d'exploitation (en 0/0). — Chemins de fer à vapeur (Société Westinghouse)

LIGNES	ENTRETIEN des voies, ouvrages d'art et stations	ENTRETIEN des ateliers et du matériel roulant	DÉPENSES de service (y compris combustible)	FRAIS généraux	TOTAL des dépenses d'exploitation en p. c. des recettes	RÉPARATIONS et renouvellement des locomotives	RÉPARATIONS et renouvellement des voitures	COMBUSTIBLE
1	19.636	20.350	56.735	3.259	73.84	6.821	3.121	9.529
2	17.870	11.980	67.470	2 680	78.96	4.310	2.637	16.690
3	15.133	13.109	68.431	3.327	76.43	4.750	3.292	19.358
4	12.876	19.438	64.259	3.427	436	9.804	2.698	10.898
5	29.532	17.775	50.883	1.810	77.006	8.354	1.764	9.353
6	21.627	24.713	50.405	3.253	73.38	10.773	2.020	11.820
7	15.369	12.377	68.738	3.516	78.83	5.228	3.809	13.729
8	21.000	18.868	56.366	3.566	73.78	6.476	2.186	12.595
9	25.611	20.375	50.783	3.231	58.21	5.897	2.476	11.467
10	28.224	23.685	46.065	2.020	101.27	8.389	1.881	9.948
11	19.722	15.886	62.553	1.839	80.46	7.450	754	13.180
12	15.680	14.220	64.743	5.357	65.66	9.065	4.326	10.287
13	12.704	23.573	60.075	3.648	59.33	9.861	1.161	7.608
14	29.850	11.790	50.720	7.640	65.67	3.747	1.666	10.986
15	19.230	16.980	55.940	7.850	85.05	8.267	2.317	9.395
16	24.200	15.390	54.100	6.310	84.22	6.215	1.277	10.251
17	19.710	13.850	58.180	8.260	74.93	5.864	2.112	10.630
18	21.730	18.120	53.600	6.550	77.47	7.434	1.839	8.118
Moyenne	20.539	17.355	57.791	4.308	75.50	7.094	2.991	11.457

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les automotrices sont alimentées en courant continu par un rail de contact placé sur le côté de la voie, à 572 millimètres de l'axe du rail de roulement.

Le matériel roulant comprend actuellement dix automotrices à voyageurs et dix fourgons automoteurs à marchandises. Les boggies sont à deux essieux moteurs portant chacun un moteur série à 4 pôles fournissant normalement 63 HP à 565 tours. Les quatre moteurs d'une même voiture sont commandés par le système à unités multiples S. Prague-Thomson-Houston. Chaque boggie possède deux patins de prise de courant, un de chaque côté, de manière à pouvoir prendre le courant des deux côtés.

Les autres lignes exploitées par la Compagnie des chemins de fer du Midi sont les suivantes : ligne transpyrénéenne d'Ax-les-Thermes à Puycerda ; de Saint-Girons à Salau ; de Bedous à Aranones ; de Lammezan à Auch ; d'Arreau à Saint-Larry ; de Pau à Hagetmau ; de Montréjeau à Pau (soit plus de 600 kilomètres de lignes). La Compagnie a en outre envisagé les prolongements suivants : de Toulouse à Montréjeau, de Pau à Pujoo, à Bayonne, et Toulouse à Ax-les-Thermes. Toutes ces lignes seront équipées en monophasé 16 périodes, 12.000 volts et moteurs à collecteur type série.

Une intéressante application de l'électrification des chemins de fer est celle adoptée par la Compagnie Paris-Orléans et par la Compagnie de l'État pour la mise en marche électrique des express à leur entrée en gare, évitant ainsi d'enfumer les quartiers populeux.

Nous avons signalé dans ses grandes lignes l'électrification du chemin de fer à grand écartement New-York, New-Haven et Hartford, qui marque une date importante dans l'application de la traction électrique aux grandes lignes de chemins de fer.

Nous ajouterons qu'en Bavière on projette d'électrifier les lignes de Salzbourg-Berchtesgaden et Garmisch, à l'aide d'usines hydroélectriques établies sur le Saalach, le Lech (21.000 HP) et le Walchensee (50.000 HP).

Quand cette dernière usine hydroélectrique sera achevée, la traction électrique se fera de Munich à Insbruck et plus tard, sans doute, de là par l'Arlberg, en Suisse. Pour le tunnel de l'Arlberg, 50 locomotives de 3.000 HP pesant 60 tonnes sont commandées, et l'on compte de ce chef sur une augmentation de capacité en trains de 50 0/0 et en vitesse de 25 0/0 ; il pourra ainsi y avoir 40 trains par jour, dont les deux tiers pour marchandises.

Enfin le Gouvernement autrichien a fait l'étude des disponibilités de ses forces hydrauliques pour l'électrification des lignes du Tyrol.

Les tableaux ci-avant permettent de se rendre compte des dépenses d'installation dans le cas de chemins de fer à vapeur et de chemins de fer électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tableau suivant renseigne sur le poids et le prix moyen par cheval de locomotives et automotrices pour les trois systèmes de courant (E. Tissot).

	POIDS PAR CHEVAL	PRIX PAR CHEVAL
A. *Locomotives*		
a) Courant monophasé :	kilos	francs
Puissance supérieure à 1.000 chevaux { 15 ∼	50	125
Puissance supérieure à 1.000 chevaux { 25 ∼	60	150
Puissance inférieure à 1.000 chevaux { 15 ∼	60	150
Puissance inférieure à 1.000 chevaux { 25 ∼	75	187,50
b) Courant triphasé :		
Puissance supérieure à 1.000 chevaux { 15 ∼	50	125
Puissance supérieure à 1.000 chevaux { 50 ∼	45	112,50
Puissance inférieure à 1.000 chevaux { 15 ∼	60	150
Puissance inférieure à 1.000 chevaux { 50 ∼	55	137,50
c) Courant continu :		
Puissance supérieure à 1.000 chevaux	50	125
Puissance inférieure à 1.000 chevaux	55	137,50
B. *Automotrices*		
a) Courant monophasé { 15 ∼	30	105
a) Courant monophasé { 25 ∼	35	122,50
b) Courant triphasé { 15 ∼	35	122,50
b) Courant triphasé { 25 ∼	30	105
c) Courant continu	28	98

II. — INSTALLATIONS TYPES DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE TRACTION

633. Lignes à courant triphasé. — *Chemin de fer de la Valleline (Italie).* La longueur totale de ce chemin de fer est de 100 kilomètres. L'écartement de la voie est de $1^{m},510$, les rampes de 20 millimètres par mètre et le rayon minimum des courbes, de 300 mètres. L'énergie, fournie par l'usine hydroélectrique de Morbegno, sous forme de courant triphasé à 20.000 volts, 15 périodes, est transportée par lignes aériennes à sept sous-stations se trouvant le long de la ligne ; la tension est abaissée à 3.000 volts et sert à l'alimentation, par lignes aériennes, des moteurs de traction.

La (*fig.* 1840) donne la disposition schématique d'une sous-station.

Les deux conducteurs aériens, distants de 870 millimètres, sont en cuivre de 6 millimètres de diamètre, supportés par des poteaux en bois placés de part et d'autre de la voie, et reliés par des fils transversaux de $4^{mm},5$ munis d'isolateurs en ambroïne. Une des files de poteaux porte la ligne à haute tension.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La distance d'axe en axe des bogies des automotrices est de 11m,50 et à chaque extrémité se trouve une cabine de manœuvre pour les conducteurs. Le châssis, en outre des organes d'attelage et de choc, porte les résistances, le transformateur pour l'éclairage, le compresseur électrique des freins, la batterie d'accumulateurs servant également à l'éclairage, les réservoirs à air comprimé du frein Westinghouse, les tuyauteries de ce dernier et enfin les tubes en laiton contenant les câbles isolés du courant à haute tension.

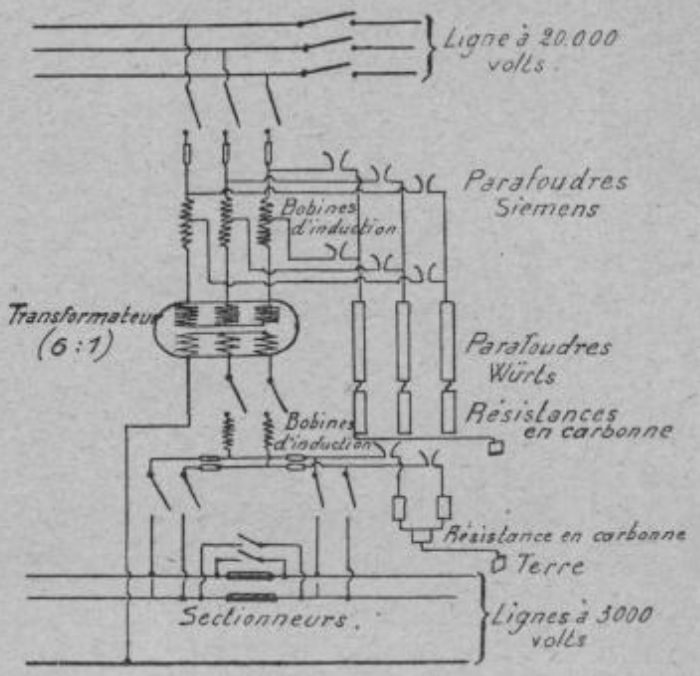


FIG. 1840.

Le matériel roulant se compose de voitures automotrices et de locomotives. Les voitures et wagons sont du type ordinaire des chemins de fer italiens. Les trains de voyageurs sont de 250 tonnes remorqués à la vitesse de 60-70 kilomètres à l'heure, et les trains de marchandises de 450 tonnes roulent à 30 et 35 kilomètres.

L'équipement électrique de chaque automotrice comporte quatre moteurs directement calés sur les essieux. A la vitesse normale de 60 kilomètres à l'heure, deux moteurs seulement sont intercalés dans le circuit à la tension de 3.000 volts. Les deux autres moteurs, dits à basse tension, ne sont intercalés que dans les rampes dépassant 10 millimètres par mètre, et ils sont alors couplés en cascade avec les moteurs à haute tension et le train marche à la vitesse de 30 kilomètres à l'heure.

Les trolleys sont formés chacun par deux rouleaux en cuivre placés sur le même axe mais isolés. En cas de rupture des fils de ligne, ces trolleys s'abaissent automatiquement par un jeu de soupapes appliqué au cylindre à air comprimé.

Un transformateur sert à alimenter le moteur du compresseur d'air, l'éclairage, le chauffage, le ventilateur ainsi qu'un frein automatique spécial. L'interrupteur qui commande le circuit primaire fonctionne sous l'action d'un relais pour la commande automatique, ou à la main par une manivelle. Il sert en même temps d'inverseur pour la marche avant ou arrière.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chaque bogie porte sur un essieu un moteur à haute tension et sur l'autre essieu un moteur à basse tension, de 75 HP. La puissance des quatre moteurs groupés en cascade est de 300 HP. Le rotor des moteurs à haute tension est pourvu de trois bagues de prises de courant qui sont en communication avec les controllers par l'intermédiaire de câbles isolés. Les courants triphasés à basse tension, provenant des rotors des moteurs à haute tension, aboutissent, après passage aux controllers, aux stators de chacun des moteurs à basse tension. Les courants provenant du rotor des moteurs à basse tension sont renvoyés dans un rhéostat à liquide. Chaque cabine contient un controller permettant deux vitesses ; un dispositif à air comprimé permet, lors des démarrages, d'intercaler dans le circuit du rotor des résistances, et les trolleys sont soulevés par des pistons à air comprimé.

Un frein automatique électro-pneumatique est disposé de telle façon qu'il puisse fonctionner toutes les fois qu'il y a interruption de circuit sur la ligne ; il sert également à doubler les signaux en freinant automatiquement la voiture, dans le cas où elle viendrait à les dépasser.

Les dernières locomotives mises en fonctionnement sont à trois essieux couplés et deux essieux porteurs avec un poids total de 62 tonnes. Chaque locomotive porte deux moteurs à 3.000 volts, dont l'un à 8 pôles (vitesse normale 64 kilomètres) et l'autre à 12 pôles (vitesse normale 42 kilomètres). En groupant les deux moteurs en cascade, on obtient une vitesse de 25 kilomètres. Le moteur à 8 pôles développe 1.500 HP et celui à 12 pôles une puissance un peu moindre ; il y a un seul rhéostat à liquide pour chaque locomotive.

L'air, comprimé à 6 kilogrammes par un moteur-compresseur, sert à toutes les manœuvres de la commande électrique, ainsi qu'à celle des freins, au soulèvement des prises de courant, aux appareils de manœuvre des interrupteurs primaires principaux, aux controllers et aux disjoncteurs automatiques principaux.

La consommation maxima d'énergie affectée à l'exploitation du réseau de la Valteline est de 46 watts-heures par tonne kilométrique au tableau de distribution de l'usine centrale (compris chauffage et l'éclairage des voitures des gares et des ateliers).

La maison Ganz a introduit une nouveauté d'un grand intérêt ; c'est une sous-station volante destinée à être utilisée lorsqu'une des sous-stations fixes doit être provisoirement mise hors service pour réparations ou autres travaux, ou bien en cas de trafic intense, pour servir d'auxiliaire à une des sous-stations fixes, ou même en un point quelconque de la ligne où, par suite d'un trafic intense, se manifeste une chute de tension.

Cette sous-station volante, aménagée à l'aide de transformateurs sta-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiques dans un wagon fermé, entièrement en fer, peut se mettre en parallèle avec les sous-stations fixes, sans qu'il soit besoin de dispositifs spéciaux et les deux sous-stations, la fixe et la mobile, se partagent alors la demande d'énergie dans le rapport 430 à 300.

Ligne du Simplon. — Le courant alimentant les locomotives électriques desservant le tunnel est fourni par les centrales de Brigue et d'Iselle sous forme de courant triphasé à la tension de 3.300 volts, 15 périodes.

L'usine hydroélectrique de Brigue utilise une chute de 44m,60 et la centrale d'Iselle une chute de 140 mètres. Les turbines de cette dernière sont du type double, à axe horizontal, de la maison Picard et Pictet (750 HP, 960 tours).

Les locomotives Brown et Boveri de la première fourniture sont à bogies, avec cinq essieux, dont trois moteurs et deux porteurs. Les moteurs, du type asynchrone, ont une puissance normale individuelle de 450 HP et 1.150 HP maxima. La distance entre bogies est de 7 mètres et le diamètre des roues porteuses, 0m,850. Le poids adhérent est de 42 tonnes et le poids total de 62 tonnes. Les vitesses normales sont de 34 et 68 kilomètres à l'heure ; à cette dernière vitesse l'effort de traction normal s'élève à 3.500 kilogrammes et atteint 9.000 kilogrammes en tant qu'effort maximum. Pour 34 kilomètres à l'heure, ces chiffres sont respectivement 6.000 et 14.000 kilogrammes.

Les moteurs sont caractérisés par l'obtention des deux vitesses signalées ci-avant, par la commutation du champ tournant, c'est-à-dire par changement du nombre de pôles. Le rotor est enroulé à six phases, consistant en deux groupes de trois chacune, connectées en triangle lors de la vitesse à 34 kilomètres à l'heure et en étoile pour la vitesse à 68 kilomètres.

Les deux phases aériennes sont récoltées par des archets et arrivent à un interrupteur de secours logé dans le toit de la locomotive, après avoir traversé les parafoudres et un interrupteur de ligne. De là elles vont à des coupe-circuits fusibles et arrivent à un inverseur, pour la marche arrière et avant, et enfin au commutateur de pôles qui provoque la marche à grande ou à petite vitesse des moteurs. La troisième phase est amenée par les rails et traverse l'inverseur et le commutateur de pôles avant d'arriver aux moteurs.

Chaque locomotive porte deux controllers dont chacun commande l'inverseur, le commutateur de pôles et les résistances de démarrage des moteurs. L'inverseur et le commutateur obéissent à une commande pneumatique.

La mise en marche des compresseurs à air est effectuée soit par un interrupteur à main, soit automatiquement au moyen d'un régulateur électromagnétique. Un transformateur spécial (3.000/110 volts) trans-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

forme l'énergie nécessaire aux compresseurs et à une partie de l'éclairage. Les appareils de mesure sont traversés par du courant à 40 volts.

Les nouvelles locomotives (1908) peuvent donner quatre vitesses de régime par modification du nombre des pôles.

Ces machines sont équipées avec des moteurs triphasés sans bagues construits spécialement pour cette application. Les essieux porteurs ont été supprimés ; le châssis est à quatre essieux moteurs. Il y a deux moteurs montés fixes sur le châssis et qui attaquent les essieux de la même façon que sur les anciennes machines.

L'enroulement statorique est connecté pour obtenir 6 et 12 pôles, correspondant à des vitesses de 70 et 35 kilomètres ; mais comme les rotors peuvent être employés, quand ils sont courts-circuités, indifféremment avec toute polarité, on a songé à bobiner le stator d'un second enroulement pouvant donner 8 et 16 pôles, correspondant à des vitesses de 52 et 26 kilomètres. On peut, en outre, à l'aide de ces deux enroulements, obtenir de très grands couples de démarrage et cela en mettant les enroulements en parallèle.

Pour opérer le démarrage, chaque moteur est relié à un transformateur statique, à l'aide duquel une tension croissante est fournie aux engins. Il y a aussi deux dispositifs de prise de courant doubles et chaque moitié de ces dispositifs correspond à une phase, la troisième phase étant en relation avec les rails par l'intermédiaire des roues.

Selon le poids du convoi remorqué et suivant l'accélération, l'intensité du courant absorbé au démarrage est de une ou une fois et demie le courant normal. Le rendement varie au démarrage, entre 60 et 85 0/0, et le facteur de puissance entre 0,5 et 0,8.

Les puissances à la jante ont été reconnues respectivement, pour les vitesses de 26, 35, 53 et 71 kilomètres à l'heure, de 16,2, 19,1, 22,1 et 25 kilogrammes par tonne de poids total de la locomotive et les efforts de traction au crochet, dans les mêmes conditions, de 11.300, 9.900, 7.300 et 6.000 kilogrammes, en palier.

Chemin de fer de la vallée de l'Adda. — Cette ligne comporte des trains de voyageurs remorqués par des voitures motrices et des trains de marchandises conduits par des locomotives (train de marchandises de 400 tonnes à la vitesse de 30 à 35 kilomètres, train de voyageurs de 250 tonnes à 60 ou 70 kilomètres à l'heure). Les voitures motrices sont à deux bogies, chacun des deux essieux d'un bogie portant directement son moteur ; chacune d'elles traîne cinq à sept voitures ordinaires de 10 à 12 tonnes à une vitesse de 65 kilomètres à l'heure.

Le moteur actionne directement la roue par l'intermédiaire d'un accouplement élastique. L'insertion d'un moteur dans le circuit, le démarrage, la régularisation de la vitesse et les mouvements de l'appareil de prise de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant se font exclusivement au moyen de l'air comprimé, à l'aide d'un compresseur actionné par un petit moteur triphasé qui fournit, en outre, l'air pour le frein Westinghouse.

La locomotive est à quatre essieux, dont chacun porte un moteur à haute tension de 150 HP normaux ; son poids propre est de 46 tonnes, et son effort de traction, mesuré à la jante des roues motrices, est de 3.000 kilogrammes à la vitesse de 30 kilomètres à l'heure. La charge maxima remorquée est de 450 tonnes sur une rampe de 10 0/0.

La ligne de contact est constituée par deux fils de 8 millimètres de diamètre amenés à 6 mètres au-dessus du sol ; la ligne primaire à haute tension, qui alimente ces conducteurs, est posée sur les mêmes poteaux au moyen d'isolateurs spéciaux.

Tout l'appareillage des voitures et les conducteurs à haute tension sont enfermés dans une enveloppe métallique continue par sa communication avec le truck de la voiture et, partant, par l'intermédiaire des roues, en relation avec les rails et la terre. L'enveloppe, qui n'entre en action que s'il y a un défaut d'isolation, joue ainsi le rôle d'un parafoudre en amenant le courant à la terre. Une rupture accidentelle du conducteur aérien, faisant tomber celui-ci sur le toit de la voiture, devient alors sans danger pour le public placé à l'intérieur, car le coupe-circuit fusible fond, et la ligne cesse d'être alimentée.

Chemin de fer électrique de Munster à la Schlucht. — Le cadre de cet ouvrage ne nous permettant pas de traiter des chemins de fer à crémaillère, qui offrent cependant un débouché intéressant pour l'utilisation des chutes d'eau, nous nous bornerons donc à signaler la construction de la ligne de Schlucht-Munster (frontière d'Alsace-Lorraine), qui offre cette particularité qu'elle est une combinaison de la voie à adhérence et de la voie à crémaillère, résolue par la Société Alioth.

Sur la partie du tracé à crémaillère, la pente moyenne est de 180 0/00 avec une pente maxima de 200 0/00 et un rayon minimum de courbe de 80 mètres.

La ligne est à voie unique et comporte quatre garages sur la longueur, qui est de $10^{km},8$. Un des garages possède un poste de convertisseurs. La différence de niveau entre les deux points terminus est de 755 mètres. La partie de la voie à adhérence est constituée par des rails Vignole du poids de 20 kilogrammes et celle à crémaillère par des rails à gorge de $12^{cm},5$ de hauteur pesant 32 kilogrammes le mètre. La voie à crémaillère est construite d'après le système Strub, qui a beaucoup d'analogie avec celui appliqué sur le Vésuve, dont il ne diffère que par la hauteur de la crémaillère qui est à 85 millimètres au-dessus de l'arête supérieure des rails, alors qu'elle n'est que de 70 millimètres au chemin de fer du Vésuve.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La ligne d'alimentation du trolley comporte deux fils de cuivre de 9 millimètres de diamètre, suspendus soit à des fils de support, soit à des traverses en fer fixées à des poteaux.

L'usine génératrice placée vers le milieu de la ligne, fournit du courant triphasé à 7.000 volts, 50 périodes, les fils de la ligne alimentant la sous-station, sont placés en partie sur des poteaux spéciaux, en partie sur ceux qui supportent le fil du trolley.

Le service est assuré par des voitures automotrices à quatre essieux avec ou sans voiture d'attelage : un train composé d'une automotrice et d'une voiture remorquée peut transporter 72 voyageurs et pèse 32 tonnes. La vitesse moyenne est de 17 kilomètres à l'heure sur la voie à adhérence et de $7^{km},5$ sur la voie à crémaillère. Les châssis du type tournant comportent une disposition permettant de rapprocher autant que possible le centre de rotation de l'essieu, à l'effet d'augmenter l'adhérence de la voiture sur la voie. Les deux châssis de chaque voiture portent chacun un moteur avec roue dentée pour engrener la crémaillère, et un moteur de traction ordinaire. Les moteurs ont une puissance individuelle de 85 HP pouvant être portée à 100 HP. Sur la voie à adhérence, les moteurs ordinaires fonctionnent seuls ; au contraire, sur le parcours à crémaillère, les quatre moteurs sont mis en service et couplés en série. Un seul coupleur est utilisé et, afin d'empêcher toute fausse manœuvre, les diverses positions de la manette pour la mise en série ou en parallèle des moteurs, pour la marche avant ou arrière, pour l'application des freins, sont dépendantes les uns des autres. La prise du courant s'effectue au moyen d'archets.

L'emplacement de la sous-station des convertisseurs a été choisi de manière à éviter tout feeder pour l'alimentation de la ligne du trolley. Le courant débité par la dynamo de chacun des groupes convertisseurs (au nombre de deux) est de 100 à 133 ampères à la tension de 1.000 à 750 volts. La sous-station possède, en outre, une batterie d'accumulateurs de 390 éléments ayant une capacité utile de 247 ampères-heures au régime de décharge en une heure.

Ligne de Berlhoud-Thoun. — La tension en ligne est de 16.000 volts, abaissée à 750 volts dans les sous-stations. La traction a lieu à l'aide de locomotives pour trains de marchandises et d'automotrices pour les trains de voyageurs. Cette ligne a utilisé un des premiers types de locomotive avec un moteur unique et transmission par bielle et manivelle.

Pour les tunnels du Giovi et du Mont-Cenis on a fait appel à des tensions relativement basses : 3.000 volts.

Les chiffres suivants, relevés de la statistique des chemins de fer suisses de 1904, montrent, pour des lignes très comparables, que les frais de traction rapportés au kilomètre sont notablement moins élevés avec l'emploi de l'électricité, pour des chemins de fer à crémaillère.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Désignation des lignes	Traction électrique : Totaux	Frais de traction : par kilomètre de parcours utile	Frais de traction : en centièmes des frais d'exploitation
Gornergrat.....	24.456f	2,07	32,77
Jungfrau.....	22.738	2,44	45,14
	Traction à vapeur :		
Pilate.....	61.303	3,95	49,23
Righi.....	104.598	3,23	49,43

Ligne des Giovi (*Italie*). — On désigne sous le nom de *ligne des Giovi* une ligne qui, partant de Gênes, traverse les Apennins sous le tunnel des Giovi de 3.258 mètres, pour se diriger au Nord sur Turin et Milan. Cette ligne à double voie, bien que doublée par une ligne parallèle également à double voie (*fig.* 1841), dite de *Ronco* parce qu'elle passe sous le tunnel de Ronco, se trouvait très chargée, en raison du grand trafic du port de Gênes, ce qui a décidé le commandeur Riccardo Bianchi, directeur général des Chemins de fer de l'État italien, à en entreprendre l'électrification pour en augmenter la capacité de circulation.

La section montagneuse de Pontedecimo à Busalla, de 10km,4 de longueur, qui monte continuellement, avec des rampes de 28 à 35 0/00 et des courbes de 400 mètres à 500 mètres de rayon, a été mise en service récemment. La section de Gênes à Pontedecimo, également d'une dizaine de kilomètres, sera achevée dans peu de temps. On a décidé, en outre, d'électrifier prochainement la ligne parallèle de Ronco qui comporte un tunnel de 8 kilomètres et ensuite la ligne de Gênes à la Spezzia, où les tunnels,

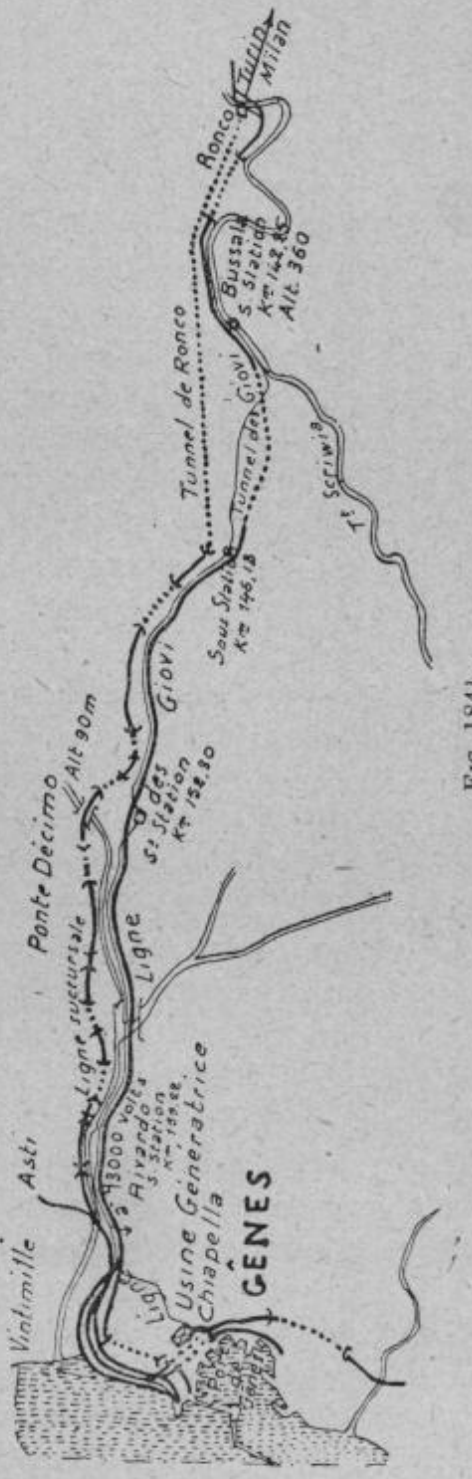


FIG. 1841.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sans être longs, sont désagréables par leur grand nombre et leur rapprochement.

Le courant triphasé à haute tension est envoyé par deux lignes indépendantes aux quatre sous-stations de Ligure, de Pontedecimo, de Montanesi et de Busalla, où la tension est réduite à la tension composée de 3.000 volts sur la ligne de travail, constituée par deux fils aériens pour chaque voie, avec les rails tous réunis ensemble comme conducteurs de retour.

La traction est faite par des locomotives électriques pesant 60 tonnes, ayant $9^m,5$ de longueur totale entre tampons, $8^m,3$ de longueur de châssis, et comportant cinq essieux moteurs à roues de $1^m,07$, actionnés au moyen de manivelles et de bielles par deux moteurs asynchrones de chacun 1.000 chevaux de puissance pouvant être couplés, soit en parallèle pour donner une vitesse de 45 km : h, soit en cascade pour donner une vitesse de 22,5 km : h ; ce dernier couplage n'est employé que pour le démarrage des trains qui peut toutefois se faire directement à la vitesse de 45 km : h. On coupe le courant quand on passe d'un couplage à l'autre. Un rhéostat liquide est intercalé au démarrage dans les rotors des moteurs. Le courant qui s'établit d'une phase au sol est un courant de capacité, il est en avance sur la force électromotrice qui lui donne naissance et produit par suite un arc instable.

Ligne de la Bernina (*Suisse*). — Cette ligne à simple adhérence sur toute sa longueur (61 kilomètres) part de Saint-Moritz à l'altitude de 1.778 mètres pour atteindre le col de l'hospice de la Bernina à 2.256 mètres d'altitude, puis redescend avec une rampe de 70 0 /00 jusqu'à la frontière suisse à l'altitude de 429 mètres.

L'énergie électrique est fournie par l'usine hydroélectrique de Campo-Cologno (Suisse), alimentée par le lac de Paschiavo. Le courant est produit à la tension de 7.000 volts, 50 périodes, triphasé, puis transformé dans une usine spéciale en courant continu à 750 volts, située à 200 mètres de l'usine de Campo-Cologno. Deux autres lignes à 23.000 volts partant de cette dernière alimentent trois sous-stations disposées le long de la ligne de traction, où le courant est transformé en courant continu à 750 volts par des groupes convertisseurs.

Les quatre sous-stations sont reliées à une ligne d'alimentation à un seul fil, montée sur poteaux suivant la voie et reliée au fil de travail aérien également tous les kilomètres. Ce fil de travail est monté sur potences en forme d'arc installées sur les poteaux.

Les trains sont à une ou deux motrices de chacune quatre moteurs formant au total une charge de 85 tonnes sur les sections les plus élevées et de 130 tonnes sur les autres. Les vitesses maxima sont de 45 km : h en palier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le freinage, capital sur une ligne aussi accidentée, est réalisé par le frein à vide Hardy agissant sur au moins huit essieux du train, par le freinage électrique des moteurs couplés tous en parallèle et par le frein à main agissant sur les mêmes essieux.

Les voitures motrices portent sur leur toit deux archets, et à l'intérieur

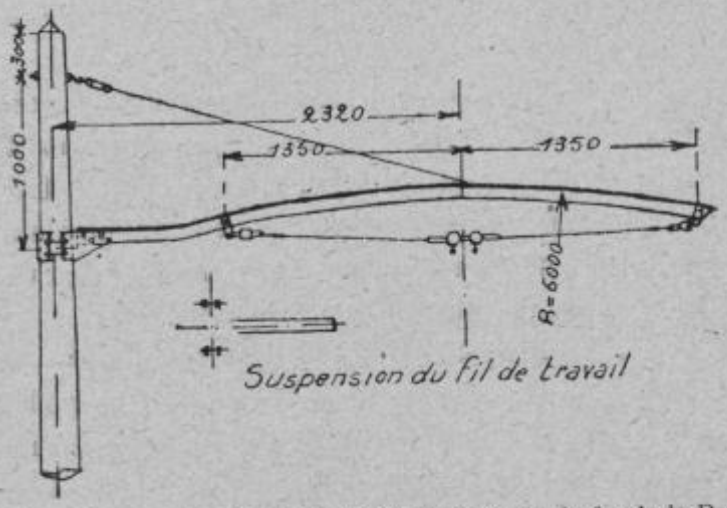


FIG. 1842. — Suspension du fil de travail du chemin de fer de la Bernina.

sont disposés les appareils de protection et de commande permettant de pouvoir marcher au besoin avec deux, trois et même un seul moteur.

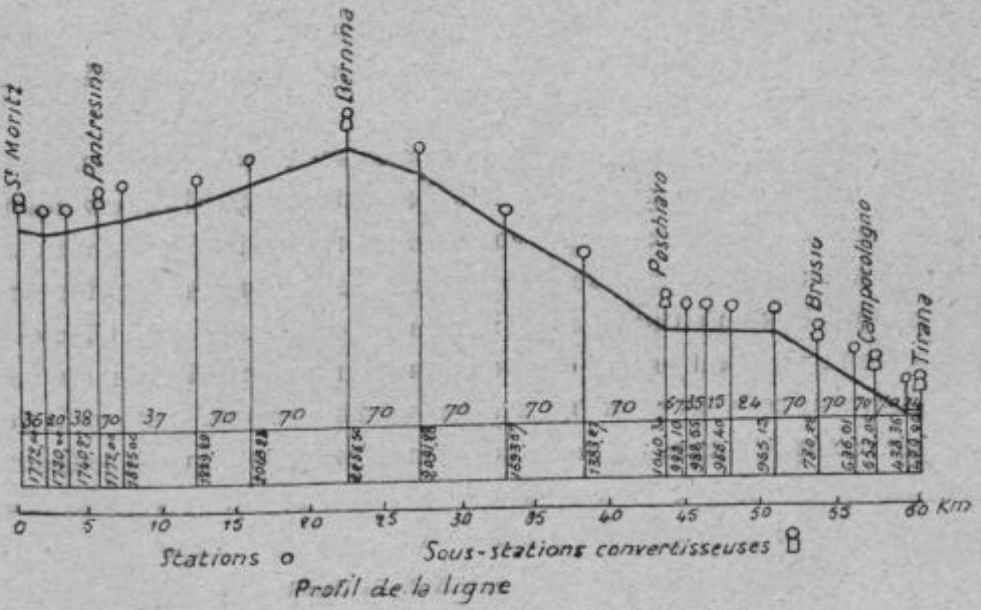


FIG. 1843. — Profil de la ligne de la Bernina.

Quand il y a deux motrices dans un train, elles sont toujours placées immédiatement l'une à la suite de l'autre en tête du train.

La tension de 3.000 volts apparaît comme une limite prudente d'ici longtemps ; un courant de 500 ampères permet d'apporter une puissance de 1.500 kilowatts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il semble donc que des locomotives puissantes doivent être envisagées de préférence avec troisième rail qui, seul, procurera la surface et la pression de contact nécessaires. Jusqu'à 150 ampères on peut utiliser les lignes aériennes à haute tension à isolation renforcée.

La réalisation des locomotives à 2.000 et 3.000 volts est facile avec deux moteurs en série ou avec des moteurs à deux collecteurs. Le courant absorbé est alors voisin de 500 ampères.

L'emploi de l'aluminium semble très indiqué dans la construction des rotors ; l'accroissement de résistance électrique pouvant être compensé par l'accroissement de vitesse périphérique à égalité de force centrifuge. D'ailleurs, la capacité du moteur est limitée aujourd'hui plutôt par l'échauffement que par les difficultés de commutation, qui peut être en tout cas améliorée par la compensation répartie.

Le mode de commande réalisé par M. Thury au moyen d'un asservissement permet de composer les trains d'une manière quelconque. L'appareil consiste, en principe, en un dispositif permettant d'actionner simultanément chacune des mises en marche d'un train à l'aide de petits moteurs électriques à basse tension réglés par une transmission synchronique.

L'équipement normal nécessaire à la commande d'un train comprend : deux manipulateurs, deux appareils d'asservissement, deux controllers (mises en marche), une batterie d'accumulateurs, un interrupteur décapolaire et éventuellement un coupleur-série-parallèle (actionnement d'une automotrice).

La transmission synchronique comprend, sur chaque mise en marche, un équipage électro-magnétique, dont l'armature est reliée aux manipulateurs par des conducteurs qui vont d'une extrémité à l'autre du train.

Le wattmann placé sur une plate-forme quelconque, munie d'un manipulateur, peut commander de là simultanément toutes les automotrices de son train, en étant assuré que tous les mouvements de sa main seront reproduits par tous les rouleaux des mises en marche et, pour qu'il puisse se rendre compte à tout moment de la position dans laquelle se trouvent les mises en marche, le manipulateur porte sur son couvercle un cadran qui reproduit exactement les divisions de celui des mises en marche et porte les mêmes indications. Ce système, appliqué à la ligne Martigny-Chatelard (Suisse), a donné toute satisfaction.

634. Lignes à courant continu. — *Chemin de fer électrique de Monlreux (Suisse).* — Cette ligne a 62 kilomètres de longueur avec emploi du courant continu sous tension de 750-1.000 volts, provenant de quatre sous-stations établies le long de la voie.

L'écartement de la voie est de 1 mètre ; elle est simple et formée de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rails Vignole posés sur traverses métalliques. La ligne de contact est double et formée de conducteurs en cuivre dur de 8 millimètres de diamètre.

L'énergie est fournie sous forme de courant triphasé de 8.000 volts et les groupes convertisseurs comportent un moteur asynchrone commandant, par l'intermédiaire d'un accouplement élastique, une dynamo de 187-140 ampères. En dérivation sur le circuit continu se trouve une batterie d'accumulateurs Pollack de 360 ampères.

Les automotrices sont à deux bogies espacés de $8^{m},50$; elles comportent quatre moteurs de 35 HP placés par deux en série sur 150 volts et le rapport des vitesses est de 1 : 4,6. La prise de courant est faite par deux archets.

Les voitures remorques sont aussi à deux bogies, distancés de $6^{m},50$, et leur poids total est de 48 tonnes.

Les wagons à marchandises sont des types ouverts et fermés ; ils comportent deux bogies espacés de 4 mètres et pèsent 10 tonnes.

Le prix de revient de l'installation, par kilomètre, a été de 210.000 francs.

Chemin de fer de Rombach. — Aux aciéries de Rombach (près de Metz), on a installé un chemin de fer électrique alimenté par du courant continu à 2.000 volts provenant de la transformation d'un courant triphasé à 5.700 volts. Ce dernier a été amené à des groupes moteurs générateurs disposés à chaque extrémité de la ligne. Chaque groupe comporte un moteur synchrone et une dynamo, puis accessoirement, un moteur asynchrone pour le démarrage du groupe et une petite excitatrice pour le moteur synchrone et la dynamo.

Sous-station du chemin de fer de la vallée de Birsig (Suisse). — Les voitures automotrices sont munies de quatre moteurs à courant continu de 50 HP alimentés par du courant continu à la tension de 750 à 1.000 volts. Les moteurs sont du type Allioth à quatre pôles tournant à la vitesse de 710 tours à la minute.

L'énergie électrique vient de la ville de Bâle sous une tension de 6.500 volts en courant triphasé, 50 périodes par seconde, lequel est transformé en courant continu à la sous-station d'Oberwil (kilomètre 5).

Le matériel électrique de la sous-station se compose : de deux convertisseurs Allioth, une batterie d'accumulateurs et un transformateur statique pour le courant servant à l'éclairage ainsi que pour actionner un survolteur.

Les convertisseurs sont formés d'un moteur asynchrone triphasé et d'une génératrice à courant continu.

Les deux machines, à bâtis séparés, sont réunies par un manchon élastique.

Le moteur asynchrone triphasé d'une puissance de 150 chevaux, tour-

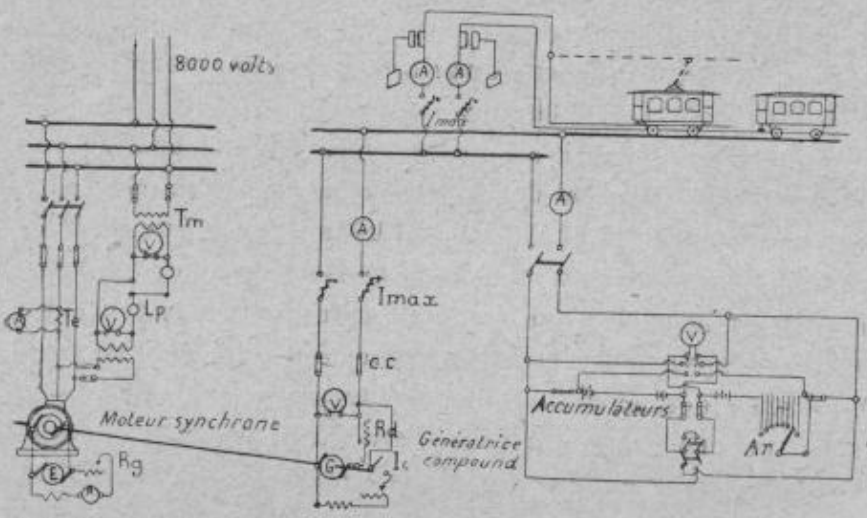
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nant à 485 tours : minute, est alimenté par du courant à 6.500 volts 50 périodes : seconde.

Les résistances de démarrage branchées sur le rotor sont métalliques, à air libre et placées près des moteurs.

La génératrice shunt, d'une puissance de 100 kilowatts, tournant à 485 tours, débite 133-100 ampères sous une tension de 750-1.000 volts. La dynamo, tétrapolaire, avec collecteur possédant 255 lames, est montée sur isolateurs en porcelaine.

Un transformateur statique 6.500/250 volts, monté en étoile, transforme le courant triphasé pour l'éclairage et le survolteur.



A, ampèremètre. — V, voltmètre. — G, générateur à courant continu. — M, moteur synchrone. — E, excitatrice. — T, transformateur de mesure. — Lp, lampe de phase. — I, interrupteur. — Imax, interrupteur à maxima. — Imin, interrupteur à minima. — Ic, interrupteur à charbons. — R, résistance additionnelle. — Rg, régulateur. — Rd, résistance de démarrage. — CC, coupe-circuit. — C, commutateur. — AR, Adjoncteur-réducteur à main. — P, parafoudre. — Pt, plaque de terre. — Tm, transformateur de mesure.

FIG. 1841. — Schéma d'une sous-station du chemin de fer de Fribourg-Morat-Amet (Suisse).

Le survolteur, d'une puissance de 17 chevaux, est composé d'un moteur asynchrone triphasé à 220 volts et d'une dynamo à courant continu type série. La génératrice débite, sous 85 volts, 118 ampères.

La batterie d'accumulateurs se compose de 390 éléments et possède une capacité de 247 ampères-heures. La batterie est placée en dérivation sur le réseau.

Le tableau de distribution est en deux parties, partie pour le courant alternatif et partie pour le courant continu.

Ligne du Fayet à Chamonix et à la frontière suisse. — La voie est de un mètre du Fayet à Chamonix avec une longueur totale de 36km,5. La traction se fait par simple adhérence.

La ligne de travail à courant continu sous 550 volts est constituée par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un troisième rail du type ordinaire P.-L.-M., à double champignon, de 38 kilogrammes au mètre, en acier de faible résistivité. Le champignon inférieur est simplement serré de distance en distance dans un bloc de bois en hêtre paraffiné monté par tirefonds sur les traverses en bois de la voie. Les organes de prise de courant sont constitués par des sabots plats fixés sur des pièces de bois paraffiné, solidaires des extrémités des châssis des bogies des véhicules.

Les trains comportent huit véhicules dont six automoteurs et deux de remorque. La commande unique de ces unités multiples se fait de la voiture de tête par un système entièrement pneumatique dû à M. Auvert.

Chaque véhicule-moteur porte deux moteurs de 65 HP couplés constamment en parallèle et qui commandent les essieux par engrenages coniques.

L'enlèvement des neiges est opéré en faisant circuler sur la voie un train comprenant, en tête, un véhicule-moteur chasse-neige armé d'un fort éperon et suivi d'un fourgon automoteur et d'un certain nombre d'autres véhicules automoteurs destinés à augmenter la puissance de refoulement du chasse-neige.

En hiver, on remplace, sur les fourgons de tête, les frotteurs ordinaires amenant le courant sur le rail conducteur par des frotteurs spéciaux, destinés à chasser le verglas qui s'est formé sur la tête du rail.

Les deux usines hydroélectriques de Servoz et des Chavants fournissent du courant continu à 550 volts pour la partie de la ligne allant jusqu'à Chamonix. Lorsque la ligne a été prolongée jusqu'à la frontière, on a installé dans l'usine des Chavants deux turbo-alternateurs de 1.200 kilowatts produisant du courant triphasé à 600 volts, 25 périodes. La tension de 600 volts est amenée à 12.000 volts à l'aide de transformateurs fixes Le courant triphasé à 12.000 volts est transmis par une ligne aérienne établie le long de la voie et alimentant deux sous-stations, distantes de 8 kilomètres. Dans ces dernières, des commutatrices triphasées à dix pôles, de 500 kilowatts, reçoivent le courant à 365 volts provenant du courant de ligne, abaissé à cette tension par des transformateurs statiques. L'installation comporte en outre deux survolteurs-dévolteurs automatiques constitués chacun par un moteur triphasé asynchrone accouplé à une dynamo à courant continu, réunis en parallèle à une batterie d'accumulateurs, pouvant débiter 1.200 ampères pendant une heure et capable d'assurer pendant cinq à six heures le service sur la portion de la ligne alimentée par la sous-station.

Ligne de Liverpool à Southport et à Crossens (34 kilomètres). — La traction électrique de cette ligne a été installée non par économie, mais pour satisfaire aux besoins du public toujours plus nombreux. La division de la ligne en trois zones, avec diminution de la fréquence des trains à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mesure qu'on s'éloigne de la ville, donne de très bons résultats. Les trains ont deux motrices, avec une, deux ou trois remorques selon l'affluence du public. La consommation moyenne de courant est de 25 watts-heures par tonne-kilomètre pour les express, et 50 watts-heures pour les omnibus. La vitesse des express est de 72 kilomètres.

Les sous-stations reçoivent du courant triphasé à 25 périodes, 7.500 volts, de l'usine centrale, lequel est transformé en continu de 600 volts au moyen de con mutatrices. Elles sont au nombre de quatre. Jugées insuffisantes, on a installé, à mi-distance de chacune d'elles, une batterie d'accumulateurs à la décharge en une heure.

Le retour du courant, selon la méthode anglaise, se fait par un quatrième rail placé dans l'axe de la voie courante. La présence de ce quatrième rail se justifie par les raisons suivantes : il évite de connecter les rails de la voie courante qui sont soumis à des chocs répétés au passage des trains ; il permet la réparation de la voie sans interrompre la continuité du courant de retour ; et enfin il empêche les effets d'électrolyse sur les conduites souterraines et les ouvrages métalliques de la voie électrifiée.

Ligne du « Great Norlher Railway ». — La partie de cette grande ligne de chemin de fer américaine, qui a été électrifiée, concerne le tunnel de Cascade Mountain, dans l'État de Washington. L'installation comprend une station génératrice hydroélectrique de 5.000 kilowatts fournis par des générateurs à 6.600 volts, 25 périodes, et un système de transmission à 33.000 volts (1). Une sous-station effectue la transformation à 6.000 volts. tension apportée aux locomotives par l'intermédiaire de trolleys et réduite à 500 volts pour le service des quatre moteurs triphasés qu'elles comportent.

Le tunnel de Cascade Mountain a une longueur de 4 km,2 et une pente moyenne de 1,7 0/0. Le problème a consisté à établir un équipement capable d'entraîner un train du poids de 2.500 tonnes, dans une portion très montagneuse de la ligne. L'effort de traction requis pour véhiculer un train de ce poids sur une pente de 2,2 0/0 est de 70 tonnes environ, effort réparti entre quatre locomotives ayant chacune quatre essieux moteurs.

Le poids total d'une locomotive est de 104 tonnes. Les moteurs fournissent une puissance de 375 HP sous 500 volts et la puissance continue

(1) L'énergie est fournie à la station génératrice par une dérivation de la rivière Wenatchie qui longe la ligne sur un parcours de 30 kilomètres, sous une chute de 60 mètres. La puissance unitaire des turbines est de 4.000 HP. Des transformateurs placés à l'usine génératrice même élèvent la tension des génératrices (6.600 volts) à 33.000 volts. Chacun d'eux a une puissance de 833 kilowatts et peut supporter une surcharge de 100 0/0 pendant une heure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

correspond à un effort de traction de 4.240 kilogrammes par moteur, soit 16.960 kilogrammes pour la locomotive. L'effort de traction maximum est d'environ 36.300 kilogrammes correspondant à un coefficient d'adhérence de 35 0/0 environ ; avec un effort de traction de 27.200 kilogrammes correspondant à un coefficient de 26 0/0 la locomotive peut entraîner un train de 885 tonnes sur une pente de 2,2 0/0.

Les locomotives portent trois transformateurs triphasés de 400 kilowatts refroidis par ventilation et transformant le courant de la ligne à 6.000 volts en une tension de 500 ou en 625 volts. Le système de contrôle de chaque moteur est séparé. Les divers circuits partent du transformateur et traversent des résistances indépendantes. Il y a 14 contacteurs dans le circuit de chaque moteur, et en passant de l'un à l'autre, on modifie seulement le circuit d'une phase. Cet arrangement permet de traiter un circuit triphasé comme un circuit monophasé, le couple résultant ayant pour valeur la moyenne des valeurs des trois couples. On a simplifié ainsi considérablement les appareils de contrôle. A chaque extrémité de la locomotive se trouve un poste de commande et au démarrage deux seulement des moteurs sont mis en circuit.

Une particularité à signaler dans la construction des locomotives est la disposition surélevée des rhéostats (placés au sommet de la voiture) qui présente l'avantage d'élever le centre de gravité de la locomotive. La ligne de transmission (33.000 volts) s'étend sur une longueur d'environ 50 kilomètres ; elle est divisée en trois sections au moyen de deux interrupteurs placés dans le voisinage des gares. La sous-station est située à l'entrée du tunnel. Elle comporte des transformateurs monophasés dont la basse tension alimente la ligne.

Dans les portions de la ligne à voie unique et à air libre, la suspension est faite au moyen de potences et dans les parties à voies multiples on a employé la suspension caténaire. Dans le tunnel, les fils sont à $2^m,40$ sur le côté et soutenus tous les 15 mètres au moyen d'une connexion mobile à bouton qui peut pivoter dans un tendeur, les deux ouvertures de ce dernier permettant de réunir chaque fil à des isolateurs de porcelaine montés en série et soutenus au moyen d'écrous de suspension à joints de dilatation fixés au sommet du tunnel.

Ligne de Saint-Georges de Coumiers à la Mure. — L'installation comporte des locomotives à quatre moteurs de 150 HP environ, connectés en série d'une manière permanente sous deux ponts, 1.200 volts l'un. Cette ligne aboutira à Gap par Corps et Saint-Bonnat.

Ligne de Baltimore-Ohio. — La locomotive est à quatre essieux moteurs, simple réduction. Les quatre moteurs sont de 200 HP chacun. Pour les trains de marchandises, les quatre moteurs sont de 400 HP à pôle de commutation. La tension est de 625 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chemin de fer d'Orléans et chemin de fer de l'Ouest. — Pour les premiers, la tension est de 600 volts-locomotives à bogies, à quatre moteurs de 350 HP et engrenages ; pour le second, tension 550 volts, type fourgon-automoteur, accouplement direct par voie élastique et par arbre creux, du moteur à l'essieu.

Détroit River Tunnel. — Cette ligne n'est qu'une portion du New-York Central. Sa longueur est de 10 kilomètres et la tension employée est de 625 volts. Les locomotives sont à deux bogies, quatre essieux, chacun avec son moteur de 300 HP à pôles de commutation. Pour la remorque des trains lourds, les locomotives sont accouplées par deux.

Chemin de fer de Pensylvanie. — On utilise des locomotives à deux bogies, quatre essieux moteurs, quatre moteurs à action directe de 320 HP l'un. L'appareillage est double pour marche sur courant continu et sur courant monophasé.

En outre des locomotives à moteurs d'essieux ci-avant la Compagnie utilise sur 17 kilomètres des locomotives Westinghouse à deux moitiés accouplées, dont chacune repose sur deux essieux moteurs et un bogie-porteur. Le moteur est de 1.250 HP par demi-locomotive. La voie est à troisième rail à contact supérieur et la tension de 650 volts.

Ligne du New-York Central. — Installation du type à troisième rail, type renversé. La longueur est de 48 kilomètres. Les locomotives sont à quatre essieux moteurs, deux essieux ou deux bogies porteurs, inducteurs plats permettant le mouvement des rotors chaussés sur l'essieu par rapport aux stators. La puissance des moteurs est de 550 HP et celle de la locomotive 2.200 HP pouvant monter exceptionnellement à 3.000 HP.

Divers. — En Amérique les lignes ci-après utilisent le voltage 1200/600 volts avec puissance des moteurs variant de 50 à 125 HP. Le nombre de moteurs est de 4 par voiture et la voie est unique. L'équipement a été confié à la Thomson-Houston et à la G. E. G. Ces lignes sont : Central-California Traction Cº Stockton ; Indianopolis et Louisville Traction Cº Ind. ; Indianapolis Colombus et Southern Traction Cº ; Pittsburg Harmony, Bulter et New-Castle ; Adoostock Valley Railway ; Southern Pacific Railway ; Meridan Middletown et Guilford : Washington, Balt et Annapoulis.

En Italie, le courant à 1.200 volts règne sur les lignes ci-après : Brescia-Salo-Toscolano ; Brescia-Storcheta et Brescia (S. E. B. ; Monza-Meda-Cantu ; Brescia-Toscolona ; Verona-Bonifacio ; Aigles-Sapey ; Turin-Rivoli ; Brianséa.

Ligne de Villefranche à Bourg-Madame (Cie des chemins de fer du Midi). — Elle a été livrée à l'exploitation au commencement de 1912. Sa longueur est de 57 kilomètres ; elle possède des courbes allant jusqu'à 80 mètres de rayon et des rampes de 50 à 60 millimètres par mètre. La

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ville où elle aboutit (Bourg-Madame) est à l'altitude de 1.143 mètres. Elle franchit la Têt sur deux points et ne comporte aucun tunnel. Bourg-Madame doit plus tard être internationalisée et devenir la tête des voies espagnoles du transpyrénéen à l'écartement de 1m,736.

La traction se fait en courant continu à 830 volts et avec troisième rail.

La tension du réseau de distribution est de 20.000 volts, triphasée. Le courant est fourni par la Centrale établie sur la Têt.

Chemin de fer électrique d'Usui à Toge (Japon). — Cette ligne construite d'après le système Abt à adhérence et crémaillère, de création récente, comporte les progrès les plus récents dans ce genre de traction. La rampe est de 67 0/00 et sur la partie à adhérence la plus forte est de 25 0/00.

L'usinage de garage est situé sur le milieu du parcours. La voie est de 1m,067.

L'énergie électrique est produite dans une usine spéciale installée à proximité d'Yokogawax, produisant du courant triphasé à 6.600 volts, 50 périodes. Des câbles armés souterrains conduisent le courant à deux sous-stations où il est transporté par des transformateurs à 240 volts, puis converti en courant continu à 650 volts par des commutatrices. Les pointes sont assurées par des batteries-tampons de 1.322 ampères-heures avec survolteurs Pirani. Le choix de la tension relativement basse de 650 volts a été rendu obligatoire en raison des nombreux tunnels de la ligne où l'isolement n'était pas compatible avec une ligne aérienne à haute tension. De là l'emploi d'un troisième rail conducteur et emploi de la tension de 650 volts.

Les locomotives électriques représentent un type entièrement nouveau. Elles sont capables de remorquer 90 tonnes chacune à la vitesse de 16 kilomètres à l'heure. Le poids de la locomotive (42 tonnes) est distribué presque uniformément sur trois essieux moteurs à adhérence avec moteurs de 350 chevaux, tournant à 650 tours. Ces derniers sont disposés dans la partie supérieure avec mécanismes à bielles parallèles.

Les moteurs assurant l'adhérence agissent moyennant une transmission de 1 : 6,4 sur l'arbre d'engrenage et, de là, par l'intermédiaire du mécanisme à bielles, sur le faux essieu, disposé, à son tour, solidement dans des cadres élastiques et d'où la commande des roues motrices est effectuée au moyen de bielles d'accouplement.

Les deux pignons moteurs sont disposés dans le cadre intérieur monté sur deux essieux ; ce même cadre porte également le moteur actionnant le mécanisme à crémaillère, et qui sur une transmission à engrenages d'un rapport de 1 : 5,9, et de là, moyennant une bielle motrice, directement sur un essieu de pignon moteur. Les deux essieux sont reliés ensemble par des bielles d'accouplement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La prise de courant se fait par la face inférieure du troisième rail avec sabots glissant à l'avant et à l'arrière respectivement sur les deux côtés latéraux de la locomotive.

Les deux moteurs de la locomotive sont réglés à l'aide d'un système de 32 interrupteurs disposés le long des côtés de la locomotive et actionnés par un courant provenant d'une batterie d'accumulateurs.

Le coupleur comporte trois cylindres; sur la section adhérence, le moteur à adhérence sert seul à faire fonctionner la locomotive, et sur la section à crémaillère, les deux moteurs marchent en série parallèle.

On a particulièrement soigné l'exécution et les dispositifs des freins électriques, pneumatiques et à main.

Ligne Rome-Fuggi-Frotignogne. — Il avait d'abord été décidé que cette ligne serait électrifiée en courant monophasé à 11.000 volts, 25 périodes, mais en raison des fortes pentes du tracé, de la longueur de la ligne et des phénomènes d'induction sur les lignes à courant faible (par suite des expériences faites sur la ligne monophasée Naples-Piedimonte d'Alise), on a adopté le courant continu à 1.700 volts.

La ligne a 150 kilomètres de longueur et la vitesse maxima est de 45 kilomètres à l'heure. Le fil de ligne est établi avec une suspension extérieure simple mais avec double isolement ; il a 106 millimètres carrés de section. Les poteaux sont constitués chacun par deux fers INPIL et IL, reliés par un simple treillis dans les alignements droits. Le retour du courant est assuré par des connexions du type « Forest City » en tresse de cuivre avec tête comprimée, de 50 millimètres carrés de section et par des transversales rigides.

La ligne de prise est alimentée par cinq sous-stations de transformation, s'échelonnant de 20 à 30 kilomètres à peu près l'une de l'autre.

L'énergie est produite par les usines hydroélectriques de Tivoli et de Castelmadana, sous forme de courant triphasé à 20.000 volts, 48 périodes.

Le poids des trains est de 37 tonnes pour ceux à voyageurs et de 67 tonnes pour ceux de marchandises. Les trains de voyageurs sont composés d'une automotrice à quatre essieux sur boggies Arbel équipés avec quatre moteurs de 60 chevaux, 800 volts, montés deux par deux en série et de une ou deux remorques à essieux convergents.

La commande électrique est faite par le système Sprague à unités multiples.

Toutes les voitures sont pourvues d'un frein à main, d'un frein électrique et du frein Westinghouse double automatique et modérable combinés.

Réseau de Milwaukee (Amérique). — Le courant est fourni par deux usines à vapeur situées à Milwaukee et une usine hydraulique établie à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Kilbourn à 193 kilomètres de Milwaukee. La ligne de transmission à Milwaukee-West-Alles est en câble souterrain à 13.200 volts. Le reste du réseau est en lignes aériennes alimentées actuellement à la tension de 38.000 volts par transformateurs triphasés en triangle pour pouvoir ultérieurement passer à 66.000 volts en passant de la connexion en triangle en montage en étoile.

Il y a six stations à 1.200 volts le long de la ligne. A toutes ces sous-stations est appliqué le principe de division nette en deux parties : la section machines et la section haute tension.

Le tableau de distribution comporte cinq panneaux : un commande la ligne à 1.200 volts, deux les machines côté basse tension et deux les machines côté haute tension. Les transformateurs sont groupés par trois pour chaque couple de commutatrice.

Les lignes de travail sont munies de parafoudres à cornes, ces dernières étant extérieures au bâtiment. Elles sont établies en partie en fil de cuivre, en câble de cuivre et en câble d'aluminium.

Les feeders et lignes de trolley sont portés en général par les mêmes poteaux ; la suspension est généralement caténaire, sauf quelques sections établies sur consoles.

Le service à effectuer est très variable ; les moteurs des motrices à voyageurs sont à 75 et 125 chevaux qui fonctionnent à volonté sous 600 ou 1.200 volts en série par deux. Ils sont à pôles de commutation.

Un commutateur 600/1.200 volts fixé sous le plancher des voitures, commandé de l'extrémité de la voiture, relie les circuits auxiliaires à la ligne dans les sections où la tension est de 600 volts (enclaves) et au dynamoteur dans les autres sections. Au régime de 1.200 volts il fait passer les moteurs de « série » à « série-parallèle » et au régime de 600 volts, de «série-parallèle» à « parallèle ». Le reste des appareils des circuits moteurs est entièrement « standard » à isolement renforcé et perche et roulette de trolley sont absolument « standard ». Les appareils de commande sont à accélération non automatique, contacteurs et inverseurs usuels étant à isolement renforcé.

635. Lignes à courant monophasé. — *Chemin de fer monophasé de Locarno (Suisse).* — Ce chemin de fer, mis en exploitation récemment par les ateliers Oerlikon, est, abstraction faite de la ligne Seebach-Wettingen, la première installation où l'on ait employé la prise de courant à antenne inventée par ladite firme, et par conséquent une disposition du fil de contact à côté de la voie, qui présente un intérêt tout particulier.

La ligne, qui est très accidentée, a une longueur de $27^{km},325$, avec des pentes variant de 10 0/0 à 33 0/0. Cette dernière pente, à laquelle fait suite une descente de 22,5 0/0, ne se rencontre qu'en un seul endroit. Le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant employé est du courant monophasé à 5.000 volts et 20 périodes, engendré par l'usine hydroélectrique de Pontebrolla, et directement amené à la ligne de contact. Celle-ci longe constamment la voie sur le côté gauche (en partant de Locarno) et est montée de telle sorte que, dans les stations et les tunnels, le contact se fait sur le côté du fil et dans les courbes ; il a lieu soit de côté, soit du haut. La hauteur de ce fil au-dessus de la voie est de $4^m,10$ à $4^m,70$ en campagne, de $5^m,30$ aux passages à niveau, de $4^m,50$ à $5^m,30$ dans les stations et de $4^m,30$ dans les tunnels. Dans les stations et les tunnels la suspension se fait par des fils de support transversaux, à l'aide de serre-fils isolés au moyen d'isolateurs et situés à peu près au milieu de la voie ; en campagne, par des serre-fils également, fixés à des consoles et distants de 50 centimètres à 1 mètre de l'axe de la voie. Les isolateurs sont attachés à des douilles dans lesquelles ils peuvent tourner en cas de rupture du fil de contact.

La ligne est divisée en sept segments ou tronçons et le fil de contact coupé en six points correspondant aux principales stations desservies. La jonction entre ces différents segments est assurée par des interrupteurs de lignes à cornes pouvant se fermer ou s'ouvrir automatiquement ou pouvant être manœuvrés à main au moyen d'une manivelle ; chaque segment est protégé par des parafoudres. La conduite auxiliaire pour le déclenchement des interrupteurs de ligne est formée de fil de fer galvanisé de 3 millimètres de diamètre et est supportée par des isolateurs à basse tension fixés aux poteaux (poteaux en bois, bétonnés dans le sol) à $4^m,50$ de hauteur.

Les supports d'isolateurs à haute tension y sont réunis par un appareil révélant les défauts d'isolation.

Les voitures automotrices sont munies de deux bogies et les châssis de ces derniers sont contrebalancés par des ressorts feuilletés s'appuyant d'une part contre des ressorts doubles supportant la voiture, et d'autre part contre les paliers des roues. Chaque bogie porte deux moteurs série monophasés, qui s'appuient, d'une part, sur des ressorts et d'autre part, sur l'essieu des roues. La transmission se fait par un train d'engrenages dans le rapport 13 : 67. Les quatre moteurs de chaque voiture peuvent emporter un train de 55 tonnes, à 18 kilomètres à l'heure sur pente de 33 0/0, et 30 kilomètres en palier. Chaque voiture est équipée de deux compresseurs travaillant en parallèle sur le réservoir auxiliaire et de là sur le réservoir principal dans lequel règne une pression de 4 atmosphères. Les résistances sont montées sous le véhicule. Les voitures portent chacune deux antennes qui sont connectées en parallèle ; celles-ci sont commandées indépendamment, verrouillées mécaniquement de l'une ou l'autre des deux plates-formes.

Le verrouillage, à action pneumatique, empêche de mettre l'antenne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en contact tant que la chambre de la haute tension est ouverte, et inversement celle-ci ne peut être ouverte, tant que l'antenne appuie contre le fil de contact. Le déclenchement électro-magnétique des interrupteurs se fait par un solénoïde alimenté par un transformateur d'intensité particulier. Des transformateurs installés sur la voiture servent pour l'éclairage pour la commande du dispositif indicateur du tachymètre ainsi que pour le chauffage.

Les contrôllers sont munis de huit positions de marche. Le changement du sens de marche a lieu par un commutateur cylindrique spécial. Enfin les voitures sont munies de sablières pneumatiques.

Chemin de fer de la vallée de Brembana (*Italie*). — La voie est à l'écartement normal de 1m,44, de 30 kilomètres de longueur, présentant sur certains points des rampes assez fortes, s'élevant parfois à 0,024 et des courbes dont le rayon minimum est de 150 mètres. L'usine hydroélectrique qui fournit du courant monophasé à la tension de 6.000 volts, 25 périodes, est située à 1 kilomètre en amont de la gare San-Giovanni-Bianco ; elle utilise une chute de 27 mètres de hauteur ménagée sur le Brembo. La puissance de la station centrale est de 1.600 kilowatts. L'éclairage des gares, qui est absolument indépendant du service de la traction, est fait à l'aide d'une génératrice spéciale ayant les mêmes constantes que celles pour la traction, de façon qu'en cas d'accident on peut assurer l'éclairage par les alternateurs fournissant l'énergie à la ligne de contact. Pour assurer la régulation de la tension des alternateurs de traction, on a adopté un régulateur Tirill.

Sur les motrices se trouvent des auto-transformateurs qui abaissent la tension de 6.000 volts à 250 volts, tension d'alimentation des moteurs.

Le départ des conducteurs électriques se fait d'une tour située sur l'un des côtés des bâtiments de l'usine et, dans les différents étages de cette tour, sont disposés les interrupteurs généraux ainsi que les parafoudres. Le fil de contact (de 8 millimètres de diamètre) est suspendu à 6 mètres au-dessus du plan des rails au moyen d'un câble porteur formé de 7 brins d'acier de 2 millimètres de diamètre chacun. Le fil de trolley

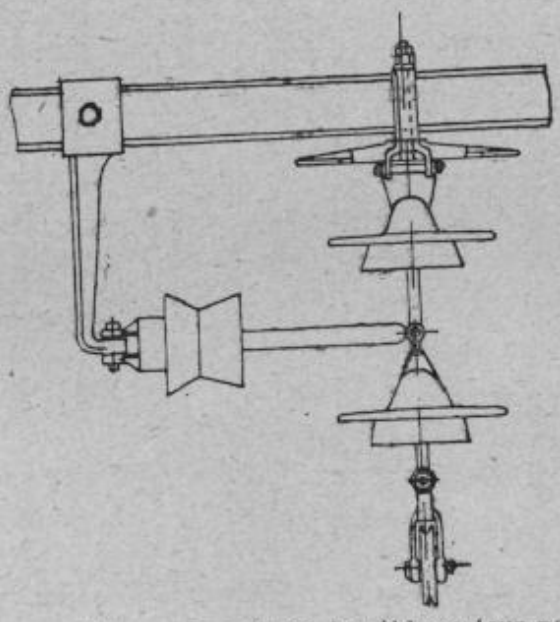


Fig. 1845. — Suspension du câble porteur pour compenser automatiquement la tension du fil de contact Westinghouse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est en cuivre, à section en forme de 8 ; il est suspendu au câble porteur au moyen de pendules de fer plat, et d'une griffe en fonte malléable.

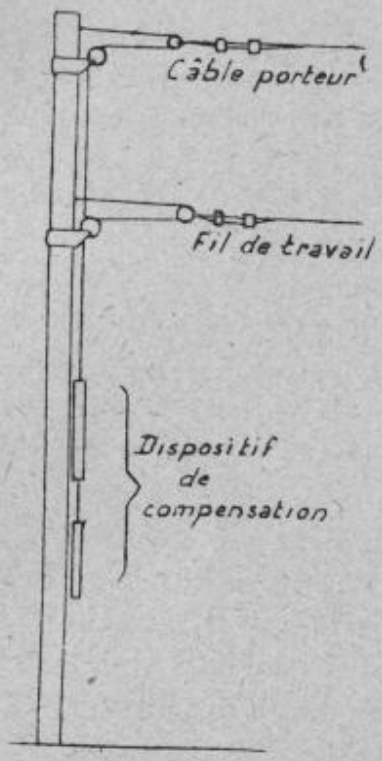


FIG. 1846. — Dispositif de compensation sur les portées de 100 mètres Westinghouse.

Les portées normales de la ligne sont de 35 mètres avec flèche au câble porteur de 30 centimètres. Les points de fixation de la ligne de travail sont constitués par un système de deux isolateurs spéciaux. Le feeder, de 50 millimètres carrés de section, monté en parallèle avec la ligne de traction, est spécialement étudié pour pouvoir facilement effectuer des travaux sur une section, sans avoir à interrompre complètement le courant. Dans toutes les gares, sur deux tours en treillis, se trouvent disposés des postes de sectionnement qui permettent d'isoler soit la ligne, soit le feeder en cas de besoin ; un fil neutre d'une longueur supérieure à celle existant entre les trolleys évite de mettre sous tension un tronçon de ligne sur lequel les ouvriers pourraient éventuellement travailler. Le retour du courant se fait par les rails et la mise à la terre a été assurée par des plaques en fer galvanisé, disposées tous les kilomètres et à $1^{m},50$ de profondeur.

Cinq locomotives sont chargées d'assurer à la fois un service de marchandises ainsi qu'un service de voyageurs. Elles sont à deux bogies moteurs et équipées avec 4 moteurs de 50 kilowatts tournant à 700 tours. Le trolley, du type pantographe, permet de marcher dans les deux sens sans manœuvre spéciale. Un dispositif de verrouillage par l'air comprimé permet d'abaisser le trolley et d'isoler la voiture de la ligne.

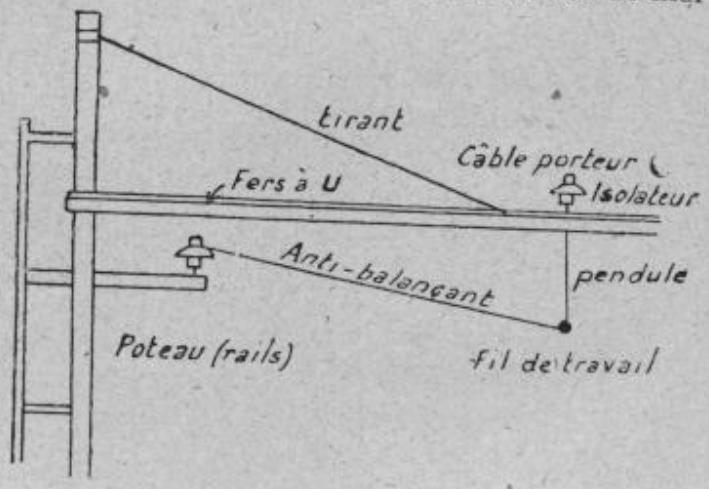


FIG. 1847. — Suspension Westinghouse pour portées de 50 mètres.

Le transformateur, monté sur la voiture, a son potentiel qui part de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

zéro pour croître graduellement à chaque spire et les moteurs sont reliés entre la terre et différents points d'enroulement. Pour passer d'une touche à l'autre on a prévu un dispositif analogue à celui d'un réducteur d'accumulateurs qui utilise un double contact avec bobine de self entre les deux. La manœuvre se fait à l'aide de contacteurs actionnés par l'air comprimé ; l'air nécessaire à la fermeture de ces contacteurs est admis au moyen de valves électro-magnétiques alimentées par du courant alternatif simple à 50 volts ; ce dispositif évite l'emploi d'une batterie d'accumulateurs. Les moteurs sont du type série compensé à collecteur ; des anneaux d'égalisation réunissent tous les points de l'induit au même potentiel, évitant les crachements aux balais lorsque l'induit vient à se décentrer.

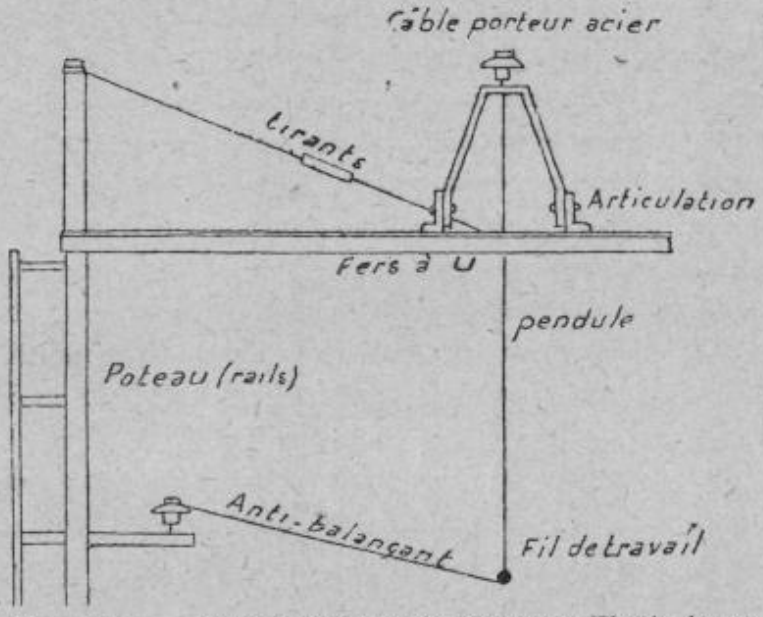


FIG. 1848. — Suspension à simple chaînette Westinghouse pour portées de 100 mètres.

Les locomotives peuvent remorquer normalement un train de 90 tonnes à la vitesse maxima de 60 kilomètres à l'heure. Sur certaines parties du parcours, des essais ont montré que le poids total du train remorqué pouvait atteindre 140 tonnes. On a pu obtenir des accélérations atteignant et dépassant 50 centimètres par seconde.

Chemin de fer de Chicago à Toledo. — La General Electric Cº a mis récemment en exploitation une ligne monophasée de Port Wayne à Auburn, qui, comme la ligne de Bloomington, est destinée à réunir électriquement Chicago à Toledo.

Les génératrices monophasées fournissent du courant à la tension de 33.000 volts, 25 périodes et les fils de trolley sont alimentés par des sous-stations à 3.300 volts. Il y a une sous-station par 40 kilomètres ; mais en élevant la tension du fil de trolley à 6.000 volts, on réduira le nombre dn sous-stations à une par 65 kilomètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chemins de fer de l'Erié. — Sur la ligne de Rochester, des chemins de fer de l'Érié (États-Unis), on fait usage de courant alternatif monophasé à 11.000 volts sur la ligne de travail. Les sous-stations donnent du courant triphasé à 60.000 volts, qui est transformé en courant biphasé ; les deux phases du transformateur statique sont directement connectées chacune à l'une des sections adjacentes du conducteur de la voie. Le service est assuré actuellement par six automotrices actionnées chacune par quatre moteurs monophasés du système Westinghouse.

Ligne de Visalia (É.-U.). — La longueur de la ligne actuellement exploitée est de 35 kilomètres.

L'usine génératrice hydroélectrique, située sur le Kweah, fournit le courant triphasé à 35.000 volts, 60 périodes. Il se rend de là à la sous-station d'Exeter installée à peu près au milieu de la ligne. Cette sous-station contient : les transformateurs à bain d'huile et à refroidissement par l'eau, qui abaissent la tension à 2.200 volts ; deux groupes moteurs-générateurs Westinghouse, comprenant chacun un moteur synchrone de 540 HP (bobiné à 2.200 volts et couplé à un moteur d'induction pour le démarrage) et un alternateur monophasé à champ tournant de 375 kilowatts, 11.000 volts, 15 périodes. En bout d'arbre sont des excitatrices à 125 volts et il y a en outre des excitatrices identiques conduites par des moteurs d'induction triphasés, branchés directement sur le courant de la ligne.

Le courant à 11.000 volts, 15 périodes, se rend à deux sous-stations situées de part et d'autre d'Exeter, à 13 kilomètres environ. Dans chacune la tension est réduite à 3.300 volts, tension d'alimentation pour un transformateur de 300 kilowatts.

Le trolley est du type à suspension caténaire ; les poteaux espacés de 36 mètres supportent un fil de $10^{mm},4$.

Le matériel roulant comprend : une locomotive Baldwin-Westinghouse de 47 tonnes environ, munie de 4 moteurs monophasés, série, compensés, de 125 HP ; 4 voitures-automotrices possédant chacune 4 moteurs de 75 HP et 2 voitures remorques de construction analogue. Les voitures et locomotives sont équipées avec le système de contrôle à unités multiples et possèdent des transformateurs qui abaissent la tension pour l'alimentation des moteurs.

La locomotive fournit un effort de traction d'environ 2 tonnes à une vitesse de 32 kilomètres à l'heure. L'effort de traction maximum est de 4 tonnes à une vitesse de 27 kilomètres à l'heure ; au démarrage, on peut fournir 7,7 tonnes.

La consommation d'énergie est respectivement de 35 et 45 watts-heures par tonne kilométrique pour les automotrices et la locomotive.

Ligne de Seebach-Wettingen. — L'usine génératrice fournit du courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

triphasé à la tension de 230 volts et à la fréquence de 50 périodes par seconde. La sous-station comprend des groupes convertisseurs composés chacun d'un moteur synchrone triphasé à 14 pôles, 230 volts, 50 périodes, 100 volts de tension d'excitation, 430 tours par minute et un alternateur monophasé directement accouplé, à 4 pôles, 700 volts, 14 à 15 périodes et 100 volts de tension d'excitation.

Le réglage de la tension des alternateurs s'opère automatiquement par des régulateurs Thury et du côté opposé à chacun des alternateurs se trouve une dynamo à courant continu qui travaille en parallèle avec une batterie-tampon d'accumulateurs, tantôt comme moteur, tantôt comme génératrice. La tension aux bornes de cette dynamo varie de 750 à 850 volts. Le courant est de 350 ampères et la tension d'excitation 750 volts. Une dynamo auxiliaire à deux collecteurs est adjointe à la batterie-tampon ; les collecteurs sont mis en parallèle pour couper les pointes, et en série pendant la charge de la batterie. Le réglage de la tension de cette dynamo se fait de deux manières et dépend soit de la consommation d'énergie du moteur triphasé auquel elle est accouplée, soit de la puissance en courant monophasé sur la ligne de contact. Dans le premier cas, on se sert d'un régulateur Thury et, dans le second cas, d'un convertisseur rotatif à induit unique.

Les transformateurs statiques élèvent la tension du courant monophasé de 730 à 15.000 volts ; leur puissance individuelle est de 800 kilowatts.

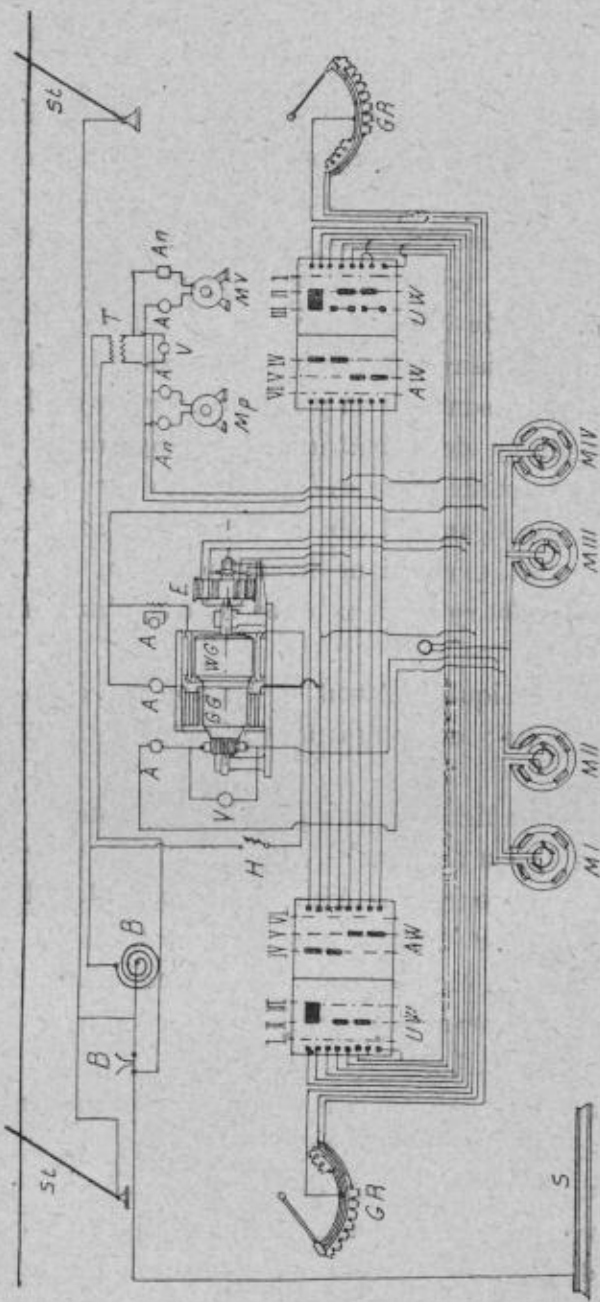
La prise de courant de la ligne dans la première section (de Seebach à Regensdorf) est du système à antenne Oerlikon. Le fil de travail est disposé tantôt pour la prise de courant latérale, tantôt pour des fils transversaux. Les isolateurs de support du fil de contact sont munis de capuchons en fonte pour le maintien du fil de contact. La seconde partie de la ligne est disposée pour prise de courant par archet « Siemens », avec suspension caténaire avec fil porteur auxiliaire.

Devant chaque station se trouve une coupure avec interrupteur de sectionnement ; celle-ci est, soit manœuvrée à la main, soit commandée à distance, par câble du poste d'aiguillage de la station. La gare de Wettingen présente des traverses de suspension recouvrant jusqu'à 7 voies. En ce point, comme en d'autres du parcours on a renforcé la suspension au moyen de pièces spéciales qui permettent le déplacement facile des différents fils de travail, d'après les exigences des voies, et malgré la réunion forcée en ces points, de deux, souvent de trois réseaux porteurs avec leurs fils de travail. Les locomotives à moteurs monophasés du type Oerlikon ont un poids total en service de 40 tonnes. Les transformateurs sont pourvus de prises de connexion intermédiaires ou secondaires et le courant est amené directement de ce dernier aux moteurs. Ceux-ci ont une puissance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

individuelle de 250 HP, tournant à 650 tours pour une vitesse de 60 kilomètres à l'heure.

Ligne Spiez-Frutigen (Loetschberg-Simplon). - Cette ligne a une lon-



K, fil de travail. — St, organe de prise de courant. — B, parafoudre. — H, interrupteur à haute tension. — A, ampèremètre. — V, voltmètre. — WG, moteur monophasé. — GG, dynamo. — E, excitatrice. — T, transformateur. — An, démarreur. — MP, pompe à vide électrique. — MV, ventilateur électrique à pression moyenne. — GR, régulateur de vitesse. — AW, 1er cylindre du coupleur (cylindre de démarrage). — UW, 2e cylindre du coupleur (cylindre de commutation). — MI, MII, MIII, MIV, moteurs d'essieux. — S, rails.

FIG. 1849. — Connexions de la locomotive Oerlikon.

gueur exploitée de 13km,43 avec une pente maxima de 15,5 0/00 et des rayons minima de 300 mètres.

L'énergie nécessaire à l'électrification de la ligne est fournie par les usines hydroélectriques de la Kander, de Gampel et de Stalden.

Le système adopté est le courant alternatif monophasé avec génératrices de 15.000 volts, 15 périodes. Les automotrices sont à 2 bogies, pe-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sant 55 tonnes et pouvant contenir 64 personnes ; elles ont 4 moteurs de 220 HP, de manière à pouvoir remorquer un convoi de 160 tonnes sur une rampe de 27 0 /00 à la vitesse de 45 kilomètres à l'heure, ou 240 tonnes sur une rampe de 15,5 0 /00.

La locomotive Oerlikon a une puissance de 2.000 HP et est capable de remorquer des convois de 300 et 500 tonnes, à la vitesse de 40 kilomètres à l'heure, sur les rampes précitées. Le poids total de la locomotive est de 80 tonnes. Cette puissance justifie la division en deux équipements absolument symétriques. Les moteurs sont à 12 pôles, du type série-compensé avec champ de commutation déphasé. Leur champ magnétique est calculé pour permettre de démarrer avec un effort de traction maximum sans dépasser une tension de 4 volts entre lames. Après essais entre la demi-charge et la pleine charge le rendement a été trouvé de 90 0 /0. Pour les vitesses supérieures à 38 kilomètres, le facteur de puissance a été trouvé dépassant 0,95. Le poids total de la locomotive est employé par l'adhérence et est réparti sur 2 bogies, chacun d'eux étant muni d'un alterno-moteur de 1.000 HP, attaquant les essieux par engrenages et bielles d'accouplement.

Le courant d'induction engendré dans les secondaires des transformateurs traverse les interrupteurs électromagnétiques ou contacteurs du groupe avant et du groupe arrière, les auto-transformateurs, l'inverseur-commutateur du sens de marche, l'interrupteur-commutateur pour mise hors circuit des moteurs avariés, et enfin parvient aux moteurs.

Les transformateurs fournissent également le courant nécessaire pour l'éclairage, le chauffage, etc., et pour le groupe convertisseur destiné à la commande de l'aéro-compresseur.

La ligne du Loetschberg-Simplon est l'une des plus grandes artères de la circulation humaine. Elle est remarquable, à la fois par la nature des ouvrages d'art, que l'homme a dû édifier pour franchir les barrières que la nature a établies et qu'elle défend jalousement et par le pittoresque des sites qu'elle traverse et par les services économiques qu'elle est appelée à rendre.

Ligne du Golhard. — Les concessions qu'intéresse la ligne du Gothard s'étend : 1° aux forces entières de la Reuss et affluents d'Andermatt à Amsteg, conférant le droit d'établir des lacs artificiels à des endroits appropriés. Les trois centrales sont désignées à Goeschenen, Wassen et Amsteg ; 2° aux forces des lacs de Ritom et de Tremorgio avec leurs affluents et émissaires, celle du Tessin et de tous les cours d'eau utilisables de la Tremola à Lavorgo, et l'exploitation de ces forces est assurée par les usines de Piotta et de Lavorgo.

La durée des concessions est de cinquante ans renouvelable sans aggravation de conditions sur la demande des concessionnaires.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tronçon Erstfeld-Bellinzone (100 kilomètres) a été choisi comme champ d'expérience pour la traction électrique en ce qu'il présente les plus grandes longueurs en tunnels et les plus fortes rampes.

Ce tronçon comprend les usines de Ritom et d'Amsteg.

Les installations entre Erstfeld et Bellinzone doivent être exécutées comme une partie d'installations futures plus étendues comprenant au moins la ligne entière du Gothard.

Le projet est calculé d'après l'évaluation du trafic probable de 1918 et l'accroissement qui peut en être prévu jusqu'en 1928.

Il est prévu uniquement des locomotives ; les trains express desservis par une unité et les trains de marchandises par deux au plus, dont une en queue. Les machines de trains express sont d'une puissance de traction de 12.000 kilogrammes et celle des trains de marchandises de 10.000 kilogrammes ; avec machine en queue en plus à la montée seulement.

La récupération d'énergie à la descente a été abandonnée.

Le trafic pour 1911 était de 606.000.000 de tonnes-kilométriques et celui de 1828 a été évalué à 820 millions et pour 1928, à 1 milliard 30 millions.

La puissance des usines a été calculée d'après ce trafic évalué, en tenant compte de fluctuations du tonnage kilométrique journalier du tronçon Erstfeld-Bellinzone, qui a été en 1911, de 36 0/0 d'augmentation sur la moyenne.

L'application électrique doit permettre d'augmenter la vitesse des trains à la montée, de réduire ainsi la durée des parcours et d'accroître la capacité de la ligne du Gothard.

La vitesse des express varie, sur rampes de 0 à 26 0/0, de 85 à 50 kilomètres et sur pentes de 0 à 26 0/00, de 85 à 60 kilomètres (express).

La puissance moyenne à la jante des roues pour une journée de l'année 1911 à trafic moyen a été calculée à 4.850 HP, si tous les trains atteignaient leur maximum de charge, cette puissance moyenne serait de 6.600 HP ; le rapport entre ce chiffre et la moyenne de l'année est donc de $\frac{6.600}{4.850} = 1.35$.

Le rapport entre la puissance maxima et la moyenne a été en 1911 :

Pour le maximum de tonnage.....	$\frac{17.000}{4.850} = 3,5$
— le jour du plus fort trafic.....	$\frac{15.000}{4.850} = 3,1$
— le jour du trafic moyen.....	$\frac{12.200}{4.850} = 2,5$

On admet qu'en 1920, la puissance maxima ne dépassera pas 19.000 HP et en 1928, 21.000 HP.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a admis, comme taux des pertes, environ 47 0/0 pour la puissance moyenne et 40 0/0 pour la puissance maxima.

Pour disposer d'une puissance totale de 19.000 à 21.000 HP à la jante des roues motrices, il faut avoir des turbines capables de produire : $\frac{19.000}{0,60}$ et $\frac{21.000}{0.40} = 35.000$ HP. Enfin, en 1928, les chiffres prévus sont: puissance moyenne 26.000 HP ; puissance maxima 60.000 HP.

L'usine d'Amsteg, qui, à elle seule, peut assurer l'exploitation du tronçon Erstfeld-Bellinzone, utilise toute la chute de la Reuss de Wassen et permet la création d'un bassin d'accumulation quotidienne de 100.000 mètres cubes pour la compensation des fluctuations de consommation quotidienne.

Sur le versant nord du Gothard, opposée à l'usine d'Amsteg est l'usine hydroélectrique de Ritom, utilisant le torrent de la Foss, depuis le lac jusqu'à Protta.

Par la combinaison de l'usine d'Amsteg qui fournira toute l'énergie en été, à l'époque des hautes eaux de la Reuss, et de l'usine de Ritom qui pourra accumuler ses réserves d'eau pour balancer en hiver l'insuffisance de la première, on obtiendra une puissance moyenne aux turbines de 26.000 HP, et de 32.000 HP avec un barrage de retenue de 7 mètres au lac de Ritom.

Au point de vue du mode de courant à appliquer à la force motrice, on a fait choix du courant alternatif monophasé, 15 périodes, 7.500 volts, qui permet de modifier la vitesse suivant les déclivités et le tonnage des trains, de recourir, selon les besoins aux vitesses maxima autorisées et de faire comme avec la vapeur, travailler plusieurs locomotives ensemble.

Les alternateurs des usines d'Amsteg et de Ritom livrent le courant directement aux lignes d'alimentation et de contact ; ces deux usines seront reliées entre elles par une conduite. Le courant transmis des centrales aux sous-stations a une tension de 60.000 volts ; la tension secondaire est celle de la ligne de contact 7.500 volts, plus tard relevée à 15.000 volts. La ligne comprend deux séries de câbles dont chacune sera capable de transporter toute l'énergie.

La ligne de contact est construite pour l'emploi d'archets. Les fils de contact des deux voies parallèles ont des supports communs, mais ils ont sur toute leur longueur une isolation et une suspension indépendantes. Les mêmes supports soutiennent aussi les lignes d'alimentation. Le retour du courant se fait principalement par les rails de la voie, les éclisses étant reliées à une ligne spéciale posée dans le corps de la voie ou, suivant la position de la ligne d'alimentation, montée sur les supports de la ligne de contact.

L'exploitation de la section Bellinzone-Airolo exigera 26 à 30 locomo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tives et celle de la section Erstfeld-Bellinzone, 36 à 41 ou même davantage.

Deux genres de locomotives sont prévues ; un type pouvant fournir un effort de 12.500 kilogrammes au crochet de traction et des vitesses de marche allant jusqu'à 90 kilomètres ; l'autre plus léger, pour les trains omnibus et le service auxiliaire des diverses catégories de trains.

Le chauffage des trains par l'électricité n'est appliqué actuellement qu'aux trains omnibus.

Les dépenses d'installation ont été prévues comme suit :

Frais d'organisation et d'administration	1.000.000 francs
Intérêts du capital de construction	2.100.000
Expropriations	430.000
Infrastructure	10.000
Superstructure	170.000
Bâtiments (ateliers et dépôts)	1.580.000
Télégraphe, signaux, divers	1.700.000
Conduites de contact	4.770.000
Sous-stations	1.540.000
Conduites de distribution	5.500.000
Usines hydroélectriques	16.700.000
Matériel roulant (wagons, chauffage)	400.000
Mobilier et ustensiles	650.000
Essais, mesures de précaution imprévues	1.000.000
TOTAL	37.550.000 francs

Les frais de production et de répartition de l'énergie électrique jusqu'aux récepteurs du courant sur les locomotives se décomposent comme suit :

Intérêts du capital d'établissement sur 37.000.000 de francs	1.480.000 francs
Amortissement du capital et versements au fonds de renouvellement	554.300
Droits d'eau et divers	331.400
Personnel et matières consommées	281.700
Entretien et réparations	457.000
TOTAL	3.104.000 francs

Les frais de chauffage des trains peuvent être estimés à 100.000 francs environ. Le compte des dépenses annuelles pour la traction électrique s'établit par conséquent comme suit :

Service de la traction	2.883.500 francs
Énergie	3.104.400
Chauffage	100.000
ENSEMBLE	6.087.900 francs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soit 4,1 0/0 en moins qu'avec la traction à vapeur. Le coût des locomotives peut être évalué à 16 millions. Soit donc en tout 54 millions pour le tronçon Erstfeld-Bellinzone. Le prix de revient de la tonne-kilométrique de poids remorque ressort à 0 fr. 70.

Traction par courant alternatif simple de l'A. E. G. et de l'Union E. G. — Il y a, dans ce système, généralement deux cabines de commande sur chaque voiture, une à chaque bout, respectivement affectées à la haute et à la basse tension. Le dispositif de prise de courant est la roulette pour les voitures de puissance moyenne et, pour les grosses voitures, on utilise l'archet avec frotteur en aluminium, dont la largeur utile peut atteindre jusqu'à 1m,30. Parfois, il y a deux systèmes de prise, l'une pour la haute tension (archet), l'autre, à roulette, pour la basse tension, en vue des manœuvres dans les dépôts.

L'abaissement de la tension est réalisé au moyen d'un autotransformateur, placé sous la caisse de la voiture. Il fournit le courant aux moteurs, ainsi que celui pour le réglage, l'éclairage, le chauffage, la pompe à air, etc.

Ce transformateur-réducteur est indépendant du transformateur de réglage à l'aide duquel le courant à tension réduite est repris après sa modification pour alimenter les induits des moteurs.

La commande de ceux-ci s'effectue ordinairement par la méthode série-parallèle combinée avec réglage par autotransformateur.

Dans le système par commande directe on agit directement sur les circuits principaux par l'intermédiaire du coupleur, lequel ne comporte pas de soufflage magnétique. Dans le système à commande indirecte, il est possible d'accoupler électriquement un nombre quelconque de voitures en les réunissant sous la direction d'un seul conducteur placé dans la cabine de tête.

Le courant à haute tension du fil de prise passe dans le transformateur par l'intermédiaire d'un premier commutateur, d'une bobine de réactance et d'un interrupteur principal à main, muni d'un enclenchement ou relais à maximum, et la borne opposée du transformateur est reliée à la terre.

La connexion du circuit secondaire avec les circuits des moteurs est opérée par des interrupteurs ou contacteurs dont la fermeture est provoquée électriquement au moyen du coupleur. Le renversement de marche est obtenu par l'inversion du courant dans les induits, au moyen d'un dispositif spécial.

Les moteurs Winter-Eichberg sont tétrapolaires ou hexapolaires ; l'induit a un noyau denté d'une seule pièce, et l'air, aspiré par l'axe creux du côté du collecteur, passe directement sur les balais et s'échappe par les côtés opposés.

L'attaque a lieu par engrenages. Les moteurs sont établis pour des tensions de 500, 600 et 850 volts, et leur réglage est obtenu simultanément au moyen du transformateur principal et du transformateur d'excitation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le freinage est le plus souvent assuré au moyen de freins pneumatiques du système Knorr. Chaque bogie moteur possède un cylindre de freinage avec un réservoir auxiliaire et chaque moitié de véhicule a un réservoir principal. Une conduite d'air spéciale est affectée à la commande des prises de courant. Outre les freins à air comprimé, il y a un frein électrique de sûreté et un frein à main.

Pour la protection des canalisations à haute tension, il est fait usage de parafoudres à cornes ou à rouleaux munis de bobines de réactance. Des dispositifs de sécurité sont en outre employés pour empêcher que les portes du cabinet soient ouvertes quand les frotteurs des prises de courant sont en contact avec les fils d'alimentation, lorsque ces portes viennent à être ouvertes. Sur les voitures équipées par la commande par unités multiples, les câbles aboutissent, à chaque extrémité, à deux boîtes de jonction, dont une sert de réserve.

Les voitures sont chauffées au moyen du courant ramené à la tension de 300 volts fourni par le transformateur principal : l'éclairage est alimenté par du courant semblable et les lampes de chaque compartiment sont branchées sur deux circuits différents.

Les appareils des voitures sont placés, en partie, dans les cabines du conducteur, en partie sous les planchers.

Dans les dépôts, la tension sur la ligne est parfois réduite à 300 volts. Un dispositif automatique spécial est alors prévu pour permettre d'utiliser les machines à cette tension.

Le mode de suspension employé couramment est le système caténaire. Sur le chemin de fer de la vallée de Stubaï (tension 2.500 volts), le câble porteur est en acier, de 5 millimètres de diamètre, et le fil de prise y est attaché de 4 mètres en 4 mètres. La plus grande portée est de 50 mètres correspondant à une tension maxima de 200 kilogrammes. Le fil de prise est normalement placé à $5^{m},50$ de hauteur ; de kilomètre en kilomètre, ainsi qu'à l'entrée et à la sortie des gares, on a placé des isolateurs et des interrupteurs de section (1).

L'éclissage électrique des rails est fait de façon fort simple et ne donne lieu à aucune dépense spéciale d'entretien.

Sur la ligne du chemin de fer de Hambourg-Altona, les véhicules em-

(1) Nous avons vu que, dans la suspension caténaire simple, le fil de trolley est supporté de telle façon que les points de suspension soient assez rapprochés pour éviter les déraillements de la perche du trolley, en assurant l'horizontalité du fil de travail. Ce résultat a été obtenu, sans multiplier le nombre de pylônes, par l'adjonction d'un câble porteur en acier prenant appui sur les pylônes par l'intermédiaire d'isolateurs et auquel est suspendu, par des fils d'acier, le fil de travail.

La suspension caténaire double permet, à l'aide de l'adjonction d'un fil intermédiaire ou auxiliaire, d'augmenter l'espacement des poteaux, tout en diminuant l'encombrement des fils verticaux de suspension. Le fil auxiliaire est suspendu au câble porteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ployés sont deux voitures accouplées suivant la méthode couramment utilisée sur le métropolitain et le chemin de fer local de Berlin. Chaque unité repose sur un bogie à quatre roues et sur un bogie simple, et les convois de grande longueur sont formés de plusieurs unités doubles. La puissance unitaire du moteur est de 115 HP à 600 tours par minute, 25 périodes, 750 volts. L'attaque se fait par engrenages dans le rapport de : 1 : 4,22, et la plus grande vitesse est de 50 kilomètres à l'heure, à 1.120 tours par minute. L'alimentation du parcours se fait de 6.000 à 7.000 volts.

Ligne de Dessau-Bilerfield. — Cette installation est particulièrement

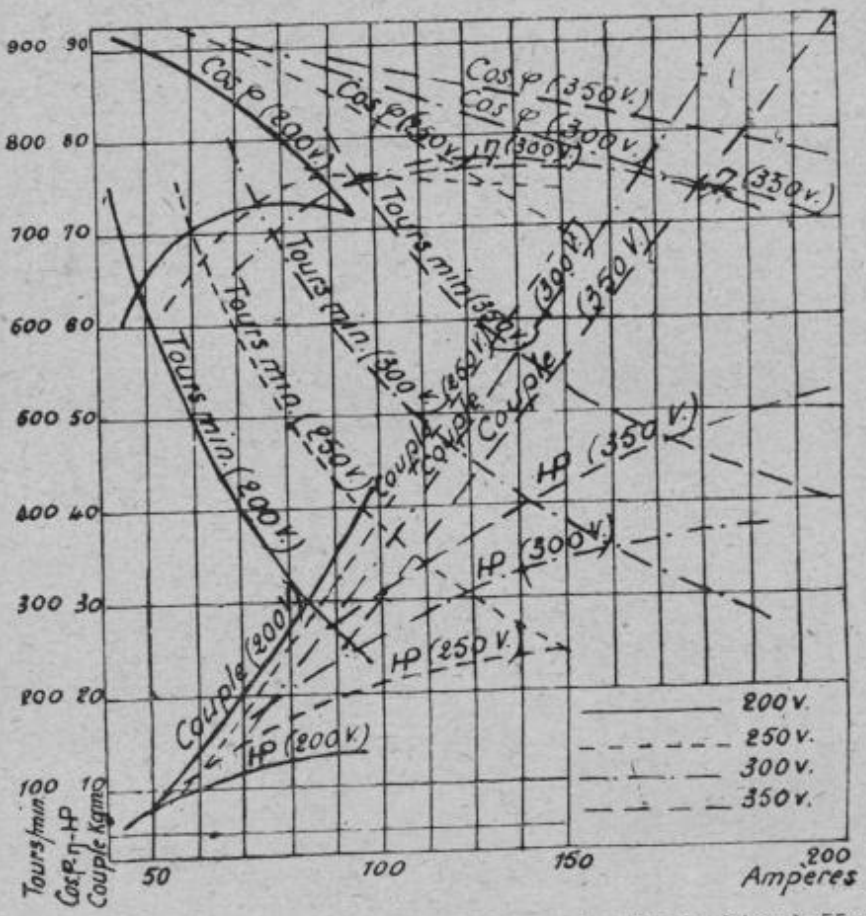


FIG. 1850. — Courbes caractéristiques du moteur monophasé à répulsion de 55 chevaux.

remarquable : l'énergie est produite en courant alternatif simple, 15 périodes seconde sous 3.000 volts.

---

par des fils verticaux appelés pendules, le fil de trolley étant lui-même suspendu à ce fil intermédiaire à l'aide de pinces spéciales.

Ce genre de suspension présente, en même temps qu'une grande stabilité, une souplesse remarquable augmentée encore par la tension constante du fil de cuivre tendu par des contrepoids placés sur des poteaux spéciaux. Un appareil de dilatation permet au fil et au contrepoids les mouvements que nécessite la dilatation par suite du changement de température.

En cas de rupture du fil de travail, tout danger est évité, car ce fil est lui-même suspendu par des agrafes aux câbles d'acier porteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les chaudières y sont établies d'après un tout nouveau système pour l'utilisation du lignite brut ou de briquettes. Le système de canalisations et de barres, avec les appareils de commande, de contrôle et de mesure sont établis en vue d'offrir le maximum de sécurité et les groupes électrogènes sont à signaler pour leur système de compoundage (Danielson) qui y est appliqué.

La transmission à câble souterraine comprend deux types de câbles, utilisés chacun pour 8.300 mètres de transport et établis pour pouvoir supporter une tension de 60.000 volts.

Ils sont formés tous deux de deux câbles simples. Pour l'un des types de câble il est en aluminium et à 100 mm² de section. Les boîtes d'extrémité de câble sont formées d'une partie inférieure en métal, d'une partie supérieure en porcelaine et d'un couvercle en métal, la partie inférieure étant soudée à la gaine du câble.

Au point de vue stratégique, la transmission en câble souterrain doit dominer toute autre considération.

Ligne des chemins de fer du Sud de la France. — Cette ligne de montagne à voie de 1 mètre présente des rampes continues de 60 millimètres par mètre (Lévens à Saint-Martin de la Vésubie).

Les châssis des automatiques fonctionnant en monophasé à 6.000 volts,

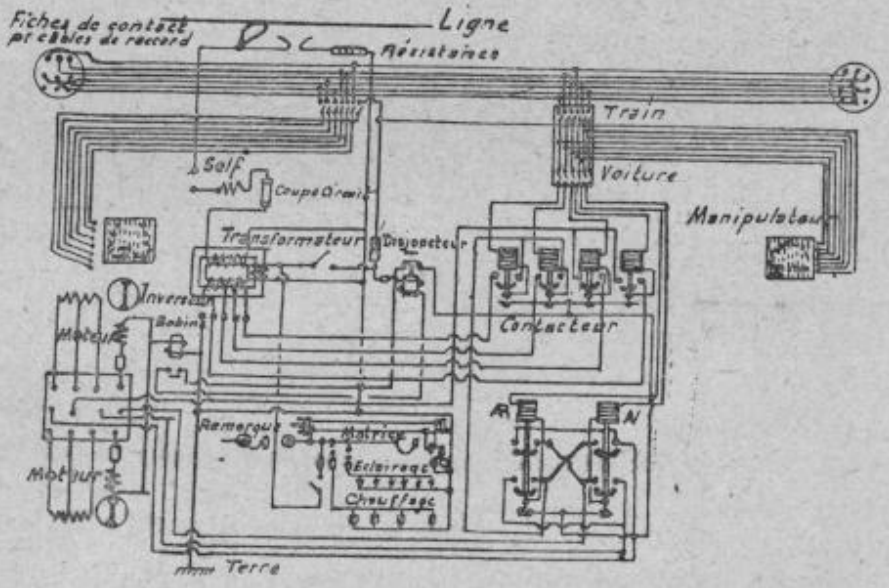


FIG. 1851. — Schéma des connexions du chemin de fer du Sud de la France.

25 périodes, sont du type Brill. L'équipement comporte deux moteurs de traction, un transformateur d'alimentation, un système de commande permettant l'accouplement de plusieurs véhicules et un compresseur d'air.

Les moteurs ont une puissance individuelle de 55 chevaux et sont montés en parallèle ; ils sont alimentés suivant la vitesse sous 180, 240,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

300 ou 350 volts et peuvent tourner à 1.100 tours. Le rendement sous la charge de 100 kilowatts est de 96,8 0 /0. On a eu recours pour la commande à un système à unités multiples par contacteurs.

Le dispositif d'ouverture automatique du circuit des moteurs en cas de surcharge ou de court-circuit est constitué par un relais qui commande la coupure du circuit d'alimentation.

636. Lignes mixtes. — COURANTS CONTINU ET MONOPHASÉ. — *Chemin de fer de New-York-Haven et Hartford.* — Sur cette ligne les locomotives

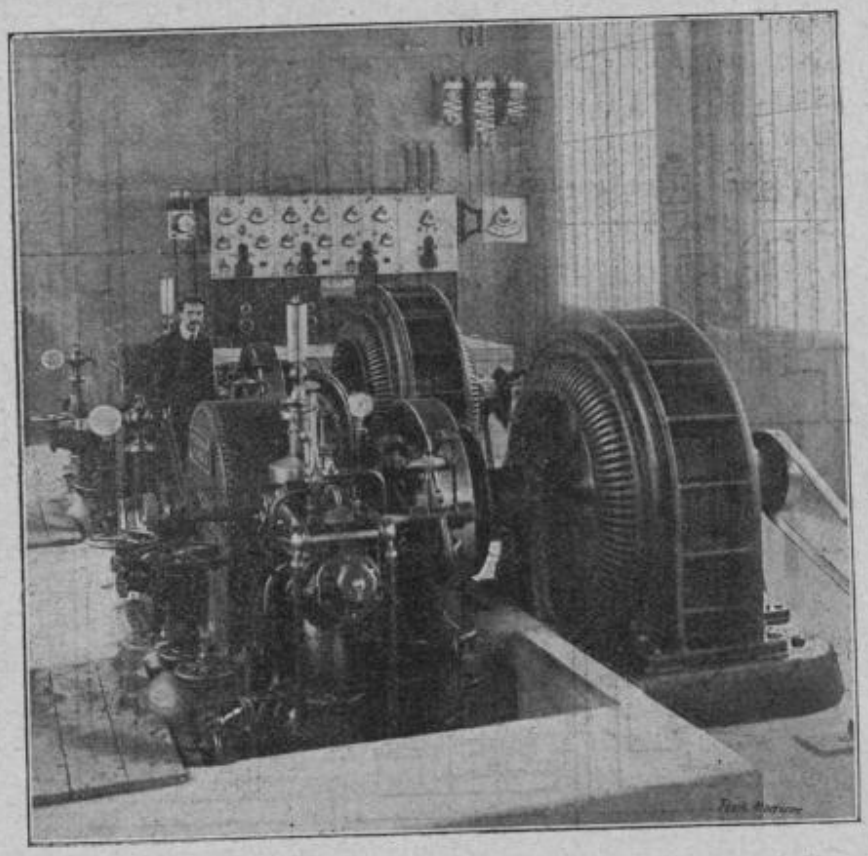


FIG. 1852. — Vue des groupes hydro-électriques de l'usine génératrice. Ligne du Somport.

marchent indifféremment en courant continu à 600 volts par troisième rail ou en monophasé à 11.000 volts par trolleys pantographes sans ralentissement dans la marche. Les alternateurs fournissent directement ce courant à 11.000 volts, et il n'y a aucune sous-station le long de la ligne. Les fils de trolleys sont soutenus tous les 100 mètres par des charpentes métalliques légères formant pont au-dessus des voies, et tous les 2 kilomètres une charpente forte assure l'ancrage des lignes. La suspension est du type caténaire double (*fig.* 1269). Tout l'ensemble du système des voies a été établi de façon à pouvoir résister aux conditions climatériques les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus dures résultant d'un vent violent ou d'une formation abondante de givre.

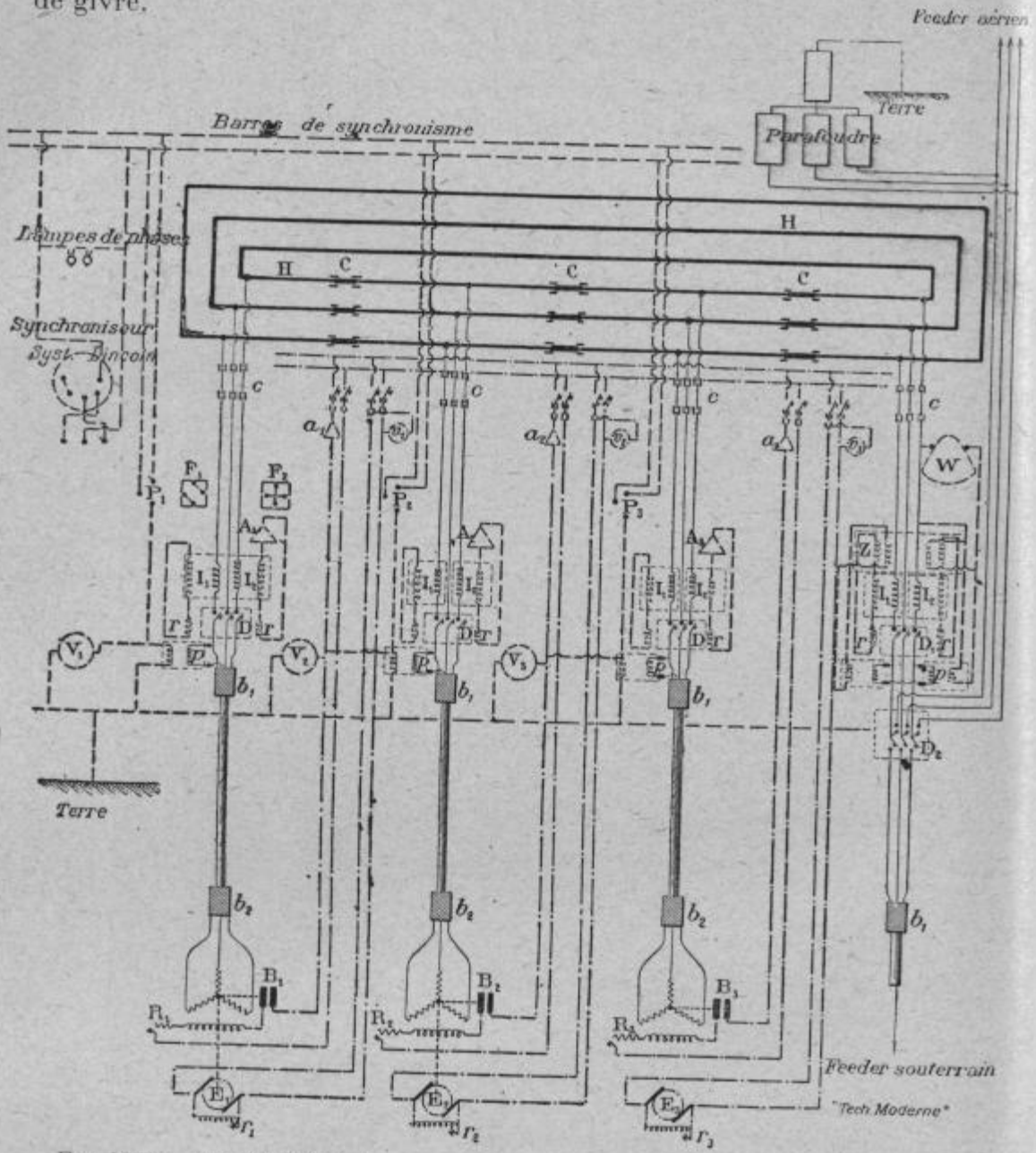


FIG. 1853. — Schéma général des connexions de l'usine génératrice de la ligne de Somport.

A_1, A_2, A_3, ampèremetres alternateurs nos 1, 2, 3; — a_1, a_2, a_3, ampèremétres excitation alternateurs nos 1, 2, 3; — B_1, B_2, B_3, bagues prises de courant excitation alternateurs nos 1, 2, 3; — b_1, boîtes de jonction arrivée des alternateurs; — b_2, boîtes de jonction départ des alternateurs; — C, couteaux de sectionnement des barres; — c, couteaux de sectionnement des circuits; — D, D_1, interrupteurs automatiques à l'huile; D_2, interrupteur à deux directions à l'huile; — E_1, E_2, E_3, excitatrices alternateurs nos 1, 2, 3; — H, barres omnibus haute tension; — F_1, fiche de la machine à synchroniser en marche; — I_1, transformateur intensité phase 1; — I_2 transformateur intensité phase 3; — P_1, P_2, P_3, plots de synchronisme alternateurs nos 1, 2, 3; — p, transformateurs de potentiel; — R_1, R_2, R_3, rhéostats d'excitation alternateurs nos 1, 2, 3; — r_1, r_2, r_3, rhéostats d'excitation excitatrices nos 1, 2, 3; — r, relais de commande des interrupteurs; — V_1, V_2, V_3, voltmètres alternateurs nos 1, 2, 3; — v_1, v_2, v_3, voltmètres excitation alternateurs nos 1, 2, 3; — W, voltmètre lumineux; — Z, compteur.

Nota. — Les connexions ———— indiquent la haute tension; les connexions — — — indiquent la basse tension; les connexions — . — . indiquent le courant continu.

Le matériel électrique comprend 35 locomotives de 85 tonnes équipées

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec 4 moteurs monophasés développant 200 HP en service normal. Ces moteurs sont placés directement sur les essieux, leur induit étant rendu solidaire des roues par sept tenons s'engageant dans des trous *ad hoc* réservés dans les rayons de ces roues. L'induit des moteurs et les roues forment donc un ensemble rigide.

Les locomotives sont prévues avec deux postes de commande dont un à chaque extrémité.

La vitesse des moteurs est réglée par la méthode ordinaire série-parallèle avec intercalation de résistances et shuntage graduel des inducteurs ; son contrôle sous courant alternatif se fait par le réglage du voltage envoyé aux bornes des moteurs. Le courant passe dans deux autotransformateurs à refroidissement par air qui abaissent la tension et qui portent au secondaire six prises de courant permettant d'alimenter les moteurs sous différentes tensions.

Les locomotives sont munies du système de contrôle électro-pneumatique à unités multiples. L'équipement de chacune d'elles comprend en outre deux compresseurs électriques fournissant l'air comprimé pour les freins, la manœuvre des contacteurs, trolleys et frotteurs de prise de courant, deux ventilateurs pour le refroidissement des moteurs, des transformateurs et des rhéostats, des interrupteurs à courant continu et à haute tension, etc.

L'usine génératrice comprend trois groupes turbo-alternateurs Westinghouse ayant une capacité de 3.750 kilowatts en monophasé et de 5.500 kilowatts en triphasé. Les alternateurs sont bipolaires tournant à la vitesse de 1.500 tours et sont enroulés pour produire indifféremment ces deux sortes de courant en changeant les connexions. Le courant est débité directement à 11.000 volts 25 périodes et transmis sous cette tension au fil du trolley. Pour la partie de la ligne qui fonctionne avec du courant continu (entre New-York et Woodlawn), le courant est fourni par le New-York central.

Le chemin de fer de New-York-New-Haven et Hartford est, comme on le sait, un des plus grands réseaux de l'est des États-Unis. En 1907, la partie électrifiée avait une longueur de 84 kilomètres ; le fonctionnement de l'installation a été en tous points satisfaisant, et la Compagnie a commandé à la Société Westinghouse, au début de l'année 1908, six nouvelles locomotives semblables aux trente-cinq déjà en service.

Locomotive électrique à converlisseur Ward-Léonard. — Les ateliers Oerlikon ont fourni pour le réseau des chemins de fer fédéraux une locomotive du type Ward-Léonard, alimentée sous courant monophasé, lequel est transformé sur la locomotive même en courant continu de tension variable pour l'alimentation des moteurs. Ce système présente des avantages : 1° lorsque le profil en long de la ligne offre de telles dénivella-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions qu'il y a intérêt à récupérer le travail de freinage sur de longs parcours, soit dans un seul, soit dans les deux sens de marche ; 2° quand il importe d'épargner la puissance de la centrale et que les démarrages et les arrêts sont fréquents.

De plus, le système Ward-Léonard s'accommode de toutes les périodicités, et, jusqu'à 6.000 volts, le courant du fil de prise peut être fourni directement au moteur du groupe convertisseur.

La locomotive possède deux bogies moteurs, et les deux essieux de chaque bogie sont actionnés, par l'intermédiaire d'une double réduction de vitesse à engrenages, par un moteur à courant continu. Les deux moteurs reçoivent le courant d'une génératrice mise en mouvement par un moteur asynchrone monophasé qui est couplé directement avec elle ; ce courant d'excitation des moteurs est produit par un petit groupe transformateur.

Un transformateur statique fournit du courant monophasé à cette tension à ce groupe aussi bien qu'à un petit moteur qui actionne un compresseur d'air.

L'excitation séparée de la génératrice et des moteurs à courant continu facilite le réglage et la variation des vitesses à réaliser ; le démarrage du groupe principal se fait au moyen de la dynamo démarrant, elle-même, sous l'action du courant produit dans le petit groupe.

La prise de courant sur ligne aérienne à haute tension peut prendre différentes positions, et le mécanicien commande de la cabine cette tige frottante.

Le montage d'une telle ligne électrique peut se faire sans interruption d'un service à vapeur.

La locomotive pèse 44 tonnes ; la puissance moyenne à l'arbre est 520 HP et le maximum 1.100 HP ; la puissance moyenne du moteur à courant continu est de 95 HP et la puissance maxima 200 HP. Le rapport de transmission des engrenages est de 1 : 3,5.

La mise en vitesse et le réglage se font en intercalant des résistances dans les circuits inducteurs de la dynamo principale et des moteurs. Les mêmes rhéostats des moteurs servent à produire les freinages avec récupération d'énergie.

Pour un train de 170 tonnes, lors d'un freinage abaissant la vitesse du convoi de 65 kilomètres à l'heure à 27 kilomètres, les pertes sont de 180 HP ; néanmoins déduction faite de la perte provenant des frottements des trains entiers, on récupère 280 HP, et comme l'arrêt dans ces conditions est de 52,5 secondes, la puissance économisée est de 3 kilowatts-heures. Sur une pente de 1 0/0 descendue à la vitesse de 65 kilomètres à l'heure, on récupère 0,8 kilowatt-heure par minute de descente.

Les ateliers de construction Oerlikon équipent actuellement le chemin

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de fer électrique de Locarno à Bignasco avec des locomotives à convertisseur ; le matériel roulant comprend des automotrices à quatre essieux et ayant chacune quatre moteurs de 40 HP ; la tension de la ligne monophasée est de 500 volts.

Dans les voitures à traction électrique, qui tantôt sont alimentées par du courant alternatif et tantôt par du courant continu, il faut avoir soin que la fermeture de l'interrupteur principal à courant continu ne se produise pas sur le parcours où l'alimentation se fait par courant alternatif. Ce problème a été résolu par l'Allgemeine Elektricitats-Gesellschaft (*fig.* 1854) de la manière suivante : elle branche la bobine primaire d'un transformateur *l*, dont l'enroulement secondaire alimente l'interrupteur F qui met les moteurs sur le conducteur à courant alternatif, devant la bobine magnétique *b* qui a pour but de fermer l'interrupteur principal à courant continu B, de sorte que le courant alternatif à haute tension n'est capable d'exciter que faiblement cette bobine *b*, et par suite il ne peut se produire de fermeture de l'interrupteur B durant le parcours à courant alternatif. Or, pour empêcher dans tous les cas la fermeture de l'interrupteur principal à courant continu sous l'effet des à-coups de courants alternatifs violents, la firme en question place sur les aimants de l'interrupteur principal à courant continu B une lame de court-circuit *z*. Cette dernière n'entrave nullement l'efficacité de l'interrupteur B en service à courant continu, par contre elle agit en opposition en amortissant le champ alternatif dans le noyau de l'électro-aimant et empêche par suite l'attraction de l'armature et la fermeture de l'interrupteur B lors même que dans sa bobine *b* s'écoulerait un courant alternatif intense, soit par suite d'un court-circuit dans l'enroulement primaire du transformateur *l*, soit pour toute autre cause.

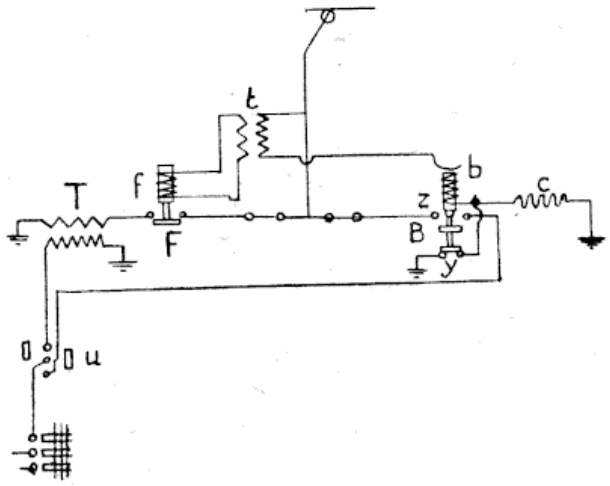


FIG. 1854.

M. Sakulka (1) a préconisé deux nouveaux systèmes de traction par courant alternatif (mono et triphasé), qui ne nécessitent pas pour la régulation le passage du courant principal dans les résistances de réglage.

Soit un moteur M dont les deux organes sont mobiles, et que l'on

(1) *Elecktrotechnische Zeitschrift*, 29 août 1907.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appellera moteur principal ; l'un des organes B (*fig.* 1855) commande l'essieu moteur A, et l'autre C actionne une génératrice shunt à courant continu fournissant du courant à un moteur F calé sur le même arbre que l'organe intérieur B. La puissance des machines D et F n'est alors que la moitié de celle du moteur M ; la vitesse relative des organes de celui-ci est toujours normale et indépendante, au glissement près, de la vitesse de l'essieu moteur A ; la vitesse de celui-ci est réglée au moyen du rhéostat d'excitation E de la dynamo D.

Le moteur M peut être alimenté directement par la haute tension et le courant est amené à l'organe C au moyen des bagues R. D'autres bagues S peuvent également servir au démarrage du moteur M, mais elles ne sont pas indispensables, le moteur démarrant à vide.

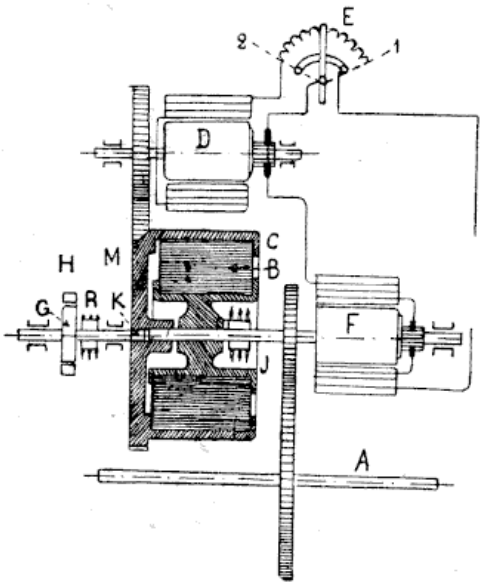


FIG. 1855.

Plus l'excitation de D sera forte, et plus le démarrage sera énergique. D'ailleurs, pendant ce démarrage, une grande partie de la force vive emmagasinée dans l'ensemble C et D se trouve transformée en énergie électrique et sert ainsi à augmenter le couple moteur.

Une fois le démarrage opéré, le moteur M donne directement la moitié de sa puissance, tandis que l'autre moitié se trouve transmise indirectement au moyen du système DF. On conçoit que le rendement soit très bon à tout régime.

Si l'on veut augmenter encore la vitesse après suppression de la résistance E, on peut bloquer l'organe C à l'aide du frein, après avoir coupé le circuit. Cette rupture peut être effectuée par la manœuvre du rhéostat E lui-même, lorsqu'il occupe la position limite ; en utilisant une commande à air comprimé, il est facile d'obtenir le freinage de C par la même manœuvre.

Le système en question permet la récupération, lorsque le moteur M est un moteur d'induction ou un moteur shunt à courant continu ; quand l'organe C est freiné, cette récupération s'opère alors, suivant le mode ordinaire.

Pour les vitesses faibles, le frein étant desserré, on doit exciter séparément le moteur F : il devient alors générateur. La machine D se trouvant réceptrice et la vitesse relative des organes B et C dépassant le synchronisme, le moteur M fournit de l'énergie au réseau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après son auteur, le système précédent est supérieur au système Ward-Léonard en plusieurs points.

Les machines D et F n'ont que la moitié de la puissance du moteur M ; le couple de démarrage est augmenté par la perte de force vive du système CD ; on peut obtenir une commande directe par le moteur principal M sans intermédiaire d'appareil transformateur ; enfin la récupération est aisée, même aux faibles vitesses.

Vis-à-vis du système triphasé ordinaire, le système présent a l'avantage de posséder un meilleur rendement, de n'exiger aucune résistance de démarrage parcourue par des courants intenses, et de permettre un réglage aisé de la vitesse.

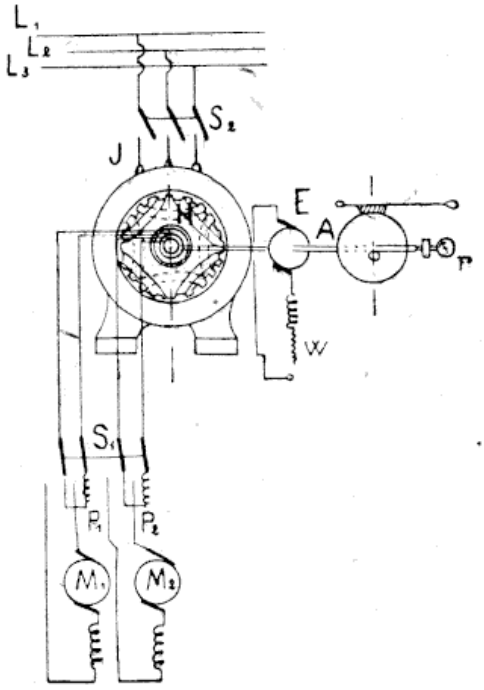


FIG. 1856.

Avec le deuxième système proposé par l'auteur (*fig.* 1856), l'essieu moteur est entraîné par un moteur à collecteur ou à champ tournant. L'inconvénient dû au passage de courants intenses dans les bobines de l'induit en court-circuit sous les balais des moteurs à collecteur est ici fortement atténué par l'emploi d'un moteur d'induction comme transformateur : au démarrage, la fréquence est très faible, et elle augmente au fur et à mesure que l'on freine le moteur d'induction transformateur.

A la fin du démarrage, ce moteur est complètement freiné et devient un transformateur ordinaire. Le freinage du moteur d'induction peut aussi être utilisé pour augmenter le couple, grâce à l'emploi d'un embrayage par frein à courants de Foucault. Cet embrayage permet également la récupération pendant la période précédant l'arrêt du train.

Au lieu de moteurs à collecteur, on peut également employer des moteurs à champ tournant ; dans tous les cas, il n'est fait usage d'aucune résistance de démarrage.

Si l'on ne se sert pas de l'embrayage mentionné ci-dessus, le rendement du système est du même ordre que celui de la méthode de régulation par rhéostat sur le courant principal ; il serait bien meilleur avec cet embrayage.

La régulation de la vitesse peut être opérée d'une manière très progressive.

Dans le cas de l'alimentation par courant triphasé, le rotor du moteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'induction est muni d'un rotor diphasé alimentant au moyen de bagues deux moteurs monophasés série.

Pour le démarrage du moteur d'induction, un commutateur double permet de fermer le rotor sur des résistances. Une fois ce démarrage effectué, on freine progressivement le rotor au moyen d'un frein mécanique après avoir manœuvré le commutateur ; la fréquence et la tension aux bornes des deux moteurs augmentant peu à peu, ceux-ci démarrent ; un desserrage de frein procure inversement une diminution de vitesse.

La différence de ce dernier système, avec le dispositif Siemens-Schuckert (emploi d'un moteur d'induction comme convertisseur de fréquence et de tension pour l'alimentation de moteurs asynchrones), est que le freinage du convertisseur est opéré à l'aide d'un deuxième moteur d'induction tendant à tourner en sens inverse et restituant ainsi une partie de l'énergie du freinage au réseau.

637. Locomotives électriques pour la traction sur les canaux. — Dans l'état actuel, les seuls appareils pratiques pour le halage des bateaux sont ceux qui remorquent ces derniers en se déplaçant sur la berge. On les divise en deux grandes catégories : les tracteurs et les locomotives.

La supériorité de ces dernières, c'est-à-dire de la traction sur rails, sur la traction sur berges au moyen de tracteurs, est aujourd'hui complètement reconnue.

En effet, la traction sur rails permet le halage des bateaux par tous les temps de jour et de nuit, tandis que la traction sur berges oblige de cesser tout service par les temps de neige, verglas, temps humide d'hiver rendant le terrain glissant.

L'entretien de la voie, y compris le renouvellement des traverses, ne dépasse pas 500 francs par an et par kilomètre, alors que l'entretien de la chaussée exige une dépense presque double, et les frais de personnel sont aussi moitié moindres dans le cas de la traction sur rails.

Sur les canaux de l'Aire et de la Deule, près de Douai, et sur une section du canal de Charleroi à Bruxelles, la Compagnie électrique du Nord emploie des locomotives à voie de 1 mètre pesant $8^{t},5$ en ordre de marche.

Ces locomotives, qui sortent des usines de Jeumont, sont munies de deux moteurs série de 30 HP, courant continu à 500 volts, attaquant chacun un essieu par un double engrenage avec une réduction totale de 14,42.

La vitesse avec deux, trois ou quatre bateaux, d'un tonnage de 290 tonnes chacun, varie de 3 kilomètres à $3^{km},800$ à l'heure.

La consommation est de 15 à 23 ampères et l'effort au crochet de trac-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion, de 700 à 1.000 kilogrammes. Le rendement moyen est toujours supérieur à 0,70.

Les locomotives de halage du canal de Teltow, construites par la firme Siemens et Halske, sont dissymétriques, aussi bien dans le sens du mouvement que dans le sens transversal.

Le poids total de chacune est de 8 tonnes, dont $7^t,050$ reposant sur un truc moteur à quatre roues à l'avant, et $0^t,950$ sur un essieu guide placé à l'arrière. La voie est à l'écartement de 1 mètre et les deux essieux du truc, espacés de 1 mètre, sont actionnés chacun par un moteur de 16 HP, courant continu, 500 volts. Ces locomotives remorquent des charges de 1.500 tonnes à des vitesses allant jusqu'à $4^{km},5$ et avec un rendement de 0,75.

La vitesse de remorquage des bateaux est limitée à 3 ou 4 kilomètres à l'heure par des conditions indépendantes de la puissance du tracteur, ou de la locomotive, telles que : effet destructif du remous sur les berges, difficulté de gouverner et augmentation excessive de la résistance.

Pour se présenter dans des conditions économiques viables, la traction doit s'opérer par rames comportant le plus grand nombre de bateaux compatible avec la sécurité de marche et il faut traîner les bateaux par rames d'au moins trois ou quatre. La traction par rames permet de réduire le matériel, d'où économie de frais d'entretien et de personnel, elle conduit aussi à une économie d'énergie électrique, car la puissance dépensée par tonne kilométrique remorquée diminue ainsi très notablement, le premier bateau ouvrant en quelque sorte le chemin aux autres.

III. — EXPLOITATION DES TRAMWAYS

638. Stations centrales et sous-stations. — Dans les usines pour la fourniture de l'éclairage, le nombre de kilowatts-heure consommés par les abonnés n'est guère que le quart ou le tiers de celui que l'usine peut fournir en marche à pleine charge. On a, en été, une charge maxima entre neuf et dix heures du soir avec un facteur de charge de 25 à 30 0/0. En décembre, la charge maxima a lieu entre cinq et six heures du soir avec un facteur de charge de 40 à 50 0/0. Les usines de traction diffèrent notablement de celles destinées à la distribution de l'éclairage, en ce sens qu'elles doivent assurer un service de dix-huit heures à vingt heures par jour, avec une demande d'énergie très irrégulière, et pendant presque toute la journée être capables de fournir au réseau la puissance maxima qui peut être réclamée à tout instant.

Une centrale de traction a son maximum de charge en été, spécialement les dimanches des mois de juillet et d'août, et c'est précisément à ces mo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ments que la consommation d'énergie pour la lumière est moindre. En décembre, la charge maxima se produit vers cinq heures du soir avec un facteur de charge de 45 à 50 0/0, et en été vers deux heures du soir avec un facteur de charge de 80 0/0 environ. La station centrale combinée ayant un facteur de charge constant de 55 à 60 0/0, on voit que cette solution présente un intérêt économique très sérieux.

La (*fig.* 1857) donne le diagramme d'une usine pour lumière et traction en décembre, dans lequel le facteur de charge n'est que de 38 0/0. Le maximum de la production est de 3.700 kilowatts, la moyenne journalière 1.400 kilowatts et le rapport du maximum à la moyenne, 2,64.

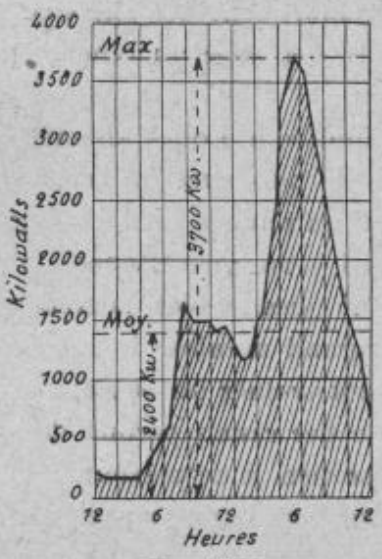


FIG. 1857.

Ce système d'exploitation mixte permet de réaliser des bénéfices suffisants, alors que les deux services se présentent isolément sous un aspect financier assez fâcheux. D'après certaines données, il résulterait qu'une usine mixte, dépensant une moyenne à peu près égale pour la traction et l'éclairage, entraîne à une réduction de 1/3 à 1/4 du prix courant, s'il était seulement fourni pour l'une ou l'autre de ces applications.

Ce genre d'installation appelle par suite une grande élasticité dans la composition des appareils qui le constituent. Il demande des machines ayant un rendement satisfaisant à toutes les charges et bien conçues en vue de leur réparation immédiate en cas d'accident.

Les génératrices doivent être capables de supporter de grands à-coups et parfois aussi des courts-circuits. Ces derniers sont d'autant plus sérieux que la fréquence, dans le cas de courant alternatif, est plus basse. Mais les génératrices à 15 périodes sont de 30 0/0 à 20 0/0 plus lourdes et plus chères que celles à 25 périodes. D'autre part, l'équipement des stations centrales avec du courant à 15 périodes revient plus cher qu'avec du courant à 25 périodes, mais le réseau à 25 périodes est plus coûteux que celui à 15 périodes (1).

(1) En ce qui concerne le courant monophasé, à l'heure actuelle, les fréquences utilisées pour les moteurs de traction sont 15 et 25 périodes à la seconde. La fréquence 25 est très favorable si le poids est calculé de façon à atteindre la limite d'adhérence et quand la commande a lieu par engrenages. L'emploi de la fréquence 15 est plus commode pour la construction des moteurs à collecteur de toute catégorie ; elle paraît s'imposer pour la traction lourde. Au point de vue exploitation, les faibles fréquences, pour le courant monophasé, sont plus économiques, et pour le courant triphasé les fréquences plus élevées sont plus profitables.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quant aux surcharges, si on veut avoir un bon service d'exploitation, il est préférable, plutôt que de fatiguer les machines du service courant, de faire appel à un groupe de secours, qui peut, d'ailleurs, entrer

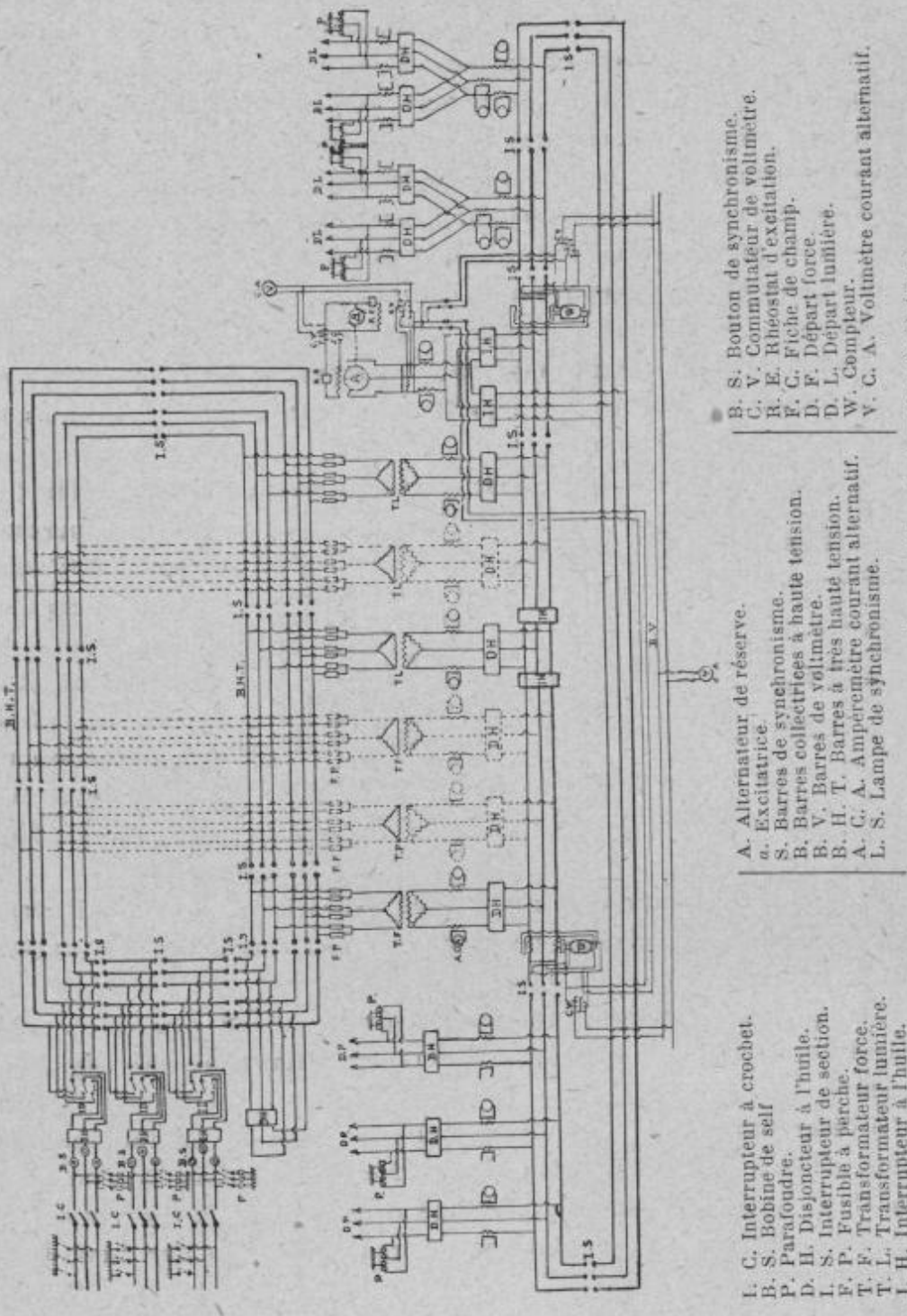


Fig. 1858. — Schéma des connexions d'une station de traction électrique.

en fonction dans le cas d'avarie à l'un des groupes électrogènes de l'usine.

Au point de vue spécial de l'utilisation des chutes d'eau pour l'alimen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tation des usines de tramways, et dans le cas d'une transmission d'énergie à grande distance, la puissance pour l'actionnement des trains est le plus souvent fournie par l'intermédiaire d'une sous-station où a lieu la transformation du courant alternatif en courant continu. Dans ce dernier cas, on peut disposer une batterie d'accumulateurs, soit à la sous-station, soit à l'extrémité de la ligne de tramway, qui a pour but d'équilibrer les charges des génératrices et de réduire les pertes en ligne. Une bonne précaution est de donner aux accumulateurs une capacité telle qu'ils puissent assurer à eux seuls le service pendant une heure ou deux.

La puissance maxima est celle qui correspond à la mise sur le réseau du nombre maximum de voitures et dans les positions les plus critiques (patinage en rampes, démarrage en courbes, etc.). Sur les lignes à départs fréquents et comportant un réseau de 60 à 200 voitures, le rapport de la charge maxima à la charge moyenne est compris entre 1,50 et 2. Pour les lignes interurbaines, à peu de départs, à parcours longs et accidentés, ce rapport se tient entre 4 et 6.

Le diagramme de la (*fig.* 1859) a trait au réseau de la Valteline ; la puissance maxima est de 1.800 kilowatts ; la puissance journalière de 500 kilowatts, et le rapport du maximum à la moyenne, de 3,6. Quant au facteur de charge, il est de 0,28.

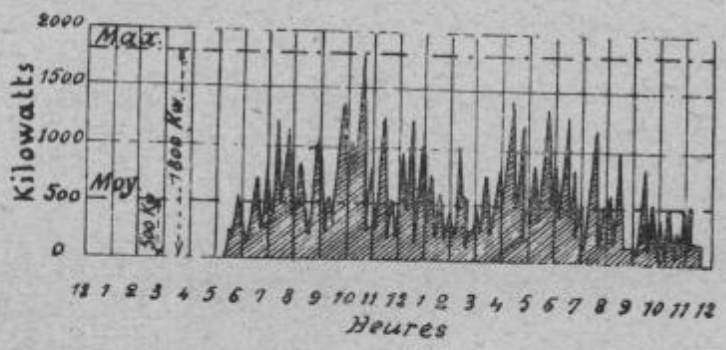


FIG. 1859.

On sait que la rentabilité d'une usine hydroélectrique dépend avant tout d'un facteur de charge élevé, pour pouvoir concurrencer la vapeur ou toute autre énergie calorifique.

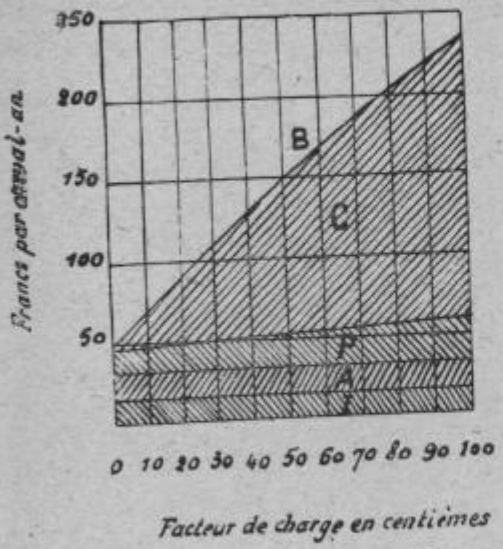
Si le facteur de charge d'une usine hydraulique est peu élevé, cette concurrence est faible, ainsi qu'il ressort des diagrammes des (*fig.* 1860 et 1861).

Le diagramme de la (*fig.* 1860) donne les dépenses totales annuelles d'une machine à vapeur en fonction du facteur de charge et celui de la (*fig.* 1861) les mêmes dépenses pour une usine hydraulique (y compris les dépenses relatives à la canalisation de transport). Le diagramme de la (*fig.* 1862) fournit la comparaison des deux autres. On voit que, dans ce cas, l'usine hydraulique n'est avantageuse que pour un facteur de charge dépassant 18 0/0.

Le rendement des canalisations directes étant généralement de 90 à 93 0/0, celui des lignes de feeders de 85 à 90 0/0 ; pour un train pesant

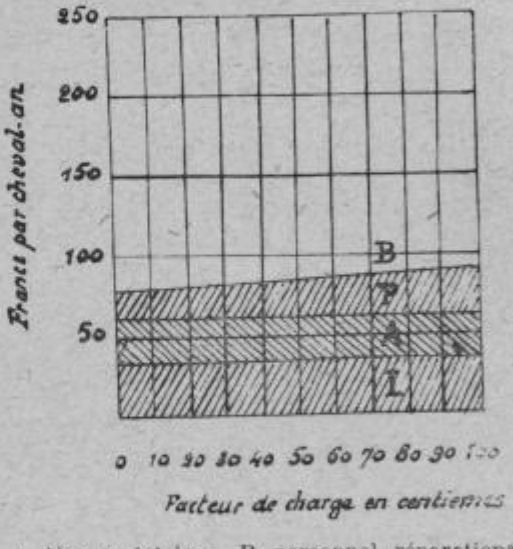
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

P tonnes (le rendement des moteurs avec engrenages pouvant être pris égal à 70 0/0), on a comme consommation moyenne d'énergie par kilo-



B, dépenses totales. — C, charbon. — P, personnel. — A, amortissements. — I, intérêts.

FIG. 1860. — Dépenses en francs par cheval-an en fonction du facteur de charge dans une usine à vapeur.



B, dépense totale. — P, personnel, réparations A, amortissements. — I, intérêts.

FIG. 1861. — Dépenses en francs par cheval-an en fonction du facteur de charge dans une usine hydraulique.

mètre, la ligne n'ayant pas de déclivité supérieure à 30 millimètres :

$$\text{W kilowatts-heures} = \frac{\text{P} \times 0{,}055}{0{,}70 \times 0{,}90 \times 0{,}85},$$

en comptant sur une dépense de 55 watts-heures par tonne kilométrique de train déplacé, ce travail étant mesuré à la jante de la roue et correspondant à un effort moyen de traction de 18 kilogrammes par tonne (1).

Il est intéressant de rechercher la charge maxima que peut remorquer un tracteur. Soient : P le poids de l'un des véhicules remorqués, P′ le poids du tracteur, R, la somme des résistances par tonne du tracteur et

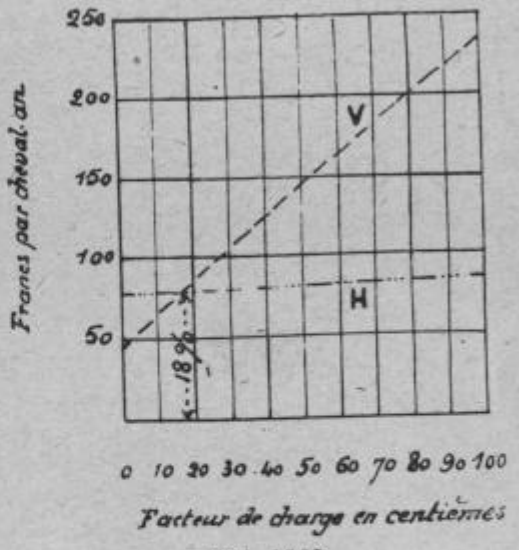


FIG. 1862.

(1) D'après M. Eric Gérard, à l'installation de la Valteline, qui comporte 76 stations sur un trajet de 25 kilomètres, des courbes de 300 mètres de rayon et des rampes de 10 0/0, on a relevé par tonne kilométrique 35 watts-heures seulement à la centrale. Cette intéressante assertion de l'éminent électricien belge est d'autant plus remarquable que le facteur de charge de cette centrale n'est que de 30 0/0, et le rapport de la charge maxima à la charge moyenne, 3,6.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la remorque, R_m la résistance propre du mécanisme moteur, P'' le poids adhérent du tracteur et f le coefficient d'adhérence.

On posera :

$$P \leqslant \frac{fP' - R_m}{R_s} - P'.$$

Dans cette formule, toutes les valeurs sont exprimées en kilogrammes.

Lorsque les stations centrales servent à la fois à l'éclairage et à la traction, le réseau de l'éclairage fonctionne soit sous la tension de la ligne de

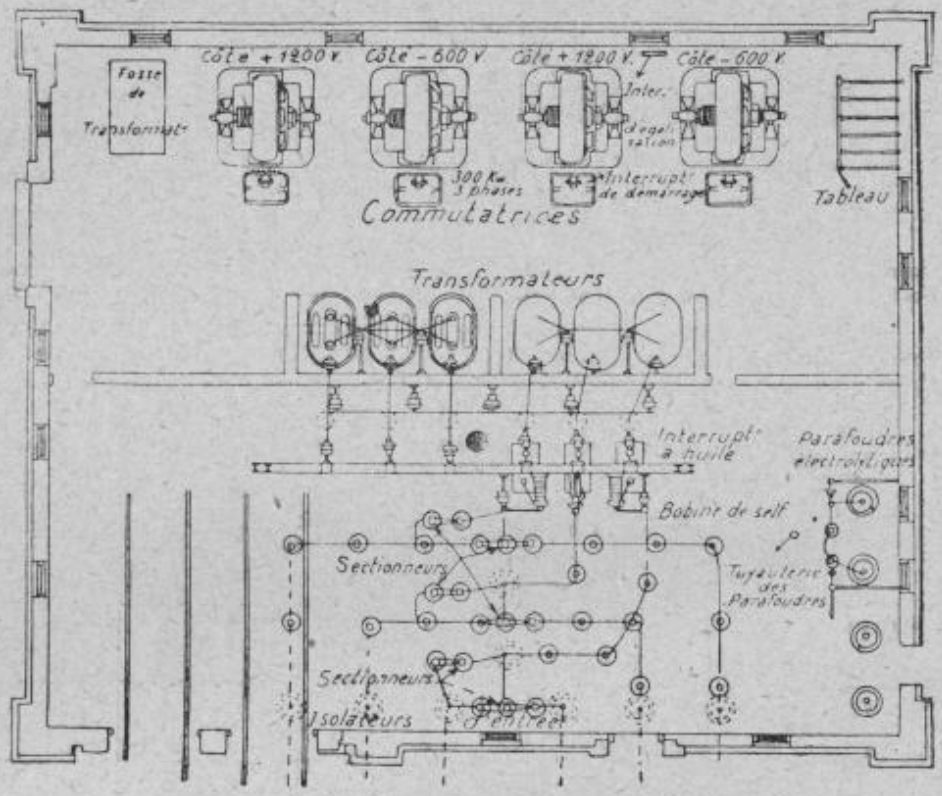


FIG. 1863. — Réseau de Milvau Kee. Vue en plan des sous-stations types East Troy et Burlington.

tramway, soit sous une tension réduite au moyen de convertisseurs rotatifs placés ou à l'usine, ou dans des sous-stations. Cette manière de faire permet d'obtenir une meilleure utilisation du matériel et du personnel. Les mêmes groupes de machines peuvent alimenter à la fois les deux réseaux, et on régularise le service par des batteries-tampons placées en des points convenablement choisis.

Nous avons dit qu'en cas de hautes chutes l'emploi de réserves hydrauliques naturelles, de dimensions relativement faibles et d'installation économique, permettait de doubler et même de quadrupler la fourniture en énergie d'une usine.

Si, incontestablement, les réserves naturelles constituent un appoint

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de premier ordre pour la régularité de marche d'une usine hydraulique, il ne faut pas, quand on n'a point un si précieux secours à sa disposition, négliger de faire néanmoins appel à une accumulation artificielle, dont le rendement est de moitié inférieur environ à celui de l'accumulation naturelle. Un modèle d'installation de ce genre est celui de Olten-Aarburg (Suisse) nsine pour la fourniture de la lumière, où on arrive à utiliser de 45 à 60 0/0 de l'énergie totale annuelle.

En ce qui concerne les usines de traction hydroélectriques, les dimensions des réservoirs artificiels auxquels on pourra recourir sont plutôt petites, car ici les périodes d'accumulation et d'emploi se succèdent rapidement, et les maxima et les minima de la puissance alternent fréquemment. En effet, l'examen des diagrammes des centrales de traction montre que les surfaces positives et négatives qui se suivent s'équilibrent fréquemment et n'entrent pas en ligne de compte pour l'évaluation de la réserve.

Nous avons indiqué les moyens mécaniques préconisés pour augmenter artificiellement la hauteur d'une chute à l'aide de pompes qui montent l'eau dans un réservoir élevé, pendant les heures de faible consommation, pour être utilisée sur les turbines lors des périodes de forte consommation. Pour pouvoir faciliter la construction du réservoir hydraulique et pour réserver les droits des riverains de l'aval et ne pas les priver d'eau pendant des périodes déterminées, M. Golwig suggère d'installer à l'aval de l'usine un réservoir de même volume que celui de l'amont, que l'on peut désigner sous le nom de réservoir de compensation, et de disposer les choses de manière qu'à chaque instant le réservoir d'aval fournisse à la rivière le même débit que celui absorbé par le réservoir d'accumulation. Il suffit donc de remplir une fois pour toutes le réservoir d'aval pour que la régulation soit complète et définitive.

L'installation de la régulation peut être effectuée de diverses manières et aussi bien pour une accumulation naturelle que pour une accumulation artificielle. S'il s'agit d'une installation importante, à l'amont du réservoir d'accumulation et à l'aval du réservoir compensateur, sur une certaine longueur de canal, de sorte que les écoulements soient identiques, on dispose des flotteurs agissant électriquement sur des relais mettant en action le moteur des vannes de décharge de la chambre de compensation, de sorte que le débit aval augmente et le flotteur correspondant remonte. Quand, au contraire, le débit amont est plus faible que celui d'aval, le relais fait fonctionner le moteur de manière que la vanne ferme. Ce dispositif peut être employé dans le cas de l'accumulation artificielle, en s'arrangeant pour que le réservoir de compensation restitue à chaque instant autant d'eau qu'en emmagasine le réservoir d'accumulation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

639. Modes d'exploitation. — Frais de construction et d'exploitation. — La tendance actuelle est aux installations avec zones limitées, en raison de l'économie de ce système qui permet l'uniformisation des charges entre les différents feeders et, par suite, la réduction des pertes de tension. De plus, il se prête à l'alimentation d'un secteur hors courant par les secteurs adjacents ; il empêche les défauts, qui peuvent se manifester dans un secteur, d'influencer les secteurs voisins dans lesquels le service n'est pas arrêté, et, par conséquent, enfin, il permet une localisation facile au point défectueux, en cas de dérangement.

Cependant l'emploi d'interrupteurs automatiques, éventuellement avec fusibles, dans un but de réunion des zones et des sections, pourrait peut-être réunir les avantages du système ci-dessus et du procédé par non-sectionnement, sans en présenter les inconvénients relatifs. Des expériences prolongées dans ce sens seraient d'un haut intérêt.

Une répartition judicieuse du service dans une exploitation quelque peu importante est un point capital pour la réussite financière des affaires de ce genre. Cette répartition ne doit pas seulement comprendre une étude des besoins suivant les diverses saisons, mais aussi et surtout de ceux momentanés du public. Cette étude est de longue haleine, et elle est toujours le résultat de laborieux tâtonnements et de patientes recherches, poursuivies pendant plusieurs années.

Dans l'établissement des horaires de service, on est astreint à tenir compte des règlements administratifs, dont les prescriptions fixent les vitesses limites dans les tronçons de lignes. Pour les rues fréquentées, on dépasse rarement 8 à 9 kilomètres à l'heure (vitesse commerciale) ; aux endroits où la circulation est moins intense, la vitesse peut monter à 10 ou 12 kilomètres pour s'élever à 15 kilomètres dans la banlieue et même 20 kilomètres en rase campagne. A ce sujet, nous rappellerons que l'exploitation des chemins de fer d'intérêt local et des tramways empruntant le sol des voies publiques est réglementée en France par le décret du 6 août 1881, modifié par celui du 13 février 1900, qui fixe à 25 kilomètres à l'heure la vitesse maxima, lorsque le matériel est pourvu de freins continus.

Deux des facteurs les plus importants du prix de revient kilométrique de la voiture sont la consommation de courant et le salaire des employés et agents. Il convient de remarquer que le temps pendant lequel une voiture stationne est un temps en partie perdu ; on a donc intérêt à faire les stationnements aussi courts que possible. En faisant parcourir aux voitures le trajet complet d'une extrémité à l'autre sans arrêts prolongés, on a un grand avantage sur le procédé dit de sectionnement, car on peut faire le service avec la même intensité en supprimant une, deux voitures et même plus.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le cas d'une ligne ordinaire à double voie, le nombre de voitures à mettre en service s'obtient en divisant le temps total du parcours complet par la fréquence des passages ; on réduit les arrêts jusqu'à ce que le temps de parcours soit un multiple exact du nombre de voitures en service. Lorsque la voie est unique, le nombre d'évitements nécessaires est une fonction de la vitesse des voitures et de l'intervalle entre celles-ci. La distance entre les évitements, et entre ceux-ci et la tête de ligne, n'est qu'une quantité absolument invariable, lorsque la vitesse de marche, le nombre de voitures en service et les arrêts aux têtes de lignes sont fixés. On admet une durée de une minute de stationnement à chacun des évitements ; il convient d'ailleurs de profiter de ces arrêts forcés pour en faire des arrêts fixes, si les règlements locaux le permettent. C'est tout bénéfice pour l'exploitation dans ce cas.

Quand le nombre de voitures fixé n'est pas suffisant à certaines heures de la journée, il est nécessaire de prévoir un certain nombre de voitures supplémentaires à intercaler entre les voitures du service ordinaire, et que l'on retire lorsqu'elles n'ont plus leur utilité. On peut très bien préparer cet espacement régulier des voitures en modifiant légèrement un des arrêts aux têtes de ligne des voitures en service.

En dressant jour par jour une situation des places offertes au public et celles occupées par celui-ci, on a une idée de la nécessité des voitures supplémentaires, et de cette façon l'on se rend compte si le service est bien étudié. On doit se tenir pour satisfait lorsque 60 0/0 des places sont occupées. Il est très utile aussi d'établir des graphiques des recettes et des dépenses kilométriques, des recettes et des dépenses totales d'exploitation, de consommation de courant par kilomètre-voiture, de production d'énergie par kilogramme de charbon, etc. Enfin, l'étude des différents horaires des voitures permet d'obtenir de celles-ci la meilleure utilisation possible et le rendement le plus avantageux des équipes d'employés.

Quant aux vitesses maxima qu'on ne peut dépasser sans trop de danger pour la circulation générale, elles paraissent être celles ci-après : 1° sur siège spécial, 40 à 50 kilomètres à l'heure ; 2° sur route en pleine campagne, 30 à 35 kilomètres à l'heure ; 3° sur route dans les artères peu bâties des agglomérations, 16 à 20 kilomètres à l'heure ; 4° sur route dans les artères complètement bâties des agglomérations, 12 à 16 kilomètres à l'heure.

Pour la détermination de la conduite économique d'une ligne de traction, on peut établir une fois pour toutes la courbe des variations en fonction de la vitesse du train, de l'intensité qu'il demande et de l'accélération qu'il prend en palier ; cette dernière courbe donne les accélérations hors des parcours en paliers par simple déplacement d'échelle.

Sur les lignes de tramways ou de chemins de fer qui comprennent plusieurs sectionnements commandés par des interrupteurs, en cas de rup-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ture d'un fil, il est nécessaire de mettre immédiatement hors de service le segment correspondant du fil de contact. Sur la ligne du chemin de fer électrique de Locarno, on a prévu dans ce but un dispositif mécanique électrique qui se compose en principe d'un fil relié fermement à l'isolateur. Celui-ci pouvant, à cet effet, tourner sur la douille qui le supporte, ce mouvement de rotation intervient dès que la rupture du fil s'est produite, car le fil de contact, qui est relié à l'isolateur du côté opposé, exerce sa force de traction. Par ce mouvement de rotation, le segment de fil fixé au fil de contact vient buter contre l'une ou l'autre des branches d'une fourchette métallique réunie à la console supportant l'isolateur et établit ainsi la connexion entre le fil de contact et le fil de déclenchement spécial pour la commande des interrupteurs de sectionnement, d'où s'opère l'ouverture de l'interrupteur de ligne.

Les prix suivants, relatifs à la construction des lignes de tramways électriques, résultent d'une étude faite dans divers pays d'Europe.

Lignes à conducteurs aériens. — Pour une ligne à simple voie et à écartement normal, compris la superstructure et l'équipement électrique, le coût est de 49.000 à 56.000 francs par kilomètre ; pour une ligne à double voie, 130.000 à 150.000 francs. Quand il s'agit de transformer une ligne de tramways à chevaux, et lorsque la superstructure est en bon état, le prix de l'équipement électrique est d'environ 33.000 à 40.000 francs.

En Amérique, on compte en moyenne une dépense de 450 à 550 francs par kilowatt pour les génératrices, 12.000 à 17.000 francs par kilomètre pour la construction d'une ligne à simple voie, 25.000 francs à 37.000 francs pour une ligne à double voie, 78.000 à 120.000 francs pour une ligne à quatre voies et 120.000 à 180.000 francs pour une ligne à six voies.

Lignes à conducteurs souterrains. — Le coût de la construction d'une ligne à conducteurs souterrains dépend en grande partie du mode de construction des caniveaux, ainsi que de la profondeur des conduites existantes d'eau et de gaz. Les dépenses sont, en général, estimées de 170.000 à 230.000 francs par kilomètre. Les dépenses supplémentaires pour travaux accessoires peuvent être considérables et dépasser 20 ou 30 0/0. C'est ainsi que, pour une ligne de 13 kilomètres de longueur, le coût de la ligne proprement dite s'est élevé à 220.000 francs par kilomètre, alors que les travaux accessoires ont atteint 850.000 francs, soit 30 0/0 du montant des travaux de la ligne proprement dite.

Lignes à contacts superficiels. — Le coût d'une ligne à simple voie, équipée avec le système Diatto, est d'environ 100.000 francs par kilomètre. Pour une ligne à double voie, la dépense ne dépasse pas 185.000 francs.

Lignes à accumulateurs. — Le prix moyen d'installation d'une ligne de tramways à accumulateurs est environ le même que pour la traction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

animale ou à vapeur ; il est d'environ 35.000 francs par kilomètre. De plus, il faut compter sur un supplément de dépense de 8.000 à 10.000 francs par voiture pour la batterie d'accumulateurs. Il faut, en outre, un plus grand nombre de voitures, à cause du rechargement des batteries.

Le coût d'établissement de la ligne Wilten-Stubaïtal (Tyrol), installée par la Société A. E. G. (courant monophasé), se décompose comme suit :

Travaux préparatoires et surveillance	138.390 fr.
Expropriation et autres dédommagements	301.770
Travaux de terrassement	332.700
Nivellements	250.990
Petits ouvrages d'art	127.050
Viaducs et tunnels	408.450
Voie	542.850
Équipement du chemin de fer	28.875
Installation électrique	577.500
Divers	76.000
TOTAL	2.794.575 fr.

pour une longueur de 18 kilomètres.

Les trains de voyageurs comprennent une automotrice et deux remorques ; leur capacité est alors de 120 places et leur poids à vide de 32t,2, et en charge complète de 45 tonnes. Les frais d'exploitation par tonne-kilomètre sont d'environ 10 0/0 moins élevés qu'avec la traction à vapeur précédemment utilisée sur cette ligne.

Le travail mécanique moyen est de 46 watts-heures et le rendement total atteint 66,5 0/0.

La Compagnie Westinghouse donne les chiffres suivants provenant des plus grands réseaux de tramways qui se rencontrent aux États-Unis :

Entretien des rails, de la canalisation, de l'infrastructure et des bâtiments	7,457 0/0
Entretien du matériel d'exploitation et de l'atelier des réparations	11,704 »
Frais de génération du courant (combustible, huile, nettoyage)	17,341 »
Utilisation du matériel roulant (y compris les salaires, le nettoyage des voies)	45,879 »
Dépenses diverses (traitements, frais généraux)	17,299 »

Pour les vingt-deux entreprises examinées, les frais d'exploitation ont atteint une moyenne de 65, 72 0/0 des recettes brutes.

L'entretien de l'installation électrique et des voitures automotrices revient, calculé par voiture-an, à 1.280 francs ; celui de l'équipement électrique des automotrices à 540 francs par voiture-an.

L'ensemble des frais d'exploitation, rapporté à la voiture-kilométrique,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'élève à 1 fr. 06 ; sur cette dernière somme, 18,4 centimes par voiture-kilométrique proviennent des frais d'entretien de l'usine centrale, et 12 centimes par voiture-kilométrique de l'entretien des véhicules.

Sur la ligne de Bloomington, Pontiac et Joliet (135 kilomètres), ligne qui n'est que l'amorce de la voie gigantesque de Chicago à Saint-Louis, et qui fonctionne avec du courant monophasé à 3.300 volts sur les fils du trolley, la dépense totale par voiture kilométrique est de 50 centimes (les voitures pèsent plus de 30 tonnes et la vitesse horaire moyenne est de 30 kilomètres). Cette somme se répartit comme suit :

Entretien général	4,25	centimes
Frais de traction	38,30	»
Dépenses générales	7,45	»

A la Valteline, les frais d'exploitation, y compris intérêts et amortis-

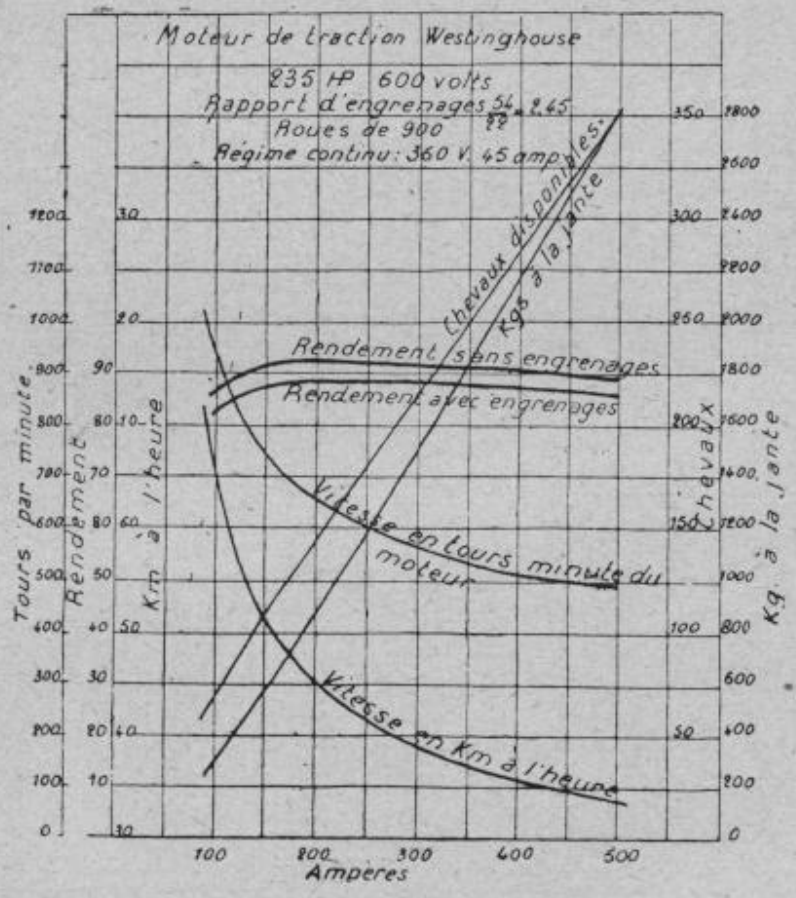


FIG. 1864. — Caractéristique de fonctionnement d'un moteur de traction Westinghouse. (Lignes de l'Ouest-État.)

sements, se sont élevés dans le dernier exercice à 1 fr. 91 par train-kilomètre (train normal, 60 à 70 tonnes).

Comme dépenses d'exploitation par kilomètre-voiture, on peut prendre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

comme chiffres moyens : 0 fé. 31 à 0 fr. 33 pour le trolley aérien, et 0 fr. 36 à 0 fr. 37 pour le trolley souterrain. MM. Barbillon et Griffisch donnent les chiffres détaillés ci-après (1), qui demandent à être envisagés comme des maxima. Ils ont trait à une exploitation d'un train comportant deux automotrices et une remorque.

Administration centrale	0f,019
Loyers de l'Administratiou et des dépôts	0 ,0038
Entretien des immeubles	0 ,0225
Assurance contre l'incendie	0 ,001
Impression et fournitures	0 ,0019
Correspondances et billets	0 ,0024
Allocations à la caisse nationale des retraites	0 ,0052
Allocations aux sociétés de secours mutuels	0 ,0032
Indemnités et secours aux agents	0 ,0059
Affichage	0 ,0011
Accidents	0 ,0083
Chauffage de l'Administration centrale et des dépôts	0 ,0029
Contentieux	0 ,0029
Éclairage	0 ,0099
Dépenses diverses	0 ,0093
Droits de stationnement	0 ,0478
Droits de régie	0 ,01785
Déblaiement des neiges, sable	0 ,0006
Contributions directes	0, 0064

Pour des voitures équipées avec deux moteurs à courant continu, l'entretien peut être évalué à 0 fr. 03 par voiture-kilomètre, ce prix comprenant la visite des moteurs, des voitures, des trucks, la peinture, le vernis, etc. Pour les voitures à quatre moteurs, la dépense afférente à l'entretien de l'équipement électrique seul varie de 2 à 2,5 centimes. Enfin le prix d'entretien d'une locomotive de 40 tonnes est de 0 fr. 015 par kilomètre, alors que celui des locomotives à vapeur est de 0 fr. 019.

Les prix de revient des divers systèmes de traction, par voiture kilométrique, peuvent se présenter de la façon suivante :

1° Traction électrique :	
Entretien de la ligne et usure	0f,015 à 0f,090
Force motrice	0 ,070 à 0 ,100
Entretien du matériel roulant	0 ,045 à 0 ,072
Personnel et combustible	0 ,046 à 0 ,081
TOTAL	0f,176 à 0f,343
2° Traction à vapeur	0f,12 à 0f,35
3° — par air comprimé	0 ,30 à 0 ,40
4° — animale	0 ,33 à 0 ,75

(1) *La Traction électrique*, par Barbillon et Griffisch. E. Bernard, éditeur, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au point de vue construction, en Amérique, la solution qui consiste à établir au milieu de la chaussée une plate-forme spéciale complètement séparée du trafic de la rue a donné des résultats particulièrement heureux. Grande aussi est la faveur qui s'est attachée dans ces derniers temps aux plates-formes de voie gazonnées.

Dans plusieurs cas de rues asphaltées, le corps de voie spécial, avec revêtement en pavés, a été disposé latéralement. Dans cet ordre de choses, le macadam système Aerbeli est particulièrement indiqué.

Les longueurs de rails ont été portées d'abord à 15 mètres, puis à 18, 20 et 24 mètres, diminuant ainsi notablement le nombre des joints. L'emploi de contre-rails renforcés pour les rails des courbes est entré dans la pratique courante.

Dans les lignes à trafic particulièrement intense, on met en œuvre des rails en aciers spéciaux (aciers au titane, au manganèse, au nickel, etc.).

D'après les essais de la Boston Elevated Railway Cº, la durée des rails en acier au manganèse, serait 50 fois aussi longue que celle des rails en acier Bessemer.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de moyen direct simple et peu coûteux de supprimer radicalement les courants vagabonds et les effets pernicieux de l'électrolyse sur les canalisations de gaz et d'eau ainsi que sur les câbles armés de lumière et de téléphone, ni de moyen d'empêcher les bruits vibratoires se produisant dans les appareils télégraphiques. Mais il convient de réduire au minimum les occasions qu'ils ont de se produire.

On conseille : 1º bien isoler le fil aérien afin d'éviter les pertes à la terre qui empireraient la situation ;

2º Passer un câble de retour isolé, du moins à partir des joints des rails où le danger est le plus grand, et s'il le faut, employer des dynamos auxiliaires pour produire des différences de potentiel inverse ;

3º Soigner autant que possible les liaisons électriques aux joints des rails ;

4º Éliminer dans les projets de moteurs toutes les conditions favorables à la production d'un courant pulsatoire à grande fréquence.

IV. — MOTEURS DE TRACTION

640. Moteur série à courant continu. — A consommation et à vitesses égales, ce genre de moteur est le plus léger, le meilleur marché et le moins encombrant, parce qu'il permet de hautes inductions magnétiques. Malheureusement, son collecteur limite la tension à un chiffre bien inférieur à celui de la tension que l'on peut employer avec le moteur triphasé. Le moteur à courant continu est celui qui convient le mieux sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les profils à forte rampe, car, la vitesse variant en sens inverse de l'effort de traction qu'il a à fournir, la puissance qu'il absorbe est beaucoup plus constante, et il n'exige pas de la station génératrice, comme avec les moteurs triphasés, une puissance considérable pour franchir les fortes pentes.

Le courant continu permet, en outre, une ligne de travail plus simple, surtout pour les aiguillages, les croisements et la possibilité de faire des réparations en marche et aussi, dans les lignes à trafic considérable, de pouvoir rattraper facilement les retards. L'emploi d'une forte batterie d'accumulateurs donne le moyen de constituer une réserve importante pouvant parer aux surcharges et rendant la puissance fournie par l'usine génératrice à peu près constante.

Les moteurs à courant continu ont presque toujours quatre pôles, rarement six ; cependant, pour les grosses unités (moteurs de locomotives), on les construit parfois avec deux pôles seulement. Pour ces derniers, on fait appel à une aération artificielle pour refroidir plus rapidement les inducteurs. Dans les moteurs quadripolaires, on connecte les quatre bobines inductrices en série ou on groupe en parallèle les bobines couplées deux à deux en série. Le type d'enroulement à anneau, pour les moteurs à quatre pôles, à une paire de balais, avec couplage des sections symétriques en parallèle, est particulièrement avantageux. Le diagramme de la (*fig.* 1865) a trait à un moteur série de 70 HP avec shuntage des inducteurs et couplage en série parallèle.

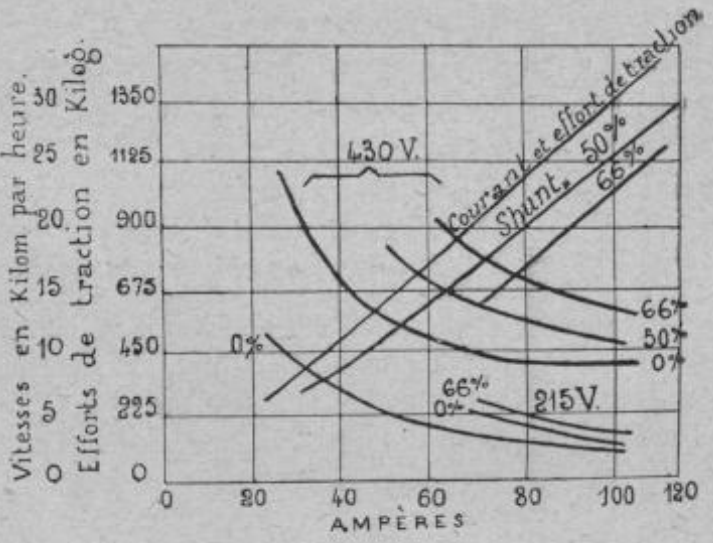


FIG. 1865.

L'enroulement en tambour s'emploie pour les moteurs multipolaires avec un nombre de balais égal à celui des pôles ; mais la multiplicité des balais est un gros inconvénient pour les moteurs de traction ; aussi l'enroulement en tambour ondulé quadripolaire à une paire de balais est tout indiqué (*fig.* 1866). Les armatures qui ont peu de spires par bobine donnent une vitesse plus grande sur palier, mais possèdent un couple assez faible et *vice versa*.

La disposition à encoches est aujourd'hui très usitée ; les conducteurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont groupés de telle façon que ceux logés dans les mêmes rainures sont parcourus par des courants de même sens, et, en général, il y a au moins deux conducteurs dans chaque rainure, ceux-ci pouvant appartenir à des sections différentes, mais aboutissant à deux lames consécutives du col-

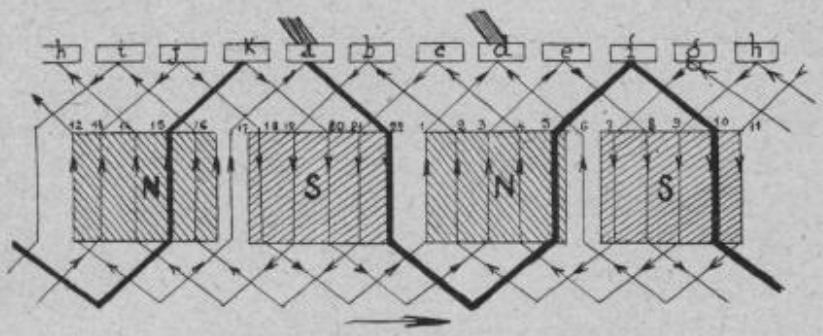


FIG. 866.

lecteur. En général, le nombre d'encoches ne dépasse pas la trentaine, et la quantité de conducteurs par rainure est de six.

Il va sans dire que le calage dans ce genre de moteurs est toujours fixe malgré la variation des charges.

Les conditions de travail des moteurs de traction sont celles pour lesquelles l'emploi des pôles de commutation est plus particulièrement indi-

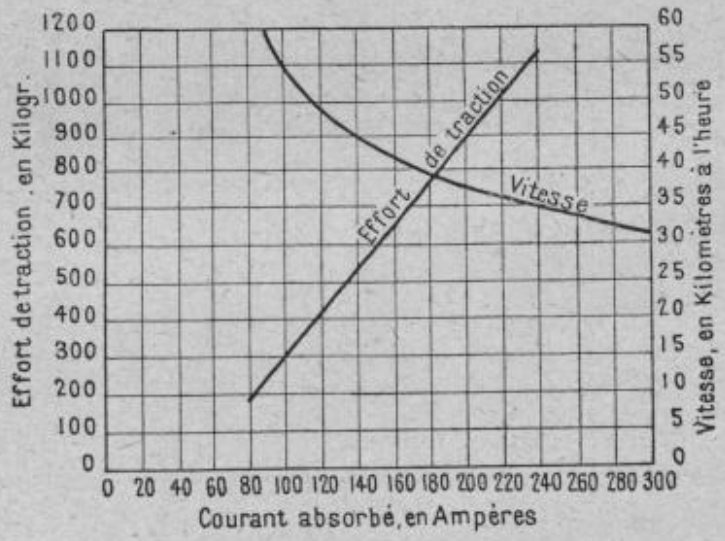


FIG. 1867. — Vitesse et effort de traction. Moteur série de traction de 117 HP.

qué, ces moteurs devant fonctionner à charges très variables et à calage constant des balais dans les deux sens de rotation.

Le but des pôles de commutation est de créer sur la zone de commutation un champ antagoniste à celui de l'induit, et capable de réagir sur les forces électromotrices de self-induction de la spire en commutation. Ces pôles sont excités en série avec l'induit et par le courant qui traverse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

celui-ci. Les pôles auxiliaires ont pour effet une réduction des frais d'entretien et la diminution, sinon la suppression, de tous les accidents qui ont pour cause la difficulté de surveillance du collecteur. L'usure des balais se trouve à peu près annulée ; l'échauffement du collecteur est considérablement diminué et la sécurité du fonctionnement est beaucoup plus grande.

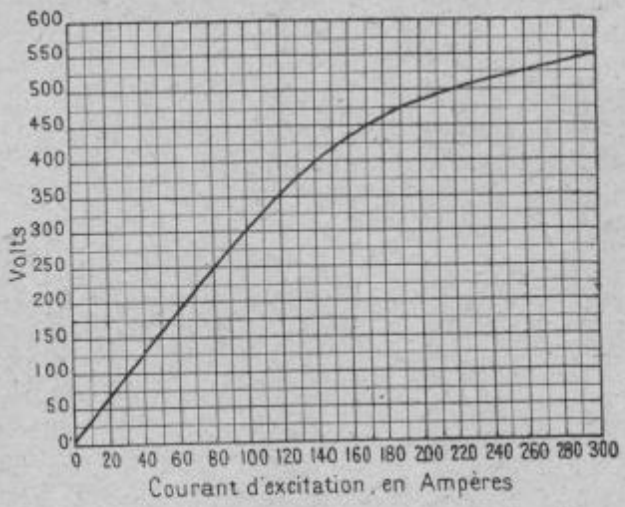


FIG. 1868. — Courbe de saturation à la vitesse de 190 tours. Moteur série de traction de 117 HP.

Les moteurs de traction font généralement 1.000 à 500 tours à la minute, ce qui implique une réduction de vitesse de 1/5, 1/4 et 1/3 entre l'essieu et l'arbre du moteur. La construction des moteurs de traction est caractérisée par l'emploi d'un induit denté de très grandes dimensions, bobinage en tambour. Le type le plus usité est celui tétrapolaire série, avec deux balais à 90°, visitable par une trappe.

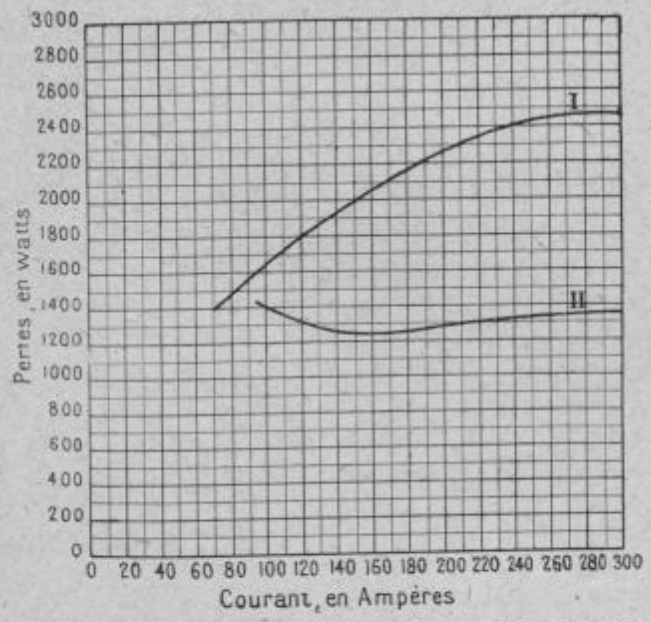


FIG. 1869. — Pertes dans le fer. Moteur série de traction de 117 HP, d'après Hobart.

I, déduites du rendement. — II, le moteur excité, mais sans courant dans l'induit et les balais levés. Les vitesses correspondent à celles de la courbe I.

La puissance d'un moteur de traction est celle qu'il est susceptible de développer pendant une heure sans échauffement dangereux (60°, 75° ou 100°, suivant la tension d'alimentation et la nature des isolements employés). Par comparaison avec les locomotives à vapeur, dont la puissance n'est jamais limitée par les appareils moteurs proprement dits, mais seulement par la chaudière, on pourrait aussi définir sommairement un tracteur électrique par la puissance maxima qu'il est susceptible de développer d'une façon continue avec un échauffement de 60°, 75° ou 100°, suivant la nature et la tension des isolants employés aux différentes vitesses pratiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais un moteur ne peut être entièrement connu que lorsqu'on possède les résultats des essais suivants (H. Parodi) :.

a) Les essais permettant d'obtenir les caractéristiques électriques, mécaniques et thermiques nécessaires au calcul d'une installation de traction ;

b) Les essais permettant de contrôler la régularité et l'uniformité de la construction du matériel, ainsi que la bonne exécution de ses différentes parties et leur interchangeabilité ;

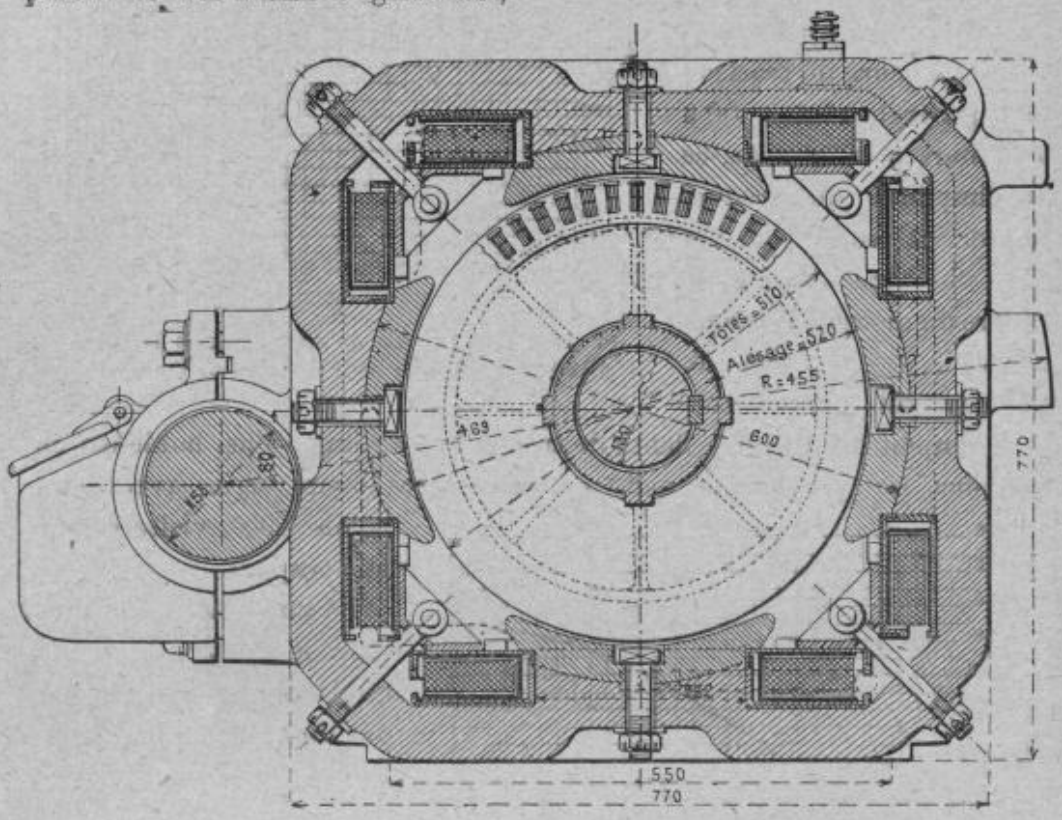


FIG. 1870. — Moteur de traction de 175 HP construit par la Société alsacienne de Constructions mécaniques.

c) Les essais permettant de vérifier, en service, la correction des calculs d'établissement de l'installation, ainsi que la bonne fabrication et la correcte adaptation au service à effectuer des différentes parties du matériel.

Les caractéristiques dont il vient d'être parlé concernent les caractéristiques électromécaniques, électriques et thermiques. Les premières se déterminent par des essais au frein de la même manière que les essais similaires de moteurs normaux. Les courbes des caractéristiques électriques doivent être tracées de manière à donner, en fonction de la vitesse de rotation, les pertes totales dans le stator, pour différentes intensités statorique ou rotorique. Toutes ces courbes sont rassemblées en un seul réseau dans lequel les pertes totales W dans le rotor et W′ dans le stator

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont exprimées en fonction du rapport $\frac{W}{W'}$ de ces pertes. Chaque courbe correspond soit à une vitesse constante, soit à une tension d'alimentation constante.

Les caractéristiques thermiques sont, en principe, constituées par un réseau de courbes donnant, en fonction du temps, les températures d'échauffement du rotor et du stator de ce moteur pour diverses charges. En pratique, ces courbes représentent les variations des coefficients

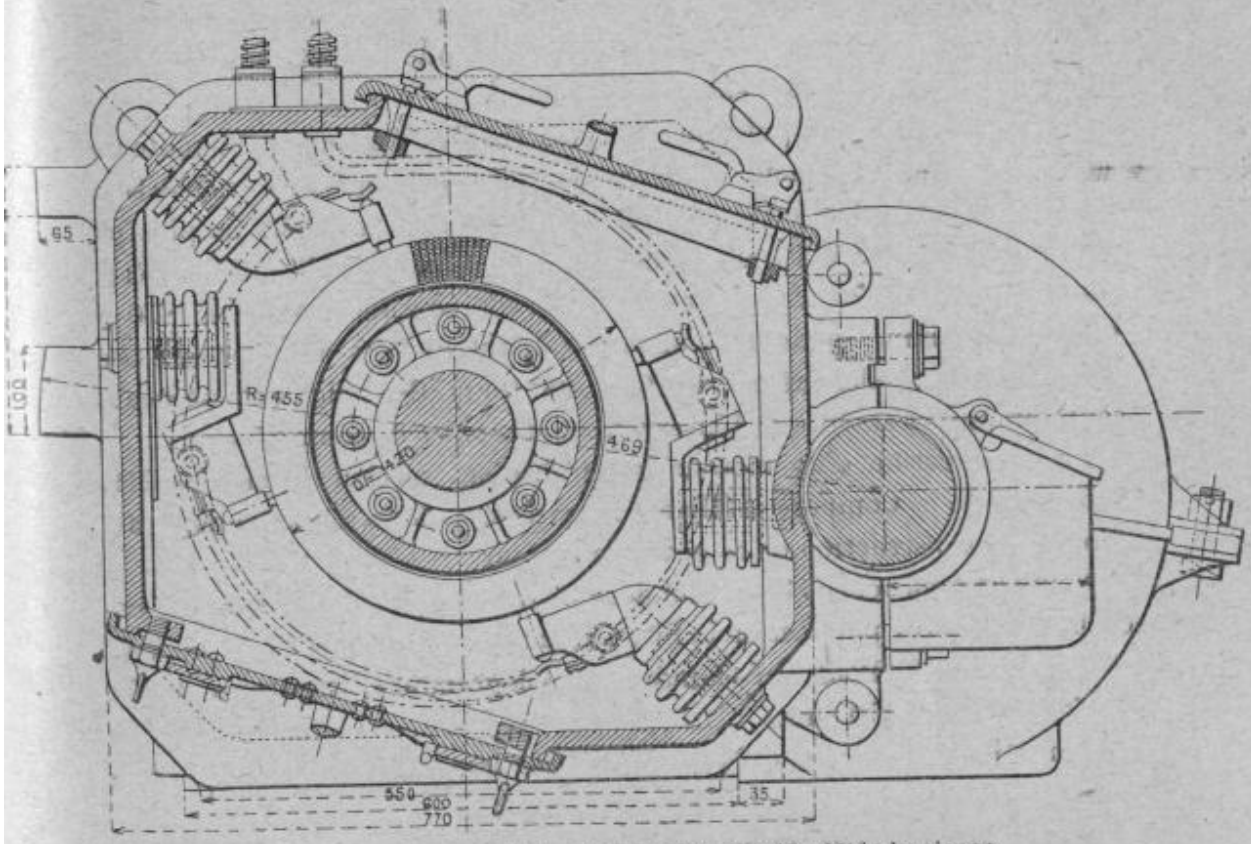


FIG. 1871. — Moteur de traction de 175 HP. (Société alsacienne de Constructions mécaniques.)

d'échauffement du stator ou du rotor d'un moteur, exprimées en degrés par watt perdu dans le rotor ou le stator en fonction du rapport $\frac{W}{W'}$ des pertes dans ces deux parties du moteur ; les coefficients considérés dans ce cas correspondent aux températures maxima relevées après une marche continue de longue durée à la charge considérée. La connaissance des caractéristiques thermiques et électriques permet de calculer rapidement, avec une approximation de l'ordre de 10 0/0, les températures finales correspondant à un service déterminé des moteurs.

Les essais de contrôle de la fabrication du matériel visent surtout l'uniformité de la construction, pour que l'on puisse sans inconvénient, en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exploitation courante, permuter deux moteurs quelconques entre eux. Mais on doit aussi vérifier la qualité des matériaux employés, la conductibilité du cuivre, la perméabilité des tôles ou des aciers des carcasses, la rigidité par rapport à la masse et de barre à barre des divers enroulements.

Les essais d'un tracteur en service courant consistent à se rendre compte si les moteurs sont capables de remorquer à la vitesse commerciale prévue un train de poids donné dans les conditions ordinaires du service, et si les tracteurs absorbent, pour effectuer ce travail, une quantité d'énergie exprimée en watts-heures par tonne kilométrique égale ou inférieure à la quantité d'énergie calculée.

La recherche d'une puissance de plus en plus élevée sur les moteurs actuels, le développement croissant des vitesses employées en traction électrique, fait qu'on a été conduit à l'adoption de moteurs de plus en plus puissants par unité de poids. On admettait jusqu'à ces dernières années que le poids des moteurs à courant continu variait de 800 à 4.500 kilogrammes pour des puissances allant de 25 à 400 chevaux, les vitesses variant elles-mêmes de 700 à 400 tours. Ces poids ont été beaucoup diminués par suite de l'intervention des pôles de commutation.

La spécification d'un moteur très utilisé en traction, le moteur 219, 750 volts de la Compagnie Thomson permettra de se rendre compte des progrès de construction de ce genre de moteur.

Nombre d'encoches 33 ; profondeur 39,8 ; largeur 16. Sections par encoche 5 et spires par section 3. Fil en quantité : 2 ronds de 21 /10 nu isolé et 2 c. c. 25 /10. Poids du fil induit 38 kilogrammes. Résistance à 20°, 0,307 et à 75°, 0,370 ohm.

Diamètre du collecteur 340, nombre de lames 165, isolement entre lames 7 /10.

Le nombre des pôles principaux est de 4 ; l'enroulement est constitué par du fil rond de 55 /10 nu isolé et 1 c. c. Le nombre de spires par bobine est de 84,5. Le poids du fil pour quatre bobines égale 64 kilogrammes et la résistance à 20° est de 0,277 et à 75°, 0,273. Le nombre de pôles supplémentaires est de 4. Le nombre de spires par bobine est de 71,5. Le rapport d'engrenages est de 4,86.

Actuellement les moteurs à accouplement direct sont suspendus par intermédiaire élastique au châssis par leur carcasse et, dans les paliers, tourillonne l'arbre creux de l'induit. Parfois l'induit est aussi sans intermédiaire sur l'essieu et il se déplace par rapport aux inducteurs suivant ainsi sans difficulté les dénivellations de la voie.

Pour les moteurs sans réduction (c'est-à-dire ceux employés sur les véhicules pour lesquels la vitesse de régime dépasse 50 à 60 kilomètres à l'heure) on utilise presque toujours l'arbre creux, comme mode de sus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pension, et on interpose entre l'arbre et la roue un intermédiaire élastique, genre manchon Raffard.

Pour les moteurs à réduction de vitesse, limitée de nos jours à un seul étage d'engrenages, le mode de suspension le plus utilisé est celui dit par « le-nez ». On emploie aussi la disposition dite par « barres latérales », celle à « joug », la suspension double Walker et enfin celle par arbre creux.

Les ateliers de Jeumont ont fourni aux chemins de fer du Midi des locomotives dont le moteur est fixé rigidement au châssis, au droit de l'essieu. L'arbre creux est entraîné par des engrenages à doubles chevrons et attaque l'essieu par deux joints universels élastiques.

Quant au relevé des caractéristiques de marche d'un train, il se fait au

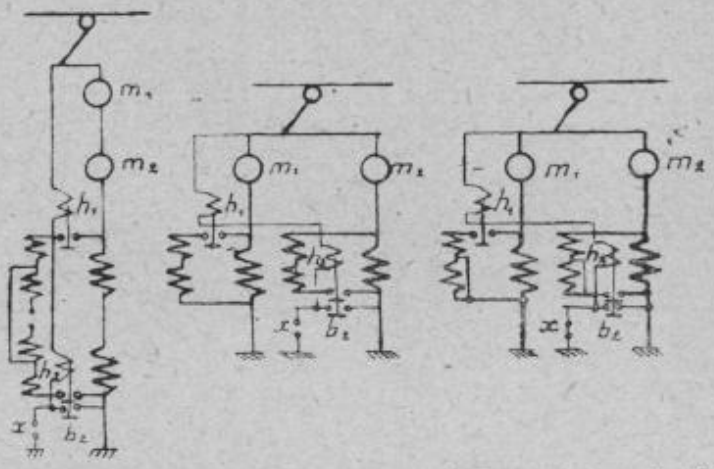


FIG. 1872. — Schéma de couplage des moteurs de 90 chevaux à 1.200 volts, courant continu de la ligne de Leyde à Katwyk (Norvège).

moyen des wagons-dynamomètres ordinairement usités et à l'aide desquels on peut avoir la vitesse en kilomètres à l'heure, l'effort de traction en kilogrammes, la puissance instantanée en kilogrammètres par seconde, et le travail effectué en kilogrammètres.

Lorsque la voiture possède plusieurs moteurs (toujours en nombre pair et quatre au maximum), on couple les quatre moteurs en série, puis par deux en parallèle, ou, si les moteurs forment par deux des groupes toujours couplés en parallèle, on couple en série, puis en parallèle.

Le couplage en série a lieu pour la période de démarrage ; on l'adoucit par insertion de résistances en série, que l'on met en court-circuit, le démarrage effectué. Par shuntage des inducteurs, on peut encore accroître la vitesse. Le couplage en parallèle, qui s'effectue ensuite, se fait avec résistances de passage en série, les inducteurs n'étant pas shuntés, puis avec des shuntages divers des inducteurs, ce qui permet d'accélérer encore la vitesse sur les sections de la ligne à faibles couples résistants.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La plupart des régulateurs (controllers à tambour) sur les lignes à parcours accidenté prévoient à la fois le freinage électrique avec moteurs travaillant en génératrice et freinage électro-magnétique par patin adhérent aux rails, les bobines pouvant être excitées par le courant des moteurs ou directement par la ligne.

La (*fig.* 1873) donne les connexions de deux moteurs couplés en série parallèle et montre les opérations à effectuer successivement pour la mise en marche, l'arrêt et le freinage.

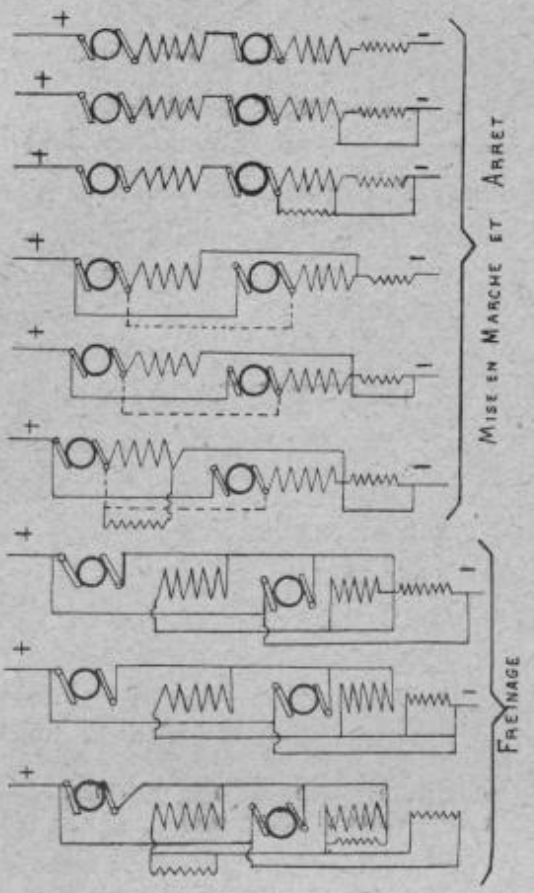


Fig. 1873.

La régulation par unités multiples, ou commande des moteurs à distance comporte, soit un régulateur local gouverné par un servo-moteur, tournant dans un sens pour envoyer le courant et en sens inverse pour le supprimer (système Sprague), soit des interrupteurs électromagnétiques commandés à distance et répartis le long de la voiture (système par contacteurs Thomson-Houston), soit des électros pneumatiques (système Westinghouse, Westinghouse-Turret ou à tourelle). Les électros sont excités par le courant d'une batterie d'accumulateurs à 14 volts. La commande mécanique du contacteur se fait dans le premier cas par des noyaux magnétiques excités par le courant de contrôle et dans le second cas par voie pneumatique.

Le réglage par tensions multiples est très utilisé en Amérique. Une des meilleures applications est celle faite dans le moteur de la Johnson Lindell Co (moteur à deux collecteurs et compound) ; avec ce système, les pertes dans les résistances sont réduites au minimum et le rendement est relativement élevé pour toutes les positions du contrôle.

Lorsqu'on emploie des survolteurs, on peut agir sur l'excitation du moteur en même temps que sur la tension aux bornes ; on peut aussi employer des moteurs à double collecteur avec contrôle série-parallèle, ou enfin des moteurs compound.

Le freinage électrique dans le moteur série est obtenu en fermant le moteur sur une résistance, après l'avoir coupé de la ligne ; avec le moteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

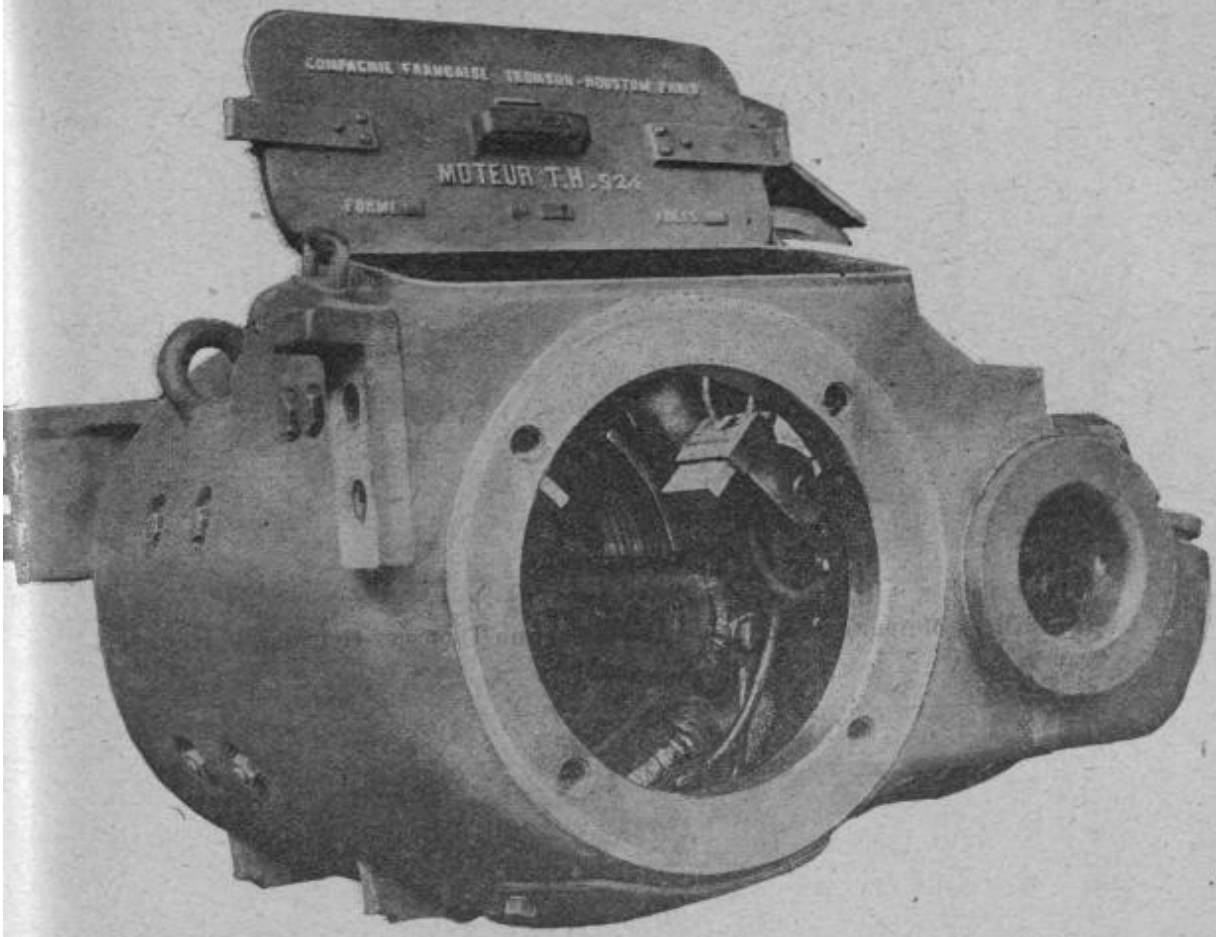


Fig. 1874. — Moteur de traction et courant continu 60 HP. 600 volts Thomson-Houston. Couronne inductrice après démontage des paliers.

BIBLIOTHÈQUE DU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS

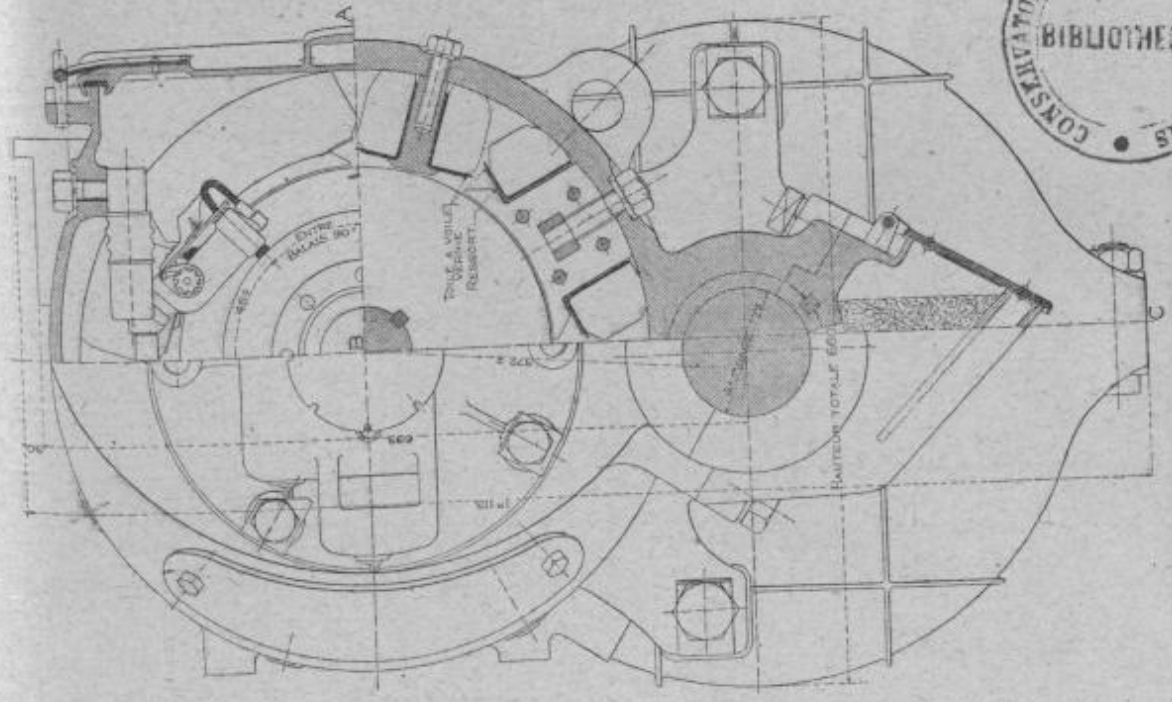


Fig. 1875. — Moteur de traction 60 HP, 600 volts à courant continu. Vue en élévation et coupe. (Cie Thomson-Houston).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

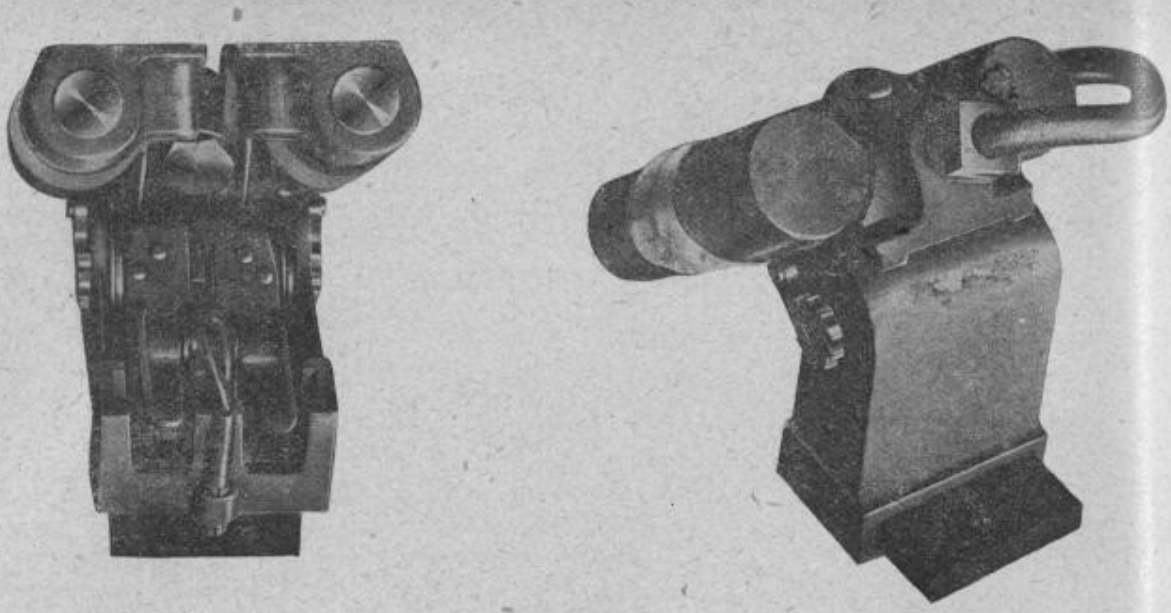


Fig. 1876. — Moteur de traction à courant continu Thomson-Houston. Porte-balais.

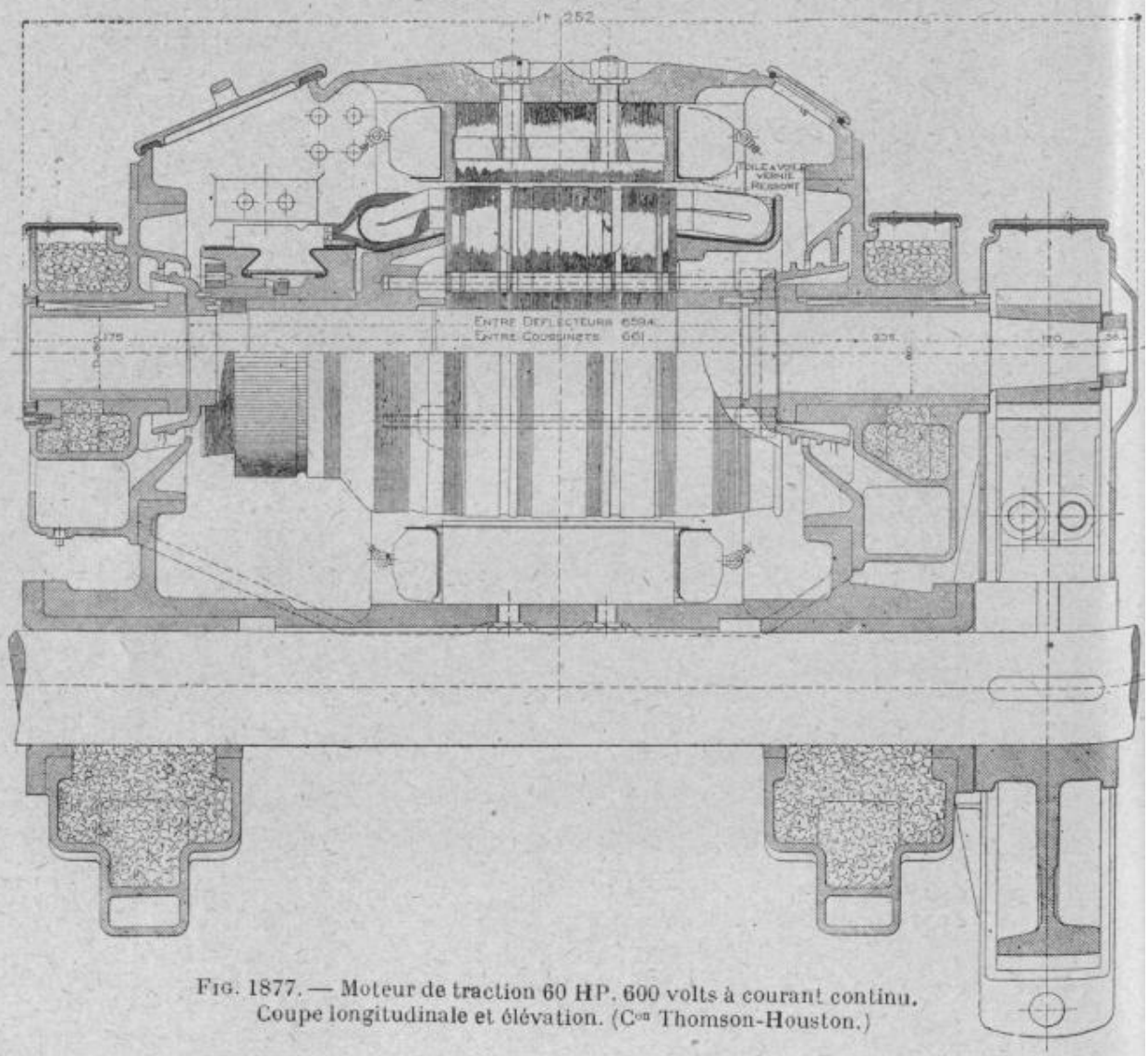


Fig. 1877. — Moteur de traction 60 HP. 600 volts à courant continu. Coupe longitudinale et élévation. (Cie Thomson-Houston.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

shunt, le freinage est assuré automatiquement par la récupération qui se produit dès que la vitesse de rotation dépasse la vitesse normale, si les moteurs sont couplés en série-parallèle, et avec la demi-vitesse, si les moteurs sont connectés en série.

Le moteur série peut être établi sans difficulté, au point de vue de l'isolement, pour des tensions de 2.000 volts ; mais la commutation devient difficile pour des tensions supérieures à 1.000 volts.

Des essais très intéressants se poursuivent incessamment pour créer des moteurs à courant continu à haute tension pour la traction électrique. Les ateliers J.-J. Rieter ont équipé la locomotive pour la ligne de Bellina-Mesona au moyen de moteurs de 1.500 à 1.700 volts fournissant 75 HP, à 500 tours. L'induit bobiné en tambour est pourvu de 53 rainures contenant chacune 5 bobines de fil, et son collecteur a 265 touches ; le voltage n'est, par suite, que de 6 volts entre deux lames successives. Pour réduire l'induction mutuelle entre les différents fils d'une rainure au moment du passage sous les balais des touches correspondantes du collecteur, on a donné aux bobines inductrices une disposition destinée à leur faire jouer le rôle de bobine compensatrice.

Les essais au frein de ce moteur ont donné un rendement variable entre 82 et 90 0/0 pour des charges comprises entre 30 et 80 kilowatts avec excitation totale.

641. Moteurs monophasés. — Les types principaux de moteurs monophasés actuellement employés pour la traction sont : le moteur série-simple, le moteur série-compensé à enroulement compensateur en court-circuit, le moteur compensé à enroulement compensateur-série, le moteur à répulsion à double enroulement, le moteur à répulsion simple, le moteur à répulsion compensé Latour ou Winter-Eichberg, le moteur à répulsion inversée et le moteur série à double alimentation. Tous ces moteurs peuvent être construits de manière à atteindre, en vitesse normale, dans les grands moteurs tout au moins, un facteur de puissance voisin de 0,90.

Les moteurs ordinaires monophasés à collecteur sont ceux qui permettent l'emploi des plus hautes tensions ; les croisements aux connexions des bouts étant évités, on peut obtenir de bons isolements jusqu'à 8.000 volts et plus ; mais là aussi le collecteur constitue un grave inconvénient qui limite et la tension et la puissance à des chiffres très faibles, malgré tous les artifices pour diminuer les effets de réaction d'induit. Cependant les moteurs à répulsion et les moteurs compensés, lesquels marchent au voisinage du synchronisme, ne présentent pas plus de difficultés de commutation que le moteur à courant continu.

La tendance actuelle est, pour le moteur série compensé, avec possibilité de marche en moteur à répulsion.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 1878) représente schématiquement un moteur série à collecteur dont le rotor est un anneau Gramme avec collecteur et balais analogues à ceux des dynamos ordinaires. Les pôles inducteurs auxiliaires du stator sont excités par des bobines parcourues par un courant dont la phase et l'intensité sont calculées de façon à produire un flux compensateur qui annule les effets fâcheux de la commutation sur les spires mises en court-circuit par les balais et supprime les étincelles.

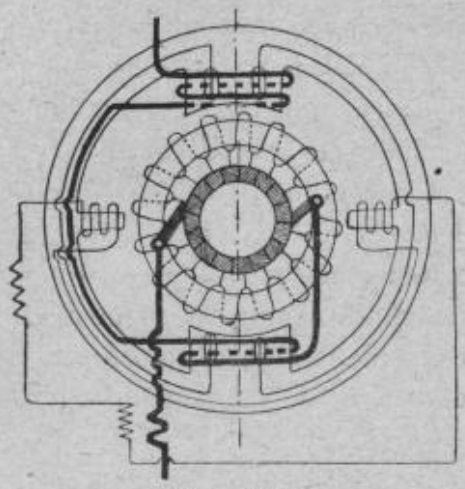


Fig. 1878.

En réalité, les moteurs sont à huit pôles. Le stator est feuilleté et muni de pôles saillants principaux et auxiliaires, portant les bobines inductrices.

Il est assez rare que l'on emploie des enroulements répartis dans des encoches comme ceux du moteur synchrone monophasé ordinaire.

Le moteur Winter-Eichberg, très utilisé en traction électrique monophasée, comporte un induit fixe et deux inducteurs mobiles. Les enroulements inducteurs et de compensation se confondent en un seul : l'enroulement de compensation est constitué par la mise en court-circuit de l'enroulement inducteur à l'aide d'une paire de balais disposés à 90° des balais principaux. Le stator est composé de tôles assemblées, et porte un bobinage tétrapolaire réparti dans des encoches. Le rotor est analogue à un induit de moteur à courant continu ; il est pourvu d'un enroulement ondulé série, qui reçoit le courant d'excitation par deux lignes de balais secondaires servant à la mise en court-circuit de l'enroulement pour la compensation.

Même quand les pôles sont saillants, les noyaux polaires sont peu développés, les ampères-tours inducteurs étant faibles, comparativement aux induits.

Le moteur Riehter (Siemens-Schuckert) est un moteur série-compensé. Il est caractérisé par la production d'un champ transversal de commutation formé sur le stator, soit là où se trouvent les balais, soit sur toute la périphérie et par l'adjonction d'un enroulement auxiliaire destiné à améliorer la commutation. De plus, des résistances sont insérées dans les liaisons de l'induit avec les segments, et ces résistances sont diposées de telle façon qu'elles produisent un couple moteur utile ; elles forment, en fait, un enroulement d'induit ouvert, relié à l'enroulement principal.

On ne peut alimenter le moteur série compensé sous plus de 300 volts

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et le moteur à répulsion sous plus de 3.000 volts. On abaisse donc la tension de distribution sur la voiture même. Cette diminution de tension s'obtient par divers procédés :

a) Par transformateurs statiques ordinaires avec primaires uniques ou multiples connectés en série et prises secondaires différentes (solution adoptée dans les petites automotrices) ;

b) Par auto-transformateurs (voitures de tramways suburbains) ;

c) Par régulateur d'induction ou par transformateur et régulateur d'induction combinés ;

d) Par réglage du décalage des balais ;

e) Par réglage de modification des enroulements de stator.

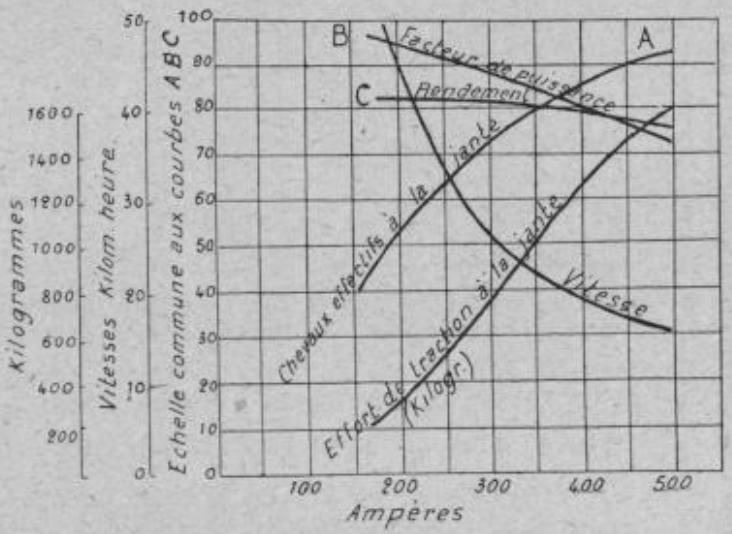


FIG. 1879. — Caractéristiques d'un moteur série-compensé à collecteur de 75 HP, 250 volts, 25 périodes, 700 tours.

Le démarrage des moteurs monophasés est d'ordre toujours inférieur, malgré l'emploi des transformateurs de régulation. Le couple est maximum au démarrage comme dans les moteurs à courant continu ; il peut atteindre 4 à 8 fois le couple normal ; mais, si l'on démarre lentement avec un couple élevé, on peut brûler le rotor, par les effets de self-induction aux balais. Comme le couple est proportionnel au carré de la tension en ligne, on est là en présence d'un inconvénient sérieux pour les démarrages sur lignes à fortes rampes.

Le rendement des moteurs monophasés est plus faible que celui des moteurs à courant continu et des moteurs triphasés, surtout aux faibles charges ; les pertes d'énergie sont d'environ 15 à 30 0/0 plus fortes que dans le moteur à courant continu, à cause de l'énergie supplémentaire dissipée dans le fer du champ et de l'armature, et dans les bobines en court-circuit.

On peut considérer que leur rendement total, moteurs et engrenages,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

varie entre 0,79 et 0,85, suivant la puissance et pour la puissance nominale.

Pour ne pas abaisser trop le facteur de puissance des moteurs série, on

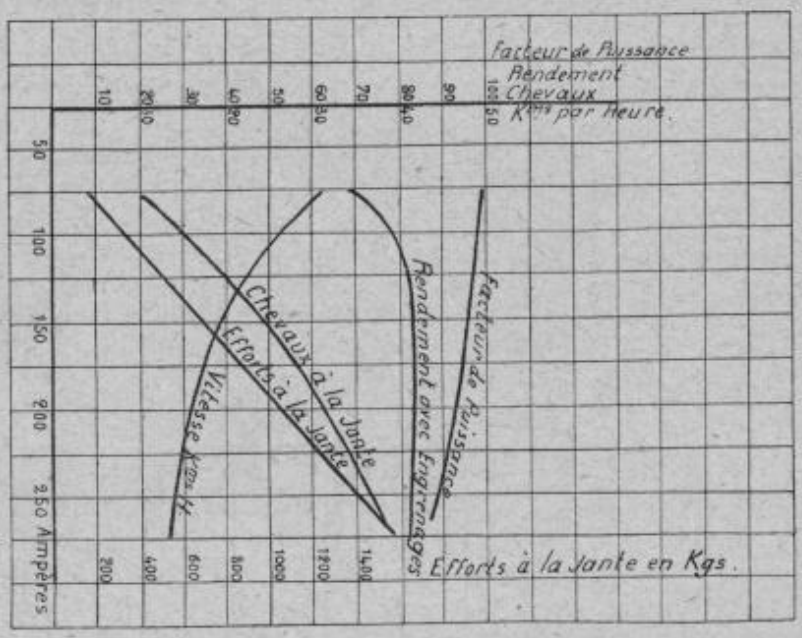


FIG. 1880. — Moteur série Westinghouse de 40 HP. Caractéristiques sous 300 volts, 15 périodes. Rapport d'engrenages 14 : 76. Roues de 840 mm. de diamètre.

emploie de grandes vitesses et une faible fréquence, inférieure à 25 ; cos φ atteint 0,95 et même plus en marche, mais il diminue avec la charge,

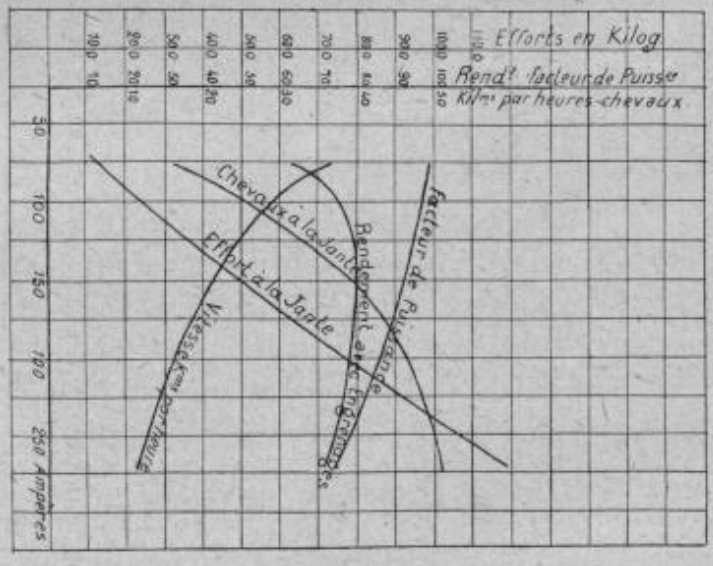


FIG. 1881. — Moteur série Westinghouse de 40 HP. Caractéristiques sous 220 volts à 25 périodes. Rapport d'engrenages 14 : 76. Roues de 840 millimètres de diamètre.

et tombe à 0,30 au démarrage. D'autre part, le coefficient d'adhérence diminue avec la fréquence. A 25 cycles, il est déjà d'environ 15 0/0 plus faible qu'avec le courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'abaissement de la fréquence du courant d'alimentation permet

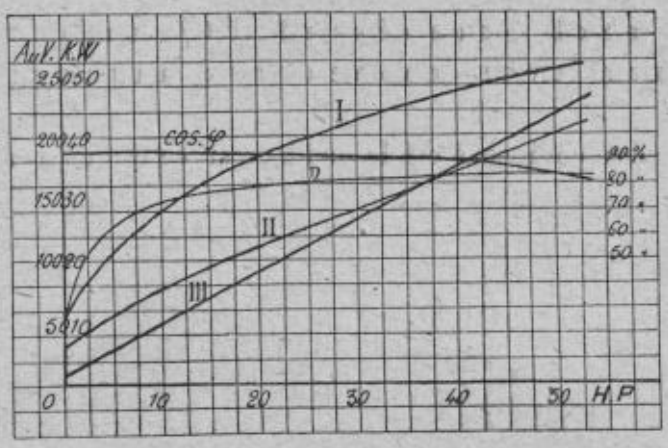


FIG. 1832. — Moteur Oerlikon de 35 HP fonctionnant comme moteur à répulsion à vitesse constante de 880 tours et à la fréquence de 14 périodes.

I, tension aux bornes en volts. — II, intensité en ampères. — III, puissance en kilowatts. η, rendement. — Cos φ, facteur de puissance 0/0.

d'améliorer le facteur de puissance et aussi le rendement en restreignant

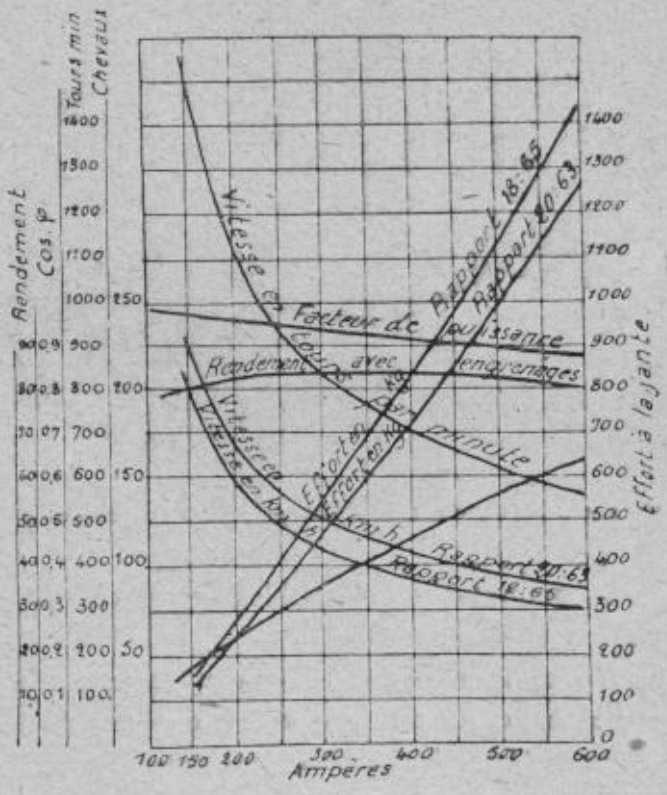


FIG. 1833. — Caractéristiques d'un moteur monophasé de traction Westinghouse, 125 chevaux.

les pertes ; il offre de plus, comme conséquence, l'avantage de réduire la dimension du fil aérien, et par suite, le coût de la ligne, pour une perte

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

admise déterminée. En Amérique, on incline vers l'emploi de la fréquence 15, car, avec cette périodicité, le poids du moteur monophasé, qui, pour une capacité donnée, dépasse de 25 0/0 en moyenne le poids du moteur à courant continu de même capacité, n'a plus qu'un excédent de 10-15 0/0.

Le moteur série-compensé est le meilleur en ce qui concerne le facteur

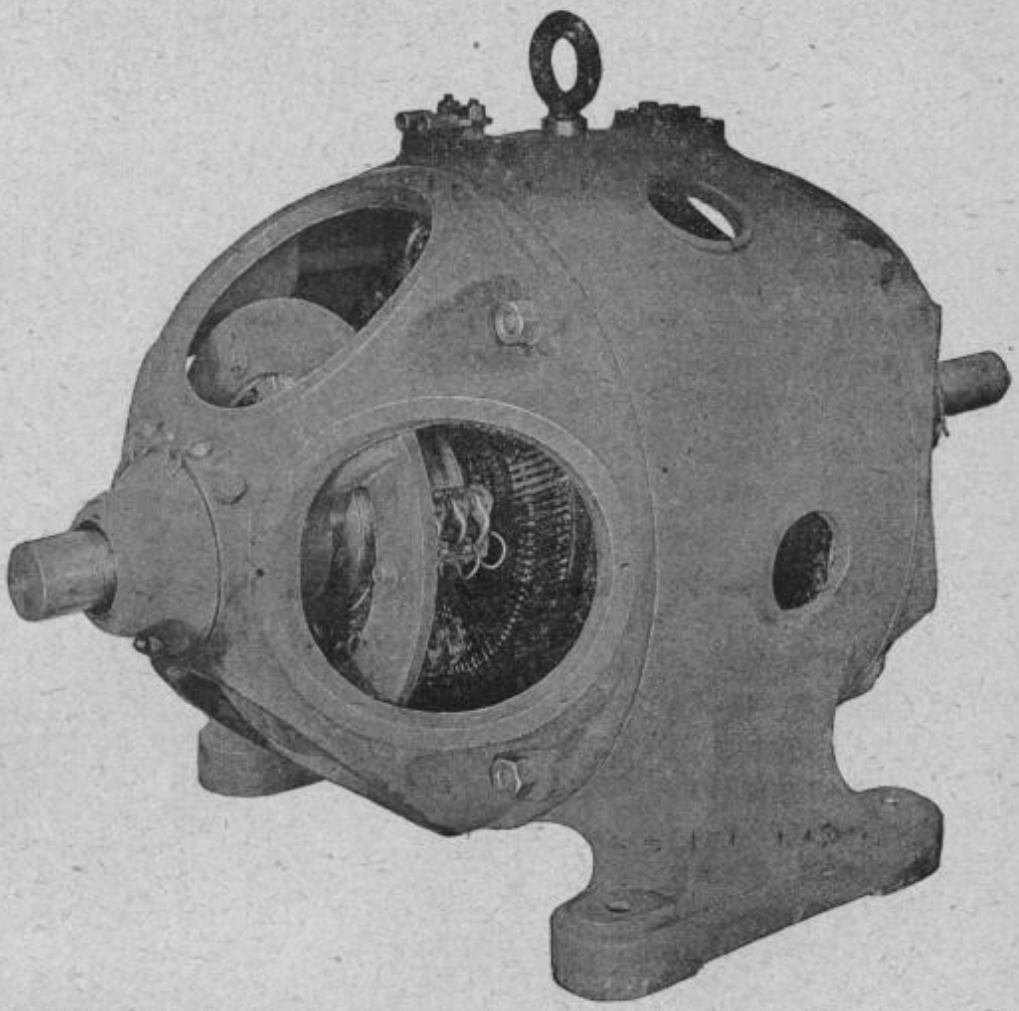


Fig. 1884. — Moteur à répulsion, monophasé, de 20 HP. Rhodes Electrical Mg. Co.

de puissance et la commutation aux faibles fréquences et aux vitesses de rotation élevées.

Les moteurs à répulsion sont sensiblement équivalents aux moteurs triphasés asynchrones, en ce qui concerne le couple, la vitesse, cos φ, le freinage et la récupération. Ils acceptent mieux les hautes fréquences que les moteurs série ; on adopte souvent 40 périodes par seconde.

Ils ont un meilleur facteur de puissance aux faibles charges que les moteurs monophasés ordinaires, facteur qui est maximum et voisin de l'unité près du synchronisme et diminue ensuite, tandis qu'il augmente au delà du synchronisme pour les moteurs ordinaires. Par suite, les mo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs monophasés doivent être de 30 0/0 environ plus grands que ceux à courant continu pour un même couple et une même consommation ; leur collecteur doit être aussi plus grand, à cause des pertes plus élevées dans la commutation et du bas voltage que l'on ne peut dépasser.

Le rendement à marche normale des moteurs monophasés à collecteur est inférieur de 2 à 10 0/0 à celui des moteurs à courant continu de même puissance ; la différence est due aux pertes par hystérésis dans les inducteurs et dans l'induit, et par effet Joule dans les enroulements supplémentaires.

Mais, au démarrage, comme il faut avec le courant continu insérer dans le circuit des résistances ohmiques dont on se passe avec l'alternatif, l'avantage appartient à ce dernier. Si les démarrages sont fréquents, on voit l'avantage que l'on peut tirer de ce dernier système. D'autre part, en employant des tensions un peu élevées en ligne, on peut toujours faire en sorte que la consommation unitaire à l'usine soit moindre qu'elle ne pourrait l'être avec le courant continu.

Les variations de vitesse des moteurs monophasés sont obtenues très simplement et, dans de très grandes limites, au moyen de transformateurs introduits soit dans le circuit primaire, soit dans le circuit secondaire, méthode qui est très économique. Le freinage a lieu comme pour le moteur série à courant continu.

Le moteur monophasé offre comme désavantage son poids élevé et la majoration de l'adhérence de l'essieu qu'il actionne. Afin de tirer le plus avantageusement parti des qualités distinctives des deux types de moteurs, M. Leblanc a suggéré l'emploi d'un commutateur permettant le fonctionnement en série pour le démarrage, et en répulsion une fois le régime établi.

On sait que les moteurs d'induction permettent, par le simple déplacement des balais, d'obtenir le réglage du couple tournant, du nombre de tours et la direction de marche.

Le moteur de 25 chevaux, 1.300 tours, courant monophasé, 1.000 volts, 50 périodes des ateliers de construction d'Oerlikon répond entièrement à ces données.

Ce moteur est à quatre pôles et muni de quatre tiges porte-balais court-circuitées entre elles. Le stator a 56 encoches dans lesquelles se trouve logé un enroulement ordinaire monophasé, tandis que l'enroulement du rotor est à boucles, logé en 72 encoches. Le support des porte-balais est amené à la position qui convient pour le couple de mise en marche désiré, ensuite le stator est branché en plein sur la tension du réseau et on n'a plus qu'à déplacer le support pour obtenir l'augmentation de vitesse.

Le moteur démarre avec un couple pouvant atteindre environ une fois et demie à deux fois la valeur du couple normal lorsque le support des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

porte-balais est déplacé d'environ 20 à 30° par rapport à la position de court-circuit, l'intensité au démarrage s'élevant à 1,25-2 fois l'intensité normale de pleine charge.

Le facteur de puissance diminue sensiblement à mesure que la vitesse s'éloigne du synchronisme, inconvénient qui dérive du principe du système.

Le moteur de traction monophasé des chemins de fer de la Haute-Vienne est un moteur à collecteur du type série avec pôles auxiliaires et enroulement de compensation. Le nombre des pôles est de six. La puissance est de 60 chevaux à 800 tours sous une tension de 320 volts, la fréquence étant de 25 périodes-seconde. Le rendement en pleine charge est de 0,84 et le facteur de puissance cos $\varphi = 0{,}88$.

Les enroulements du stator et du rotor sont logés dans des encoches réparties sur tout le pourtour. Les cadres d'induit, ainsi que les bobines de stator, sont préparés d'avance sur gabarit et facilement interchangeables. La suppression d'étincelles aux balais est réalisée par l'emploi d'un champ auxiliaire, et la commutation ainsi obtenue est excellente à toutes les vitesses et à toutes les charges.

L'induit ressemble absolument à un induit à courant continu, les connexions entre les sections et les lames du collecteur sont seulement plus résistantes.

Les moteurs sont à ventilation. Le ventilateur est monté dans le moteur, à l'extrémité du collecteur ; il aspire l'air d'une canalisation fixe s'ouvrant dans la voiture. Le moteur est relié à la canalisation fixe par un tuyau à soufflet extensible. L'avantage de la ventilation artificielle consiste non seulement dans l'élévation de la puissance du moteur en service continu, mais aussi dans l'aspiration des poussières de charbon, qui se produisent en plus grande quantité avec les moteurs monophasés qu'avec les moteurs à courant continu.

Le moteur est complètement fermé par un bâti en acier coulé, divisé en trois parties suivant les plans perpendiculaires à l'axe de rotation. L'une de ces parties porte le paquet de tôles du stator avec les enroulements, tandis que les deux autres, qui sont placées de part et d'autre de la première, constituent les paliers flasques. Les porte-balais et le collecteur sont accessibles pour la visite et le nettoyage par des regards ménagés sur le pourtour cylindrique du palier flasque correspondant. Ces regards sont munis de couvercles à fermeture rapide.

La partie active de l'induit, ainsi que le collecteur, sont montés sur un moyeu en acier coulé qui est emmanché sur l'arbre à la presse. On peut donc retirer l'arbre, sans être obligé de démonter l'induit et ses connexions avec le collecteur. Les lanternes d'induit et du collecteur sont en acier coulé. L'arbre est en acier Martin de même que le pignon.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tous les coussinets sont garnis de métal antifriction pour réduire l'usure des arbres au minimum. Le graissage est effectué à l'huile.

Le démontage des moteurs pour la visite est des plus facile.

Tableau comparatif des moteurs à courant continu et des moteurs à courant alternatif simple, d'après J. Sprague.

MOTEUR A COURANT CONTINU	MOTEUR A COURANT ALTERNATIF
L'afflux du courant est continu.	L'afflux est intermittent.
Les masses du rotor et du stator forment un tout électrique et mécanique.	Il n'offre ni les mêmes garanties de rigidité ni la même utilisation du métal.
Les bobines sont bien ventilées et accessibles.	Les bobines inductrices sont noyées dans la masse des tôles.
Il a un plus grand entrefer; la limite d'utilisation des coussinets est plus impérieuse et plus étroitement limitée.	Entrefer faible.
Grande densité de flux magnétique et par suite un couple très élevé pour une intensité donnée du courant dans l'induit.	Intensité du flux faible; couple de l'induit faible.
Induit de petites dimensions, collecteur également réduit et vitesse modérée de l'ensemble.	Induit et collecteur de diamètre beaucoup plus grand et vitesse beaucoup plus élevée.
Permet l'emploi d'une faible réduction d'engrenages et par conséquent d'un pas d'engrenage important, qui correspond à des dents bien proportionnées et solides.	Réduction d'engrenage plus grande et diminution d'autant du pas.
Les enroulements sont soumis à des actions électriques et à des efforts mécaniques d'un caractère déterminé.	Le caractère et la direction des enroulements changent rapidement, et tous les efforts subis sont de nature intermittente.
Le couple moyen est celui qui correspond au maximum.	Le couple moyen en atteint seulement les 2/3.
Couple de nature continue.	Couple de nature pulsatoire passant de 0 à 50 fois par seconde (pour une fréquence de 25 périodes par seconde).
Deux ou quatre pôles principaux; ce qui fait deux passages de flux dans l'induit et deux lignes de balais fixes.	14 pôles et par conséquent autant de divisions de l'induit (d'où peuvent résulter des déséquilibres) et autant de groupes de balais sur les collecteurs.
Peut développer un effort considérable pendant un temps très long, même l'induit maintenu au repos.	Lorsque pareil cas se produit, on peut brûler les bobines court-circuitées sous les balais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Toutes les connexions d'enroulement d'induit sont faites directement au collecteur.	Les puissances élevées ne se réalisent qu'avec des résistances introduites entre les bobines et les barres du collecteur.
La puissance développée avec un poids donné de matière rentre parfaitement dans les conditions raisonnables de la pratique.	Il faut doubler la proportion.
On peut réaliser la commande directe avec un induit et des inducteurs offrant l'impédance voulue et le jeu nécessaire entre l'induit et l'inducteur.	Ne peut pas se réaliser.
»	Poids et prix plus élevés, amortissement plus rapide.
Se prête mieux au freinage.	»

642. Moteurs triphasés. — Les moteurs d'induction triphasés sans collecteur (avec entrefer limité à 3 millimètres au maximum pour obtenir un facteur de puissance et une surcharge suffisants, ce qui est possible avec des paliers assez grands) offrent l'avantage très appréciable d'avoir automatiquement, en rampes comme en paliers, une vitesse de train à peu près constante, sans recourir à un freinage automatique, et d'éviter ainsi dans les descentes une grande usure des bandages et des sabots.

En prenant des précautions pour les croisements des connexions de bouts de ces moteurs, on peut obtenir, dans leur construction, une isolation presque aussi élevée que dans les moteurs monophasés. Le facteur de puissance atteint 0,80 à 0,95 au démarrage, mais il baisse beaucoup aux faibles charges où il descend jusqu'à 0,50 ; de là l'usage des grandes vitesses et des basses fréquences.

Les pertes au démarrage (on a vu que le couple au démarrage pour les moteurs alternatifs est proportionnel au carré de la tension, inconvénient grave pour les lignes à fortes rampes) sont notablement plus fortes avec le courant triphasé qu'avec le courant monophasé et qu'avec le courant continu (groupement en série-parallèle). Si on représente par 1 les pertes dues au démarrage par courant continu, on peut prendre approximativement les chiffres suivants pour les moteurs triphasés, savoir : moteurs avec démarrage par résistances, 1,53 ; moteurs avec démarrage par connexions étoile-triangle, 1,29, et moteurs en cascade, 1,98 (moteurs de 250 à 300 HP). Par suite, les moteurs triphasés ne conviennent pas pour les services à arrêts fréquents, où les faibles accélérations sont inadmissibles.

Les changements de direction se font aisément, pour les moteurs à courant continu ou monophasé, en changeant les connexions du rotor et dans les moteurs triphasés, en changeant les connexions du stator ; pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les moteurs à répulsion dont le rotor n'est pas relié directement à la ligne, mais par un transformateur, on peut soit renverser les balais (Brown), soit changer les connexions du stator.

Les fortes variations du profil en long exigent, pour les moteurs triphasés, l'adoption de deux vitesses différentes, soit en couplant les moteurs en cascade (dans ce cas, pour obtenir un rendement à peu près convenable, il faut avoir recours à une faible fréquence), soit en faisant varier

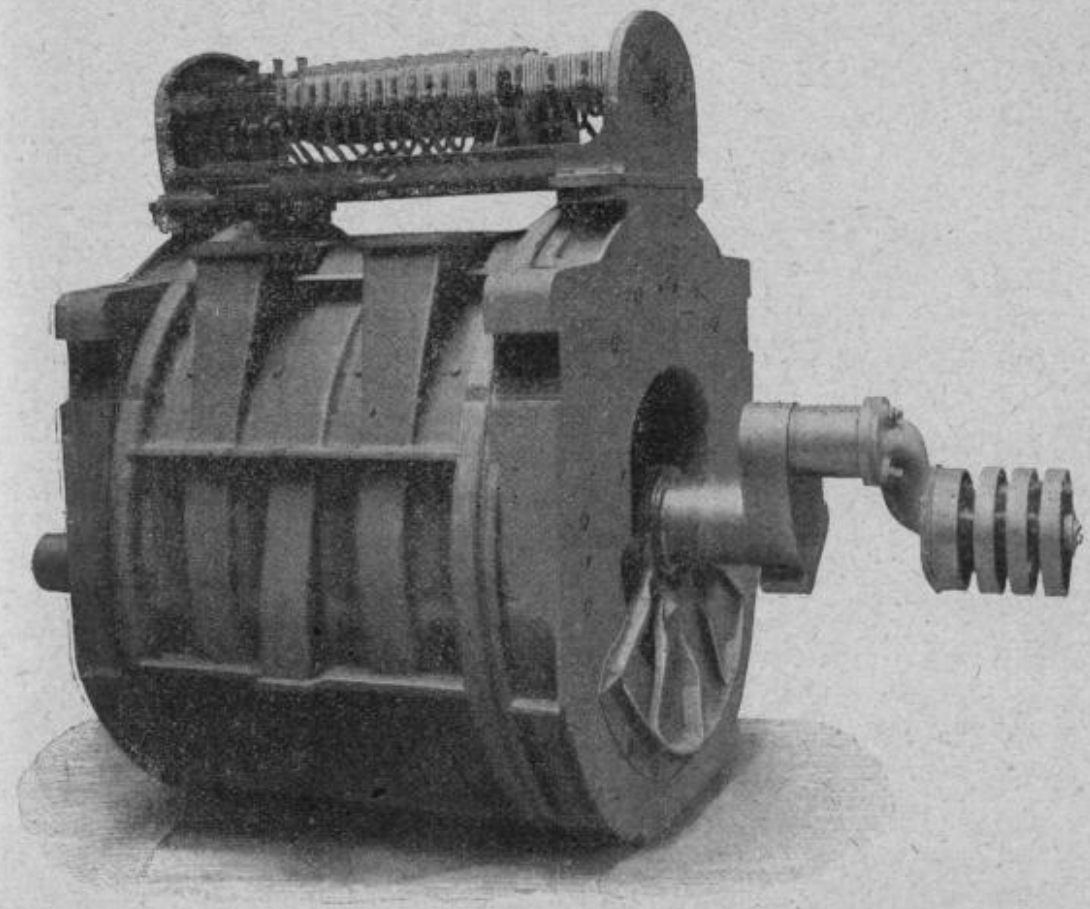


Fig. 1885. — Moteur triphasé Westinghouse, 16,7 périodes 250 tours. (Traction.)

le nombre des pôles du moteur, ce qui entraîne une grande complication, annulant toute la simplicité offerte par l'équipement à courant triphasé.

Les moteurs triphasés en usage n'ont que de très faibles accélérations (inférieures à $0^m,3$ par seconde), et on ne pourrait augmenter l'accélération qu'au moyen d'artifices compliqués (changement de connexions de triangle en étoile, lourds transformateurs de réglage) ou en sacrifiant le facteur de puissance en marche. Les moteurs en cascade sont les moins bons à ce point de vue, car ils ne permettent d'augmenter le couple que de 50 à 70 0/0 au démarrage.

L'abaissement de la tension du courant d'alimentation détermine une diminution de puissance et, par suite, le courant absorbé augmente très

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rapidement pour compenser cette diminution de puissance. Le moteur peut même se décrocher si l'abaissement de tension est par trop considérable, ce qui a lieu au moment où le locomoteur s'engage sur une rampe.

Le courant triphasé permet de restituer aux descentes, lorsque les moteurs tournent au-dessus du synchronisme, une partie de l'énergie à la station génératrice ; mais son principal avantage se trouve dans les stations de transformation offrant un grand caractère de simplicité, réduisant les frais d'entretien, de surveillance, ainsi que le coût de leur établissement.

L'emploi pratique de la haute tension directement dans la voiture (comme dans la ligne Marienfeld à Zossen) conduit à une réduction importante des frais d'établissement par la diminution du poids de cuivre des conducteurs et la suppression ou le plus grand espacement des sous-stations, tout en permettant l'emploi de locomotives de grande puissance.

Les moteurs asynchrones sont de beaucoup les plus utilisés, car ils peuvent donner un couple puissant ; néanmoins, pour les lignes à arrêts nombreux, les moteurs synchrones sont préférables et, sur les lignes interurbaines, à longs parcours, leur facteur de puissance élevé et leur vitesse pratiquement constante compensent amplement les inconvénients provenant de leur paresse au démarrage.

Quant à l'enroulement des moteurs triphasés, il se fait en tambour avec bobines calibrées et bobinage à chevauchement, c'est-à-dire que les rainures des tôles sont successivement occupées par des fils appartenant à des phases différentes.

Pour augmenter le couple au démarrage, on modifie soit la tension aux bornes en connectant de manières différentes les bobines secondaires d'un transformateur local (courant à haute tension avec transformateur-réducteur sur la voiture), soit le couplage des enroulements inducteurs. Dans ce dernier cas, on peut passer du groupement en étoile au groupement en triangle, ce qui modifie les tensions efficaces réelles entre les extrémités de chaque circuit dans le rapport $\sqrt{\frac{3}{1}}$. On peut aussi grouper les enroulements de chaque phase en plusieurs sections et obtenir des groupements tantôt en série (au démarrage), tantôt en parallèle (service normal). Enfin, on a recours au groupement des inducteurs, d'une part, et à celui des induits, d'autre part, en série pour la marche normale et en parallèle lors du démarrage.

Pour modifier la vitesse en cours de route, on procède de plusieurs façons : en insérant des résistances par changement de fréquence (au cas où on a deux lignes de fréquences différentes), par commutation des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pôles et enfin par groupement en tandem, mais avec deux moteurs au moins.

Lorsque, dans un train marchant à pleine vitesse, on couple des moteurs en cascade, la force vive correspondant à la différence des deux vitesses est également récupérée sous forme électrique et la vitesse du train est réduite à moitié sans aucun freinage mécanique.

Le système de réglage de la vitesse par le montage en cascade ou en tandem a été imaginé simultanément par Steinmetz aux États-Unis et par Görges en Allemagne en 1897. Il consiste en principe à relier deux moteurs mécaniquement, de façon à obtenir un couple moteur supérieur au couple normal avec une vitesse angulaire réduite de moitié. Les moteurs peuvent être rangés en deux groupes : le premier comprenant les moteurs dans lesquels on obtient le décalage des deux champs en espaçant convenablement les enroulements du stator, et le second, les moteurs dans lesquels les deux enroulements du stator sont faits avec des nombres de pôles différents. Quand on emploie deux enroulements sur le stator, la dispersion de celui qui occupe la partie des encoches la plus éloignée du rotor est très grande, ce qui augmente forcément la perte dans les dents.

Les principales objections que l'on fait aux moteurs ayant deux stators et deux rotors ou un rotor commun sont : l'augmentation des pertes par dispersion magnétique et par effet Joule, le prix élevé, le faible rendement, le petit facteur de puissance et l'impossibilité de supporter les surcharges.

Dans cet ordre d'idée, il est intéressant d'appeler l'attention sur un moteur d'induction construit par la Sandycroft Foundry Cº Limited, qui est un moteur en cascade perfectionné ayant deux systèmes de champs magnétiques superposés dans le même bâti ; le second champ prend naissance dans le rotor et donne lieu à des courants induits dans le rotor. Le stator porte un seul enroulement ; il est muni de bornes qui sont reliées deux par deux, par des résistances, pendant le démarrage ou quand on règle la vitesse par un rhéostat, et sont mises en court-circuit quand le moteur tourne à sa vitesse de régime. Le rotor porte deux enroulements, et il est muni de bagues permettant divers couplages, s'il doit tourner à plusieurs vitesses de régime.

Dans les moteurs des locomotives du Simplon, les moteurs de 850 HP sont avec rotors en court-circuit. Le couple maximum au démarrage est obtenu par un choix convenable de la résistance du rotor, et le réglage de ce couple, suivant les besoins, est effectué par une variation de la tension d'alimentation. Le couple moteur croît en même temps que la tension, et suivant une certaine fonction de la résistance du rotor.

Le couple maximum disponible atteint au démarrage, pour un des moteurs de la série, 915 kg : m ; mais, en service, on ne dépasse pas le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couple de 500 kg : m ; la consommation spécifique est dans le premier cas égale à 0,46 ampère sous 550 volts contre 0,59 ampère en marche normale de 200 chevaux à 470 tours.

L'utilisation de la plus grande partie du poids adhérent du matériel roulant conduit tout naturellement à la commande d'un seul poste de manœuvre des moteurs attaquant les différents essieux des voitures motrices, c'est-à-dire à l'emploi du système à unités multiples imaginé par Sprague. En constituant des trains par des voitures motrices entraînant elles-mêmes, si on veut, des remorques, on a le moyen de conserver une correspondance parfaite entre la puissance motrice et la densité du trafic.

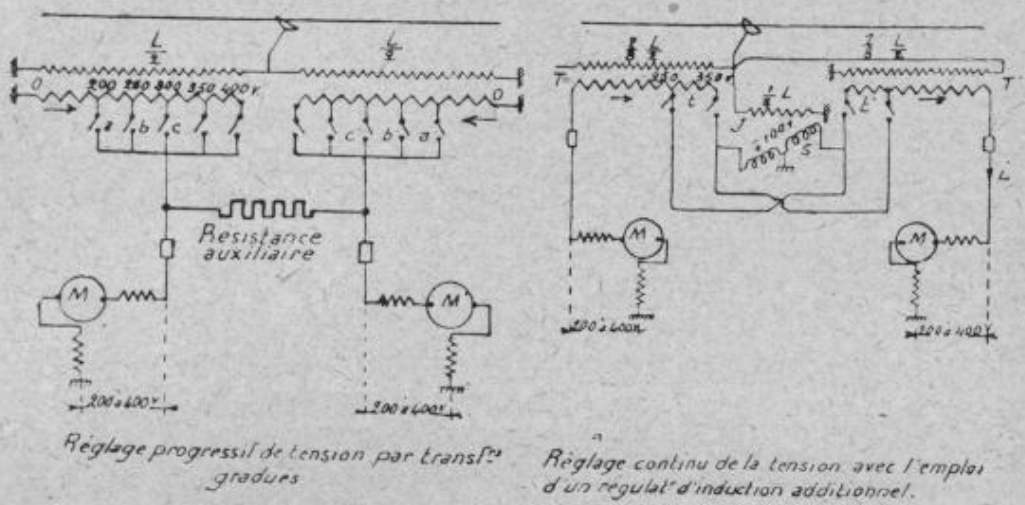


FIG. 1885. — Schémas de réglage de la tension pour moteur d'induction de locomotives.

L'examen de divers exemples de lignes de banlieue où circulent des trains à unités multiples (lignes françaises, allemandes, anglaises et américaines) montre que l'on tend de plus en plus à augmenter la puissance des moteurs et le nombre d'essieux attaqués.

Dans le système Thomson-Houston, que nous avons signalé plus haut, un combinateur principal placé sur chaque plate-forme, et dont la manœuvre est identique à celle des combinateurs ordinaires à cylindre ou contrôleurs, commande à distance et synchroniquement, pour toutes les voitures motrices du train, les interrupteurs électro-magnétiques asservis, dont les attributions sont celles des combinateurs de commande des moteurs dans les systèmes ordinaires.

L'emploi du système à unités multiples (1) permet de supprimer toutes

(1) Les systèmes d'unités multiples ou d'unités doubles ont pour but de diviser le courant en autant de parties que cela est nécessaire pour obtenir un fonctionnement satisfaisant des organes distributeurs et de tous les appareils qui constituent un équipement. Les contrôleurs sont commandés simultanément dans toutes les voitures accouplées à l'aide d'un servo-moteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les manœuvres qu'exige la traction à vapeur, manœuvres de formation des trains, de mise en pression et de ravitaillement des locomotives à vapeur. Il donne aussi le moyen de disposer d'un emplacement moins grand pour les gares, ce qui a beaucoup d'importance dans les grandes villes où les terrains sont chers, en raison de la suppression des temps pendant lesquels chaque convoi occupe les voies de la gare, ce qui, avec le système ordinaire, demande une superficie de terrain relativement considérable.

De nombreuses lignes de tramways installées par la Compagnie Thomson-Houston fonctionnent par l'emploi du système à unités multiples. Une des plus importantes en France est celle de Nice et du Littoral méditerranéen (de Cannes à Menton, soit 46 kilomètres).

Des appareils spéciaux ont, en outre, pour but de rendre impossible le changement de marche tant que le courant passe encore dans les moteurs, de ne permettre le passage du courant que lorsque tous les inverseurs de marche sont à leur place, de rendre impossible le couplage en série de plusieurs groupes de moteurs quand l'un des moteurs est hors circuit, de permettre d'arrêter le train d'un point quelconque par la suppression du courant et l'application des freins, d'assurer, en cas de rupture d'attelage, la suppression du courant dans la moitié du train qui n'est pas sous le contrôle du mécanicien, enfin de pouvoir isoler un circuit local, c'est-à-dire un groupe quelconque de dispositifs électromagnétiques qui commandent une voiture.

L'emploi de batteries-tampons pour courant triphasé a été résolu, d'une façon très simple, à l'usine de Carlsfund (Allemagne), c'est-à-dire sans l'aide de relais et d'appareils trop délicats. La dynamo de charge et de décharge et un moteur synchrone sont montés sur un arbre commun auquel est reliée une commutatrice par l'intermédiaire d'un manchon d'accouplement. Cette dernière est construite de telle sorte qu'en déplaçant la couronne annulaire on arrive à amener le champ dû au courant triphasé dans la direction du champ polaire, de manière que ces deux champs soient en opposition. La tension du côté continu de la transformation ne dépend plus alors seulement du champ polaire seul, mais bien de la différence des deux champs. Dans le circuit d'excitation auxiliaire (la dynamo est à pôles auxiliaires excités par une dérivation du courant de charge ou de décharge de la batterie, et la commutatrice a son courant d'excitation également emprunté aux accumulateurs), desservi par le côté continu de la commutatrice, est intercalé un ampèremètre qui sert à mesurer le cou-

Les nouveaux « multiplex units », adoptés depuis peu de temps, ont pour objet le remplacement du contrôleur par un ou plusieurs tambours rotatifs, dits contacteurs, disposition qui a permis de donner une augmentation de capacité très notable au matériel de traction et d'abaisser la température initiale dans les moteurs de traction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rant d'excitation de la commutatrice, ce qui permet de régler celle-ci pour n'importe quelle charge moyenne, et l'action du tamponnage peut être vérifiée entre les plus grandes limites. L'introduction de la batterie-tampon a provoqué une diminution des frais d'exploitation de l'usine de 0 fr. 25 par kilowatt-heure utile fourni au réseau.

Un projet de réglementation des moteurs de traction à courant continu a été présenté au Congrès international de Milan par l'Union internationale des tramwàys et des chemins de fer d'intérêt local. Ce projet, élaboré par un groupe de professeurs et de praticiens, parmi lesquels figurent d'éminents représentants de la science électrique, MM. Kapp, A. Blondel, Swinburne, Macloskie, a pour but de définir les prescriptions qui devront être observées dans les offres de vente et dans l'exécution éventuelle de celles-ci, si elles n'ont pas été préalablement établies par un accord entre le vendeur et l'acheteur. Elles visent : 1° les définitions générales précisant la portée qu'il convient d'attacher aux expressions : puissance, effort de traction, vitesse, rendement, échauffement ; 2° certaines indications rapportées à la tension normale de service et concernant la puissance avec l'intensité de courant correspondante, le rendement, la nature des matières isolantes, les dimensions d'encombrement ; 3° des données sur la construction des moteurs, relatives à la forme des inducteurs, aux paliers, aux collecteurs, à l'isolement des enroulements et à l'interchangeabilité des pièces ; 4° enfin des prescriptions touchant la réception des moteurs ; détermination de la puissance mécanique, prescription pour les essais de puissance des moteurs par la mesure de l'élévation de température, puis la détermination du rendement des moteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CINQUIÈME PARTIE

ÉLECTROCHIMIE — ÉLECTROMÉTALLURGIE

CHAPITRE XXXII

ÉLECTROCHIMIE

I. — MÉTALLURGIE DES MÉTAUX PAR VOIE HUMIDE

643. Tension électrique. — Densité de courant. — Électrodes. — Tout sel métallique et toute base à l'état de dissolution, dans un liquide approprié, sont décomposés quand ils sont traversés par un courant électrique. Telle est l'opération à laquelle on a donné le nom d'*électrolyse par voie humide*. Suivant le travail à opérer, on fait entrer en jeu soit des anodes solubles, soit des anodes insolubles, et pour chaque électrolyte, il existe une force électromotrice sans laquelle l'électrolyse ne peut pas s'effectuer complètement. Quant au travail chimique, il est exclusivement mesuré par la force électromotrice de décomposition minima nécessaire à la polarisation.

Le courant électrique est constitué par le transport des ions [1], et le pouvoir conducteur des électrolytes est proportionnel à la mobilité des ions libres. En se plaçant dans les meilleures conditions de température, les tensions nécessaires aux réactions dont s'occupe l'industrie électrochimique ne s'écartent guère des limites de 1 à 5 volts.

La tension de polarisation, qui croît avec la dilution du sel, est la somme des tensions cathodique et anodique, ou autrement dit, de la tension

---

[1] Les ions positifs ont reçu le nom de *cations* et les ions négatifs celui de *anions*.
La dissociation électrolytique a lieu généralement comme suit : pour les sels, le métal forme le cation ; le reste, élément ou radical, forme l'anion. Pour les acides, l'hydrogène basique forme le cation ; le reste l'anion. Pour les bases, le métal forme le cation ; l'hydrogène, l'anion.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

employée pour décharger l'anion et celle pour décharger le cation. Dès qu'une force électromotrice, appliquée aux bornes, est égale ou surpasse la tension de décomposition de l'électrolyte, les produits de l'électrolyse apparaissent qui résultent du retour de l'ion à la forme atomique usuelle (1).

C'est à la cathode que se déposent la plupart des métaux ; cependant les métaux qui forment des peroxydes conducteurs du courant, comme le mannèse et le plomb, se déposent très bien à cet état à l'anode.

Si l'anode est attaquable, le produit de décharge de l'ion pourra l'attaquer et la dissoudre ou la transformer chimiquement, ou bien un corps réducteur, introduit dans le système, absorbera l'oxygène ou le gaz produit à l'anode, et un corps oxydant agira à la cathode en comburant l'hydrogène.

En électrolyse, la recherche des tensions de décomposition présente un intérêt pratique fondamental. Si nous appelons i l'intensité du courant qui traverse l'électrolyse, ε_a la tension qui s'exerce à l'anode, ε_c celle à la cathode, ri la tension nécessaire pour vaincre la résistance r du bain, et enfin e la tension électrique aux bornes de la cuve, on a :

$$e = \varepsilon_a + \varepsilon_c + ri.$$

Les valeurs de ε_a et ε_c dépendent l'une et l'autre de la concentration des cations et des anions. Quand la concentration s'élève dans le liquide, sa décharge devient plus facile et inversement.

Si on néglige la tension ri, qu'on peut d'ailleurs rendre aussi petite que l'on voudra en réduisant i, en augmentant la surface des électrodes et en rapprochant celles-ci, la tension électrique ou la tension de polarisation minima pour effectuer une électrolyse quelconque s'obtient par la formule :

$$e = \varepsilon_a + \varepsilon_c.$$

Le tableau ci-après donne les valeurs de ε_a et de ε_c pour des concentrations normales :

1° A la cathode : ε_c.

K, + 3,20 ;	Na, + 2,82 ;	Ba, + 2,75	Sr, + 2,54 ;	Ca, + 2,21 ;
Mg, + 1,508 ;	Al, + 1,276 ;	Mn, + 1,097 ;	Zn, + 0,801 ;	Fe, + 0,66 ;
Ni, + 0,60 ;	Co, + 0,45 ;	Cd, + 0,439 ;	Sn, + 0,192 ;	Pb, + 0,162 ;
		H, ± 0.		

(1) Nernst attribue à tout corps ionisable au contact d'une solution une certaine tension électrolytique de dissolution, qui mesure précisément la tendance du corps à l'ionisation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° A l'anode : ε_a.

Fl, + 1,96 ; SO^4, + 1,9 ; Cl, + 1,417 ; O, + 1,12 ; Br, + 0,993 et I, + 0,520.

La concentration des anions ne varie pas suffisamment au cours de l'électrolyse pour faire varier sensiblement la valeur de ε_a. Au contraire, la concentration des cations à précipiter sur la cathode diminue constamment au cours de l'électrolyse, jusqu'à ce qu'elle devienne pratiquement nulle : il en résulte des variations sensibles pour ε_c, et, par suite, pour e. Ces variations sont données par la formule de Nernst :

$$\varepsilon_e = \frac{K}{V} \log \frac{P}{C} \text{ volts ;}$$

K, constante pour une même température ; V, valence du métal précipité ; C, concentration des ions-métal, et P, la tension de dissolution de ce métal.

Pour calculer approximativement la tension de décomposition, on applique assez couramment, en électrochimie appliquée, la formule de Thomson :

$$\varepsilon = 0{,}0433\ Q. ;$$

ε tension de décomposition en volts et Q la somme algébrique, évaluée en grandes calories et rapportée à 1 équivalent-gramme du principal ion réagissant, des quantités de chaleur absorbées et dégagées par l'ensemble des réactions qui se produisent dans l'opération électrolytique. Cette formule n'a un caractère rigoureux que dans le cas où la tension de décomposition ne varie pas avec la température. Les traités spéciaux ou les aide-mémoire donnent les renseignements concernant les poids atomiques, valences équivalentes électro-chimiques, équivalents-grammes des corps simples, conductivité et poids spécifiques des solutions des principaux électrolytes et les chaleurs de formation des composés chimiques usuels.

Ces dernières interviennent non seulement dans les calculs électrolytiques, mais encore dans les calculs électrothermiques. Lorsque l'électrolytique est complexe et renferme plusieurs anions et plusieurs cations, la formule Thomson peut être employée pour déterminer l'ordre des décompositions électrolytiques.

En réalité, il n'existe guère qu'un métal sur lequel la décharge d'hydrogène suive la formule de Nernst, c'est le platine platiné. Pour les autres, une f. é. m. supplémentaire est nécessaire pour libérer le gaz ; ce supplément de f. é. m., par rapport à celle du phénomène réversible est désignée sous le nom de surtension électrolytique. Le tableau suivant, qui a été

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

établi par Caspari, donne les différentes valeurs des surtensions cathodiques de l'hydrogène sur des métaux usuels en solution acide :

Pt, 0,00;	Au, 0,02;	Fe, 0,08;	Ag, 0,15;	Ni, 0,21;	Cu, 0,23;
Cd, 0,48;	Sn, 0,53;	Pb, 0,64;	Zn, 0,70 et Hg, 0,78.		

Les métaux qui ne peuvent pas se déposer en solution fortement acide sont ceux suivants qui nécessitent, pour recouvrir la cathode, des tensions électriques supérieures à la tension pour laquelle l'hydrogène commence

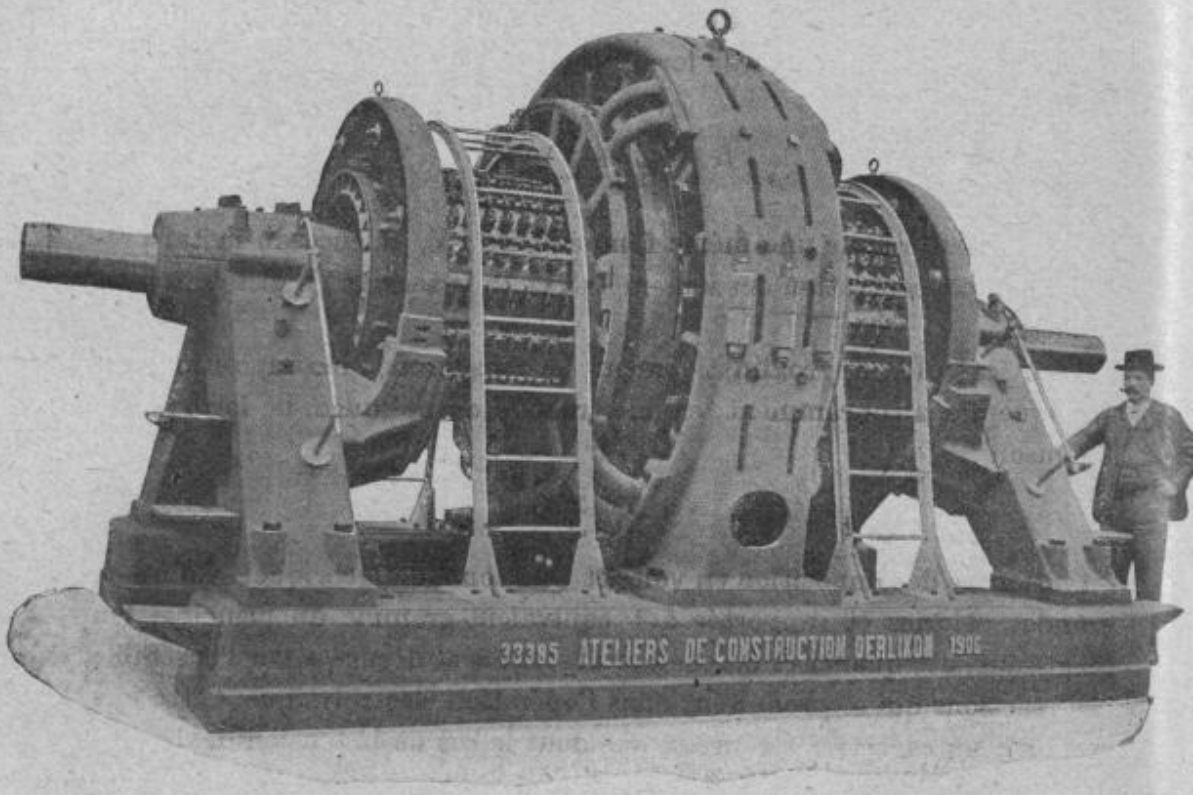


Fig. 1887. — Dynamo pour électrochimie.

à se dégager (Mn, Zn, Fe, Ni, Co, Cd, Sn et Pl). Les métaux qui sont susceptibles, au contraire, de se déposer sur la cathode en solution fortement acide sont ceux qui ne nécessitent pour cette précipitation que des tensions inférieures à la tension de polarisation de l'hydrogène (Cu, Ao, Bi, Sb, Ag, Pd, Pt et Au).

Si la densité de courant est trop forte, elle entraîne la formation de dépôts pulvérulents, noirâtres ; faible, elle occasionne une cristallisation, également défavorable. Le dépôt serré, comme le métal fondu, n'est guère obtenu qu'avec des densités moyennes qu'il importe de noter pour chaque cas. Quelquefois, cependant, une forte intensité peut offrir l'avantage de soustraire un métal aisément soluble à l'attaque du bain.

La densité de courant doit être aussi grande que possible, afin que la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

durée de l'électrolyse soit réduite au minimum ; la valeur que la densité ne doit pas dépasser (celle où elle commence à provoquer des dépôts spongieux ou pulvérulents) est atteinte d'autant plus vite que le liquide est plus pauvre en métal. Elle est de plus limitée à la valeur pour laquelle la diffusion qui dirige vers la cathode le liquide entourant l'anode, ne peut plus compenser assez vite l'appauvrissement en métal-ions du liquide avoisinant immédiatement la cathode.

Les principales conditions auxquelles doivent satisfaire les électrodes sont les suivantes : être inattaquables par les bains employés et ne pas absorber de gaz, au cours de l'électrolyse ; offrir une forme telle que la densité du courant sur l'électrode qui reçoit le dépôt soit aussi homogène que possible ; enfin, la forme des électrodes doit favoriser le plus possible la diffusion du liquide de l'anode vers la cathode.

On favorise la diffusion en imprimant à l'électrolyse un mouvement par rapport aux électrodes, ou à celles-ci par rapport à l'électrolyte ; la chaleur aussi favorise la diffusion.

La résistance d'un électrolyte dépend du degré de concentration ; en général, elle augmente rapidement aux teneurs faibles ; elle varie également avec la température et diminue à mesure que celle-ci augmente. Pour une température donnée, chaque électrolyte présente, le plus souvent, à une teneur moyenne, son maximum de conductibilité. L'addition d'un sel au bain augmente généralement sa conductibilité.

En solution acide ou neutre, où les principaux métaux se dissolvent, le matériel anodique inattaquable se réduit au platine ; mais, en solution alcaline, plusieurs métaux restant indissous, on peut employer des anodes en fer, de nickel, qui, en outre de leur bon marché, offrent l'avantage de consommer la moindre surtension, tant à l'anode qu'à la cathode.

La matière de l'électrode elle-même joue, vis-à-vis d'une réaction voisine, un rôle catalytique marqué. Mais, à côté de l'électrode, les matières ionisées ou non qui l'avoisinent peuvent aussi jouer un rôle catalytique puissant sur les réactions (1).

La séparation de plusieurs métaux par les procédés purement électrolytiques comprend une ou plusieurs des opérations suivantes : addition à leur solution d'un acide fort qui permet une première scission des métaux en deux divisions (et davantage si on fait usage de cathodes constituées par différents métaux) ; formation, dans chacune de ces divi-

(1) Désignant par J le courant, t le temps en secondes pendant lequel le courant circule dans la solution du sel métallique, a un facteur qui dépend de l'état moléculaire du sel ou équivalent électrochimique, G la quantité dissociée d'un électrolyte en milligrammes, la formule ci-après permet de résoudre les différents problèmes relatifs aux effets chimiques du courant électrique :

$$G = aJt.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sions, d'ions complexes en vue d'espacer suffisamment les valeurs des tensions de polarisation relatives à chaque métal ; suppression des gaz aux électrodes ; séparation successive des métaux à la cathode par accroissement graduel de la tension de polarisation. On utilise aussi la propriété qu'ont un grand nombre de métaux de pouvoir, dans certaines conditions, se déposer à l'état de peroxydes sur l'anode.

Dans les opérations électrolytiques, la densité de courant a une influence capitale sur l'état du dépôt à la cathode ; autrement dit, pour chaque électrolyte et suivant la température, il faut employer un courant donné pour en extraire le métal en quantité voulue. La densité de courant est proportionnelle au rapport de l'équivalent électrochimique à la densité de l'élément électro-positif déposé. Les traités spéciaux renseignent sur les densités de courant et les forces électromotrices à appliquer à l'électrolyse des divers sels utilisés comme électrolytes.

Les électrodes industrielles les plus employées sont : le carbone graphitisé, le fer ou la fonte, la magnétite artificielle, le platine. Au point de vue de leur montage, elles sont unipolaires ou bipolaires. Les premières sont exclusivement soit cathode, soit anode et les bipolaires sont anode sur une face et cathode sur l'autre face.

Les matières ordinairement employées pour les diaphragmes sont : la toile d'amiante, la porcelaine poreuse ou le ciment poreux.

Les cuves sont construites en diverses matières dont les plus fréquemment employées sont : le ciment ou béton armé paraffiné selon les cas, le fer ou la fonte portant une couche de ciment ou galvanisés, le bois intérieurement doublé de plomb, l'ardoise avec joints en asphalte, le grès, le granit, la lave de Volvic, enfin la porcelaine ou le verre.

Les cuves à aluminium en 1902 n'absorbaient pas plus de 5.000 ampères ; elles ont successivement monté à 8.000, 12.000 et 15.000 ampères, et enfin l'usine de Saint-Jean-de-Maurienne a mis en marche (34) des cuves de 24.000 ampères.

L'électrolyse par voie humide n'est qu'assez peu employée pour le traitement direct des minerais de cuivre, de plomb, d'argent, de bismuth, de cadmium et de mercure.

En ce qui concerne ces métaux, c'est l'affinage qui constitue le domaine principal de l'application de l'électrolyse humide.

Le métal déposé par ce procédé est excessivement pur, et, de plus, la méthode électrolytique permet de recueillir sous forme de boues les plus petites teneurs en métaux précieux.

Mais, à part le développement considérable du raffinage du cuivre et de la précipitation électrolytique de l'or de ses solutions cyanurées, les progrès en électrolyse sont restés loin de ceux réalisés en électrothermie et en électrométallurgie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cependant une nouvelle application de l'électrolyse qui vient au point de vue industriel d'entrer dans la lice, paraît appelé à jouer un très grand rôle ; c'est l'obtention du fer électrolytiquement.

L'électrolyse du fer a fait l'objet de nombreuses recherches de la part de Müller, de Burgess, de Fischer, Boucher, etc. Ce fer en effet possède des propriétés très précieuses, hystérésis très faible, grande perméabilité, résistance élevée au point de vue mécanique et allongement considérable. Le procédé de la Société « Le Fer » auquel nous avons voulu faire allusion, est mis au point dans les usines de la Société des Établissements Bouchayer et Viallet permettant de fabriquer directement à partir d'anodes en gueuses de fonte, soit des tuyaux, soit des tubes de fer électrolytiques.

Procédé Sherard Cowper-Coles. — Ce nouveau procédé permettrait non seulement d'extraire le fer pur de ses minerais, mais encore de l'obtenir directement sous la forme désirée : tôle, tube, fil, ce qui supprime le laminage, l'étirage, la coulée.

On peut partir soit de la fonte, soit du minerai de fer, le traitement préalable de ce dernier consistant en un simple concassage. On introduit ensuite ce minerai ou la fonte dans des cuves électrolytiques dans lesquelles se produit une circulation permanente d'acide. Le fer et le minerai sont reliés au pôle positif de la source d'énergie électrique.

Comme cathode on utilise un cylindre rotatif ou une plaque selon que l'on veut obtenir des tubes ou des tôles. La tension doit être maintenue assez basse et la densité de courant cathodique très élevée. L'électrolyte est une solution d'acide créosolsulfonique à 20 0/0 que l'on maintient à la température de 70° C.

La densité maxima à cette température est de 10,76 ampères par décimètre carré de surface cathodique. A l'électrolyte on ajoute, dans certaines circonstances, une petite quantité de sulfure de carbone. La circulation du liquide est assurée par des pompes.

Pour la fabrication des tubes, on interpose un recouvrement en plomb sur le noyau avant d'effectuer le dépôt électrolytique. Le fer se dépose à l'état absolument dense sur le plomb. En chauffant ensuite l'ensemble, le plomb coule et l'on retire le tube de fer.

On peut, à volonté, doser la teneur en carbone et en silicium du fer déposé.

Le procédé permet aussi la préparation d'alliages de fer et on peut recouvrir intérieurement et extérieurement les tubes d'une couche de cuivre en déposant ce métal avant ou après le fer.

Le prix de revient serait de 135 francs par tonne de fer fini.

644. Galvanoplastie. — La galvanoplastie, fondée par le physicien russe Jacobi, la première en date des applications de l'électrolyse par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voie humide, se divise de nos jours en plusieurs branches, qui sont : la galvanoplastie proprement dite, ou reproduction d'un objet déterminé au moyen d'un dépôt électrique métallique ; l'électrotypie — dont Spencer posa les premiers principes, — qui est l'ensemble de procédés ayant pour but de reproduire des compositions typographiques et des gravures ; la galvanostégie ou galvanisation, et la galvanotypie.

La galvanostégie, ou galvanisation électrolytique, est de beaucoup supérieure à la galvanisation ordinaire : elle donne des dépôts plus uniformes, plus réguliers, plus adhérents, et nécessite, d'autre part, une dépense de métal beaucoup moindre pour obtenir une protection toujours plus efficace.

Cette industrie a pris un développement encore plus considérable depuis qu'on a reconnu les avantages de la galvanisation des tubes pour chaudières, tuyauteries, économiseurs, condenseurs, etc.

La galvanisation à froid s'est répandue avec une grande envergure en Angleterre où l'on applique le procédé Cowper-Coles, en Allemagne, aux États-Unis. C'est de nos jours la branche la plus importante de la galvanostégie.

Les principales opérations industrielles de cette nature sont : le cuivrage, l'étamage, le laitonisage, le bronzage, le nickelage, le zingage, l'argenture et la dorure. Au moyen de dépôts électrolytiques, on obtient des tubes, des planches, des fils de cuivre (à l'aide des procédés dits centrifuges), ainsi que le zingage des tôles, pour la fabrication desquels produits d'importantes usines se sont créées un peu partout.

645. Affinage du cuivre. — Les premiers brevets pour l'affinage du cuivre, qui reste toujours l'application la plus importante de l'électrolyse des solutions métalliques, ont été pris par J.-B. Elkington en 1865 et 1869. Les procédés que l'on utilise de nos jours sont ceux de Marchese, de Siemens et Halske, de Borchers, R. Frank et E. Gunther, et enfin de Perreur-Lloyd et de Elmorre.

La solution de sulfate de cuivre acide constitue l'électrolyte le plus avantageux ; sa résistance spécifique est de 20 à 25 ohms. L'addition d'une faible proportion d'un chlorure soluble précipite dans les boues l'argent, ainsi que l'antimoine. Les raffineries américaines emploient généralement des anodes en cuivre de teneur élevée (98 à 99,3 0/0) ; les cathodes, formées de feuilles minces de cuivre pur, obtenues par électro-déposition dans des voltamètres spéciaux, se recouvrent de cuivre très riche (99,93 0/0 de métal pur), avec de l'hydrogène comme principale impureté. L'or et l'argent passent dans les boues, et divers corps étrangers (arsenic, anti-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moine, bismuth, sulfate de cuivre et de nickel) se trouvent emportés dans la solution, en partie dans les boues. La production d'une cuve d'affinage dépend du courant total qui la traverse, du nombre d'électrodes en série qu'elle contient et de la durée du passage du courant. La densité du courant, en Amérique, varie de 90 à 330 ampères par mètre carré (moyenne, 160 à 190), et la force électromotrice n'excède pas 0,3 volt environ par cuve. La puissance nécessaire est de 2 à 3 HP par 100 kilogrammes de cuivre produits en vingt-quatre heures, et ce prix de revient s'élève jusqu'à 100 francs par tonne.

La circulation des électrolytes constitue un des facteurs les plus importants de cette industrie ; on la réalise par insufflation d'un courant d'air et en disposant les récipients contenant le liquide à électrolyser à une certaine hauteur. Les schlamms anodiques contiennent environ de 10 à 40 0/0 de cuivre, 5 à 15 0/0 d'argent et 0,01 à 0,07 0/0 d'or. Après séparation mécanique de la plus grande partie de l'acide sulfurique à 95 0/0 pendant douze à quatorze heures à 66° C., le cuivre, l'arsenic, le fer et le bismuth sont dissous. Le résidu est lavé à l'eau chaude, passé au filtre-presse et séché dans des chaudières en fonte. On le fond alors au four-réverbère avec de la soude et du sable. Cette opération fournit de l'argent avec une teneur de 1 à 2 0/0 d'or et 2 à 3 0/0 de cuivre. L'argent est alors raffiné par la méthode ordinaire ou par l'électrolyse.

Dans le procédé Elmorre, on comprime constamment le dépôt de cuivre en cours de formation pour donner au métal l'homogénéité et la résistance mécanique nécessaires. La cathode est un mandrin horizontal tournant, en acier poli, et l'anode est une masse de cuivre en forme d'U. La compression du dépôt est effectuée par des brunissoirs en agathe appuyés sur le cuivre par des ressorts.

M. Martyn-Change purifie le cuivre par électrolyse du cuivre brut fondu de la manière suivante ; s'il s'agit d'éliminer l'oxygène, le soufre, le phosphore, le sélénium ou l'arsenic, on fond le cuivre impur en présence d'un laitier constitué par du chlorure de calcium, et l'on fait passer dans la masse un courant électrique, le cuivre pur étant pris comme cathode. Le calcium libéré à la cathode s'empare de toutes les impuretés qui passent dans le laitier. S'il s'agit de purifier le cuivre d'impuretés comme le fer, on prend comme électrolyte une substance donnant de l'oxygène à l'anode, et l'on dispose le cuivre impur à l'anode ; le fer s'oxyde et disparaît dans le laitier.

La prospérité si croissante de cette industrie s'explique par l'économie du procédé et par les bénéfices énormes réalisés dans l'extraction de l'argent, de l'or et des schlamms qui s'accumulent dans les cuves. La proportion du cuivre raffiné par électrolyse, par rapport à la production mon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diale, dépasse 55 0/0 (1); il existait, en 1910, 38 raffineries jetant sur le marché annuellement près d'un demi-million de tonnes, dont une seule usine, la raffinerie de la Raritan Copper Works, à Perth-Amboy (E.-U) qui possède 2.788 bains, a une capacité de production de 130.000 tonnes par an. Au Canada, on a réussi à traiter des minerais de 2 à 4 0/0 de cuivre, ainsi que toutes sortes de vieux cuivre pour en faire du cuivre neuf. L'énergie dépensée varie de 13 à 20 HP par tonne de cuivre déposé, selon la teneur du métal.

Aux États-Unis et Canada, on comptait onze usines ; en Angleterre, trois ; en Allemagne, neuf ; en France, quatre ; en Russie, trois ; en Autriche, trois, et au Japon, deux.

La plus grande partie de ce cuivre électrolytique est tranformée par coulage, laminage et étirage en tôles, tubes et fils.

Aujourd'hui, au moyen du procédé Cowper-Cowles, on fabrique directement ces tôles, tubes et fils dans la cuve électrolytique.

La solution électrolytique est composée de 112,5 0/0 de sulfate de cuivre, et 13 0/0 d'acide sulfurique.

On la prépare dans des citernes, et elle n'est envoyée aux voltamètres qu'après un filtrage par injection sous l'influence de la lumière provenant de lampes à arc.

C'est principalement à la richesse des slims que leur donnent les minerais du pays que les raffineries américaines doivent leur prospérité, car la valeur de ces slimes couvre en général plusieurs fois le coût de la fabrication électrolytique.

Le seul défaut que l'on peut reprocher au système électrolytique est d'être lent : ainsi, au régime de 2 ampères par décimètre carré, le traitement du contenu d'une cuve dure une quarantaine de jours. Aussi de nom-

---

(1) D'après l'*Engineering and Mining Journal*, la production totale du cuivre, dans le monde entier, s'est élevée en 1909 à 839.225 tonnes contre 754.310 tonnes en 1908, soit une augmentation de 11,2 0/0. En 1897, la même production totale avait été de 399.730 tonnes ; on a donc pour 1909 une augmentation, sur 1897, de presque 110 0/0. La production en question se répartissait comme il suit, d'après les pays d'origine :

	1909 — Tonnes
Etats-Unis	540.310
Mexique	56.240
Espagne et Portugal	52.185
Japon	47.000
Australie	34.400
Canada	24.105
Allemagne	22.455
Russie	17.750
Pérou	16.000
Afrique	14.950
Autres pays	28.000
TOTAL	839.255

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

breux procédés ont été conseillés pour augmenter la rapidité de formation du dépôt tout en conservant à celui-ci la texture voulue, tels que rotation de la cathode, brunissage de la surface, injection contre la cathode.

M. Copwer-Cowles, par une rotation très rapide de la cathode, a poussé la densité jusqu'à 20 ampères par décimètre carré.

Les avantages du procédé électrolytique sur les méthodes d'extraction ont conduit à rechercher le moyen de l'appliquer à l'extraction directe du cuivre du minerai. Le procédé Laszczinski semble être une solution satisfaisante du problème. Il consiste à transformer le minerai en sulfate et à électrolyser la solution en employant des anodes de plomb recouvertes d'une enveloppe étroitement adhérente de tissu de coton. Ce procédé en usage dans la Pologne russe, des usines se sont crées, l'une en Sibérie et l'autre en Allemagne. A Paris, on applique le procédé L. M. Lafontaine, qui est également utilisé en Espagne et en Portugal.

Le sulfate de cuivre — employé pour le raffinage électrolytique du cuivre, en teinture, en galvanoplastie et en agriculture pour combattre les maladies de la vigne et autres plantes nourricières — est actuellement en majeure partie préparé par les procédés chimiques Lagache et par celui au cément, procédés coûteux et présentant certaines difficultés de fabrication. Par la voie électrolytique, on pouvait obtenir le sulfate de cuivre à 55 francs les 100 kilogrammes, en appliquant le système Campagne, qui consiste à produire de l'hydrocarbonate de cuivre, duquel on tire le sulfate de cuivre.

On électrolyse à une densité de courant de 1 à 1,5 amp. : dm^2, en chauffant de 40° à 50°. On neutralise l'acide libre dont s'enrichit le bain par des additions calculées de carbonate et d'oxyde de cuivre.

Thirot et Mage ont breveté un procédé qui consiste à maintenir constante la teneur en acide par des additions d'acide sulfurique et à maintenir également constante la teneur en cuivre en suspendant dans les bains des caisses renfermant des déchets de bronze oxydés.

On fabrique également le cuivre électrolytique en traitant des mattes riches tenant entre 72 et 80 0/0 de cuivre. Le courant nécessaire est de 50 ampères par mètre carré de surface de cathodes et on opère à une température de 50 à 60° avec une différence de potentiel que l'on maintient au-dessous de 1 volt.

Usine électro-métallurgique de Saint-Ours. — L'usine, née depuis la guerre, sinon de la guerre, est située à la gare de Saint-Ours-les-Roches, dans la petite plaine de Beauloup ménagée entre les coulées de lave des pays de Dôme et de Lonchadière.

Elle est rattachée à la « Société électro-métallurgique, procédé Grammont », des puissantes usines de Pont-de-Chéruy (Isère). Elle traite uniquement le cuivre : affinement du cuivre par l'électrolyse et fonte de laiton

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le four électrique. L'énergie électrique est fournie par les barrages de la Compagnie du gaz, sur la Sioule.

Le cuivre arrive à Saint-Ours à l'état brut. On traite aussi des scories. L'usine possède déjà 160 cuves à électrolyse ; d'autres sont en construction.

Actuellement, l'usine peut sortir 250 tonnes de cuivre électrolytique par mois. Notons que le cuivre ainsi obtenu est d'une pureté remarquable. L'analyse officielle a accusé une teneur de 99,99.

L'usine est outillée également pour le traitement et la récupération des sous-produits de l'électrolyse. Pour ne parler que du sulfate de cuivre — le plus important — la production est de 180 tonnes par mois, et elle va en s'intensifiant de jour en jour.

De l'électrolyse nous passons à la fonderie électrique. L'usine de Saint-Ours possède déjà quatre fours à laiton. Ils refondent des douilles de cartouches, des détonateurs, des étoupilles retour du front et de la tournure, de la limaille, fournies par les usines. Chaque four avale de 5 à 8 tonnes de métal. La fonte dure de huit à onze heures suivant la charge du four. Le courant arrive sous une tension de 20.000 volts et est transformé à l'usine. Pour porter la température à 1.200°, point de fusion du laiton, on fait passer, entre électrodes, un courant de 3.000 à 6.000 ampères sous 30 à 60 volts.

Chaque lingot de laiton ainsi obtenu pèse 55 kilogrammes. Après vérification les lingots sont expédiés à l'usine de Pont-de-Chéruy où ils sont laminés et étirés pour être livrés en feuilles ou en barres calibrées aux différentes fabrications de guerre.

Les quatre fours de l'usine de Saint-Ours peuvent couler 900 tonnes de laiton par mois.

646. Extraction et affinage du zinc. — L'*extraction* du zinc s'opère soit en utilisant directement, comme anodes, les minerais de zinc plongés dans un électrolyte formé de sels de zinc, soit par électrolyse d'une dissolution de sulfate de zinc à l'aide d'anodes insolubles (procédés Luckow, Blas, Miest, Létrange, Curie, Lange et Kosmann, Pertsch, Cassel, Kjellin, Siemens et Halske).

Dans le but d'obtenir un bon dépôt de zinc métallique, Paweck additionne l'électrolyse d'acide borique ou de borates. Ce procédé peut être employé pour le raffinage électrolytique du zinc. L'électrolyse a lieu à l'aide d'une densité de courant de 1 à 3 amp. : dm^2.

Dans le but d'éviter la formation de mousse, Siemens et Halske préconisent d'employer une densité de 20 à 50 fois plus grande à l'anode qu'à la cathode, soit 150 ampères par mètre carré à la cathode, et 3.000 à 7.000 ampères à l'anode. Le zinc électrolysé de cette façon est cristallin,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

absolument dense, uni et exempt de gemmes. Les mêmes inventeurs effectuent également l'électrolyse du sulfate de zinc sans diaphragme, en employant comme anode du peroxyde dense et massif, tel qu'il se dépose à l'anode dans des dissolutions de sel de plomb.

Pour éviter la production d'hydrogène et par suite la formation de zinc spongieux, le zinc se déposant à l'état métallique, C.-J. Tossizza extrait le zinc de ses minerais, abaisse la tension nécessaire en évitant la polarisation anodique.

L'opération s'effectue dans des vases séparés en deux compartiments par une cloison poreuse.

Dans le compartiment anodique, renfermant des anodes en charbon, la solution de sel de zinc est saturée d'acide sulfureux, celui-ci s'oxydant en acide sulfurique.

La redissolution du zinc peut être due dans certains cas à des impuretés qui s'accumulent pendant l'opération de l'électrolyse. Pour éviter cet inconvénient, Laszczinski fait usage d'une enveloppe qui s'applique autour de l'anode insoluble et est faite d'un tissu ou d'une matière absolument perméable.

Dans les procédés suivants, on électrolyse une solution de sel autre que le sulfate de zinc. M. L. Brunet fait appel au sulfite de zinc ; MM. Howard et G. Hadley emploient du chlorure ferrique qui passe sur le minerai renfermant l'oxyde de zinc et le dissout ; enfin M. Kaiser utilise une solution de chlorure de zinc préalablement débarrassée des métaux étrangers (fer, plomb, argent, etc.).

M. A. Eybert se sert du courant électrique non pour déposer le zinc métalliquement sur les cathodes mais pour attaquer les minerais et obtenir de l'oxyde de zinc.

Aux usines d'Olkusz (Pologne russe), on électrolyse des solutions de sulfate de zinc. S'il s'agit de traiter des blendes, on les soumet à un grillage satisfaisant à basse température ; le sulfate de fer s'oxyde et se décompose. Le minerai grillé est lessivé systématiquement, les liqueurs acides provenant de l'électrolyse passant d'abord sur le minerai le plus lessivé déjà et, en dernier lieu, sur le minerai grillé frais. On lessive rapidement et non par un contact prolongé. La calamine doit être lessivée avec de l'acide sulfurique, la gangue absorbant aussi une partie de cet acide. On purifie les solutions en transformant d'abord l'oxydule de fer en oxyde par l'air, et en le précipitant par l'oxyde de zinc. Le cuivre, l'arsenic et le cadmium sont précipités par l'hydrogène sulfuré. L'argent reste dans le résidu de minerai, d'où on peut l'extraire par un lessivage spécial.

Dans l'électrolyte, il n'y a plus, comme impureté, que le manganèse, que l'on empêche d'attaquer le zinc par le procédé de Laszczynski.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chaque bain prend 1.500 ampères sous 4 volts. Entre les anodes et les cathodes se meuvent des agitateurs en haut et en bas. La pureté du métal atteint 99,97 0/0. On arrive à déposer pratiquement $1^{gr},15$ de zinc par ampère-heure, ce qui correspond à un rendement en quantité de 94,1 0/0.

M. Betts électrolyse le sulfate de zinc en présence d'une anode insoluble et d'une cathode de mercure. L'amalgame de zinc sert d'anode et la cathode est en zinc. Par le passage du courant, le zinc de l'amalgame est transporté sur la cathode.

M. Goldschmidt opère sur des solutions de fluosilicate de zinc, en employant des cathodes rotatives animées d'une grande vitesse et en ajoutant à l'électrolyse du sable fin.

Pour l'*affinage* du zinc, on emploie des cathodes formées de disques de zinc laminé recevant un mouvement de rotation au sein d'un électrolyte composé d'une solution de chlorure double de zinc et de magnésium avec addition de sel basique. Les éléments insolubles de l'anode se précipitent au fond de la cuve électrolytique sous forme de boue (procédés Hermann, Watt et Kiliani, Borchers).

Les États-Unis, l'Allemagne et la Belgique sont les pays du monde où la production du zinc est la plus considérable. En 1915, les États-Unis ont produit 444.000 tonnes. La guerre a amené la création et le rapide développement d'usines à zinc électrolytique dont la production a atteint 60.000 tonnes en 1916, pour la France. L'industrie du zinc est susceptible chez nous d'un grand développement au moyen des minerais d'Algérie, de Tunisie et de l'Indo-Chine et de la houille blanche. Le procédé Wilisin-Greenawalt s'applique aux minerais oxydés ou à des minerais sulfurés grillés.

Il consiste à dissoudre le cuivre du minerai par l'action combinée d'une solution de sel marin électrolysée et d'acide sulfureux, puis à le précipiter par électrolyse en ramenant la solution de chlorure cuivrique à l'état de chlorure cuivreux par l'anhydre sulfureux.

647. Affinage du plomb. — Extraction de l'antimoine. — Extraction de l'aluminium. — Extraction de l'étain. — Extraction du nickel. — *Affinage du plomb argentifère.* — Cette opération consiste à prendre l'alliage argent pour anode, pour cathode un disque en bronze d'aluminium et, comme électrolyte; une solution d'acétate double de plomb et de sodium (procédé Tomasi). L'argent qui tombe au fond de la cuve est recueilli, lavé, séché et fondu au creuset avec des nitrates de soude et un peu de borax, puis coulé en lingots et enfin raffiné. On peut, avec une force motrice hydraulique, traiter avec avantage des minerais de plomb ne contenant pas plus de 150 à 200 grammes d'argent par tonne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le procédé Betts consiste à produire des dépôts de plomb uniformes et épais par électrolyse de solution de sels de plomb à acide fort non oxydant, avec addition d'un réducteur (gélatine) qui empêche la cristallisation du plomb déposé.

En employant un bain de fluosilicate de plomb avec acide libre additionné de 1 : 5.000 de gélatine, et en électrolysant à 4 ampères par décimètre carré, on obtient un dépôt dont la densité est de 11,276, c'est-à-dire la densité du plomb laminé. Ordinairement on emploie une densité de 1 à 2 ampères par décimètre carré, ce qui correspond à une tension de 0,15 à 0,35 volt.

Les anodes ont 25 mm. d'épaisseur et chaque cuve en contient une trentaine. Les cathodes sont en plomb fondu et les bacs en bois ou en ciment. La consommation d'énergie serait de 4.500 watts-jour et les frais de traitement de moins de 25 francs par tonne de plomb raffiné.

Auerbach et Wœrn réduisent la galène dans un bain en fusion de chlorure de sodium ou de chlorure de calcium, pouvant être additionné de cryolithe.

Extraction de l'antimoine. — L'électrolyte, qui donne les meilleurs résultats pour l'extraction de ce métal, est une dissolution de trisulfure d'antimoine dans un sulfure alcalin. Les minerais d'antimoine peuvent être aussi traités au moyen d'une dissolution de sodium à la densité de 12° B. Les cuves électrolytiques en fer servent de cathodes, ou bien des feuilles de fer suspendues dans le bain. Les anodes sont en plomb ou en antimoine à affiner. Pour séparer l'antimoine déposé sur la cathode sous forme de poudre noirâtre, il suffit de brosser cette dernière sous l'eau. La force électromotrice du courant est de 2 à 2,5 volts.

Dans le procédé Kopp, la stibine (sulfure d'antimoine Sb^2S^3) est traitée par le perchlorure de fer qui dissout l'antimoine à l'état de trichlorure qui, électrolysé, donne de l'antimoine métallique à la cathode et régénère le perchlorure de fer à l'anode.

Siemens et Halske lessivent la stibine pulvésirée à l'aide d'une solution de sulfhydrate de sodium (NaHS), qui dissout l'antimoine à l'état de sulfo-antimonite de sodium. Cette solution est portée dans le compartiment cathodique d'un électrolyseur à diaphragmes.

Pendant l'électrolyse, il se dépose de l'antimoine métallique à la cathode avec régénération de sulfhydrate de sodium.

Le procédé Borchers consiste à dissoudre la stibine à l'aide de sulfure de sodium additionné de 3 0/0 de sel marin et à effectuer l'électrolyse du sulfo-antimonite dans une cuve sans diaphragme ; l'antimoine se dépose à la cathode et le sulfure de sodium est régénéré.

MM. Isart et Thomas extraient l'antimoine de la façon suivante :

La stibine, ou sulfure d'antimoine naturel, est d'abord passée dans un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

concasseur granulateur qui la réduit en morceaux assez petits pour faciliter sa dissolution, qui s'obtient par le sulfure de sodium (Na^2S).

L'électrolyse s'opère dans une cuve à diaphragme. Le compartiment cathodique reçoit une électrode en charbon et en cuivre et la solution sulfo-antimonique ; le compartiment anodique, une électrode en charbon et une solution étendue de soude.

Plus récemment, MM. Isart et Thomas ont proposé de supprimer le diaphragme et de remplacer comme dissolvant le sulfure de sodium par la soude ou la potasse.

Extraction de l'aluminium. — On électrolyse l'alumine mise en solution dans un bain de cryolithe fondue, ordinairement additionnée de fluorure de calcium (jusqu'à 3 CaF^2 pour 1 $Al^2F^6 6NaF$). Le bain se fait à une densité inférieure que celle du métal, pour que ce dernier tombe au fond de la cuve, en étant protégé de l'oxydation par les sels fondus. L'aluminium se dépose à la cathode et le fluor à l'anode. On charge régulièrement de l'alumine pure qui absorbe le fluor et régénère le fluorure d'aluminium.

Les opérations ont lieu sous une tension de 8 à 10 volts et avec une densité de courant de 1,5 à 3 ampères par centimètre carré de section d'électrodes. Le prix de revient (sans frais généraux) par kilogramme d'aluminium en 1914 était de 1 fr. 47.

Extraction de l'étain. — On a déjà essayé d'extraire par électrolyse l'étain de ses minerais, dont le principal est la cassitérite ou bioxyde d'étain (SnO^2).

Le procédé Kugelgen et H. Damel consiste à électrolyser du chlorure de sodium fondu, et à introduire de la cassitérite dans le compartiment cathodique.

Dans le procédé D. W. Hemingway, les déchets d'étain sont traités par une solution de sulfate ferrique, additionné d'acide sulfurique.

L'étain se dissout ; on le précipite par électrolyse entre une anode en fer et une cathode en cuivre étamé. La solution est ensuite régénérée par chauffage avec un oxydant (azotate de sodium par exemple) qui transforme le sulfate ferreux en sulfate ferrique.

Pour régénérer l'étain pur des vieux bronzes, M. Campagne les coule en plaques qui servent d'anodes dans un bain de sulfate de cuivre, additionné d'acide sulfurique.

Comme dans le raffinage du cuivre, on sépare ce dernier métal à la cathode, tandis que l'étain se précipite au fond des bacs sous forme d'oxydes hydratés mélangés de sulfate de plomb, de cuivre, d'arsenic, d'antimoine et d'argent.

Ces boues lavées et séchées sont dissoutes dans une solution bouillante de soude caustique à 10 0 /0. On précipite tous les métaux dissous en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même temps que l'étain en ajoutant à la liqueur la quantité strictement nécessaire de sulfure ou d'hyposulfite de sodium.

La liqueur pure renfermant le stannate de sodium est enfin électrolysée à la température de 80° C., entre des anodes en tôle et des cathodes en fer-blanc. L'étain pur déposé à la cathode est fondu à l'abri de l'air et coulé en saumons.

A. J.-M. Thirot et L.-A. Mage extraient l'étain soit des schlamms stannifères qui se déposent pendant l'électrolyse du bronze, soit des minerais d'étain ou des crasses d'étain, déchets d'étamage et vieux fers-blancs.

Comme dans le procédé Campagne, on traite les matières par une lessive bouillante de soude de 10 à 12 0/0, capable de dissoudre 45 grammes à 50 grammes d'étain par litre.

Le procédé Hans Mennicke et Otto Steiner est relatif au raffinage électrolytique de l'étain ou à la récupération de l'étain, des alliages, déchets et résidus.

Lorsqu'on électrolyse en solution sulfo-alcaline l'étain brut ou les alliages d'étain à 90° C. et avec une densité de 7 ampères par décimètre carré, l'antimoine et l'arsenic, s'ils sont présents, se déposent en même temps que l'étain à la cathode.

Pour les éliminer, il faut procéder à une nouvelle électrolyse dans une solution de thiosulfate de sodium et dans l'acide chlorhydrique.

Dans le procédé Mennicke et Steiner, on obtient, par une seule opération, de l'étain métallique compact et pur, en maintenant la tension du bain au-dessous de 0,2 volt et en prenant comme cathode des feuilles d'étain ou des tôles étamées.

Dans le désétamage électrochimique des déchets d'étain au moyen de la soude caustique, le bain perd bientôt de son activité par suite d'absorption de l'acide carbonique.

La production de l'étain n'augmentant pas en raison de sa consommation, qui va toujours en progressant et aucun nouveau gisement important n'étant pas encore découvert, on conçoit que la question de l'extraction de l'étain de tous les déchets qui en contiennent prennent chaque jour plus d'extension.

Parmi les procédés employés pour extraire l'étain des rognures de fer-blanc, l'électrolyse joue dans la plupart un grand rôle. Parmi eux, celui de MM. Thirot et Nouguier, qui donne de bons résultats, ne traite pas directement les déchets de fer-blanc, mais une liqueur contenant, à l'état de stannate de soude, l'étain de ces déchets ; de même il permet de retirer l'étain des schlamms, c'est-à-dire des boues qui se déposent au fond des bacs où on fait l'électrolyse du vieux bronze en vue d'en extraire le cuivre. Le procédé s'applique aussi au traitement du minerai naturel (la cassitérite), après qu'il a subi un grillage oxydant et une lixiviation, soit à tous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les produits capables de donner du stannate de soude par voie humide ou ignée, tels que les crasses d'étain, les déchets d'étamage.

Le procédé comporte trois opérations principales : préparation d'une solution de stannate de soude, purification de cette solution et l'électrolyse.

Cette dernière s'effectue dans des bacs en fer ou en fonte, avec des anodes en fer et des cathodes en feuilles d'étain ou simplement de fer-blanc.

On maintient une température de 90° par circulation ou barbotage de vapeur ; chaque bac absorbe 2,4 volts environ, tandis que la densité de courant peut être portée de 300 à 400 ampères par mètre carré de cathode, une seule face comptée. La tension entre les cuves extrêmes ne dépasse pas généralement 80 volts. On obtient un dépôt métallique d'étain pur ; il est livré au commerce après un simple lavage à l'eau chaude.

L'électrolyse est synthétisée par les formules :

$$SnO^3Na^2 = Na^2O^3 + Sn\,; \qquad H^2O + Na^2O^3 = 2NaOH + O^2.$$

On récupère pratiquement $0^{gr},8$ par ampère-heure.

A. Sperry opère comme suit : il fond les déchets d'étain, les additionne de salpêtre, puis coule le métal en anodes à basse température.

Ces anodes sont introduites dans un élément à diaphragme. On prend du chlorure d'étain comme électrolyte, et l'on électrolyse à 850°. C. De temps en temps, on enlève une partie de la solution anodique dont on précipite le métal à l'aide de chaux.

Nodon extrait l'étain des déchets en employant une lessive de bichlorure d'étain mélangé à du chlorure d'ammonium et de sulfate stannique avec un excès d'acide sulfurique libre. Les déchets sont placés dans des corbeilles ; on électrolyse à 40° C. Le plomb n'est pas attaqué, l'étain se dissout.

De la solution d'étain, on extrait électrolytiquement l'étain dans d'autres éléments.

Affinage du nickel. — L'affinage du nickel s'effectue comme celui du cuivre. Les anodes sont du nickel fondu ; l'électrolyse est une dissolution d'un sel double de nickel et d'ammoniaque, à laquelle on ajoute de l'acide benzoïque ou citrique qui joue le rôle de réducteur.

Les cathodes consistent en des feuilles minces de nickel (procédés Basse et Seves).

Les dépôts résultant de l'électrolyse du sulfate double de nickel et d'ammoniaque sont plus durs, plus unis et plus solides que ceux provenant des solutions de chlorure.

Pour l'extraction du nickel des mattes ou alliages cuivre-nickel, on n'utilise comme électrolyse que les solutions étendues d'acide sulfurique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou d'acide chlorhydrique. Le cuivre est d'abord déposé par électrolyse jusqu'à une teneur de 1 0/0 environ. Le reste du cuivre est précipité par cémentation ou encore par l'hydrogène sulfuré.

La solution de nickel, filtrée et rendue alcaline, est ensuite électrolysée en présence d'anodes en plomb si l'électrolyse est du sulfate, ou en graphite si l'électrolyte est du chlorure. Le raffinage du nickel doit être fait en solution de cyanure double de nickel et de sodium. Les solutions de sulfate ne doivent pas être employées, parce qu'il se sépare du soufre avec le métal à la cathode.

La conductibilité des bains varie directement avec la quantité de sel dissous, et les bains les plus concentrés donnent les meilleurs résultats. La tension en volts varie de 0,8 volt à 1,5 volt, et la densité de courant par décimètre carré, de 1 à 2 ampères.

Günther et Franke traitent de la manière suivante les mattes cuivre-nickel. Celles-ci, finement pulvérisées, sont mélangées à une solution de chlorure de sodium, magnésium ou cuivre, et soumis à un courant de chlore gazeux. Il se forme des chlorures et du soufre. On le filtre, on élimine l'acide sulfurique et les impuretés, puis on électrolyse la solution de nickel et de cuivre en présence d'anodes solubles. Le cuivre se dépose à la cathode pendant que le chlore qui se dégage à l'anode sert pour une nouvelle lixiviation des mattes.

On remet des lessives fraîches jusqu'à ce que la teneur en nickel soit suffisante. On décuivre alors aussi loin que possible, et l'on précipite le reste du cuivre à l'aide de nickel. La solution de nickel est enfin électrolysée en présence d'anodes insolubles.

Le procédé *Brovone* est basé sur la séparation du nickel en solution chlorhydrique. Les anodes (minerai de cuivre et de nickel) sont suspendues dans un bain obtenu en faisant agir sur le minerai de cuivre et de nickel (minerais du Canada) en grenailles du chlore et du sel marin en solution. Le cuivre précipité, on élimine par le sulfure de sodium celui qui peut encore rester dans la liqueur contenant le nickel. La solution de nickel est ensuite concentrée par évaporation jusqu'à ce que le chlorure en solution qu'elle renferme soit entièrement cristallisé ; elle arrive enfin dans des cuves où se fait la précipitation du nickel. Dans cette cuve les anodes sont en graphite et les cathodes en nickel. On obtient du nickel pur et du chlore que l'on envoie dans des tours où se fait l'attaque de la grenaille de cuivre et de nickel.

648. Extraction de l'argent. — Extraction et raffinage de l'or. — L'obtention directe de l'argent par électrolyse, ou séparation par affinage de l'or et de l'argent aurifère, consiste à électrolyser un acide capable de dissoudre l'argent (solution faible d'acide nitrique) et n'ayant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aucune action sur l'or. On a ainsi un sel d'argent qui se décompose sous l'action du courant électrique en donnant, d'une part, de l'argent métallique qui se dépose aux cathodes (lames minces d'argent) et, de l'autre, de l'acide avec lequel il était combiné. Cet acide dissout une quantité d'argent équivalente à l'anode (argent brut), en reformant un nouveau sel qui est pareillement réduit. L'or étant insoluble dans le bain, on a, en fin d'opération, de l'or d'une part, et de l'argent d'autre part (procédé Mœbius).

A l'usine de Pinot-Altos, le prix de revient de l'affinage par le procédé Mœbius est de 0 fr. 51 par kilogramme.

Dans le type plus récent installé par MM. Guggenheim, Brothers, à Perth Amboy, les cristaux d'argent se déposent sur une lame plate qui se déplace dans l'électrolyte horizontalement dans son plan, et sont enlevés à une extrémité de la cuve par une raclette qui les dirige dans un récipient collecteur.

Les anodes sont posées à plat, dans des cellules poreuses au-dessous de la lame cathodique, et peuvent être examinées ou enlevées sans interrompre l'opération. Les cuves, au nombre de 48, ont $4^{m},25 \times 4^{m},90$ en plan et $2^{m},15$ de hauteur ; le courant de 220 ampères sous 90 volts qui leur est fourni, permet de déposer 24.000 onces (de $31^{gr},103$) d'argent par jour.

Si la proportion d'or contenue dans l'argent brut ne dépasse pas $\frac{2}{10.000}$, cet or peut être totalement séparé dans ce procédé, et sa récupération ne coûte pas plus de 0 fr. 20 par kilogramme d'argent traité.

Dans le procédé employé par la Balbach Smelting and Refining Co de Newark (États-Unis), les anodes sont fondues sous forme de plaques rectangulaires, placées dans un tissu ; les cathodes sont en graphite artificiel Acheson, de 7 millimètres d'épaisseur, recouvrant une surface de $0^{m2},75$ sur le fond de la cuve ; l'argent se dépose en cristaux. La densité de courant est de 2 à 2,5 ampères par décimètre carré de cathode, et la tension est de 3,8 volts par cuve ; le rendement du courant est de 93 0/0, correspondant à une consommation de 1 watt-heure environ par gramme d'argent obtenu.

A la raffinerie d'argent des usines de cuivre Raritan, l'électrolyse se fait d'après le procédé W. Thum, où les électrodes sont légèrement inclinées sur l'horizontale, de sorte que la solution plus lourde formée sous l'anode se mélange plus facilement. Les cuves sont en pierre ; une cathode en charbon est placée dans le fond. Sur celle-ci sont disposées horizontalement les anodes, qui ont $32^{dm2},5$ de surface. La densité de courant atteint 4,3 ampères par décimètre carré. L'argent déposé est raclé du fond, lavé et fondu. Les boues d'or sont bouillies avec de l'acide nitrique et de l'acide sulfurique et fondues à leur tour.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les installations de Butters et Cº, les cathodes sont en fer-blanc et les anodes en graphite Acheson. La densité atteint 5 ampères par mètre carré.

La séparation électrolytique des métaux de l'argent par le système Betts consiste à employer l'alliage argento-aurifère comme anode dans une solution de nitrate de cuivre et d'argent, par exemple. Selon la densité du courant, on a à la cathode un dépôt d'argent cristallisé et spongieux ou un dépôt compact, cohérent et brillant. Quant à l'or, il reste sous forme de schlamms ; il a plus de 99 0/0 de pureté, et l'argent est totalement exempt de tellure.

Dans d'autres cas, l'électrolyse est utilisée simplement pour favoriser l'amalgamation de l'or et de l'argent (procédé Malloy). On peut aussi préparer par décomposition électrolytique un réactif capable de dissoudre l'or et l'argent, tel que du sel marin rendu basique par addition de chaux (procédé Cassel). Dans le procédé Borchers, l'électrolyte est une solution aqueuse d'azotate de cuivre.

L'extraction électrolytique de l'argent des alliages (Cu + Ag), par le procédé Dietzel est du système à diaphragme et à cathodes cylindriques en cuivre tournant horizontalement ; l'électrolyte est une solution faiblement acide de nitrate de cuivre. A travers le diaphragme, cette liqueur arrive à l'anode où elle dissout le cuivre, l'argent et un peu de fer et de plomb.

L'or, dans la nature, se trouvant à l'état natif, il s'ensuit que sa métallurgie se réduit à une question de séparation du métal d'avec les gangues qui l'enserrent ; en Australie, la teneur est de 51 grammes et au Transvaal de 15 grammes d'or par tonne de minerai. Pour procéder à l'*extraction de l'or*, le minerai est préalablement concassé, grillé, s'il renferme des combinaisons sulfurées, arséniées ou autres, dont il est nécessaire de se débarrasser. On passe alors au broyage humide. La pâte ainsi obtenue (pulpe) passe sur une table d'amalgamation où le mercure s'empare d'une partie de l'or, soit environ 50 0/0. La pulpe, après passage sur les tables d'amalgamation, est traitée par des moyens chimiques, et on obtient ainsi des solutions aurifères, d'où il ne reste plus qu'à précipiter l'or métallique.

On électrolyse la dissolution clarifiée dans le but de recueillir le métal précieux à la cathode, et on atteint un rendement de 90 0/0 à 95 0/0 en or. Les procédés modernes (procédés Andréoli, Eltonhead, Kirth, Max Netto, Rieken), utilisent comme cathodes le plomb, le mercure ou du cuivre amalgamé ; comme anodes le zinc, le plomb ou des feuilles de fer, l'électrolyte étant une solution cyanurée. Lorsque les cathodes sont recouvertes d'une couche suffisante d'or, il suffit de fondre et de coupeller pour recueillir le métal précieux en un culot. Avec le procédé Siemens et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Halske, le plus employé, la densité de courant est de 0,5 ampère par décimètre carré, et la différence -de potentiel de 2 volts. Au Transvaal, les frais de traitement s'élèvent à 3 fr. 60 par tonne. La production de l'or durant ces dernières années a dépassé un milliard et demi de francs par an.

Le raffinage de l'or par le procédé Wohlwill, qui fonctionne à Paris, à Londres, à New-York, à Philadelphie, à San-Francisco, à Hambourg, consiste en des cuves en porcelaine renfermant comme électrolyte une dissolution composée de 25 à 30 grammes de chlorure d'or par litre et 40 centimètres cubes d'acide chlorhydrique à 22° Baumé. Les anodes d'or brut sont coulées en plaques de 2 millimètres d'épaisseur et peuvent contenir jusqu'à 15 0/0 d'argent. Les cathodes sont des feuilles d'or pur placées à 16 millimètres des anodes. L'or et l'argent qui se trouvent dans les anodes se transforment tout d'abord en chlorures, mais l'or seul reste en dissolution et peut se déposer à la cathode, tandis que le chlorure d'argent formé étant insoluble, se dépose tel quel au fond de la cuve en y formant des schlamms qui sont un peu aurifères.

L'or est déposé sous forme cristalline ; il est rincé et lavé à l'eau distillée. Le platine et le palladium, qui, éventuellement, peuvent se trouver dans l'or brut, se dissolvent à l'état de chlorure dans l'électrolyte et s'y accumulent.

On les en retire par un traitement chimique.

Le procédé Wohlwill, pour le raffinage de l'or en récupérant le platine, a été l'objet de nombreux travaux. Un récent brevet de la Norddeutsche Affinerie A. G. a trait à une modification assez simple qui élargit singulièrement le domaine et les conditions d'application du procédé Wohlwill.

Si l'on raffine de l'or, riche en argent, dans une solution de chlorure d'or contenant de l'acide chlorhydrique pur ou d'autres chlorures, il est nécessaire d'enlever de temps en temps, par un procédé mécanique, le dépôt de chlorure d'argent qui se forme sur l'anode ; la pratique a montré que cela était nécessaire quand la proportion d'argent à l'anode était supérieure à 6 0/0. Si ce dépôt de chlorure d'argent à l'anode n'est pas enlevé, il y a du chlore mis en liberté, et cela arrivera d'autant plus vite que la densité de courant employée et la proportion d'argent à l'anode seront élevées.

Il devient alors nécessaire de réduire la densité du courant, mais cela augmente considérablement la dépense en raison de la diminution de la production et de l'augmentation correspondante des charges du capital par poids unitaire de matière purifiée.

Le nouveau dispositif permet de surmonter ces difficultés : on emploie un courant ondulé au lieu d'un courant continu et constant. Cela se fait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de préférence en montant une dynamo à courant continu en série avec une dynamo à courant alternatif. Si le voltage de cette dernière est inférieur à celui de la première, le courant résultant obtenu, par la superposition des deux courants élémentaires, sera toujours de même sens, mais passera périodiquement d'un minimum à un maximum.

Bien qu'un tel courant produise un bon effet dans le raffinage électrolytique de l'or, il est préférable, dans la pratique, d'employer un alternateur d'un voltage (maximum) supérieur à celui de la dynamo à courant continu en série avec lui. Dans ce cas, on obtient un courant qui n'est pas toujours de même sens, mais est en réalité un courant alternatif symétrique par rapport à la courbe de voltage de la dynamo.

L'effet électrolytique est, comme l'indique la loi de Faraday, égal à l'effet du courant continu opérant seul. Autrement dit, le poids d'or total, déposé à la cathode, s'obtient par la loi de Faraday, en supposant que le courant continu passe seul.

L'effet de l'alternateur en série avec la dynamo à courant continu se manifeste de plusieurs manières. Le voltage aux bornes de l'élément de raffinage, mesuré avec un voltmètre à courant continu, est inférieur à celui qu'on observe avec la dynamo continue employée seule. En outre, la réaction d'anode est essentiellement influencée par le courant alternatif. Il est possible d'accroître considérablement la densité de courant à l'anode sans provoquer le dégagement de chlore et sans gratter la couche de chlorure d'argent.

L'accroissement de la densité de courant à l'anode est limitée par ce fait qu'un petit dégagement d'oxygène se produit quand, en faisant croître la densité de courant, le voltage atteint la valeur pour laquelle le chlore se dégagerait avec un courant continu. L'apparition de l'oxygène est d'abord si limitée que la décroissance correspondante des ampères-heures est relativement faible. Elle a même un certain avantage puisqu'elle facilite la chute du dépôt de chlorure d'argent. Si l'on augmente la densité de courant, l'évolution du gaz devient plus rapide. La limite de densité de courant qu'il ne faut pas dépasser, sous peine de faire décroître immodérément l'efficacement en ampères-heures, dépend de la proportion d'argent aux anodes et de la valeur du courant alternatif.

Plus le rapport de l'alternatif au continu est élevé, et moins la proportion d'argent est forte, plus la limite admissible de densité de courant s'élève.

Aussitôt qu'un fort dégagement de gaz se produit à l'anode (plus de quelques bulles) il devient nécessaire de diminuer le continu en laissant à l'alternatif sa valeur ou d'augmenter l'alternatif en laissant au continu sa valeur. Par exemple, si l'on traite de l'or brut contenant environ 10 0/0

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'argent par la méthode employée à l'origine par Wohlwill, il ne faut pas dépasser la densité de courant de 750 ampères par mètre carré à l'anode, et, avec ce chiffre, il faut gratter la couche de chlorure d'argent à l'anode toutes les quarante-cinq minutes. Avec l'usage de courant alternatif, dont le voltage est d'environ 1,1 fois celui du continu, il est possible de maintenir à l'anode une densité de 1.250 ampères par mètre carré sans gratter l'anode.

La méthode permet aussi de traiter par le procédé électrolytique des alliages beaucoup plus riches en argent qu'avec le courant continu seul. Par exemple, de l'or contenant 20 0/0 d'argent peut être raffiné si le rapport du courant alternatif au continu est de 1,7, et on peut employer dans ce cas une densité d'anode de 1.200 ampères par mètre carré.

Avec des densités de courant plus faibles, on peut traiter des alliages encore plus riches en argent. Le procédé s'applique à tous les cas qui se présentent en pratique.

L'emploi du courant ondulé et la possibilité correspondante d'employer des densités de courant élevées comportent un autre avantage important. Dans le procédé Wohlwill (avec le courant continu seul) environ 10 0/0 de l'or des anodes passe à l'état de poussière impalpable dans les boues et doit être récupéré par des procédés chimiques. Si toutefois on emploie un courant ondulé, l'or ne passe dans les boues qu'au commencement de l'opération, tant que l'anode n'est pas complètement couverte de chlorure d'argent. Ensuite, l'or ne passe plus dans les boues.

Les boues se composent essentiellement de chlorure d'argent, que sa structure spongieuse fait tomber de lui-même. Comme, au commencement de l'opération, il passe toujours un peu d'or dans les boues et que les pertes mécaniques à l'anode ne peuvent être entièrement évitées, la boue contiendra toujours un peu d'or, mais généralement pas plus de 1 0/0 de celui contenu dans les anodes, d'où économie appréciable.

Cet avantage suffit à justifier l'emploi du courant ondulé dans les cas mêmes où l'on doit raffiner de l'or pauvre en argent.

Si l'on n'a pas intérêt à obtenir une densité de courant supérieure à 1.000 ampères par mètre carré, le procédé a l'avantage que la proportion d'acide chlorhydrique ou de chlorures, ajoutés à l'élément de raffinage, peut être considérablement diminuée. Avec de l'or contenant peu d'argent, et une densité de 1.000 ampères par mètre carré, il faut en continu 3 0/0 d'acide chlorhydrique et une température de 60° à 70° C. La superposition de courant alternatif permet de n'employer qu'un quart de la proportion précédente en acide, soit 7 à 8 grammes d'acide chlorhydrique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par litre. Et si l'on laisse 30 grammes ou plus sans dépasser 800 à 1.000 ampères par mètre carré, il n'y a plus besoin de chauffer l'électrolyte à 60 ou 70°.

Si l'on emploie le courant continu, l'élévation de température de l'électrolyte est indispensable, sinon l'or se précipite à l'état de poudre noire ou brun foncé — même avec une densité de 500 ampères par mètre carré.

L'application du courant ondulé permet aussi l'accroissement de densité à la cathode en solution chaude, ou si la densité de courant à la cathode est inférieure à 1.000 ampères par mètre carré, il est possible d'obtenir des dépôts cohérents et denses même en solution froide.

En pratique, le procédé s'emploie de la façon suivante : les deux dynamos (à courant continu et alternatif) sont connectées en série, et le voltage de la dynamo à courant continu est réglé de telle sorte qu'un ampèremètre à courant continu (qui n'est pas affecté par l'alternatif) indique en ampères l'intensité cherchée pour le continu. Soit i_c cette intensité. Si l'on veut employer un courant alternatif d'une valeur effective de i_a ampères, la valeur efficace du courant ondulé obtenu par superposition des deux est :

$$I = \sqrt{i_c^2 + i_a^2};$$

I se mesure par un ampèremètre thermique et l'on règle le voltage du courant alternatif, jusqu'à lire à l'ampèremètre le I cherché.

Si l'on veut, par exemple, que $i_c = i_a = 200$ ampères, on aura :

$$I = \sqrt{80.000} = 283 \text{ ampères.}$$

Le voltage total qui indique l'énergie consommée se mesure aussi par un appareil thermique.

Par exemple, si l'alliage à raffiner contient 10 0/0 d'argent, il est recommandé d'employer un courant continu d'environ 1.250 ampères par mètre carré, et un alternatif de même intensité efficace ; la densité totale de courant est alors :

$$1.250\sqrt{2} = 1.767 \text{ ampères par mètre.}$$

Dans ce cas, le voltage du courant continu aux bornes de l'élément doit être 1 volt et le voltage total 1,4. Cela donne un courant alternatif de 0,9 volt.

Dans le calcul des dynamos, le mieux est de compter 1,3 volt comme courant continu maximum par élément, et 1 volt seulement par élément en courant alternatif. Les deux dynamos étant en série, leurs armatures doivent être proportionnées pour résister à l'élévation de température produite par le courant total. Dans les limites usuelles de fréquence, la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

valeur de celle-ci n'influe pas sur le résultat (pour moins de 50 périodes par seconde).

La valeur à choisir pour la densité de courant et le voltage dépend naturellement de la composition de l'alliage d'or. Si l'or contient moins de 10 0/0 d'argent, on peut accroître un peu le courant continu et diminuer l'alternatif. Sinon, modifier dans le sens indiqué plus haut.

En général, on emploie des solutions de chlorure d'or contenant au moins 3 0/0 d'acide chlorhydrique et chauffées à 60 ou 70°. Si toutefois on peut employer une densité de courant entre 500 et 1.000 sans inconvénient, on peut abaisser le titrage en acide chlorhydrique à 0,75 0/0 ou garder 3 0/0 et ne pas chauffer.

On peut remplacer l'acide chlorhydrique par les chlorures qui forment des sels doubles avec le chlorure d'or, par exemple le chlorure de sodium. Comme nous l'avons déjà dit, on emploie comme cathodes de fins rouleaux de feuilles d'or, et l'on fournit l'or régulièrement à l'électrolyte sous forme de chlorure d'or pour compenser la perte. Si l'or raffiné est riche en plomb, on ajoute de l'acide sulfurique à l'électrolyte en quantité équivalente à l'acide chlorhydrique libre.

Le procédé Clancy permet d'employer la cyanamide calcique coûtant six fois moins cher que le cyanure. Grâce à ce procédé, on peut dissoudre l'or de minerais très réfractaires, et cela sans grillage préalable. Pour précipiter l'or de la solution de cyanure, on se sert de zinc.

Le procédé Merril utilise la poussière de zinc, résidu qui se condense dans les étouffoirs des usines à zinc.

Pour l'extraction électrolytique de l'or des minerais, l'or concentré et dissous par une solution assez forte de cyanure de potassium est déposé sur des fragments de zinc (procédés Forrest, Siemens, Neumann, Betty, Pelletan et Clerici). Au point de vue des procédés d'agitation, celui pneumatique de Pachuca et Parral constitue un progrès sur ceux employés actuellement. D'autre part le centrifugeur Peck permet une concentration avantageuse des slims et un entraînement plus rapide des parties riches des minerais par les boues de lavage.

Actuellement, un peu plus du tiers de la production globale d'or est obtenue par cyanuration, et sur ce chiffre la moitié de l'or est précipitée électrolytiquement. Il reste donc encore un bel avenir à la méthode.

649. Dynamos pour l'électrolyse. — La première application d'une dynamo à la galvanoplastie est due à Woolrich (1842) ; puis Wilde, vers 1867, inventa une machine multipolaire à commutateur redresseur. La machine Weston, pour le nickelage, avait des noyaux inducteurs en acier et portait des bobines en série sur le circuit principal ; elle était munie d'un coupe-circuit automatique destiné à prévenir le renversement de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'aimantation sous l'action d'un courant inverse. Elmore construisit une machine à inducteur multipolaire et induit en disque ; le collecteur redressait simplement le courant sans le rendre continu. Il établit, pour l'affinage du cuivre, de grandes machines comportant 18 inducteurs sur chaque couronne et fournissant un courant de 3.000 ampères sous 8 volts. Gramme, en 1873, trouva la vraie formule de la machine industrielle ; il construisit des types spéciaux de très faible résistance, à anneaux avec bobines de cuivre en barres, munis d'un collecteur à chaque extrémité et donnant 1.500 ampères sous 8 volts. Siemens et Halske, vers la même époque, fabriquèrent des induits à barres pour leurs ateliers électrolytiques d'Oker. Puis vinrent les machines construites par Brush, par Ellwell, Parker, Paterson et Cooper, Sayers, Crampton et C^ie^, etc.

Les dynamos généralement employées en électrolyse sont des machines shunt avec lesquelles les changements de courant ne sont pas à craindre, changements qui proviennent de la polarisation des électrodes. Dans le cas de dynamos à enroulement série, on dispose un appareil spécial, ou disjoncteur, sur le circuit extérieur, lequel a pour fonction d'intercepter le courant dès que la force contre-électromotrice du bain est sur le point d'atteindre la valeur de la force électromotrice de la génératrice.

La galvanoplastie, le clichage, le traitement électrolytique des minerais, enfin l'affinage des métaux exigent des types spéciaux de dynamos. Ces opérations demandent de très faibles forces électromotrices et, par contre, des courants très intenses, la quantité de métal déposé étant proportionnelle à l'importance de ces derniers.

La force électromotrice de ces dynamos ne dépasse généralement pas 5 volts, et elles doivent présenter une très faible résistance intérieure. Dans le cas de cuves montées en tension, on donne à la dynamo la force électromotrice correspondant au nombre de volts des cuves mises dans le circuit. Ces machines demandent à être construites avec très peu de spires sur l'induit ou avec un faible champ magnétique et pour une faible allure de marche. Les inconvénients correspondant à ces conditions sont : pour une vitesse angulaire faible, un coût relativement élevé de la machine ; pour un champ inducteur faible, la production d'étincelles au collecteur.

Lorsque la machine ne comporte qu'un petit nombre de conducteurs massifs et un collecteur à peu de segments, il est bon de recourir à un conducteur toronné ou à plusieurs enroulements indépendants, tous reliés en parallèle par des balais d'épaisseur spéciale, afin d'éviter la production d'étincelles et de courants parasites locaux. MM. Crampton et C^ie^ ont imaginé une manière de distribuer les conducteurs principaux entre deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

paires de balais touchant les lames adjacentes du collecteur, ce qui permet de diminuer le nombre des sections d'induit.

Il peut y avoir un grand intérêt à faire fonctionner une dynamo sous des voltages différents sans faire varier la vitesse. Sayers arrive à ce résultat en pratiquant dans les surfaces polaires de profondes entailles ayant pour but de produire sur le collecteur plusieurs points neutres permettant d'y appliquer des balais sans production d'étincelles. Si la différence de potentiel entre les deux balais principaux est de 10 volts par exemple,

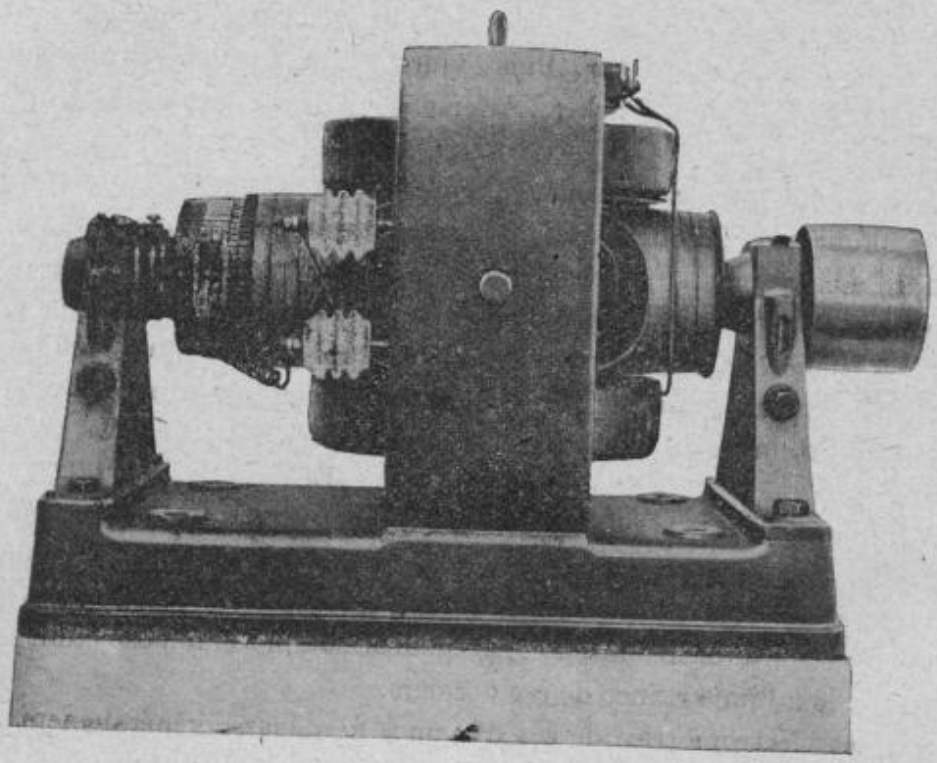


Fig. 1888. — Génératrice de 0,2 ampère sous 10.000 volts.
(Construction H. Guénod, S. A.).

un balai intermédiaire permettra de la diviser en 7,5 volts pour le nickelage, et 2,5 volts pour l'argenture.

Des exigences de plus en plus nombreuses ont été imposées ces dernières années aux constructeurs : puissance aussi élevée que possible par unité, vitesse angulaire relativement élevée par rapport à la puissance à atteindre et à la vitesse que peut supporter la turbine hydraulique, pour passer de la pleine charge de la marche à vide. Cette vitesse représente, en moyenne, la vitesse normale multipliée par 1,8 ; or les efforts mécaniques correspondant à cette vitesse doivent rester en dessous de la limite d'élasticité.

Nous citerons comme un type de bonne construction, une dynamo construite par les ateliers d'Oerlikon, de 4.400 kilowatts, 375 volts et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tournant à 300 tours en allure normale. Les surcharges sont de 15 0/0 pendant deux heures et de 35 0/0 pendant une demi-heure ; elles correspondent à des débits respectifs de 9.000 et 11.000 ampères. La machine

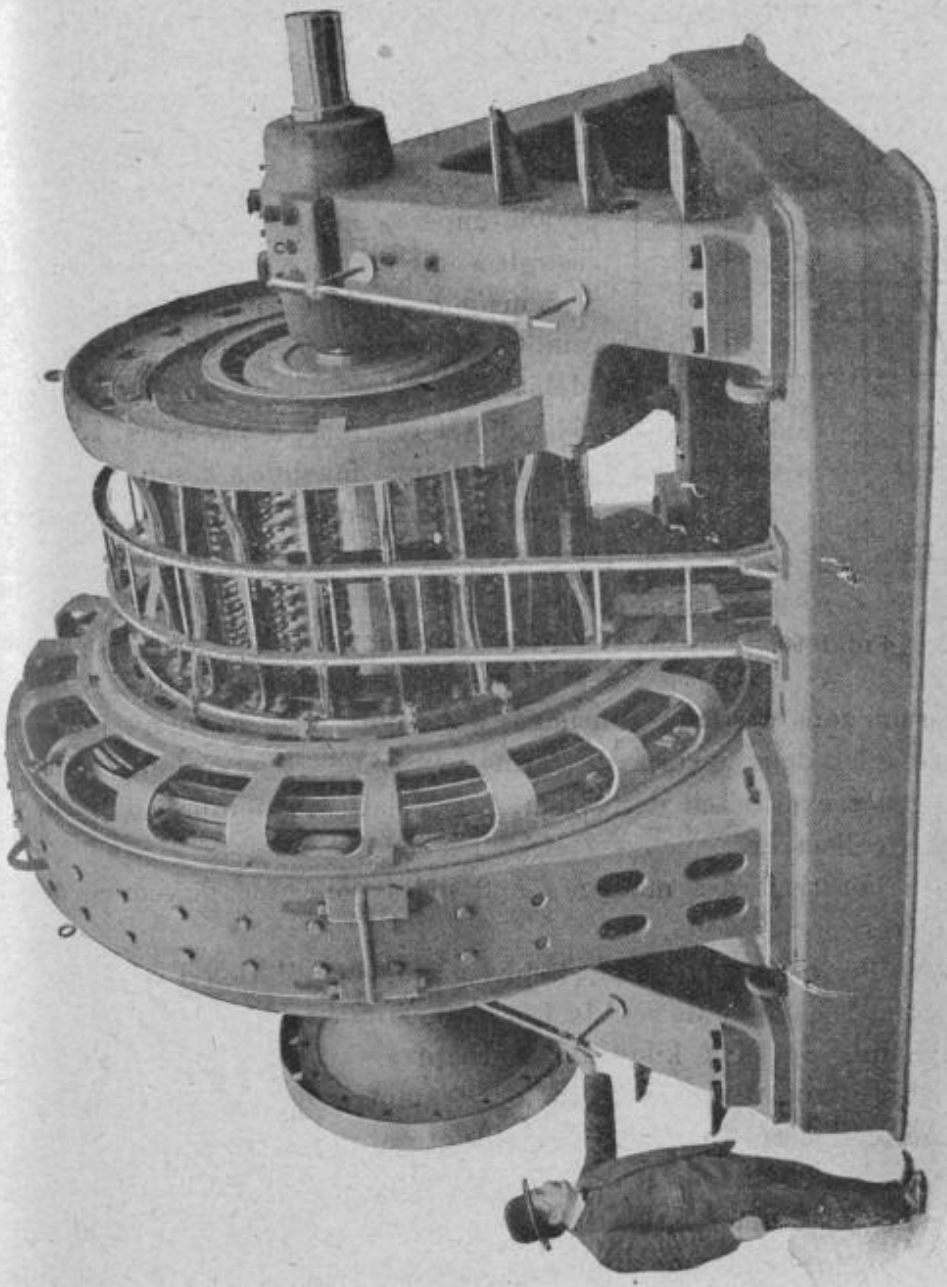


Fig. 1889. — Dynamo pour électrochimie de 1720 kw., 7.500 à 8 000 ampères sous 230 à 250 volts, 355 tours min. (Ateliers de construction Oerlikon.)

est à deux paliers. La carcasse inductrice, en deux parties, est en fonte spéciale.

Le nombre des pôles principaux et auxiliaires est respectivement de 20. L'enroulement induit est du type dit à boucles et à connexions équipotentielles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La (*fig.* 1890) reproduit la caractéristique à vide et les pertes à vide mesurées en marche normale. Le rendement de la machine obtenu par la méthode des pertes séparées est de 95 0/0 en chiffres ronds.

Les machines modernes les plus employées pour les opérations électrochimiques et électrothermiques sortent des ateliers Oerlikon, Gramme, Bréguet, Hillairet, Crampton et Cie, Siemens et Halske, Schneider et Cie, etc.

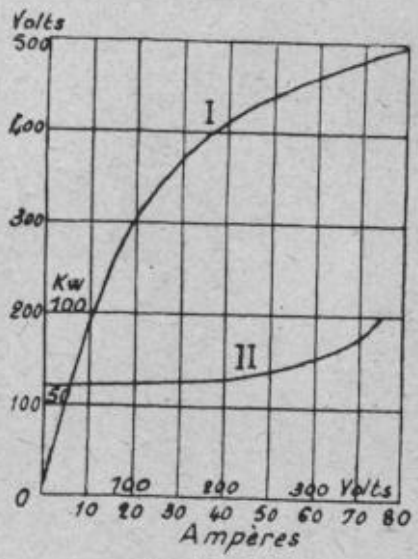


FIG. 1890.

Les ateliers Oerlikon ont fourni à l'usine de Newhaven des dynamos de 7.500 ampères sous 55 volts, qui sont couplées directement sur les turbines. Les machines de la « British Aluminium and Co », installées à l'usine de Foyers, débitent chacune 7.000 ampères sous 64 volts et tournent à 150 tours. L'armature de ces machines a son noyau formé par des lames de fer doux supportées par une solide monture en fonte. L'enroulement est du système tambour multipolaire ; les barres sont placées sur la périphérie du noyau en fer et passent dans des trous aménagés dans 5 disques en cuivre jaune placés à cet effet dans le corps de l'armature. L'inducteur en fonte comporte 24 pôles excités en dérivation. Les balais, au nombre de 120, entourent le collecteur.

Brown a construit des machines à 8 pôles pour une puissance de 4.000 ampères sous 34 volts.

L'usine de Perth-Amboy, qui est la plus grande installation de raffinage électrolytique de cuivre (elle peut traiter 10.000 tonnes de cuivre par mois), a cinq dynamos de 1.000 kilowatts tournant à 150 tours, dont une de réserve. Elles envoient un courant de 4.000 ampères dans chaque groupe de 400 bacs connectés en série. Le nombre total des bains est de 1.600, représentant 35.000 anodes et 37.000 cathodes.

A l'usine de De Lamar, installée pour produire 3.600 tonnes de cuivre par mois, les deux dynamos alimentent deux circuits, l'un de 5.000 et l'autre de 600 ampères à 115-130 volts.

Des alternateurs au nombre de dix pour électrométallurgie, de 65 volts, 520 K. V. A. ampères, 375 tours, construits dans les ateliers de Champagne-sur-Seine, appartenant à MM. Schneider et Cie, fonctionnent à l'usine de la Praz.

En résumé, les dynamos destinées aux opérations électrolytiques et électrothermiques doivent comporter une faible résistance d'induit, des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

induits dentés avec un très petit nombre de conducteurs induits dans chaque dent, et enfin une faible vitesse périphérique de l'anneau.

650. Fabrication du chlore. — Dans la fabrication du chlore par électrolyse du chlorure de sodium, on obtient au pôle positif du chlore (Cl) et au pôle négatif du sodium (Na). Ce dernier décompose l'eau en donnant de la soude caustique (NaOH), qui reste en dissolution, et de l'hydrogène qui se dégage.

Pour séparer le chlore et la soude, il existe de nombreux procédés basés sur l'emploi soit de diaphragmes poreux, de cloisons imperméables, soit de cathodes en mercure, soit de certains artifices qui séparent mécaniquement le chlore et la soude sans diaphragmes ni amalgamation (procédés Kellner, Spilker et Lœwe, Lesueur, Hargreaves-Bird, Richard et Holland).

Les diaphragmes séparent les ions en n'opposant qu'une faible résistance au courant électrique. Dans ces opérations, il faut disposer d'une grande surface poreuse, qui peut être constituée par de la porcelaine, de l'amiante, du parchemin végétal doublé d'amiante, du carbonate de chaux, des ciments, etc. Commme l'on ne dépasse guère 200 ampères par mètre carré d'électrode, et que la tension aux bornes du bain est de 4 volts environ, une puissance de 1 cheval utilisée correspond à très peu près à 1 mètre carré d'anode, et par conséquent, de cloison poreuse, et pour 1 mètre carré d'anode, on ne peut guère compter que sur 5 kilogrammes de soude caustique à la cathode par vingt-quatre heures (procédé Outhenin-Chalandre).

L'électrolyseur Griesheim-Electron utilise des anodes en magnétite plongeant dans des cuves en ciment poreux servant de diaphragmes et celles-ci sont placées dans un bac en fer formant cathode. L'alimentation en saumure se fait dans les compartiments anodaires, un courant de vapeur à 90° circulant à l'extérieur de l'appareil.

Dans l'électrolyseur Kellner, les électrodes sont bipolaires, c'est-à-dire ayant un côté anode et l'autre cathode ; elles sont en charbon. L'électrolyte est de l'acide chlorhydrique. A la sortie de la cuve électrolytique, le liquide excitateur est pompé dans des tours de condensation. Le chlore mis en liberté aux anodes s'échappe dans des compartiments disposés à l'extrémité de la cuve, tandis que l'hydrogène s'en va par l'extrémité opposée. Enfin, le chlore est conduit dans des chambres à chlorure de chaux où il sert à la transformation de la chaux en chlorure.

Parmi les procédés au mercure, le plus connu est celui qui porte le nom de Castner-Kellner, appliqué en Angleterre et aux États-Unis. Une cuve en fonte, divisée en compartiments par des cloisons verticales qui s'arrêtent à quelques millimètres du fond, reçoit environ 82 kilogrammes de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mercure qui constituent l'électrode négative. L'anode est en charbon graphitique ou en charbon recouvert de ferro-silicium. Le mercure absorbe le sodium dès sa formation, et il est soutiré à l'état d'amalgame. Celui-ci est décomposé par l'eau avec dégagement d'hydrogène, et le liquide s'enrichit de soude caustique. Chaque cuve étant mobile autour d'un axe horizontal, on fait passer le mercure, chargé de métal alcalin, dans le compartiment du milieu où cesse l'électrolyse.

Le procédé Castner a l'avantage de supprimer les cloisons, mais il exige la mise en œuvre de quantités importantes de mercure. La question industrielle paraît résolue plus économiquement avec les appareils à diaphragmes.

L'extraction électrolytique du chlore des résidus de fabrication de la soude à l'ammoniaque se fait au moyen de l'électrolyseur Kellner, composé d'anodes en charbon, de cornues disposées entre des diaphragmes inattaquables au chlore et de cathodes ou disques circulaires en fer fixés sur un même axe avec lequel il tourne ; le courant arrive dans la cuve par cet axe ; alors le chlorure de calcium est décomposé en chlore, qui se porte à l'anode, et en calcium qui se fixe sur la cathode où il est immédiatement transformé en chaux hydratée, qui se dépose aux cathodes, puis est enlevée mécaniquement au fur et à mesure de sa production.

Certaines industries donnent lieu à des résidus de chlorure de calcium et de magnésium que l'on utilise à la fabrication du chlore, en les transformant en chlorure de plomb par action sur le nitrate de plomb.

Le chlorure de plomb est électrolysé, et il se forme du chlore que l'on recueille, et du plomb.

L'obstacle au développement de l'électrolyse du chlore est que ce processus ne peut accroître sa production cathodique sans encombrer le marché de chlorure de chaux dont le prix est avili. Aussi, a-t-on cherché une orientation vers la production de l'acide chlorhydrique, notamment en Amérique.

On injecte, sur du charbon porté au rouge, un mélange de chlore et de vapeur, soit :

$$Cl^2 + 3H^2O + 2C = CO^2 + CO + 2HCl + H^2,$$

et on obtient ainsi de l'acide chlorhydrique, de l'hydrogène, de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone. Dépouillé de son acide chlorhydrique, le gaz est de nouveau combustible.

Le simple mélange de chlore avec l'hydrogène en présence de substances de contact, comme le noir animal, permet d'obtenir le gaz chlorhydrique très pur.

On a indiqué d'autres procédés pour transformer le chlore en gaz chlo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rhydrique et pour utiliser le chlore à l'état de tétrachlorure de carbone lequel renferme 92 0/0 de chlore.

La meilleure solution du problème serait la transformation du chlore en acide chlorhydrique dont les emplois sont très importants autant que variés. On a essayé de réaliser la combinaison directe des deux gaz (brevets Pataky, Crudo, etc.) mais, étant donnée la possibilité d'explosions dangereuses de ce mélange gazeux, ces différents procédés ne se sont pas développés. Les techniciens préfèrent en général transformer le chlore en acide chlorhydrique sans se servir de l'hydrogène produit dans le compartiment cathodique. Le procédé qui paraît de beaucoup le plus intéressant consiste à faire agir le chlore sur l'acide sulfureux conformément à l'équation :

$$Cl^2 + SO^2 + 2H^2O = 2HCl + SO^4H^2.$$

Cette réaction a servi de base à différentes méthodes dont la plus avantageuse paraît être celle de F. Askenasy et M. Mugdan du Consortium für Elektrochemische Industrie à Nurnberg. Elle est basée sur le principe du contre courant : le chlore et l'anhydride sulfurique, tous les deux à l'état gazeux entrent par le bas d'une tour du haut de laquelle tombe une pluie d'eau ou mieux d'acide chlorhydrique concentré. Dans le bas on recueille un acide sulfurique assez concentré et à la partie supérieure l'acide chlorhydrique se dégage à l'état gazeux. Cette méthode offre le grand avantage technique d'obtenir en même temps la formation des deux acides et leur séparation, tandis que, dans les autres systèmes, la séparation doit être faite au moyen d'opérations longues et dispendieuses, telles que la distillation, etc. La solution d'acide chlorhydrique que l'on fait arriver en haut de la tour ne doit pas être en excès, mais seulement en quantité correspondant à la formation d'un acide sulfurique commercial concentré. Le mélange de chlore électrolytique et d'anhydride sulfureux (provenant des fosses à pyrite) qui arrive au bas de la tour est calculé de façon que le chlore se trouve en léger excès. Le mélange liquide en descendant rencontrant de nouvelles quantités de mélange gazeux s'enrichit en acide sulfurique et s'appauvrit en acide chlorhydrique déplacé par le précédent. Les dimensions de la tour doivent naturellement être calculées de façon à offrir un espace suffisant aux substances réagissantes pour que leur réaction soit complète. L'acide chlorhydrique qui s'échappe en haut de la tour est recueilli par les appareils à absorption ordinaire, après avoir été débarrassé du petit excès de chlore qu'il contient et qui est éliminé par passage sur des substances capables de le fixer comme par exemple le chlorure ferreux, les sulfures métalliques, etc., ou simplement sur des produits absorbants tels que le charbon de bois.

Si on examine maintenant le procédé au point de vue économique, on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constate d'abord qu'il emploie, comme matières premières, les pyrites et le chlore électrolytique. La valeur des pyrites rendues en fabrique peut être estimée à 0 fr. 60 par unité de soufre à la tonne (soit 2,70 pour un quintal de pyrite à 45 0/0 de soufre), ce qui revient à donner à un quintal de soufre (sous forme de pyrite) la valeur de 6 francs. Quant à la valeur du chlore électrolytique, elle ne peut pas être déduite simplement du prix de vente du chlorure de chaux en tenant compte que dans 100 kilogrammes de chlorure il y en a 35 à 36 de chlore et en défalquant simplement du prix total la valeur de la chaux, car indépendamment de toute autre considération, la marge entre le prix de vente et le prix de revient est assez forte. On peut admettre le prix de 6 fr. 20 par 100 kilogrammes de chlore gazeux, amortissement et intérêt compris. Ce prix est certainement bien au-dessus du prix de revient réel, puisque, dans beaucoup d'usines, on reporte tous les frais d'électrolyse à la soude. Quant aux prix de vente des produits fabriqués ils seraient les suivants : *a*) l'acide chlorhydrique commercial à 21° B., c'est-à-dire contenant 33,65 0/0 de HCl, se vend par fortes quantités au moins 5 fr. 50 par quintal ; *b*) l'acide sulfurique commercial à 52° B., c'est-à-dire à 65,5 0/0, se vend en moyenne 3 fr. 30 les 100 kilogrammes. D'après la réaction :

$$Cl^2 + SO^2 + 2H^2O = 2HCl + SO^4H^2,$$

on calcule que, pour obtenir 73 kilogrammes de HCl et 98 kilogrammes de SO^4H^2, il faut 71 kilogrammes de chlore et 32 kilogrammes de soufre. Comme dans les fours à pyrite on a une perte de 5 0/0 environ du soufre total qui y est contenu, le soufre nécessaire sera de $33^{kg},6$. Il faut compter 75 kilogrammes de chlore pour tenir compte des pertes éventuelles et du petit excès de chlore qui doit agir dans les tours de réaction. Les 73 kilogrammes de HCl correspondent à 214 kilogrammes d'acide à 21° B., tandis que les 98 kilogrammes de SO^4H^2 correspondent à 149 kilogrammes d'acide à 52° B. Si on se réfère à la transformation d'un quintal de chlore gazeux, il est nécessaire de brûler 45 grammes de soufre sous forme de pyrite et on obtient 285 kilogrammes d'acide chlorhydrique à 21° B. et 199 kilogrammes d'acide sulfurique à 52° B. Les frais, en matières premières, s'établissent comme suit, suivant qu'on donne au chlore la valeur 0 (les frais de fabrication étant reportés sur la soude) (I) ou la valeur ci-dessus de 6 fr. 20 calculée d'après le prix de vente minimum du chlorure de chaux (II).

Chlore gazeux 1 quintal à 0 fr.....	$0^f,00$	à $6^f,20$	$6^f,20$
Soufre sous forme de pyrite : 0,45 quintal à 6 fr.....	2 ,70		2 ,70
	$2^f,70$ (I)		$8^f,90$ (II)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La valeur des produits obtenus serait la suivante :

Acide chlorhydrique à 21° B., 2,85 quintaux à 5 fr. 50.....	15f,67
Acide sulfurique à 52° B., 1,99 quintal à 3 fr. 30.....	6 ,57
	22f,24

Dans les deux cas, entre le prix de revient des matières premières et le prix de vente des produits fabriqués, il y a une différence très sensible qui, même en comptant largement les frais de fabrication, les intérêts et les amortissements, doit permettre un certain bénéfice. En effet, en ce qui concerne les frais d'installation on peut estimer qu'ils ne sont pas supérieurs à ceux qu'on aurait en faisant séparément une installation ordinaire pour l'acide sulfurique et une autre pour l'acide chlorhydrique. Dans une installation pour l'acide sulfurique on aurait des fours à pyrite, la tour de Glover, la tour de Gay-Lussac, etc. Dans une usine pour l'acide chlorhydrique il faudrait le four à sulfate et tous les appareils pour l'absorption de l'acide. Or, l'installation dont il s'agit nécessiterait les fours à pyrite, une tour de Glover, une tour de réaction et les appareils à absorption. L'outillage se trouve donc simplifié et il faut noter au point de vue des frais de fabrication la suppression du combustible consommé dans les méthodes ordinaires dans les fours à sulfate.

La Société pour l'Industrie chimique de Bâle a créé un dispositif pour l'obtention des métaux alcalins et du chlore par électrolyse des chlorures alcalins fondus.

Cette conception, basée sur des avantages économiques, rejette l'emploi de diaphragmes entre l'anode et la cathode. On utilise des cloisons séparatrices doubles et inattaquables au métal alcalin sur une face et au chlore sur l'autre face.

Après quelque temps de fonctionnement, ces cloisons sont mises en court-circuit par le métal alcalin avec la cathode et remplissent alors le rôle de cathode ; ou bien elles travaillent comme électrode bipolaire.

651. Fabrication des hypochlorites. — Ces produits sont utilisés pour le blanchiment ainsi que pour la désinfection des eaux industrielles et des eaux d'égouts. Ils sont obtenus par l'électrolyse d'une solution saturée de sel marin (chlorure de sodium), et les vapeurs de chlore qui se dégagent des électrolyseurs sont dirigées sur de la pierre à chaux non calcinée (procédé Kellner).

Sous forme de solutions renfermant de 3 à 6 grammes par litre de chlorure de sodium, le rendement en quantité de l'électrolyse varie de 60 à 80 0/0. Le plus souvent, on utilise de longs baquets divisés en compartiments constituant chacun une cuve fonctionnant à la tension de 5 volts. Avec 20 compartiments, on arrive à un courant de 100 volts. Les plaques

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

formant compartiments sont du type bipolaire (anode-cathode), et constituées par des lames de platine. La production varie entre 2 et 3 kilogrammes de chlore par kilowatt-heure, et le prix oscille entre 30 et 75 centimes par kilogramme de chlore.

Les divers électrolyseurs utilisés industriellement sont ceux de Hermitte, de Corbin, de Haas et Oettel, de Stepanow, de Brochoki, de Schuckert, de Volgesand, de Schoop, etc.

Dans ce dernier système, le voltage adopté est de 110 volts ; les électrodes sont soit en platine-iridium aux deux pôles, soit en platine-iridium à l'anode et graphite à la cathode. Durant l'opération d'électrolyse, la température du liquide dans les éléments doit être maintenue à 15°. La production de l'appareil est de $0,^{kg}2$ de chlore actif dans la solution pour une consommation de sel marin de $1^{kg},25$, et une consommation d'énergie électrique de 1 kilowatt-heure. Cette installation convient bien, par exemple, pour les papeteries.

Les électrolyseurs de l'usine de Poplar ont leurs anodes en platine formées d'un fil enroulé sur une plaque d'ardoise. A chaque anode correspondent deux cathodes en zinc, à 7 centimètres de l'anode. L'électrolyte est une solution de 20 parties de chlorure de magnésium et 100 parties de chlorure de sodium. Seul le chlorure de magnésium est électrolysé.

Le kilowatt-heure donne 105 grammes de chlore actif ; la dépense en énergie électrique et matières premières est de 7 francs pour 832 litres.

La fabrication du chlore par la *voie sèche* donne comme résultat une production de 81 grammes de chlore et de 54 grammes de sodium par cheval-heure électrique, soit, par jour, avec arrêt moyen de une heure, $1^{kg},85$ de chlore gazeux, et $1^{kg},24$ de sodium correspondant à $2^{kg},35$ de soude à 72° anglais, et $5^{kg},1$ d'hypochlorite de chaux à 105 ou 110°.

L'électrolyte se compose d'un mélange dosé et constant de chlorure de plomb et de chlorure de sodium (procédé Hulin). Dans le chlorure de sodium fondu sont immergés des récipients ouverts, en charbon ou en terre réfractaire, et contenant du plomb, qui joue le rôle d'*anode partielle et complémentaire*. Le chlore libéré se dégage au dehors pour la plus grande partie, et le reste forme du chlorure de plomb. Chaque creuset exige environ 7 volts, et la densité de courant est, en moyenne, de 7.500 ampères par mètre carré.

Le procédé Haas-Oettel, qui est utilisé dans l'usine de la Compagnie de Cocheco, permet de faire, en cinq heures et demie, 476 litres d'une solution d'hypochlorite de soude contenant $14^{gr},4$ de chlore par litre, équivalant à $27^{kg},5$ de soude blanchissante. La consommation de courant pendant la décomposition est de 64 ampères sous 101 volts, équivalant à 58 HPH pour la durée totale.

Plus exactement, la dépense d'énergie par kilogramme de chlore est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 5,4HPH pour la concentration de 3 grammes de chlore par litre, et de 12,3 HPH pour la concentration, de $10^{gr},6$ de chlore par litre.

Il existe de petits appareils pour la production de 2,5 à 3 litres de chlore par jour, et destinés aux blanchisseries ou autres spécialités analogues.

La solution utilisée dans les électrolyseurs Haas-Oettel est le chlorure de sodium de 4° à 6° B., et les électrodes sont bipolaires et en charbon.

Chlorates et perchlorates. — On procède à peu de chose près comme pour les hypochlorites, mais au lieu d'effectuer l'électrolyse à froid, on opère à environ 55°. La température en s'élevant transforme les hypochlorites en chlorates (chlorates de potassium, de sodium et de baryum). Dans le procédé Gibbs et Franchot, on emploie comme cathodes des grilles de cuivre recouvertes d'oxyde de cuivre. L'hydrogène naissant réduit cet oxyde et par suite ne réagit pas sur le chlorate. Le liquide du bain en se refroidissant dépose le chlorate formé.

Les procédés électrolytiques qui opèrent sur le chlorure de sodium mettent du chlore en liberté qu'on utilise immédiatement pour obtenir un produit commercial. Actuellement on fabrique un certain nombre de chlorures qui jusqu'ici étaient pour la plupart sans emploi. Parmi ces derniers le tétrachlorure de carbone a reçu de nombreuses applications. Les produits dénommés diéline, triéline, tétraline, pentaline ne sont autres que des chlorures d'éthylène.

652. Fabrication de la soude. — Les procédés Jablochkof, Roger, Hœpner, Grabau, consistent à électrolyser à chaud du chlorure de sodium, la température étant maintenue par une source extérieure. Le sodium surnage et est enlevé, à la fin de l'opération, à l'état globulaire ou de vapeur. Ce produit a l'avantage d'être très bon marché, mais il ne fond qu'à 800° C. et à cette température le sodium se volatilise très froidement.

Les électrolyseurs Vautin et L. Hulin emploient également le chlorure de sodium comme électrolyte, mais ils permettent d'obtenir des rendement plus élevés. La cathode est constituée par du plomb fondu. On obtient un alliage de plomb et de sodium, et on extrait ce dernier par distillation. Le sodium traité par l'eau permet d'avoir de la soude caustique et de recueillir le plomb, qui peut ainsi servir à une nouvelle opération. La densité de courant varie de 60 à 100 ampères par décimètre carré ; la différence de potentiel aux bornes du bain est de 8 volts, et la dépense réelle de 15 kilowatts-heures par kilogramme de sodium (1).

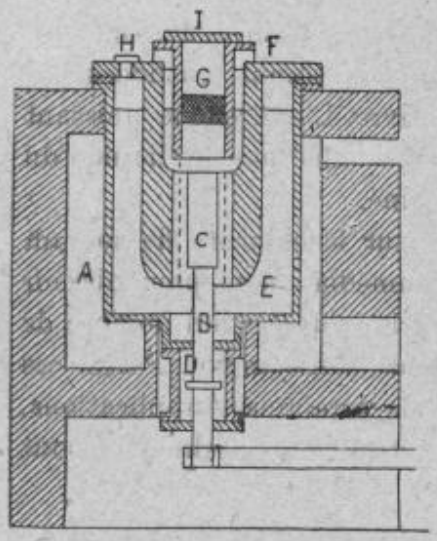
(1) Une usine du Niagara pratique actuellement, avec 4.000 chevaux de force, un procédé dû aux frères Acker, dans lequel on fait absorber à la cathode de plomb en fusion jusqu'à 4 0 /0 de sodium, et cet alliage est alors décomposé au rouge, par injection de vapeur, en plomb, soude caustique et hydrogène. La densité du courant sur les anodes en graphite atteint près de 300 amp.-déc. car. et la chaleur joule ainsi produite maintient le sel en fusion.

Le rendement du courant est d'environ 90 0 /0, et la f. é. m. oscille entre 6 et 7 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le procédé Castner, on emploïe comme électrolyte de la soude caustique, comme anode du charbon et comme cathode du fer. La cuve est en fer, et la solution est maintenue à une température de 20° C. au-dessus de son point de fusion. La chaleur est demandée, partie au courant électrique, partie à une source extérieure. La dépense d'énergie réelle est de 16 kilowatts-heures par kilogramme de sodium métallique.

On prend une cuve de faible profondeur et divisée en trois compartiments par des cloisons verticales qui n'atteignent pas le fond, lequel est recouvert d'une mince couche de mercure. Le compartiment du milieu contient de l'eau pure et une cathode en fer est reliée électriquement au mercure. Les compartiments extrêmes renferment des anodes en charbon et une solution concentrée de lessive de soude. En faisant osciller la cuve d'un côté et de l'autre, elle entraîne le sodium, formé dans des compartiments extrêmes, dans le compartiment central. Ce dernier constitue un élément formé de fer et d'amalgame de sodium dans une solution de soude caustique. Le sodium mis en liberté donne, avec de l'eau, de la soude caustique. La soude obtenue par ce procédé est presque pure. La force électromotrice nécessaire est de 4 volts. Les cuves ont $1^m,82$ de longueur, $0^m,914$ de largeur et $0^m,15$ de profondeur. L'intensité du courant est de 5,50 ampères et exige 3,5 HP par cuve. Le sel décomposé par vingtquatre heures est de 33 kilogrammes environ (17,5 de soude caustique, et 15,5 de chlore).



A, vase de fonte. — C, cathode. — B, tige maintenant la cathode. — D, tube pour éviter les fuites. — E, anodes en nickel. — F, couvercle.

FIG. 1891. — Électrolyseur Castner.

La méthode Castner n'est que peu employée ; on n'utilise plus guère que la décomposition spontanée de l'amalgame mis en court-circuit avec un autre métal, le fer, par exemple, soit dans l'électrolyseur lui-même qui est alors cloisonné en deux compartiments, l'un d'amalgamation, l'autre de désamalgamation, entre lesquels le mercure circule automatiquement (procédé Kellner), soit dans un décomposeur spécial où le mercure est conduit mécaniquement (système Solvay).

Dans ce dernier procédé, qui s'est vite répandu, les bacs ne sont pas cloisonnés, mais le mercure, aussi bien que le liquide d'électrolyse, circule continuellement dans le même sens ; on évite ainsi la formation de chlorure mercureux par le chlore dissous et l'appauvrissement en sel de la surface liquide contiguë à la cathode.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

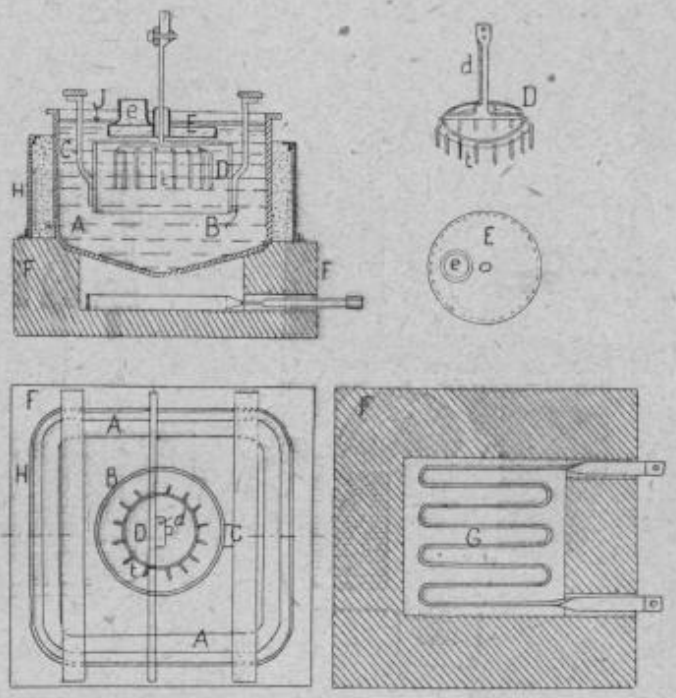
La tension de décomposition de NaCl entre mercure et charbon est de 3,2 volts.

Les brevets Castner-Kellner utilisent environ 18.000 HP, répartis entre diverses usines en Europe et aux États-Unis.

Le procédé Solvay s'est répandu en Allemagne, en Russie, en Belgique et en Italie.

Les procédés au mercure donnent lieu à une production de plus de 20.000 tonnes de soude par an.

Le procédé Hulin, employé à l'usine des Clavaux (Isère), qui produit journellement 4 tonnes de soude caustique et 8 tonnes de chlorure de chaux, fait usage d'une cathode poreuse qui laisse passer l'électrolyse suivant une vitesse fonction de l'intensité du courant. La force électromotrice est de 4,3 volts pour chaque élément, et la densité de courant de 4 ampères par décimètre carré d'électrode. Le rendement moyen en soude caustique et en chlore, rapporté au nombre de chevaux-heures, est de 82 à 85 0/0.



A, cuve en fonte. — E, séparateur. — e, tubulure où passe le Na F, maçonnerie. G, conducteur. — H. enveloppe isolante.

FIG. 1892. — Électrolyseur Hulin.

Le procédé Hargreaves, appliqué en Angleterre, consiste à électrolyser une solution de chlorure de sodium dans une cuve formée d'une anode en charbon placée entre deux diaphragmes qui forment les parois de la cuve. Les cathodes sont des toiles métalliques en cuivre, sans contact avec l'électrolyse. Le circuit entre l'anode et la cathode est établi, à l'aide d'un courant de vapeur d'eau et d'acide carbonique, entre les toiles métalliques en cuivre. Dès que le courant passe, le sodium métallique apparaît sur la paroi extérieure des diaphragmes et est aussitôt transformé en carbonate de soude par l'action combinée de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique.

Le carbonate de soude se dissout dans la vapeur condensée et s'écoule à la partie inférieure de la cuve, d'où il est extrait.

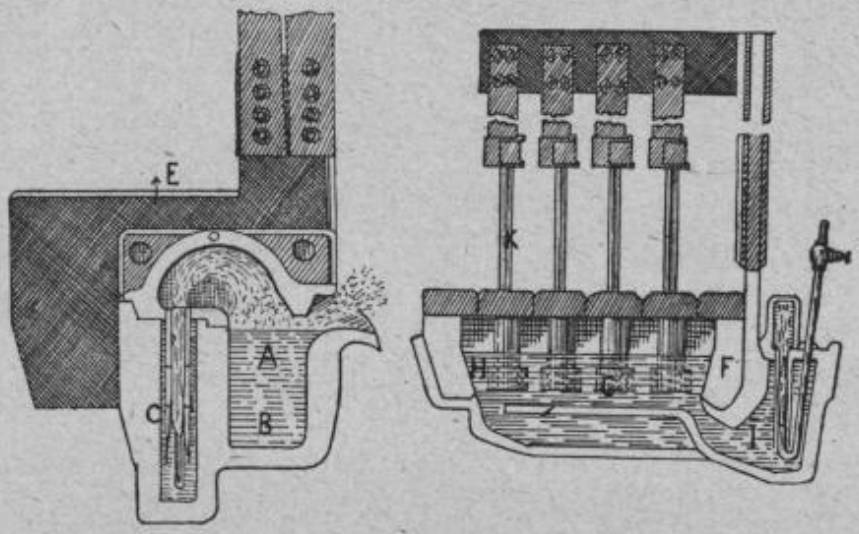
Une cuve de $3^m,30$ de longueur sur $1^m,80$ de hauteur, avec une surface totale des diaphragmes de 9 mètres carrés, peut décomposer 110 kilo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grammes de chlorure de sodium par vingt-quatre heures en produisant 97 kilogrammes de carbonate de soude et 162 kilogrammes d'hypochlorite.

La différence de potentiel nécessaire à la décomposition est de 4 volts, et la densité de courant de 2,5 ampères par décimètre carré de surface des diaphragmes.

Le procédé nouveau de Townsend, pratiqué au Niagara par la « Development and Funding Cy », se rapproche beaucoup du procédé précédent. Ici aussi l'alimentation se fait par l'anode, et le liquide traverse la cloison poreuse pour s'enrichir ; mais le liquide circulant est soustrait à toute action nuisible du courant ou de mélange avec les liquides voisins, dès



A, soude fondue. — F, briques de magnésie. — H, bain de chlorure fondu. G, bloc de graphite. — K, tige de laiton amenant le courant.

FIG. 1893. — Électrolyseur Acker.

qu'il a subi l'enrichissement cathodique. A cette fin, le liquide passe automatiquement dans des réservoirs d'huile minérale.

L'électrolyseur Townsend est composé d'un bâti parallélipipédique en ciment armé de métal.

Les faces opposées les moins éloignées reçoivent des plaques de fer criblées servant de cathode auxquelles sont juxtaposées, vers l'extérieur, les réservoirs d'huile, tandis qu'à l'intérieur un diaphragme poreux, tapissé d'hydrates de fer, retient le liquide anodique au sein duquel baignent les prismes de graphite des anodes.

Le liquide circulant filtre à travers le diaphragme et la cathode criblée, lequel suinte en gouttelettes dans la couche d'huile isolante.

La vitesse de circulation détermine la teneur en alcali du liquide cathodique.

Les électrodes prennent chacune 3,4 à 3,6 volts, et le rendement en énergie atteint 60 0/0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La teneur finale en soude caustique des liquides d'électrolyse est pratiquement de 150 grammes de soude au litre, et 200 grammes de sel résiduaire, et l'on peut atteindre 200 grammes de soude par litre.

La concentration en alcali est donc ici près de trois fois plus élevée que dans le procédé au diaphragme ordinaire et sans immobilisation de capital, sous forme de dépense de mercure.

Actuellement, à Neustassfürt, on obtient le sodium d'une façon extrêmement simple à partir d'un bain d'hydrate de sodium. On fait arriver les cathodes dans le bain de fusion simplement de façon qu'elles touchent la surface. A la surface de contact, lorsque le courant passe, il se sépare une goutte de sodium métallique et quand la goutte est devenue assez grande, elle est enlevée. Le sodium est préservé de l'action de l'air par la cathode elle-même et si l'on maintient même la température du bain au-dessus du point de fusion, la goutte se recouvre d'une couche protectrice de soude caustique solide. Pour pouvoir enlever cette goutte facilement, la cathode, en forme de crochet, est suspendue à un dispositif qui permet de la tirer facilement de côté.

L'électrolyseur Finlay est du type à deux diaphragmes. Chaque élément se compose d'une caisse divisée en trois compartiments étroits. Dans le premier se trouve l'anode en graphique ; le compartiment moyen contient l'électrolyte ; le dernier compartiment contient la cathode en fer.

La solution saline fraîche arrive par le compartiment central et déborde dans les deux autres ; sa marche s'oppose, dans les deux sens, au transport des ions qui tendent à se recombiner pour former le sel primitif. En pratique, on groupe un certain nombre d'éléments qu'on assemble à la façon d'un filtre-presse.

Avec cet appareil on est arrivé, paraît-il, à un rendement de 91 0/0 par rapport à l'intensité du courant, en produisant une lessive dont le titre atteint 8 0/0 de soude caustique.

La tension nécessaire aux bornes de chaque élément aurait été abaissée à 3 volts au lieu de 3,5 volts ; on augmente ainsi très notablement le rendement qui, auparavant, dépassait rarement 60 0/0.

Si l'on pousse la concentration de la lessive en soude caustique jusqu'à 13 0/0, le rendement rapporté à l'intensité seule serait de 81,5 0/0 avec une différence de potentiel aux bornes de 3,37 volts par élément.

La Virginia Laboratory Company et la Société des usines électriques de la Lonza emploient comme électrolyte, la première à Holcomb-Rock en Virginie (procédé Seward et Kugelgen), et la seconde à l'usine de Bozel (Savoie), le chlorure de sodium fondu. Ces procédés permettent l'obtention simultanée du sodium et du chlore et des sous-produits de ce dernier.

Procédé de la cloche. — Cette méthode diffère des procédés à dia-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

phragmes et à circulation, en ce sens que la cloison poreuse est supprimée. L'anode se trouve enfermée dans une cloche en fonte ouverte par le bas et à surface interne électriquement isolée, la face externe jouant l'office de cathode. L'alcali descend par densité et forme une couche plus lourde au fond du bac ; cette couche tend à être transportée à l'anode par le courant. La vitesse de progression de la couche est fonction de la force électromotrice dépensée par centimètre de liquide, entre les électrodes, pour le transport du courant. Ce procédé mis au point par une usine autrichienne a été adopté par quelques usines.

On atteindrait, avec 4-5 volts par électrolyseur, et 85-90 0 /0 de rendement, 100 grammes et même 150 grammes d'alcali par litre.

La production mondiale de la soude par l'électrolyse a été de 49.000 tonnes en 1906, soit le douzième de la consommation totale.

Les usines de soude électrolytique, pour développer leur fabrication, ont cherché à étendre les applications du chlore en dehors du blanchiment et de la désinfection.

Ainsi le *télrachlorure de carbone* (CCl^4) est susceptible de prendre une assez grande importance, en tant que dissolvant des corps gras, pour remplacer la benzine, le sulfure de carbone et les éthers de pétrole, car il est incombustible, et ses vapeurs ne forment avec l'air aucun de ces mélanges explosifs auxquels sont sujets les produits ci-avant.

On l'emploie pour la préparation des vernis.

La fabrication se fait au moyen de chlore électrolytique, sous-produit surabondant de la fabrication de la soude électrolytique. On part toujours du sulfure de carbone sur lequel on fait agir le chlore directement à température élevée, ou indirectement à température moyenne, en recourant à l'emploi de substances catalytiques.

Dans le premier cas, on a :

$$\underset{\text{Sulfure de carbone}}{CS^2} + \underset{\text{Chlore}}{6\,Cl} = \underset{\text{Chlorure de soufre}}{S^2Cl^2} + \underset{\text{Tétrachlorure de carbone}}{CCl^4}.$$

Les points d'ébullition du chlorure de soufre et du tétrachlorure de carbone étant assez éloignés, on peut séparer facilement ces deux corps par distillation et rectification ; puis on achève ensuite la purification du tétrachlorure par des lavages alcalins.

Dans la méthode indirecte, on prépare d'abord le chlorure de soufre, et on le fait agir sur le sulfure de carbone en présence du corps de contact (le fer réduit, généralement). On a :

$$\underset{\text{Sulfure de carbone}}{CS^2} + \underset{\text{Chlorure de soufre}}{2S^2Cl^2} = \underset{\text{Tétrachlorure de carbone}}{CCl^4} + \underset{\text{Soufre}}{6\,S}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le soufre cristallise à froid ; on recueille le tétrachlorure par simple décantation. Comme on voit, le soufre est récupéré et peut servir à nouveau à la préparation du sulfure de carbone et du chlorure de soufre.

La fabrication des peroxydes alcalins utilisés pour le blanchiment des poils et des pailles à chapeaux, du lin et de la laine, a un grand avenir devant elle ; la Société d'Électrochimie en produit plus de 200 tonnes par an.

La production mondiale de sodium est de 6.000 tonnes environ,dont 4.200 tonnes environ pour l'Europe. Chaque tonne de soude caustique correspond à peu près à 2 tonnes et demie de chlorure de chaux.

Les usines principales productrices de sodium sont : En France, les usines des Clavaux et de Bozel ; en Suisse, les usines de Martigny et Monthey, en Valais ; en Angleterre, l'usine de Weston-Point ; en Allemagne, les usines de Rheinfelden et de Gersthofen ; en Norvège, les usines de Vaadhein et de Frederiksstad et aux États-Unis, les usines du Niagara et de Holcomb-Rock.

653. Fabrication du chlorate de potasse. — Liebig, le premier, indiqua un mode de traitement du chlorate de potasse, mais ce n'est qu'en 1889 que Gall et Montlaur trouvèrent un procédé réellement pratique.

Comme électrolyte, on utilise une solution saturée de chlorure de potassium avec des anodes en platine iridié et des cathodes en charbon ou en fer.

L'électrolyte prend la somme de chaleur qui lui est nécessaire dans le courant électrique lui-même. Sous l'action de ce dernier, le chlorure de potassium donne, à l'anode, du chlore, et à la cathode, un métal qui décompose l'eau en formant de la potasse caustique et en produisant un dégagement d'hydrogène.

Dans le procédé Gall et Montlaur, la cuve est divisée en deux par une cloison poreuse. La cathode, qui est en fer ou en nickel, est disposée horizontalement et au-dessus de l'anode en platine iridié. L'intensité du courant est de 50 ampères par décimètre carré et la force électromotrice de 5 volts pour chaque paire d'électrodes. La potasse caustique fournie à la cathode est transportée à l'anode assez vite pour absorber tout le chlore dégagé. Le chlorate de potasse qui se sépare par cristallisation est soumis à une recristallisation.

La réaction est : $ClK + 3H^2O = ClO^3K + 6H$. Un kilowatt-heure produit 100 grammes de chlorate.

On fait usage de cuves électrolytiques en fer émaillé et d'électrodes en charbon de cornues dans le procédé H. Blumemberg.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Urter, de Liverpool, préconise des cuves électrolytiques rondes, revêtues intérieurement d'une couche poreuse en ciment inattaquable par l'électrolyte, qui est une solution alcaline de chlorure de potassium. Comme anode, une lame de platine qui plonge au centre de la cuve. La température du bain est maintenue entre 60° et 80° C.

Le procédé Franchot et Gibbs comporte des anodes en charbon et des cathodes constituées par un grillage en cuivre recouvert d'oxyde de cuivre. Le chlore agit sur la potasse caustique, qu'il transforme en hypochlorite ($2KHO + 2Cl = KCl + H^2O + KClO$) ; puis ce dernier, lorsque la température est plus élevée, se décompose en chlorate et chlorure ($3KClO = 2KCl + KClO^3$).

L'oxyde de cuivre de la cathode est réduit par l'hydrogène naissant qui en empêche le dégagement et, par suite, son action sur l'hypochlorite ou le chlorate formé.

Commencée en France par Gall et Montlaur, la fabrication des chlorates emploie aujourd'hui plus de 20.000 HP, tant en France qu'en Suisse, en Suède et aux États-Unis. Les principales usines hydroélectriques se livrant à la fabrication du chlorate de potasse sont celles : de Chedde, de Saint-Michel-de-Maurienne, de Prémont, de Livet-et-Gavet (France) ; de Mansboé et Avesta (Suède) ; de Vallorbe (Suisse), et la Chemical Construction Co (Amérique).

A l'usine de Vallorbe, de nombreux procédés de perfectionnement ont été apportés au procédé primitif. Cette installation dispose de 3.000 HP et le cheval-an revient à 35 francs. La production était en 1909 de 2.200 tonnes et la dépense d'énergie d'environ 1 cheval-an par tonne. Les dépenses de fabrication pour 100 kilogrammes de chlorate de potassium livrés en barils étaient de 33 francs environ.

Si, à cette somme, on ajoute les dépenses pour tenir compte des intérêts et amortissements, on obtient 44 francs pour le prix de revient de 100 kilogrammes. C'est donc une industrie rémunératrice.

II. — ÉLECTROLYSE PAR VOIE IGNÉE. — ÉLECTROTHERMIE

Dans les électrolytes fondus, les produits de la dissociation électrolytique, les ions, se comportent comme dans les électrolytes dissous, et les lois de l'électrolyse par voie humide sont applicables à la voie ignée ou sèche. Ainsi pour la loi de Faraday, les ions apparaissent avec les mêmes équivalents électrochimiques et l'unité de charge de la valence est aussi de 96.540 coulombs. De même la tension des électrolytes fondus peut s'évaluer par la formule de Thomson, comme nous l'avons indiqué. Les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tensions initiales de décomposition, d'après Lorenz et Garrard sont pour les électrolytes fondus ci-après :

NaOH 2,2 volts ;	KOH 2,1 volts ;	$ZnCl^2$ 1,50 volt ;	$PbCl^2$ 1,22 volt
$CdCl^2$ 1,23 »	AgCl 0,75 »	$CdBr^2$ 0,91 »	AgBr 0,47 »
KI 0,83 »	NaI 0,81 »	PbI^2 0,71 »	CdI^2 0,68 »

Les conductivités (c) des électrolytes fondus les plus usuels sont rapportées ci-après, en inverses d'ohms-centmètre. Le tableau indique en outre les densités (d) à l'état fondu et les températures en degrés centigrades.

KCl 755° $c = 1,82$ et $d = 1,63$ (Poincaré); NaCl 150° $c = 3,40$ et $d = 1,65$ (Poincaré); $CaCl^2$ 750° $c = 1,16$ et $d = 2,21$ (Poincaré); $PbCl^2$ 730° $c = 2,66$ et $d = 5,21$ (Poincaré); $ZnCl^2$ 500° $c = 0,104$ (Lorenz); $CdCl^2$ 580° $c = 0,16$ (Gratz); $SnCl^2$ 300° $c = 1,02$ (Gratz); Cu^2Cl^2 490° $c = 0,40$ (Gratz); AgCl 650° $c = 4,68$ (Kohlrausch); KBr 750° $c = 1,40$ et $d = 2,10$ (Poincaré); NaBr 760° $c = 2,95$ et $d = 2,20$ (Poincaré); $ZnBr^2$ 450° $c = 0,096$ (Gratz); $CdBr^2$ 600° $c = 0,031$ (Gratz); AgBr 600° $c = 3,33$ (Kohlrausch); KI 640° $c = 1,07$ et $d = 2,61$ (Poincaré); NaI 670° $c = 2,43$ et $d = 2,65$ (Poincaré); ZnI^2 500° $c = 0,16$ (Gratz); CdI^2 440° $c = 0,37$ (Gratz); PbI^2 400° $c = 0,49$ (Gratz); AgI 700° $c = 2,53$ (Kohlrausch); $KClO^3$ 359° $c = 0,24$ (Foussereau); $KAzO^3$ 370° $c = 0,8$, et $d = 1,84$ (Bouty); $NaAzO^3$ 350° $c = 1,30$ et $d = 1,84$ (Bouty); AzH^4AzO^3 202° $c = 0,40$ et $d = 1,36$ (Poincaré); $AgAzO^3$ 325° $c = 1,16$ et $d = 3,90$ (Poincaré).

Dans les fours électriques (1) la chaleur est produite par la consommation du courant par une résistance solide, liquide ou gazeuse. Les lois qui régissent le courant électrique sont appliquées intégralement.

Pour les opérations électrothermiques usuelles, on a l'habitude de chiffrer la consommation d'énergie en déterminant celle correspondant à l'unité de poids du produit fabriqué ou le poids du produit effectivement obtenu par unité d'énergie consommée.

Il faut, pour déterminer la quantité de chaleur à fournir pour produire l'unité de poids du produit, connaître la quantité dépensée pour la transformation chimique qui s'opère dans le four, qui ajoute aux chaleurs d'échauffement de tous les produits solides, liquides et gazeux, obtenus à partir des matières premières et aux chaleurs de fusion et à celles de volatilisation.

Le tableau suivant renseigne sur les points de fusion des principaux métaux usuels et divers oxydes et carbures.

Al = 658° ± 1; Sb = 630° ± 1; Ag = 961° ± 2; Bi = 270° ± 2; Cd = 321° ± 0,2; Cr = 1505° ± 15; Co = 1490°; Cu 1083° ± 3; Sn = 231°9 ± 0,2; Fe = 1520° ± 15; Mg = 1225 ± 15; Hg = — 38°7 ± 0,5; Ni = 1450 ± 10; Au = 1063 ± 3; Pd = 1550 ± 15; Ml = 2500; Pt = 1755 ± 20; Pb = 327,4 ± 0,4; Tg = 3000 ± 100; Vd = 1730 ± 30 Zn = 410,3 ± 3; Si = 1420 ± 15; Ti = 1825 ± 25; Al^2O^3 = 2020;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$CaO = 1995$; $SiO^2 = 1770$; $Cr^2O^2 = 2059$; $FeO = 1419$; $Fe^3O^4 = 1538$; $Fe^2O^3 = 1548$; $UO^2 = 2176$; $ZrO^3 = 2500$; $VC = 2750$; $Al^2O^3 = 2000$; $SiO^2 = 1770$.

654. Fabrication de la cyanamide et des nitrates. — La fabrication de la cyanamide calcique repose sur la réaction, découverte par Frank et Caro, de l'azote sur le carbure de calcium, suivant l'équation chimique :

$$CaC^2 + Az^2 = CaCAz^2 + C.$$

La fixation économique de l'azote atmosphérique est un problème qui intéresse très vivement le monde industriel et agricole, et qui est de la plus haute importance pour le développement de l'industrie électrochimique en permettant d'exploiter cette source inépuisable qu'est l'air. L'azote ammoniacal est d'obtention limitée, et il ne répond qu'imparfaitement aux besoins, car les industries des explosifs et de l'acide azotique réclament de plus en plus des nitrates, et l'agriculture en sent la nécessité comme engrais, l'action fertilisante de l'azote ammoniacal étant beaucoup plus lente que celle de l'azote nitrique.

La production des combinaisons oxygénées de l'azote aux dépens des éléments de l'air, sous l'influence de la décharge électrique, avait été déjà observée en 1784 par les physiciens Cavendish et Priestley. Les réactions qui se passent entre l'azote et l'oxygène de l'air sous l'action de l'étincelle électrique donnent lieu à des oxydes d'azote qui, une fois obtenus, peuvent aisément être transformés en acide nitrique et en nitrate de soude. Si l'espace d'air dans lequel un arc électrique produit est limité, il s'y forme du bioxyde d'azote en quantités croissantes jusqu'à ce qu'on arrive à un état d'équilibre. La proportion de bioxyde correspondant à cet équilibre dépend de la consommation en watts, de l'éloignement des électrodes et de la nature des substances introduites dans la flamme.

Les procédés utilisant l'énergie électrique pour la fixation de l'azote atmosphérique sont, soit à action indirecte, procédé Franck et Caro, soit à action directe, procédés Bradley et Lovejoy, Birkeland et Eyde, Kowalski et Moscicki, et en dernier lieu, le procédé Schönherr.

Le *procédé à la cyanamide* de MM. Franck et Caro consiste à faire passer de l'air dépouillé de son oxygène ou azote atmosphérique sur du carbure de calcium chauffé à 800°, qui donne un composé solide cristallisé, la cyanamide calcique ($CaCAz^2$) ou chaux-azote. Le produit, à l'état de pureté, contient 35 0/0 d'azote et, industriellement, 15 à 22 0/0, alors que les nitrates du Chili n'en contiennent que 15 à 16 0/0.

La cyanamide enfouie en terre développe de l'azote ammoniacal dont la valeur n'est pas inférieure, au point de vue agricole, à celle de l'azote nitrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour préparer la cyanamide, on chauffe dans un four électrique à résistance les matières premières servant à la préparation du carbure de calcium et de l'azote. Ce dernier s'obtient soit en faisant passer de l'air dépouillé de son oxygène sur des copeaux de cuivre chauffés, soit par distillation de l'air liquide au moyen des procédés Linde ou G. Claude (1).

Le procédé est basé sur ce fait qu'à la pression atmosphérique l'azote bout à — 196° C., l'air liquide bouillant à — 194 et l'oxygène liquide à — 183. Le procédé de séparation est absolument semblable à la méthode de rectification employée pour la fabrication des alcools industriels. La Compagnie Linde garantit que l'azote ainsi obtenu ne contient pas plus de 0,4 0 /0 d'oxygène, pourcentage qui ne peut pas avoir d'influence défavorable sur la réaction chimique et, d'autre part, ne risque pas de provoquer la destruction par combustion des électrodes.

L'installation pour la production de l'air liquide faite par la Linde Eismaschinen Gesellschaft à Munich a fonctionné pendant plusieurs mois et ce pourcentage n'a réellement jamais été dépassé ; elle a été faite pour une production de 375 mètres cubes par heure et elle est actionnée par un moteur de 200 HP. Tous les appareils employés sont en double, pour éviter toute interruption dans le travail par suite d'un dérangement quelconque. L'air à traiter est aspiré de l'atmosphère au moyen du plus grand des quatre cylindres compresseurs, mais il passe d'abord dans deux tours où ruisselle une lessive de soude caustique dont le but est de le débarrasser aussi complètement que possible de l'acide carbonique qu'il contient. Il est comprimé à 4 atmosphères environ, puis il est refroidi, d'abord par une première tour à circulation d'eau, à la température de cette eau, puis il passe dans des tuyaux traversant un réfrigérateur à action reverse. Autour de ces tuyaux circule de l'oxygène ou de l'azote froid provenant des autres parties de l'appareil ; l'eau qui se condense dans cette opération est naturellement enlevée de même que la glace qui s'y forme, car l'air est déjà à une température au-dessous de zéro. De là il passe dans un réfrigérant à ammoniaque où sa température est encore abaissée à — 20° ou — 25° C. A ce moment toute l'humidité qu'il contenait a été presque complètement éliminée et l'air est sensiblement pur et sec. Il passe alors dans le séparateur où il arrive dans un interchangeur à contre-courant composé du système ordinaire de tuyaux concentriques ; il traverse l'intérieur de ces tubes et est refroidi par le courant d'azote ou d'oxygène circulant en sens inverse et s'évaporant à l'état liquide. A ce moment la

(1) M. Polzeniusz a eu l'idée d'ajouter au carbure de calcium 10 0 /0 de chlorure de calcium, ce qui permet d'effectuer la fixation de l'azote sur le mélange à une température sensiblement plus basse (700°) que dans la fabrication de la cyanamide.

Cet artifice est appliqué à l'usine de Westregeln par la Gesellschaft für Stistoffdunger. Le produit est vendu sous le nom d'azote-chaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

température de l'air est tout à fait basse et en l'amenant dans un serpentin immergé dans une cuve d'oxygène liquide, il s'y liquéfie, bien qu'étant à la température de 4 atmosphères. En sortant du serpentin il se détend par une soupape d'étranglement et l'on en a une forte proportion à l'état liquide et à peu près à la pression atmosphérique. Le liquide ainsi produit est amené à un point voisin du sommet d'une colonne de rectification remplie de billes de verre sur lesquelles il ruisselle. En tombant il rencontre un courant ascendant de gaz produit par l'évaporation du liquide qui se trouve au bas de la colonne. Ce gaz est riche en oxygène et cet oxygène, ayant une température de liquéfaction plus élevée que celle de l'air liquide qu'il rencontre dans l'appareil de rectification, est condensé par une proportion équivalente d'azote qui distille du liquide circulant de haut en bas. Le liquide arrive donc dans la cuve placée au bas de la colonne, enrichi en oxygène, tandis que les gaz qui s'échappent au-dessus sont presque de l'azote pur. Pour enlever les dernières traces d'oxygène la colonne de rectification est prolongée au sommet au-dessus du point où l'on introduit l'air liquide. Les gaz ascendants dans ce prolongement rencontrent un courant d'azote pur qui lui enlève complètement l'oxygène, de sorte que c'est finalement de l'azote pur que l'on recueille au sommet de la colonne. On l'envoie au four électrique sauf une faible proportion qui est utilisée comme on l'a vu ci-dessus dans la partie supérieure de la colonne de rectification. A cette extrémité il est amené dans le second cylindre du compresseur et, de là, par les réfrigérants intermédiaires aux autres cylindres, le dernier le livrant à la pression de 120 atmosphères. Après refroidissement et purification le gaz comprimé est amené ensuite dans un serpentin placé dans une cuve d'oxygène liquide venant du séparateur. Il s'y condense à l'état liquide et finalement il passe par une soupape d'étranglement au sommet de la colonne de rectification et par détente on obtient l'azote liquide à basse pression nécessaire pour la rectification. L'oxygène séparé de l'air est évaporé dans un récipient spécial par une partie de l'air comprimé et amené à la spirale à contre-courant utilisée pour refroidir l'air comprimé. Comme il n'est pas possible d'enlever complètement l'acide carbonique et l'humidité avant le passage dans les séparateurs, il arrive que cet appareil est bloqué et ne fonctionne plus après une période de six à dix jours. On l'arrête alors et l'on marche avec la seconde partie de l'installation pendant le nettoyage.

A l'usine de Piano d'Orte, l'installation, en service depuis 1905, comprend six fours à cinq cornues pouvant donner trois charges de 125 kilogrammes de matières par vingt-quatre heures.

Les cornues sont formées, en principe, d'un cylindre de fer muni de couvercles terminaux et placé horizontalement dans un bâti de maçonnerie au-dessus d'un foyer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La matière provenant du four est finement broyée ; elle contient 55,57 0/0 de cyanamide et 19,21 0/0 d'azote, avec un peu de carbure de calcium et de chaux.

L'installation d'une usine de cyanamide demande moins de capitaux, à production égale d'azote, que celle d'une usine de nitrate de chaux. Avec 1 kilowatt-an, on obtient 2 tonnes de carbure, soit 400 kilogrammes d'azote fixé, tandis qu'on obtient seulement 111 kilogrammes d'azote fixé sous forme de nitrate.

La cyanamide peut être annexée comme outillage supplémentaire à toutes les usines de carbure ; c'est le côté réellement pratique et économique du procédé d'extraction de l'azote de l'air pour le transformer en engrais azoté.

Avec la cyanamide fabriquée avec du carbure de calcium à 140 francs la tonne, le bénéfice ressort à 0 fr. 10 par kilogramme d'azote, soit 0 fr. 10 $\times$ 400 = 40 francs par kilowatt-an.

La fabrication du nitrate de chaux est à peu près confinée à l'usine de Notodden, avec une puissance motrice de 40.000 HP, tandis que les usines à cyanamide s'élèvent déjà dans tous les pays d'Europe. En Italie, on trouve la Société des produits azotés avec une usine à Piano d'Orte (10.000 HP) et une production de 100.000 quintaux métriques, puis la Société italienne des produits azotés ; en Angleterre, la North Western Cyanamid C° Ltd a construit une usine à Odda (Norvège), capable de produire 12.500 tonnes avec le carbure provenant des usines d'Alby (1) ; en Autriche-Hongrie, l'usine de Sebenico, en Dalmatie, est établie pour une production de 10.000 tonnes ; en France, la Société des produits azotés a créé une installation pour 3.750 tonnes par an dans l'usine de Notre-Dame-de-Briançon (Savoie) ; en Suisse, l'usine de Martigny peut fournir également 3.750 tonnes ; enfin l'American Cyanamid C° a fondé une

---

(1) L'installation d'Odda pour la fabrication de la cyanamide calcique comprenait en 1910, 196 fours électriques capables d'une production de 1 tonne de cyanamide par semaine.

Ces fours sont arrangés par groupes de sept, et les cornues qui y sont placées sont transportées des fours aux chargeurs et de ceux-ci à ceux-là au moyen d'un pont roulant électrique.

Une usine spéciale produit l'azote nécessaire, à raison de 1.300 mètres cubes environ par heure ; l'alimentation est réglée au moyen de registres et contrôlée à l'aide de compteurs.

L'absorption de l'azote dure approximativement 30 à 40 heures ; pendant cette période, il est indispensable de maintenir la température bien constante.

Le carbure de calcium est chargé en poudre dans les fourneaux ; en absorbant l'azote, il se transforme en une masse compacte et dure, assez semblable au coke.

Comme le produit se contracte en se formant, le déchargement des cornues est heureusement facile.

La matière doit toutefois être refroidie ; pour cela, on la laisse pendant 8 à 12 heures sur une grille et l'on fait arriver sur la masse un courant d'air froid.

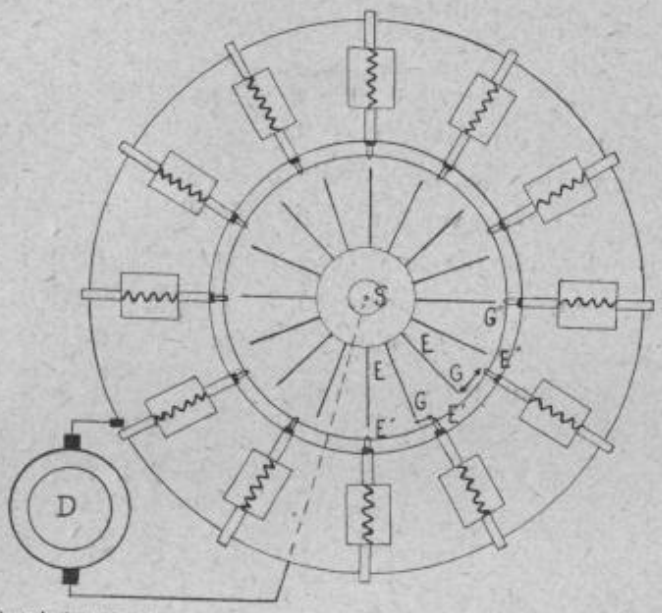
Les fours employés sont de petites dimensions, et ils exigent, par le fait même, beau-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usine pour produire 20.000 tonnes par an, à Muscle Schoals sur le Tennessee (Alabama).

L'Allemagne possède plusieurs sociétés exploitantes de cyanamide.

Le procédé à la cyanamide peut donner, non seulement un engrais ammoniacal, mais aussi de l'ammoniaque ; pour cela, il faut que l'azote retiré de l'air, qui est employé à cette fabrication, soit tout à fait débarrassé d'oxygène. On serait ainsi porté à abandonner le procédé de préparation de l'azote par le cuivre et à lui substituer celui de l'air liquide (M. G. Claude croit pouvoir obtenir le mètre cube d'oxygène et, par conséquent, les 4 mètres cubes d'azote, en ne consommant pas plus de un cheval-heure). Avec ce procédé, on se trouverait en présence d'un excédent d'oxygène, qui pourrait servir sur les lieux mêmes à la préparation de l'acide azotique au moyen de l'azote atmosphérique.



D, génératrice à courant continu (10.000 volts). — E, tiges de platine formant l'électrode mobile et passant devant l'électrode fixe E' à la distance G constituant l'intervalle de décharge. — F, arcs. — S. arbre.

FIG. 1894. — Schéma du procédé Bradley et Lovejoy.

A cet effet, on oxyderait l'ammoniaque, préparée au moyen de la cyanamide, ou on ajouterait l'oxygène à l'air soumis à l'arc électrique pour faire immédiatement les produits oxygénés de l'azote.

Ainsi la fabrication de la cyanamide et celle de l'acide azotique, par les procédés électriques, auraient lieu dans la même usine.

Le procédé de *MM. Bradley et Lovejoy* consiste à produire électriquement le bioxyde d'azote par le passage de l'air dans un four à arcs fréquemment interrompus.

---

coup de manutentions ; il a néanmoins été reconnu indispensable d'utiliser des appareils de taille restreinte pour assurer une régularité convenable dans la qualité de la fabrication.

On s'est d'ailleurs arrangé pour que la main-d'œuvre fût secondée mécaniquement dans la plus grande mesure possible.

La salle des fours n'occupe pas plus de 45 hommes, travaillant en trois brigades, et le coût de la main-d'œuvre, dans cette partie, est d'environ 15 francs pour une production de 200 tonnes.

Les conditions de fabrication sont très avantageuses et, aux prix du jour, le kilogramme d'azote assimilable revient moins cher avec la cyanamide calcique qu'avec aucun autre engrais azoté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces derniers jaillissent entre des électrodes tournantes montées sur un arbre vertical et des électrodes fixes disposées sur un cylindre concentrique.

Le courant alternatif a une tension de 8.000 à 15.000 volts. Avec une vitesse suffisante des électrodes mobiles, on parvient à réduire la durée des arcs à $\frac{1}{20.000}$ de seconde.

Le rendement en acide nitrique par ce procédé est d'environ 570 kilogrammes par kilowatt-an.

La concentration de l'acide par rapport au pourcentage de la quantité d'air qui traverse l'appareil est aussi très bonne.

Le procédé de *MM. Birkeland et Eyde* est basé sur le même principe. Les gaz, en sortant du four décrit, ne sont plus qu'à une température de 600 à 750°, renfermant, en volume, 1 à 2 0/0 de bioxyde d'azote. Après avoir été refroidis dans des appareils à récupération de chaleur, ils sont conduits dans des tours où s'achève le refroidissement, ce qui permet l'oxydation du bioxyde en peroxyde, ce dernier étant ensuite absorbé dans des tours de condensation. Dans les premiers tours, on fait circuler méthodiquement de l'eau, et on recueille un acide à 50 0/0 d'acide azotique (AzO^3H), et dans les suivantes, on absorbe les dernières portions de peroxyde en y faisant circuler un lait de chaux. Une dernière tour renferme de la chaux vive. L'acide azotique obtenu peut être ou concentré ou employé à la fabrication du nitrate par neutralisation avec du calcaire. On ajoute à la solution ainsi obtenue les lessives mixtes de nitrates et de nitrites, qui s'écoulent des tours à lait de chaux ; on traite par un excès d'acide de façon à détruire la majeure partie des nitrites et à les transformer en nitrates. On concentre, on évapore jusqu'à cristallisation, et on arrive finalement à obtenir un nitrate de chaux solide qui titre environ 13 0/0 d'azote total.

L'arc électrique tournant consomme 500 kilowatts, et 10 0/0 de cette énergie sont dépensés par la formation du champ magnétique alternatif qui sert à la dispersion de l'arc ; la tension est de 5.000 volts. Au moyen d'une soufflerie, on lance au travers de l'arc 25 mètres cubes d'air par minute, et on obtient un rendement de 2 0/0 en composés oxygénés de l'azote.

Les fours Birkeland et Eyde, installés à l'usine de Notodden (Norvège), donnent un rendement de 500 à 600 kilogrammes d'acide nitrique commercial par kilowatt-an. Avec l'azotate de calcium (1) supposé vendu au

(1) Le nitrate de chaux est un sel blanc, opaque, n'ayant pas d'odeur caractéristique, complètement neutre, très pur, exempt des perchlorates qu'on trouve dans le nitrate du Chili et de toute autre substance nuisible aux plantes ; il dose 13° d'azote ; par 100 kilogrammes, l'azote est associé à 19 kilogrammes de chaux, 44 kilogrammes d'oxy-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même prix que l'azotate de sodium du Pérou, les deux corps étant sensiblement les mêmes, le bénéfice est de 0 fr. 30 par kilogramme d'azote, ce qui fait un bénéfice de 0 fr. 30 × 111 = 33 fr. 30 par kilowatt-an, puisqu'un kilowatt-an est capable de fixer 111 kilogrammes d'azote ; avec l'acide azotique, le bénéfice ressort à 1 franc le kilogramme d'azote fixe, soit 111 francs par kilowatt-an.

A l'usine de Saaheim, il y a 8 fours de 3.500 kilowatts et on établit des fours de 4.300 kilowatts.

L'usine de Notodden, qui exploite le procédé qui vient d'être décrit, comprend 12 batteries de 3 fours chacune et reçoit 60.000 HP des chutes voisines de Svealgfos et de Lienfos. Cette usine est en mesure de fournir actuellement 20.000 tonnes de nitrate de chaux, 4.000 tonnes de nitrite de soude et 4.000 tonnes de nitrate d'ammoniaque par an. La société norvégienne de l'azote, propriétaire de l'usine de Notodden, dispose d'ailleurs en Norvège de chutes d'une puissance totale d'au moins 500.000 HP. L'une d'elles, celle de Rjukanfos, a une puissance de 240.000 HP et les usines de Vamma (70.000 HP), de Matre (80.000 HP) et de la Tyn (70.000 HP) donnent ensemble 220.000 HP. Quand on utilisera les 500.000 HP (en 1920) la production atteindra 300.000 tonnes, et les dépenses de premier établissement se seront élevées à 300 millions de francs.

A l'usine de Notodden, un kilowatt-an produit 0,7 nitrate de chaux et 0,08 de nitrite de soude, ce qui correspond à 0,5 tonne de NO^2H à 96 0/0.

Le prix de revient de la tonne de nitrate ressort de 107 à 106 francs et l'acide nitrique à 36° B. de 187 à 217 francs.

Le procédé de *MM. de Kowalski et Moscicki* repose sur la remarque faite par M. de Kowalski, en 1899, que, lorsque l'arc est produit dans l'air par un courant alternatif, la quantité de bioxyde d'azote formée augmente très rapidement avec la fréquence du courant alternatif. Les inventeurs emploient un courant oscillatoire pour produire l'intermittence des arcs, et en utilisant des condensateurs, ils obtiennent des arcs multiples sans aucun déplacement relatif des électrodes. La fréquence du courant la plus avantageuse est comprise entre 6.000 et 10.000 périodes à la seconde.

Au delà, le rendement diminue.

L'élévation plus ou moins grande de la température et la consommation d'énergie électrique dans l'arc n'ont qu'une importance secondaire pour

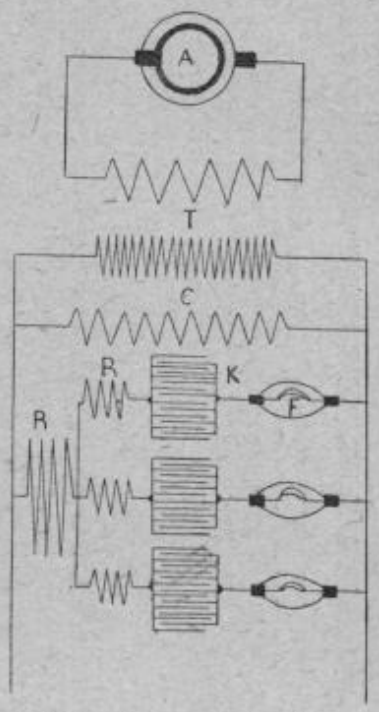
---

gène et 22 kilogrammes d'hydrogène. La Société norvégienne de l'azote vendai le nitrate de chaux, en France, avant la guerre, au prix de 22 fr. 50, environ les 100 kilogrammes. Le nitrate de chaux, quoique moins riche en azote que le nitrite de chaux, est préféré pour l'agriculture, car le mélange de ce dernier produit avec le superphosphate, qui contient toujours un excès d'acide sulfurique à l'état libre, provoque le dégagement de composés nitreux qui se répandent dans l'atmosphère et le rendent délétère.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

augmenter le rendement en bioxyde d'azote. Ce rendement dépend bien plus de la vitesse de refroidissement, laquelle dépend surtout du volume et de la surface extérieure de l'arc.

Pour produire 1 kilogramme d'acide nitrique, il faudrait employer environ 500 litres d'oxygène. Avec l'oxygène électrolytique, la dépense totale s'élèverait à 17 kilowatts-heures ; avec l'oxygène extrait de l'air liquide (procédé G. Claude), elle serait seulement de 10 kilowatts-heures (1).



A, alternateur. — T, transformateur. — C, bobine de réactance. — K, condensateurs. — F, flamme produite par la décharge. — R, résistances.

FIG. 1895. — Schéma du procédé Kowalski-Moscicki.

Le *procédé Schönherr* marque un progrès sur les méthodes que nous venons d'exposer. Le problème de la combinaison directe de l'oxygène et de l'azote est soumis en effet à plusieurs conditions : la réaction Az + O = AzO est réversible, et, d'autre part, la quantité n'est intéressante que si la température dépasse 3.000°, les gaz qui ont réagi doivent être rapidement refroidis pour limiter au minimum la réaction inverse. Dans les anciens procédés, comme nous venons de le voir, on a recours, pour obtenir la température voulue, à un grand nombre d'arcs dont l'intermittence et l'instabilité sont la caractéristique.

L'arc réalisé par M. Schönherr est au contraire une flamme très longue pouvant atteindre facilement plusieurs mètres et d'une grande fixité. Schématiquement, l'appareil se compose (*fig.* 1895) d'un tube métallique B constituant un des rhéophores portant dans son axe le second réophore A. Dans ces conditions, l'arc éclaterait en D, et si l'on faisait passer un courant d'air vertical dans le tube B, l'arc serait simplement soufflé. Mais si l'arc est envoyé sous forme d'un fort courant en spirales à l'aide de buses telles que C, l'arc s'allonge dans l'axe du tube, prend une forme telle que EG, et devient d'une fixité remarquable.

Dans le mouvement hélicoïdal, l'air circule longitudinalement, et non

(1) En se plaçant au point de vue unique de la théorie, il paraît plus avantageux d'avoir recours à des procédés seulement calorifiques, comme celui de M. Vaerst Gladbeck. Dans ce procédé, on chauffe l'air à une température aussi élevée que possible, puis on le soumet à un refroidissement brusque et rapide. Si on recourt dans l'espèce aux fours électriques, le four à résistance en particulier, il faut que celui-ci se prête assez facilement à une localisation de points chauds et froids.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus transversalement, et, au lieu de tendre à souffler l'arc, il lui assure la fixité.

On a construit des fours Schönherr industriels de 600 chevaux (*fig.* 1896), On voit sur cette figure que le rhéophore A est en cuivre et reçoit dans son centre une tige de fer E facile à remplacer. Le tube rhéophore est en fer. L'air arrive par H et avant d'arriver aux trous d'injection *o*, dans la zone du rhéophore A, il traverse le circuit indiqué par les flèches, s'échauffant lui-même et refroidissant les gaz qui ont réagi. L'extrémité supérieure du rhéophore B, et le rhéophore A sont refroidis par un courant d'eau ; enfin, l'ensemble est protégé par une forte enveloppe en maçonnerie.

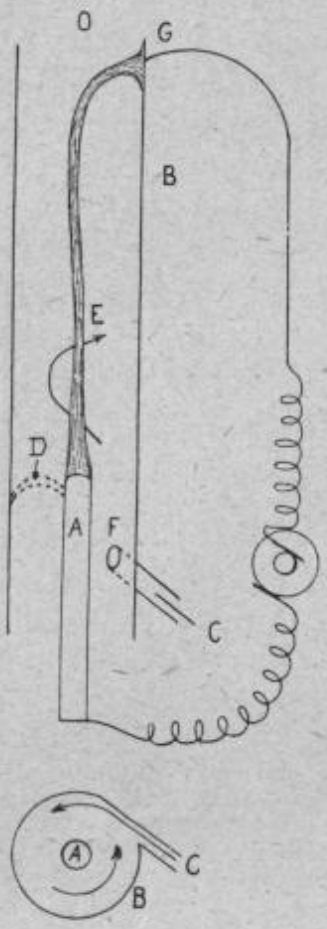


FIG. 1896. — Schéma du procédé Schönherr.

L'électrode A est en relation directe avec la source d'électricité, et toutes les autres pièces sont à la terre. La pièce de fer E s'use un peu et peut être réglée à la main. Elle dure environ trois mois ; la dépense, par suite, n'est que de quelques centimes par kilowatt-an. Le four est aisément démontable et son entretien facile.

L'électrode du four utilisé à cet effet est constituée par une tige de fer réglable placée à l'intérieur d'un cylindre en cuivre refroidi par une circulation d'eau et soigneusement isolé de la masse du four dont toutes les parties métalliques sont mises à la terre.

Pendant son fonctionnement, l'électrode de fer se recouvre d'une couche d'oxyde magnétique de fer fondu qui se volatilise lentement, empêchant ainsi l'usure rapide de l'électrode. Au-dessus de cette dernière est disposé un tube en acier soigneusement isolé de l'électrode et mis en communication métallique avec la masse du fer reliée à la terre.

Pour produire l'allumage de l'arc, il suffit d'amener la tige en fer au contact de l'électrode ; l'arc s'élève le long du tube grâce à la pression de l'air insufflé. En donnant à l'air toute la pression disponible, l'arc s'allonge jusqu'au sommet du tube en acier, s'étendant depuis l'électrode jusqu'au rebord supérieur du tube.

Les gaz sont ensuite amenés dans les fours d'absorption où le peroxyde d'azote est mis en contact avec l'eau de chaux. En présence de l'eau, le peroxyde se décompose en acide azoteux et en acide azotique qui s'unissent à la chaux pour donner un mélange de nitrite et de nitrate de chaux, que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'on peut utiliser directement comme engrais. Le produit obtenu contient environ 18 0/0 d'azote.

La différence de potentiel entre les deux pôles de l'arc varie, suivant la longueur de ce dernier, entre 5.000 et 7.000 volts. L'air passe dans des tubes concentriques ménagés dans le sens de la longueur du four, de manière à acquérir une assez haute température avant d'arriver au contact de l'arc.

Le facteur de puissance du four Schönherr est très bon ; pratiquement, il varie de 0,92 à 0,96. On admet que le laps de temps assez long, pendant lequel l'air se trouve en contact avec l'arc, constitue un avantage, et c'est à ce fait que l'on attribue la régularité de la courbe d'intensité, et par conséquent l'augmentation du facteur de puissance par rapport au four Birkeland-Eyde.

Une grande usine, construite à Kristiansand (Norvège), exploite le procédé Schönherr. L'énergie électrique nécessaire à cette usine lui est fournie par une usine hydro-électrique, distante de 26 kilomètres, qui lui envoie du courant triphasé sous 25.000 volts (4.200 volts entre phases). On a débuté avec douze fours de 600 HP, 4.200 volts, 50 périodes. Cependant on a construit des fours de 1.000 HP qui ont donné d'excellents résultats, et l'arc y atteint une longueur de 7 mètres. La Badische Anilin und Sodafabrik, concessionnaire des brevets Schönherr, s'est entendue avec la société exploitant les procédés Bikerland-Eyde, pour construire à Rjukan, 96 fours de 1.000 kw.

Les gaz, à leur sortie, contiennent environ 2 0/0 d'oxyde d'azote ; 3 0/0 de l'énergie sont transformés en énergie chimique, 40 0/0 sont employés pour chauffer l'eau de réfrigération du four, 17 0/0 sont perdus par conductibilité et rayonnement, 30 0/0 sont utilisés à chauffer les chaudières, et 10 0/0 sont absorbés dans les diverses opérations du traitement.

Les gaz nitreux avec l'eau peuvent donner de

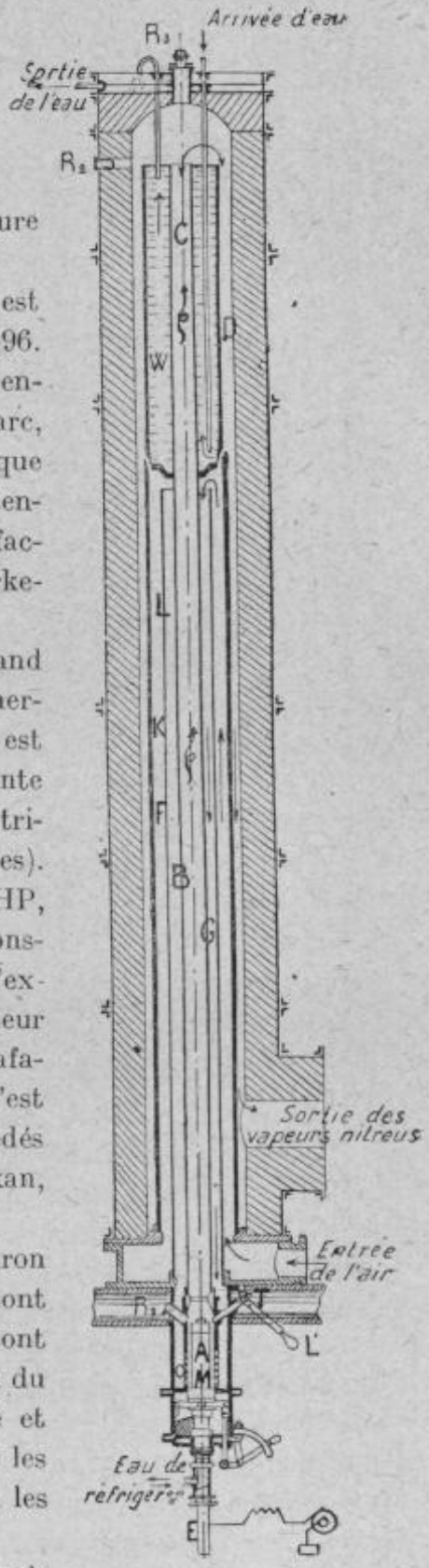


FIG. 1897.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'acide azotique à 30 0/0. On produit ainsi des nitrates exempts d'azotites. On peut former des mélanges de nitrates et de nitrites, et obtenir des nitrites seuls.

Le « four génevois » imaginé par M. Guye et qui dérive de l'appareil Schönherr comporte cinq cheminées d'appel, au bas desquelles se trouvent des électrodes à cornes montées en série et refroidies par le courant d'air insufflé. Parmi les autres procédés appliquant l'arc électrique nous citerons le procédé Fritz Haber qui consiste à faire réagir l'azote et l'hydrogène à une pression de 200 atmosphères en présence de l'osmium et de l'uranium agissant comme agents catalytiques et à une température ne dépassant pas 500°.

Le procédé Pauling exploité à Patsch, près Innsbruck, par la Société Salpetersäure-Industrie-Gesellschaft, de Gelsenkirchen à Milan, à la Roche de Rame (France), à Chippis (Suisse), dans la Caroline du Sud, à Nitrobu et à Maldenstein (Silésie), repose sur l'emploi d'arcs à flamme éclatant entre des électrodes recourbées comme celles des parafoudres à cornes. A chaque demi-période du courant alternatif, s'allume à la partie inférieure la plus étroite un arc qui est chassé vers le haut par les gaz chauds. On produit ainsi une véritable flamme qui devient encore plus étendue lorsqu'on souffle contre les électrodes un courant d'air à grande vitesse.

Pour la réalisation pratique de flammes qui peuvent absorber plusieurs centaines de kilowatts, on doit considérer qu'il faut rapprocher le plus possible les électrodes dans le bas pour que les quantités considérables d'air soufflé n'apportent pas de trouble et qu'il est nécessaire, à cause de ce violent courant d'air, d'employer une tension excessive qui tombe immédiatement après formation de l'arc.

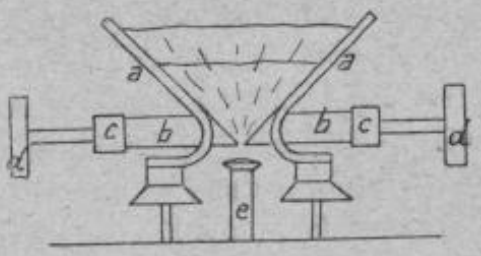
Pour obtenir des flammes constantes de grande énergie avec la plus faible tension possible, la Société ci-dessus mentionnée emploie le dispositif d'allumage représenté (*fig.* 1988). Les électrodes principales *a* possèdent à leurs extrémités inférieures des fentes verticales dans lesquelles coulissent de minces couteaux d'allumage *b* qui sont écartés de quelques millimètres lorsque la flamme brûle régulièrement. Ce mouvement est obtenu par les dispositifs à main *d* reliés aux couteaux par les pièces isolantes *c*. Comme ces couteaux sont très étroits, ils ne troublent pas le mouvement de l'air et l'action de la flamme sur lui.

Les électrodes principales sont disposées de telle façon qu'un jet d'air de 40 millimètres de largeur passe à la partie la plus étroite. La buse *e* qui amène cet air a une forme telle que le courant d'air diverge à la sortie et balaie les électrodes dans toute leur longueur. Grâce à ce dispositif d'allumage, les électrodes principales peuvent être fixées solidement et le réglage de la flamme peut être obtenu très facilement. La flamme brûle très

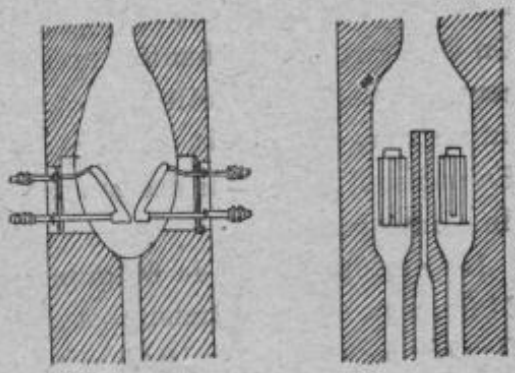
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

silencieusement ; elle rayonne une lumière blanche éblouissante par suite des particules détachées des électrodes.

Pratiquement, la longueur de la flamme atteint 1 mètre. Les électrodes sont en fer ; elles sont refroidies par circulation d'eau ; leur durée moyenne est de 200 heures. Par suite de leur moindre épaisseur, les couteaux d'allumage brûlent plus rapidement.



Le refroidissement des gaz de la flamme se fait par l'emploi d'air dit de circulation qui est envoyé latéralement dans la partie supérieure de la flamme. On obtient ainsi un refroidissement brusque des gaz de la flamme. Cet air de circulation est introduit à une vitesse plus faible que le courant d'air principal ; il exerce une action d'aspiration sur l'arc qu'il étire et élargit. Ce moyen de refroidissement permet d'obtenir, dans une grande exploitation, une concentration d'environ 1,5 0/0 d'oxyde azotique.



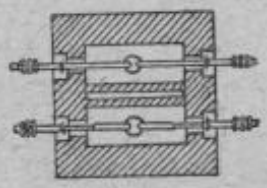


Fig. 1898. — Four Pauling double.

Chaque four en maçonnerie renferme deux arcs. La (*fig.* 1898) représente deux coupes verticales et une coupe horizontale d'un four. La puissance absorbée par four est de 400 kilowatts sous une tension de 4.000 volts. Il y passe 600 mètres cubes d'air à l'heure, non compris l'air de circulation. Dans l'usine d'Innsbruck, il y a eu à l'origine en exploitation 24 fours de ce type. Le service est extrêmement simple et un homme peut surveiller jusqu'à six fours.

La Société Salpetersäure-Industrie-Gesellschaft a encore un dispositif particulier pour mettre en série dans un même circuit plusieurs arcs sans apporter de troubles au fonctionnement de ceux-ci. Les deux arcs en tension dans le même four ont leur pôle commun soigneusement isolé par rapport à la terre et en communication avec un des deux pôles extrêmes par une résistance très élevée. Il en résulte que la tension totale s'exerce sur l'arc qui n'est pas shunté par la résistance. Dès que cet arc s'est amorcé, la tension à ses bornes s'abaisse considérablement et le deuxième arc est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alors soumis à une tension presque égale à la tension totale, de sorte qu'il s'allume à son tour. Aussitôt que ce second arc a jailli, le circuit de la machine se ferme directement sur les deux arcs en tension.

Ce dispositif a encore été perfectionné récemment. Comme la tension d'allumage est beaucoup plus haute que celle de fonctionnement normal, on produit cette tension d'allumage à l'aide d'un circuit auxiliaire à tension très élevée, mais à puissance faible. Par une disposition appropriée, on évite que le circuit auxiliaire ne décharge dans le circuit principal. Ce mode opératoire permet de mettre en exploitation dans un même circuit le nombre de fours que l'on désire sans qu'un arc trouble les autres. On utilise ainsi à tout instant toute l'énergie disponible.

Les gaz quittent les fours à une température de 700° à 800° C. et sont transformés en acide azotique ou en azotite de sodium. Un problème très important en pratique est l'utilisation rationnelle de la chaleur de ces gaz. On s'en sert pour échauffer préalablement l'air de soufflage et pour concentrer l'acide et l'azotite. La condensation de l'acide azotique se fait dans un système de tubes et de tours d'où l'on retire de l'acide à 35 ou à 40 0 /0. En utilisant la chaleur des gaz, on concentre alors à 60 0 /0, titre de l'acide du commerce.

Le rendement est de 60 grammes de AzO^3H par kilowatt-heure. Les 24 fours de l'usine d'Innsbruck utilisent une puissance de 15.000 chevaux. Deux autres usines de 10.000 chevaux, utilisant les mêmes procédés, ont été créées, l'une dans le sud de la France, l'autre dans le nord de l'Italie (1).

---

(1) La Société *La Nitrogène* exploite à la Roche-de-Rame (Hautes-Alpes), une usine destinée à la fabrication de l'acide nitrique et autres produits nitrés par synthèse, par l'application des procédés Pauling.

L'énergie utilisée est produite par la chute de la Biaisse, affluent rive droite de la Durance, dont l'installation hydroélectrique est faite pour 20.000 HP.

L'usine électro-chimique est située vis-à-vis de l'usine génératrice, sur la rive gauche de la Durance, à côté de la gare de Roche-de-Rame.

Au point de vue électrique, chaque four comprend deux arcs en série ; le courant utilisé dans l'installation est du courant alternatif triphasé à la fréquence courante de 50 périodes et à la tension de 4.000 volts ; les fours sont monophasés et répartis également sur les trois phases.

Le matériel électrique correspondant à chaque four comprend deux bobines de self, un petit transformateur et une boîte de manœuvre ; ce matériel se trouve placé en face de chaque four, sur le pourtour de la salle.

Les fours sont de 500 et 1.500 HP.

Les gaz nitreux chauds qui sortent des fours commencent par échanger une partie de leur chaleur dans un échauffeur spécial avec l'air comprimé qui se rend aux fours ; ils sont ensuite envoyés alternativement au moyen de vannages mobiles dans deux tours en briques dont le fonctionnement est analogue à celui des cowper des hauts fourneaux et où les gaz achèvent de se refroidir.

Après avoir traversé le ventilateur qui produit leur appel à travers les installations qu'ils parcourent, les gaz se rendent dans une grande tour d'oxydation, consistant en une immense chambre de 10 mètres de diamètre sur 22 mètres de hauteur ; c'est dans cette chambre que s'achève l'oxydation commencée dès la sortie des fours.

Les gaz arrivent enfin dans les tours d'absorption, dans lesquelles l'acide se condense ; les tours sont construites en briques spéciales, réfractaires à l'acide nitrique, et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'usine de Maldenstein, d'une puissance de 15.000 HP, produisait à la veille de la guerre 6.000 tonnes d'acide nitrique avec des fours monophasés de 6.000 volts, 50 périodes. A l'usine de Gelsen Korchen, on a construit des fours de 400 à 4.000 kilowatts et, à Nitrobie, des fours de 1.100 et 2.000 kilowatts.

A l'usine de Herringen (Westphalie), où on a appliqué le four Hausser, on utilise comme source de chaleur celle qui est produite par l'explosion d'un mélange de gaz combustible et d'air.

La valeur des nitrates de soude et des sulfates d'ammoniaque consommés dans le monde avant la guerre dépassait un milliard de francs, dont près de 120 millions pour la France seule.

---

sont munies d'un remplissage approprié ; chaque tour est desservie par un appreillage comprenant des monte-jus automatiques et des canalisations en grès ; ces tours sont au nombre de cinq.

Dans une sixième tour de construction différente s'opère une concentration de l'acide fourni par les premières, ce qui permet à l'usine de fabriquer son acide nitrique à tous les titres voulus, depuis la concentration commerciale de 36° B. jusqu'à 46 et 48° B. (96 0 /0).

Les tours d'absorption et la tour de concentration précédentes sont situées dans un grand hangar en bois. A ce hangar est adossé le magasin d'acide devant lequel se trouve le quai de chargement qui sera desservi par un embranchement particulier.

Les dernières traces de gaz qui sortent de l'installation précédente se rendent dans une installation annexe où elles sont utilisées pour produire du nitrite de soude. Cette installation comprend une tour d'absorption, des bassins de dissolution et de cristallisation, des appareils de séchage et d'essorage. Le nitrite de soude y est produit à 97,98 0 /0 de pureté en beaux cristaux.

En marche normale, la fabrication donne de 60 à 70 grammes d'acide monohydraté (HNO^2) par KWH d'énergie dépensée, calculée aux bornes d'entrée du courant dans la fabrique ; ainsi que nous l'avons dit, tout cet acide peut être produit à la concentration de 48°B. (96 0 /0).

Le coût d'établissement de l'installation électrochimique proprement dite ne dépasse pas 120 francs par kilowatt ; on voit donc que ce procédé est extrêmement économique.

Mais son économie se révèle surtout dans l'exploitation ; tout se passant en quelque sorte en vase clos et sans aucune manutention, le personnel est extrêmement réduit ; il ne comprend que quelques hommes pour la surveillance des fours, des machines et des monte-jus ; tout fonctionne pour ainsi dire automatiquement.

La récente mise en fonctionnement de l'usine de *la Nitrogène* paraît intéresser vivement l'industrie chimique à cause de la grande pureté des produits obtenus par cette fabrication synthétique. L'acide ainsi fabriqué est, en effet, exempt de toutes les impuretés de l'acide obtenu par les procédés ordinaires et, en particulier, exempt de chlore.

Avant la guerre de 1914, nous écrivions ce qui suit : qui aurait pu donner l'éveil sur le développement qu'il eût fallu donner à la fabrication des explosifs. La nécessité a été plus forte qu'un simple avertissement, car de 2.000 HP que l'usine possédait avant guerre, elle a été portée en raison des circonstances à 20.000 HP.

Cette usine doit également intéresser tous ceux qui s'occupent de la mise en valeur des forces hydrauliques, car la nouvelle industrie qu'elle nous apporte offre un champ immense à l'utilisation des chutes d'eau ; en effet, le marché de l'acide nitrique lui-même est considérable. Quant aux nitrates, pour la fabrication desquels l'installation du procédé Pauling est — cela va sans dire — encore plus simple et plus économique que pour la fabrication de l'acide, on sait qu'ils ont dans l'agriculture des débouchés illimités.

Cette usine mérite enfin d'intéresser les pouvoirs publics car, à bref délai, cette nouvelle industrie pourra donner à la France — qui jusqu'ici était tributaire de l'étranger pour les produits nitrés, matière première de la fabrication des poudres — la possibilité d'approvisionner elle-même ses magasins de munitions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En 1916, ce chiffre a atteint 200 millions et une cavalerie de un million de chevaux étaient utilisés à cet effet. Si les procédés synthétiques n'avaient pas été industriellement exploités avant la guerre, l'Allemagne n'aurait pu soutenir la lutte, les nitrates du Chili n'ayant pu être importés chez elle.

Fabrication de l'ammoniaque en partant de l'azoture d'aluminium. — L'azoture d'aluminium paraît devoir s'imposer comme engrais concurremment avec la cyanamide. En effet cet azoture dose entre 30 et 33 0/0 d'azote, tandis que le sulfate d'ammoniaque, le nitrate de soude, la cyanamide ne dépassent pas 21 0/0 d'azote. Il représente donc une forme plus condensée que les engrais azotés usités jusqu'ici et par suite d'un transport plus économique.

L'azote peut se combiner avec un assez grand nombre d'éléments métalliques en donnant naissance à des azotures très stables, formés avec de grands dégagements de chaleur (80 calories et 110 aux chaleurs de formation des azotures de silicium et d'aluminium).

La réaction est définie par la formule chimique :

$$Al^2O + 3\,C + Az^2 = Al^2\,Az^2 + 3\,CO. \qquad \text{(Serpeck)}$$

Cette réaction, qui marche déjà à 1.500°, mais lentement, devient rapide à 1.800°, au point que quelques minutes suffisent pour la transformation en azoture.

On chauffe le mélange d'alumine et de charbon dans un four électrique et vers 1.800° on envoie un fort courant électrique pendant que l'azote le parcourt, lequel chasse trois fois son volume de gaz oxyde de carbone.

La présence de fer et d'hydrogène permet de rendre pratique la réaction vers 1.500°, ce qui présente une marche industrielle avantageuse.

Par l'application du procédé Serpeck, la préparation de l'alumine en passant par l'azoture d'ammonium, avec synthèse simultanée d'ammoniaque, est appelée à baisser sensiblement le prix du métal.

D'après le Dr Serpek, la transformation de la bauxite en alumine coûte, en temps normal, 125 fr. 25 par tonne d'alumine pure, et celle du nitrure en alumine ne dépasse pas 63 fr. 80.

Le procédé Serpek peut non seulement fonctionner comme producteur d'alumine avec l'ammoniaque comme produit secondaire, mais également comme producteur d'ammoniaque, la même alumine restant toujours dans la fabrication, et, dans ce dernier cas, la décomposition de l'azoture est encore simplifiée.

Les fours d'essai pour cette fabrication ont été créés à l'usine hydro-électrique de Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie), et on arrive à la conception d'un four tournant constitué par deux cylindres inclinés en sens inverse,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'un au-dessus de l'autre, et dans la partie centrale du cylindre inférieur se trouve intercalé un four électrique à résistance.

On verse la bauxite à l'ouverture supérieure du premier cylindre et elle arrive dans la chambre fixe où elle se mélange avec le charbon, puis le mélange passe dans le deuxième cylindre, arrive dans la section électrique et s'y rencontre avec du gaz de gazogène, marchant en sens inverse et introduit par conséquent à l'extrémité inférieure du deuxième cylindre. Des dispositifs spéciaux permettent de produire la combustion du gaz oxyde de carbone par une arrivée d'air à la base du cylindre supérieur.

La section électrique du cylindre inférieur est chauffée par des résistances diamétrales, perpendiculaires à l'axe du cylindre, en contact par leurs extrémités avec des têtes d'électrodes noyées dans la paroi et émergeant à l'extérieur.

Un tel four est alimenté par un courant de 10.000 ampères sous 230 volts.

Ce procédé de fixation de l'azote paraît tenir une place importante dans cette nouvelle industrie.

L'azoture d'aluminium dose, d'après les études de M. Matignon, 30 et 33 0/0 d'azote ; il représente donc une forme d'azote plus condensée que les engrais azotés usités jusqu'ici (sulfate d'ammoniaque, nitrate de soude, cyanamide). Reste à déterminer si l'azoture d'aluminium se prête facilement à sa décomposition dans le sol.

Les essais entrepris par la Société des nitrures ont eu pour objet immédiat la préparation de l'alumine et l'obtention de l'ammoniaque comme produit secondaire.

Dérivés nitrés. — Ces produits constituent des matières fort importantes, pour la grande industrie chimique organique. Un certain nombre d'entre eux, surtout les dérivés polynitrés, servent comme explosifs et dont la guerre a montré toute l'importance. On obtient les produits nitrés par action de l'acide nitrique sur les composés aromatiques.

Dans la plupart des nitrations industrielles, on emploie un mélange d'acides nitrique et sulfurique.

Comme procédés de fabrication de l'acide nitrique, nous citerons les procédés Valentiner, Arbel, de la Badische Anilin und Soda-Fabrik, Negrier-Hartmann. Un des dérivés les plus importants pour la fabrication des matières colorantes est certainement la nitrobenzine. Presque toutes les chaudières utilisées pour la nitration dérivent du type Nicholson et Maule.

La nitration des anines offre aussi un grand intérêt chimique, il y a notamment la fabrication du paranitraline.

L'exportation du Chili en Europe de nitrates destinés en principe aux industries chimiques est de 1.500.000 tonnes représentant 375 millions de francs, dont 1.200.000 tonnes sont employées à la culture du sol.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« L'industrie électrochimique de la fixation de l'azote a donc devant elle un avenir des plus brillants, même en ne considérant que les procédés actuellement en pratique, lesquels peuvent sans doute ou être améliorés dans leur rendement, ou remplacés par des procédés à meilleur rendement. » (Blondin).

655. Préparation de l'ozone. — Par suite de ses propriétés oxydantes extrêmement énergiques et de sa grande puissance microbicide, l'ozone est recherché dans un grand nombre d'applications industrielles. Au point de vue de l'hygiène, il permet d'utiliser les propriétés qui le caractérisent, sans avoir à craindre la formation de produits nuisibles à l'organisme humain.

Il devait donc trouver son emploi à la stérilisation de l'eau. En dehors de la stérilisation de l'air et de l'eau, l'ozone a de nombreux emplois dans l'industrie, souvent cachés avec un soin jaloux par l'industriel qui l'applique dans ses usines au profit de sa fabrication. Actuellement, l'ozone est utilisé au blanchiment des toiles, des fils, des matières amylacées (amidon, etc.), des gommes, des huiles, pour le vieillissement des bois, des alcools, des vins, pour le dégras des cuirs, la production de la vaniline, le traitement et la conservation des moûts de raisin, le raffinage du sucre, la conservation et le transport des poissons vivants, la fabrication des parfums artificiels, la préparation du camphre artificiel et la fabrication de la soie arfiticielle.

L'ozone oxyde tous les corps susceptibles d'oxydation à froid, comme à chaud ; il se combine à la plupart des hydrocarbures et oxyde un grand nombre de matières organiques. Son poids moléculaire est 48, et, en se transformant en oxygène, une molécule d'ozone fournit 29,6 calories.

La préparation de l'ozone s'obtient par la transformation de l'oxygène de l'air en ozone, ou oxygène condensé, au moyen de l'effluve électrique ou décharge produite entre deux lames conductrices parallèles, portées à des potentiels différents suffisamment élevés, et séparées par un gaz. On régularise la production de l'effluve en disposant les diélectriques, verre ou mica, contre chacune des lames.

Quand la décharge se produit sous forme d'effluves bleus ou violets, on peut recueillir et utiliser l'ozone formé.

Pour que l'appareil producteur d'ozone émette beaucoup de ce gaz, il faut, dans le cas d'un courant continu, augmenter la fréquence des interruptions (par l'emploi d'interrupteurs à étincelles), et, dans le cas d'un courant alternatif, augmenter la fréquence pour multiplier le nombre de décharges actives dans l'appareil. La théorie indique une production possible de 1.400 grammes par kilowatt-heure. On a obtenu jusqu'ici 100 grammes par kilowatt-heure dans certaines conditions favorables. En

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prenant comme rendement moyen 30 grammes d'azote par cheval-heure, et comme prix de revient de ce dernier 0 fr. 10, l'ozone reviendrait à 3 fr. 30 le kilogramme.

Les appareils ozoniseurs sont, dans l'ordre de date de leur découverte : ceux de Siemens et Halske, Arnold et Otto, Schneller et Wite, Tyndal et Andréoli, Marnier et Abraham, de Vosmaer et L. Gérard.

L'électrolyseur Schuckert (*fig.* 1899) est un appareil à cloche. Les gaz qui se dégagent aux électrodes sont recueillis dans des cloches en fer placées au-dessus des électrodes, l'électrolyte étant une lessive sodique à 16 0/0. Les électrodes pénètrent dans les cloches qui sont isolées et étanches. Les différents éléments, qui sont complètement indépendants

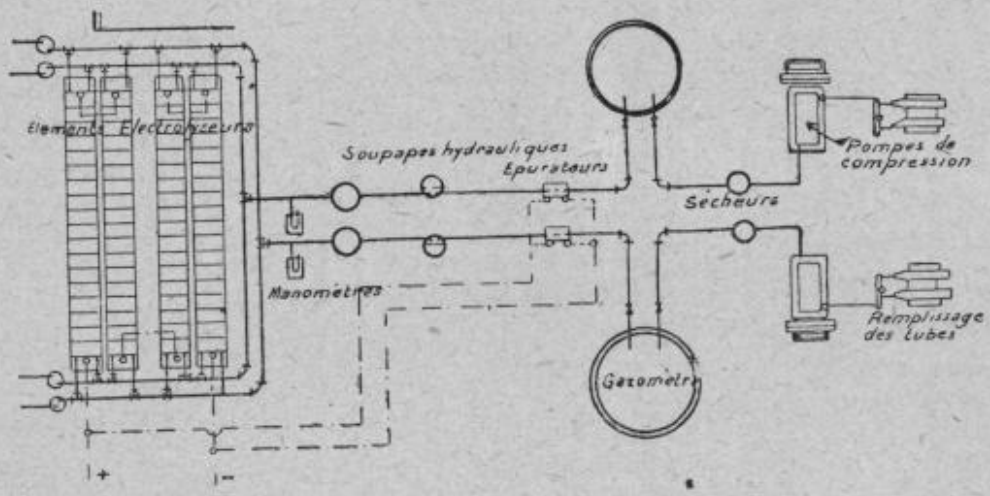


FIG. 1899. — Électrolyseur, système Schuckert, produisant 2^{m3} d'oxygène et 4^{m3} d'hydrogène à l'heure.

les uns des autres, sont suspendus dans les récipients qui contiennent l'électrolyte.

Chaque élément est construit pour supporter une tension aux bornes de 2,5-3 volts à 4 volts au maximum et l'intensité peut varier à volonté en agissant sur la tension dans ces limites, sans influencer la pureté du gaz produit.

L'oxygène ne contient pas plus que 2 à 4 0/0 d'hydrogène.

Pour améliorer la pureté, l'électrolyseur qui nous occupe permet la séparation des gaz par l'interposition des cloches métalliques entre les électrodes. L'électrode en fer se trouve lentement oxydée et elle peut durer un an à un an et demi.

Pour éviter que l'électrolyse contienne de grosses impuretés on emploie, pour préparer la lessive, de la soude caustique qui ne contient en chlorure sulfate et nitrate que 0,1 0/0 du poids de la soude pure.

La présence de corps saponifiable est, par contre, favorable à la bonne marche du phénomène.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les gaz sortant de la batterie sont débarrassés des petites particules de lessive qu'ils contiennent en suspension dans une colonne à coke laveuse et sont conduits à l'épurateur, qui ramène la pureté de ces gaz à 99 0 /0. L'épurateur constitue en même temps un appareil de sécurité pour empêcher des mélanges explosifs d'arriver aux gazomètres et aux compresseurs.

Le remplissage journalier nécessaire (pour 1 mètre cube d'oxygène et 2 mètres cubes d'hydrogène, il faut 2l,5 de lessive) peut être fait par un ouvrier quelconque.

Les frais de production de l'oxygène électrolytique résident principalement dans la dépense d'énergie électrique.

La figure 1899 montre le dispositif d'installation des appareils pour une production de 2 mètres cubes d'oxygène et 4 mètres cubes d'hydrogène à l'heure.

Dans les appareils Siemens la puissance absorbée est de 1 /4 à 1 /2 cheval pour ozoniser 500 à 1.000 litres d'air par heure.

M. L. Gérard revendique pour ses appareils une production de 100 grammes d'ozone par kilowatt-heure ; il arrive en outre, facilement, à des concentrations de 30 milligrammes par litre.

Le rendement des ozoniseurs à effluve, employant des transformateurs à haute tension, donnent un chiffre bien supérieur au procédé d'électrolyse Grafenberg, ce dernier ne pouvant fournir encore que 2 centigrammes d'ozone par kilowatt.

Aujourd'hui, de nombreuses usines stérilisent l'eau d'alimentation des villes : l'eau à purifier est en contact avec de l'air chargé d'une quantité d'ozone variant de 0gr,50 à 4gr,0 par mètre cube.

L'ozone s'emploie aussi à la stérilisation des eaux industrielles ou des eaux destinées à un service public, des eaux pour le lavage des laines, pour la teinturerie, pour la brasserie, pour les bains de natation, etc. ; à la stérilisation de l'air, dans la ventilation des habitations, la désinfection des locaux, la préservation des comestibles ; pour le traitement des objets de pansement. Il est enfin utilisé comme stérilisant du lait, comme stérilisant coagulant ou agent de blanchiment dans la brasserie, dans les industries de l'alcool et du vin, des matières grasses, des sucres, farines, amidons, céréales ; des dentelles, des plumes, des textiles ; dans la fabrication du camphre, des parfums, de la vaniline, du caoutchouc, etc.

656. Préparation de l'oxygène, de l'hydrogène, de l'oxylithe et de l'hydrolithe. — Depuis l'année 1897, on a réalisé l'obtention industrielle de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse de l'eau, au moyen de l'énergie des chutes d'eau.

L'électrolyte est une solution de soude ou de potasse recouverte d'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couche d'huile pour empêcher l'acide carbonique de l'air de transformer les hydrates en carbonates alcalins.

Le voltamètre est placé dans une cuve en fer qui contient l'électrolyte ; il est divisé par des diaphragmes verticaux en un grand nombre de cellules ouvertes par le bas, dans lesquelles sont disposées alternativement les anodes et les cathodes. Chaque cellule porte en haut un trou, et ces trous communiquent alternativement avec deux cloches destinées, l'une à l'oxygène, l'autre à l'hydrogène.

La tension aux bornes du voltamètre varie de 2,3 à 2,5 volts, et la densité du courant ne peut dépasser 2 ampères par décimètre carré. Théoriquement, 1 ampère-heure produit 417 centimètres cubes d'hydrogène à 0° C. et 200 centimètres cubes d'oxygène, et à la pression 760 millimètres. Avec de l'énergie électrique à 4 centimes par kilowatt-heure, le prix de 1 mètre cube d'hydrogène peut revenir à 6 centimes.

Le principal avantage de l'électrolyse de l'eau est de fournir ses constituants à l'état de grande pureté.

Parmi les systèmes employés industriellement, on peut citer les procédés Garutti, Oerlikon, Sckuckert, Schmidt et Schoop. Les deux premiers travaillent en solution alcaline et le dernier en solution acide. Dans les deux premiers, les électrodes sont en fer ; dans le procédé Schoop, elles sont en plomb. Le système Garutti, le plus répandu, est utilisé en grand à Lucerne, à Schiedam (Hollande), et à Tivoli et Bruxelles.

L'usine de Saint-Vrain, en France, produit journellement 200 mètres cubes d'hydrogène et 200 d'oxygène.

La Société l'Oxhydrique française, qui exploite le procédé Garutti, produit 400 mètres cubes d'hydrogène et 200 d'oxygène.

L'emploi des lessives alcalines présente l'inconvénient d'une absorption de l'acide carbonique de l'air, ce qui abaisse la conductibilité de l'absorption.

L'appareil Schmidt ne diffère pas d'un filtre-presse. Il est composé d'électrodes bipolaires en fer placées parallèlement les unes à côté des autres. Des toiles d'amiante gommées au bord servent d'isolants et de joints, en même temps qu'elles séparent les gaz. Il peut fournir 168 litres d'hydrogène et 84 litres d'oxygène par kilowatt-heure, ce qui correspond à la décomposition de 134 kilogrammes d'eau.

Dans l'appareil Schoop, ce qui est caractéristique, c'est la forme en tube d'électrodes qui présentent à la partie inférieure un évasement en forme de cloche. Ces électrodes sont des tubes en plomb recouverts extérieurement d'un enduit isolant.

Un tube peut supporter une intensité de 25 ampères et fournir $5^{l},22$ d'oxygène et $10^{l},44$ d'hydrogène.

La tension aux bornes atteint 3,3 à 3,6 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après la Kölner, Akkumulatoren-Werke, qui exploite le système Schoop, on obtiendrait, par cheval-heure, 48l,75 d'oxygène et 97l,5 d'hydrogène ; 1 mètre cube de gaz tonnant correspondrait donc, d'après ces chiffres, à une consommation d'énergie de 6,2 à 6,8 HPH.

L'électrolyse du sel marin permet de mettre en liberté un atome d'hydrogène par molécule de soude. La préparation en grand est maintenant réalisée dans des usines importantes en Angleterre, en France et en Allemagne.

L'*oxylithe* est un produit composé de bioxyde de sodium et de permanganate de potasse agglomérés en blocs, qui jouit de la propriété de dégager de l'oxygène pur lorsqu'on l'immerge dans l'eau. C'est là une solution remarquable du problème de la préparation de l'oxygène par un moyen des plus simples et des plus pratiques.

Ce produit, découvert par M. F. Jaubert, est exploité par la Société d'Electrochimie, qui le fabrique en grand aux usines des Clavaux (Isère). Un kilogramme d'oxylithe fournit environ 140 litres d'oxygène.

L'*hydrolithe* s'obtient par une préparation analogue à celle du peroxyde de sodium. On fabrique préalablement du calcium électrolytique, lequel est ensuite chauffé dans un courant d'hydrogène.

En pratique, l'hydrolithe fournit environ 1 mètre cube de gaz par kilogramme.

Les avantages de l'hydrolithe sur l'hydrogène comprimé sont indéniables ; ce produit constitue un appoint intéressant pour l'aéronautique, tant pour le gonflement des ballons à terre que pour les tentatives de très longues traversées aériennes.

L'emploi de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'acétylène dans les procédés de soudure et de découpage des métaux donne une importance toute spéciale à l'obtention de ces gaz et, par suite, aux moyens économiques de se les procurer. Mais les procédés de distillation fractionnée de l'air liquide (Linde, Claude), qui permettent d'extraire directement l'oxygène de l'air liquide, se présentent comme de redoutables concurrents des procédés électrolytiques.

La Société Linde livrait avant la guerre l'oxygène, à raison de 6 fr. 60 le mètre cube, et l'hydrogène à 2 fr. 50 le mètre cube. Il y a peu d'années, l'oxygène valait encore 18 à 22 fr. 50 le mètre cube.

657. Sénilisation et ignifugation des bois. — Les procédés électrolytiques de *Nodon et Bretonneau* consistent en des cuves d'électrolyse en bois, doublées de plomb (12m,00 × 3m,00 × 1 mètre) isolées du sol électriquement ; ces cuves sont chauffées à la vapeur à une température de 35° C. Le bain est une solution de sulfate de magnésie à 20 0/0. Les bois à préparer baignent dans cette solution, dont ils n'émergent que de 3 à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8 centimètres. Le chargement des bois se fait sur de faux fonds mobiles recouverts d'une table de plomb (électrode). Les bois, une fois disposés dans la cuve, sont recouverts d'une série de récipients ou vases poreux qui contiennent la deuxième électrode en plomb.

Les lames de plomb de chacun de ces vases portant des pattes sont reliées entre elles par des pinces en fer et ensuite à l'un des pôles, l'autre pôle étant à l'électrode inférieure.

Le courant (courant continu à 110 volts) traverse d'abord les bois de haut en bas, puis de bas en haut, le renversement du courant se faisant à peu près toutes les heures. La durée du traitement peut varier de sept à quatorze heures.

L'intensité du courant est de 6 ampères par stère de bois empilé, et l'énergie dépensée correspond à 4.500 watts par mètre cube de bois.

L'action électrolytique a lieu par électrolyse simultanée des sels organiques renfermés dans la sève, des matières incrustantes du bois et du sulfate de magnésie employé. Il se forme ainsi, sous l'influence de l'électrolyse, dans la masse du bois, de nouveaux composés minéraux, instables et imputrescibles, combinaisons aseptiques qui empêchent le développement ultérieur des germes de décomposition et l'attaque du bois par les insectes.

Les bois, après le traitement électrolytique, sont desséchés complètement, soit à l'air libre, soit dans des étuves ou séchoirs munis de ventilateurs.

Un des avantages de la sénilisation du bois est que l'aubier de certaines essences, telles que le chêne, présente le même aspect et la même dureté que le cœur ; la couleur du bois n'est pas modifiée, et sa sonorité augmente. Enfin, le procédé est plus économique que les méthodes employées jusqu'ici, ce qui résulte des essais entrepris à l'usine d'Aubervilliers par la Société de sénilisation.

L'*ignifugation* des bois est aussi simple que la sénilisation ; le dispositif n'en diffère que par l'encombrement des cuves ($5^m,00 \times 1^m,50 \times 0^m,70$) et l'épaisseur des bois de traitement. Le bain ignifuge a la composition suivante, saturée à 80° C. :

Eau	100
Sulfate d'ammoniaque ordinaire	80
Borate d'ammoniaque ordinaire	20

Le courant électrique a une tension de 20 à 30 volts, et l'énergie nécessaire est de 1 /2 cheval par stère de bois en traitement. L'opération dure quarante-huit heures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — CARBURE DE CALCIUM

658. Propriétés du carbure de calcium. — Moissan, le premier, a pu obtenir, au cours de l'année 1892, un carbure de calcium défini et cristallisé, en soumettant à la température de l'arc électrique un mélange d'oxyde de calcium et de charbon.

La réaction chimique pour la formation du carbure est fournie par la formule :

$$CaO + 3\,C = CaC^2 + CO.$$

Le carbure de calcium, lorsqu'il ne contient pas de traces de fer, est complètement transparent. Au moment de sa formation dans le four, il est liquide et, en se refroidissant, il se cristallise. Sa dureté est très grande et sa densité, à la température de 18°, est de 2,22. Il est insoluble dans tous les réactifs, dans le sulfure de carbone, dans le pétrole et dans la benzine. Son action sur les métaux est nulle. Mis en présence de l'eau, le carbure de calcium donne naissance à un gaz d'éclairage très brillant et très économique, l'*acétylène*, suivant la réaction :

$$C^2Ca + H^2O = C^2H^2 + CaO.$$

Théoriquement, 1 kilogramme de carbure dégage 348l,9 d'acétylène à 0° et sous 760 millimètres de pression en se combinant avec 563 grammes d'eau. Le carbure industriel n'est jamais pur, et son rendement en gaz n'est en moyenne que de 300 litres par kilogramme, chiffre couramment admis comme base par le commerce.

Les acides réagissent sur le carbure de calcium, et certains oxydants agissent sur lui avec une grande énergie et une grande facilité.

Le carbure de calcium en fusion opère avec énergie sur les oxydes : lorsque le métal ne peut pas s'allier au carbone, il est simplement mis en liberté, et lorsqu'il peut se combiner, il y a formation de carbure du métal.

M. Bullier et la Société des Carbures métalliques préparent des métaux et des alliages par l'action réductrice du carbure de calcium sur les chlorures, les sulfures métalliques et sur les minerais sulfurés. Cette méthode paraît surtout convenir au cuivre et à ses alliages. C'est ainsi que la maison Siemens et Halske fabrique le cuivre, le nickel, les alliages cuivre-nickel, cuivre-manganèse, cuivre-étain, cuivre-silicium, cuivre-aluminium, le maillechort, le ferro-nickel, etc. Le bronze d'aluminium s'obtient en prenant pour point de départ le chlorure de cuivre et l'alumine et les alliages cuivre-nickel, en partant des mattes grillées et chlorurées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le carbure de calcium a la propriété d'absorber l'azote de l'atmosphère quand il est porté à la température du rouge. On obtient ainsi un nouvel engrais et des cyanures.

Le carbure et ses résidus sont utilisés comme insecticides et anticryptogamiques.

De l'acétylène, on tire un noir de fumée employé dans la fabrication des encres de Chine (1 mètre cube de ce gaz fournit 1 kilogramme de noir).

On a été surpris pendant la guerre de la faible production de carbure en France. Ça été la faute d'avoir fixé le carbure à l'origine à un prix trop bas, puis d'en avoir maintenu ensuite le prix à 40 francs les 100 kilogrammes, alors que l'anthracite revenait dans nos usines des Alpes ou des Pyrénées à 300 francs la tonne. On va maintenant relever ces prix et installer de nouveaux fours dans toutes les usines où on trouvera des kilowatts disponibles.

659. Fabrication du carbure de calcium. — La composition chimique du carbure de calcium est définie par la formule C^2Ca, soit 60,5 de calcium et 27,5 de carbone. La réaction à haute température d'un mélange de chaux vive et de chaux est définie par la formule :

$$\underbrace{CaO}_{87,50} + \underbrace{C^3}_{56,25} = \underbrace{CaC^2}_{100} + \underbrace{CO.}_{43,75}$$

$$143,75 \qquad 143,75$$

Dans l'état actuel de la fabrication du carbure de calcium, on emploie, pour produire 1.000 kilogrammes de carbure, 875 kilogrammes de chaux et $562^{gk},5$ de charbon, la différence représentant l'oxyde de carbone disparu. Le mélange de la chaux et du charbon en morceaux concassés et les produits en présence restent dans les mêmes proportions, un léger excès de chaux favorisant la réaction. La chaux doit contenir le moins possible de silicates et de phosphates.

Les fours utilisés pour la fabrication du carbure de calcium comprennent ceux dans lesquels le produit retiré de l'appareil est à l'état liquide (coulées) et ceux où le carbure est sorti du four à l'état solide, après refroidissement (pains) (1).

La dépense d'électrodes par tonne de carbure varie de 40 à 50 kilogrammes.

D'après M. Keller, la fabrication rationnelle du carbure de calcium, en

(1) Voir le (§ 668) et suivants qui renseignent sur la classification et la nature des fours électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vue de l'obtention calorifique maxima, donnerait lieu à un procédé mixte qui conduirait à produire le carbure partie coulé, partie en pains. Mais l'avantage paraît néanmoins rester au carbure coulé, à condition que sa fabrication soit bien réglée et le produit obtenu avec une faible densité de puissance et dans un four de grande puissance.

Pour augmenter le rendement des usines à carbure, M. Hartenstein a proposé de déverser la matière en fusion, provenant des fours de fabrication ordinaires, au sortir du four, dans des moules revêtus intérieurement de coke finement pulvérisé, de charbon de bois, de noir de fumée, etc., de façon à ce que l'excès de chaux réagisse sur ce revêtement pour former une nouvelle quantité de carbure.

M. Hjort, dans un autre ordre d'idées, propose d'utiliser les gangues provenant de nombreuses opérations métallurgiques et composées principalement de silice et de graphite, en les mélangeant dans le four électrique avec de la chaux, du fer et un alliage de fer et fonte. Il se formerait ainsi du carbure de calcium en même temps que du ferro-silicium. Avant-guerre, le prix de revient de la tonne de carbure, quand on disposait d'une puissance de 5.000 HP au moins, avec des fours de 1.000 HP, était de 135 francs environ (1).

On a envisagé, ces derniers temps, la fabrication du carbure comme annexe des grandes usines métallurgiques où le gaz des hauts fourneaux, utilisé par des moteurs à gaz, permet d'obtenir l'énergie électrique à bon compte.

660. Fours pour la production du carbure de calcium. — Dans ces fours le facteur de puissance peut s'élever à 0,95 et même dépasser cette valeur.

A l'égard des variations périodiques de la résistance intérieure du four, dues aux variations de température et aux phénomènes d'ionisation variables qui accompagnent les variations périodiques du courant, il y a lieu de prendre certaines précautions convenables dans la conduite du four, sinon l'arc peut prendre un caractère d'instabilité et une résistance fortement variable influant le facteur de puissance qui s'en trouve considérablement modifié.

---

(1)

Chaux, 940 kilogrammes à 15 francs la tonne	14f,10
Coke, 650 kilogrammes à 50 francs la tonne	32 »
Électrodes, 40 kilogrammes à 45 francs la tonne	18 »
Main-d'œuvre	7 50
Réparations	3 »
Frais généraux et amortissement	20 »
Énergie électrique	40 »
TOTAL	134f,60

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les fours à arc simple, l'arc est protégé efficacement par la paroi contre les transmissions de la chaleur, et si l'arc n'a pas une très grande longueur, il possède une température à peu près constante et un facteur de puissance très élevé, même si les électrodes sont en charbon homogène. Dans les fours à carbure, le bain liquide et le mélange de chaux, dégageant des substances fortement ionisées, et à cause de leur masse, la température et la résistance de l'arc ne peuvent pas changer appréciablement pendant la période et cos φ peut atteindre des valeurs très élevées. Donc, dans les grands fours industriels à carbure *soigneusement réglés*, les courbes du potentiel et du courant ne doivent guère différer entre elles, et le facteur de puissance s'approcher de l'unité.

Pour les fréquences à employer, il semblerait que leur augmentation a pour corrélation une augmentation de cos φ, mais comme les forces électromotrices de réaction sont proportionnelles à la fréquence et que leur effet augmente encore plus rapidement, il en résulte que, pour chaque four et chaque disposition des circuits, il y a une fréquence pour laquelle cos φ atteint son maximum et le four fonctionne dans des conditions plus économiques.

Les fours électriques employés dans la presque unanimité des cas sont basés sur la formation d'un arc voltaïque entre une ou plusieurs électrodes mobiles et la masse en fusion placée dans la cuve, et plus ou moins conductrice suivant la température à laquelle on la porte. Le dispositif à une seule électrode convient pour des puissances inférieures à 500 HP ; mais si le nombre de chevaux mis en jeu augmente, il vaut mieux adopter plusieurs électrodes, ainsi que le courant à plusieurs phases, en particulier le triphasé.

La cuve est soit dépendante, soit indépendante du circuit. Le dernier système existe par exemple dans le cas du courant monophasé ou continu, à deux électrodes réunies chacune à un pôle, ou à trois électrodes reliées, celle du milieu à l'un des pôles et les deux autres au pôle opposé.

On a prétendu que les fours triphasés de grande puissance devaient avoir une sole électriquement indépendante ; néanmoins, il semble que l'on ne puisse guère émettre d'axiome à ce sujet. On peut très bien, par exemple, adopter une cuve reliée au courant, pourvu qu'elle ne s'échauffe pas trop.

Il faut cependant reconnaître que les fours monophasés à une seule électrode sont plus faciles à conduire et consomment moins d'électrodes s'il s'agit de basses puissances. Mais au-dessus de 500 HP, les fours à électrodes multiples reprennent leurs avantages : ils exigent moins de main-d'œuvre, et rendent possible un fonctionnement continu. Les fours à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trois électrodes permettent d'adopter des dispositifs plus commodes que ceux à deux électrodes en série. C'est pourquoi, dans les dernières unités construites en Norvège et en Autriche, et dont la puissance atteint jusqu'à 4.000 kilowatts, on a adopté le système triphasé avec cuve isolée d'ailleurs.

Nous allons décrire les fours les plus connus à ce jour.

Fours Bullier. — C'est en 1894 que M. Bullier prit son premier brevet pour la production industrielle du carbure de calcium, qui, en très peu de temps, prit un grand essor, tant en France qu'à l'étranger. Dans ce genre de four, l'arc voltaïque plonge au milieu du mélange dont on veut obtenir le carbure (*fig.* 1900).

Les murs A sont formés de briques réfractaires, les soles B sont en métal, en charbon ou toute autre matière conductrice, et l'anode C est constituée par un cylindre de charbon qui plonge dans le mélange des matières à réduire. Une fois l'arc amorcé, le mélange qui l'entoure commence à fondre, et, à mesure que la réaction s'opère, le carbure fondu augmente. Les parois intérieures du four sont constituées par des oxydes mélangés de charbon qui alimentent d'une façon continue la chambre de réaction. Le produit de l'opération est évacué en faisant basculer la porte de fond du four au-dessus d'un wagonnet qui reçoit le carbure avec sa gangue.

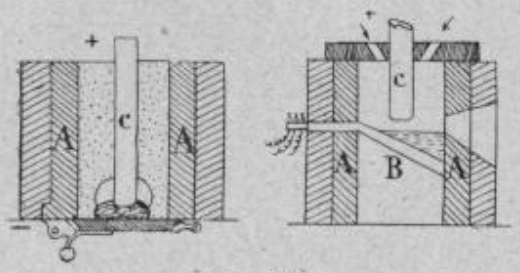


FIG. 1900.

Four de la Société des Carbures métalliques. — Dans ce four, l'arc se forme entre le bain en fusion et l'électrode supérieure mobile, et il y a formation d'un bain liquide de carbure de calcium qui est bon conducteur de l'électricité. Pendant le temps de la coulée, on baisse l'électrode pour rattraper la surface du bain. Le carbure une fois recueilli dans une lingotière est concassé, criblé, divisé en numéros suivant sa grosseur, pesé, puis embarillé.

Le *four de la Compagnie électrothermique Keller, Leleu et C*^{ie} fonctionne par incandescence. Les matières premières mélangées descendent entre l'électrode verticale et la sole portée sur un chariot, permettant une mise rapide en circuit. Le passage du courant échauffe le mélange, et l'on obtient la température nécessaire à la réaction. La coulée du carbure s'effectue par un orifice situé à la partie inférieure de l'enveloppe métallique perforée, qui contient la matière à traiter, au centre de laquelle plonge l'électrode.

Le rendement de ce four est de $4^{kg},5$ de carbure par cheval-jour.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une tonne de carbure demande environ 1.560 kilogrammes de mélange et un four d'une puissance de 300 kilowatts environ fonctionne sous une intensité de 8.000 ampères et une différence de potentiel de 35 volts.

Le *four Siemens et Halske* a son électrode composée d'un cylindre creux de 1 mètre de hauteur et de 50 centimètres de diamètre (*fig.* 1901). La sole du four est percée d'un trou central par lequel s'écoule le carbure formé. La réaction se produit entre la sole en charbon et l'électrode tubulaire. L'oxyde de carbone, avant d'entrer en combustion, s'échappe par l'intérieur de l'électrode pour brûler à l'extrémité d'une conduite faisant suite à l'électrode. Le carbure s'obtient à volonté en pains ou coulées. Dans cet appareil, il n'y a aucune perte de chaleur provenant soit du four, soit de l'électrode, soit du carbure, car on peut recueillir celui-ci à une température aussi basse qu'on le désire.

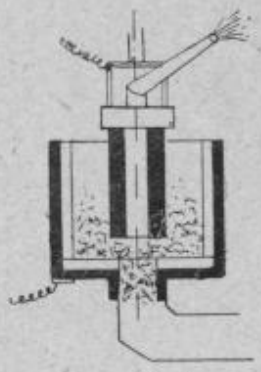


FIG. 1901.

Four Memmo. — Ce four, qui a une forme cylindrique, est construit en briques réfractaires et est du type triphasé.

Les trois charbons sont disposés obliquement et réglés par trois tiges à vis commandées par de petits volants (*fig.* 1902). A l'intérieur du four est un plateau en fonte recouvert d'une série de couches de graphite et qui fonctionne à l'instar d'un piston, par l'intermédiaire d'engrenages droits et d'un volant à main ; après six ou sept heures de marche, le plateau est arrivé à la partie inférieure de sa course, et l'on peut décharger le carbure par l'ouverture ménagée sur la paroi du four, tout en continuant à charger par le haut.

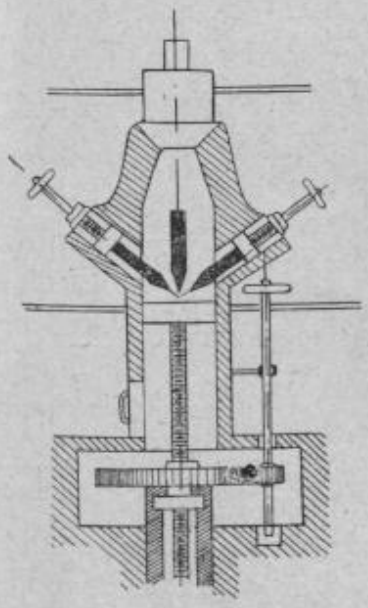


FIG. 1902.

Pour un fonctionnement de quatre heures et une dépense de 220 kilowatts, on obtient 180 kilogrammes de carbure de calcium, soit 1.080 kilogrammes par vingt-quatre heures, ou $4^{kg},88$ par kilowatt et par jour. L'usure des électrodes correspond à 5 ou 6 kilogrammes par opération de quatre heures, soit une dépense moyenne de 30 francs par tonne de carbure produite.

Four de Froges. — Ce four (*fig.* 1903) se compose d'un bloc de graphite, en forme de parallélipipède, recouvert extérieurement d'une chemise en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fonte et percé d'une cavité en communication avec une petite cheminée pour le chargement du four. A la partie inférieure, un trou de coulée est placé en face d'une cuve destinée à recueillir le carbure. La masse du four forme ainsi l'électrode négative, et l'électrode positive est constituée par un bloc de charbon manœuvrable à l'aide d'un volant à main. L'arc s'établit entre l'électrode et la matière dont on charge le creuset ; pour ne pas interrompre le courant, on laisse l'électrode plongée dans le creuset au moment où on débouche le trou de coulée.

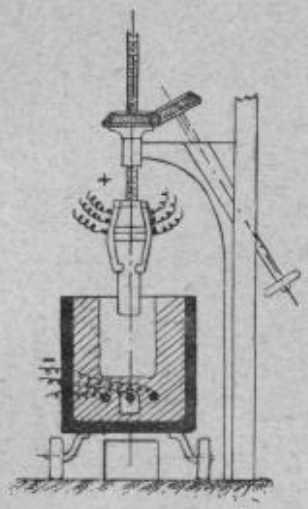


Fig. 1903.

Four Knapp. — Dans ce système de four, les électrodes, de polarités contraires, sont toutes les deux disposées verticalement (*fig.* 1904) et rapprochées l'une de l'autre. Au cours de l'opération, la masse de liquide de calcium réduite remplit un récipient qui se déplace de haut en bas, tandis que la matière à réduire peut tomber entre les électrodes. Dans ces conditions, le carbure possède toujours une teneur et une qualité uniformes.

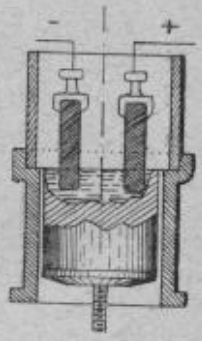


Fig. 1904

Four Ducasse. — Ici le foyer électrique est réparti, au moyen d'arcs tournants, sur toute la face intérieure du four, qui a la forme d'un cylindre. A la partie inférieure se trouve un creuset qui se déplace et qui sert d'électrode. Quatre électrodes verticales, disposées à la partie supérieure, sont reliées à l'aide de câbles conducteurs à un petit moteur électrique spécial, tournant à 3.000 tours par minute. L'arc jaillit à l'intérieur 3.000 fois par minute à chaque électrode supérieure, et l'une des électrodes conserve toujours l'arc avant que celui-ci jaillisse à la suivante.

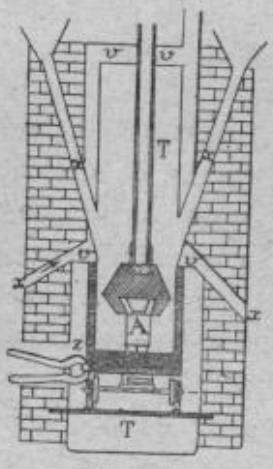


Fig. 1905.

Four de l'Electro Gas Company (Niagara-Falls). — Le creuset de ce four est constitué par une cuve en fer rectangulaire portée par un truc monté sur quatre roues et roulant sur rails ; le fond de cette cuve est recouvert d'une garniture de coke de 10 à 20 centimètres d'épaisseur. Le mélange de coke et de chaux est introduit dans la cuve par charges successives et par des canaux aménagés dans la paroi du four (*fig.* 1905). Dans ces canaux tournent des ailettes, et ils font l'office de distributeurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'électrode est formée de plusieurs blocs agglomérés, à base de coke, et elle peut fournir de deux cents à trois cents heures de travail. On abaisse cette électrode A de manière à former l'arc avec la garniture de charbon du fond de la cuve, dans laquelle on fait tomber du mélange de coke et de chaux. La partie supérieure du four est refroidie par une chambre à air v ; ce dernier entre par les ouvertures x et ressort par une cheminée.

Lorsque le creuset est rempli, l'électrode est complètement soulevée au-dessus de ses bords. On interrompt alors le courant et on retire le wagonnet que l'on remplace aussitôt par un autre. Pour refroidir le contenu de la cuve, il faut six à douze heures. La dépense en énergie électrique peut être estimée à 5 francs par tonne de carbure produite.

La puissance utilisée à la fabrication du carbure de calcium dans les usines de l'Électro Gas Company est de 5.000 HP.

661. Conditions d'exploitation des usines de carbure de calcium. —Le coke utilisé ne doit laisser que très peu de cendres (5 0/0 au maximum) et la chaux ne pas renfermer plus de 5 0/0 d'impuretés ; toute chaux contenant plus de 3 0/0 de magnésie demande à être rejetée. D'autre part, la chaux n'a pas besoin d'être pulvérisée aussi finement que le coke. En outre, l'emploi de la chaux vive est préférable, et le mélange de chaux et de coke doit être très homogène.

Une intensité supérieure à 2.000 ampères n'est pas justifiée, et il n'est pas nécessaire que le voltage dépasse 100 volts, la qualité des carbures étant meilleure avec les bas voltages. On fait généralement fonctionner les fours à arc à une tension de 45 à 50 volts, et les fours à incandescence ne demandent pas plus de 33 à 35 volts.

L'emploi de courants alternatifs de basse fréquence (16 ou 25 périodes par seconde) permet de réduire l'impédance ; quant aux alternateurs, ils doivent être établis avec une grande réaction d'induit (alternateurs homopolaires) et telle que le facteur de puissance ne descende pas au-dessous de 0,9.

On a intérêt à alimenter plusieurs fours en dérivation sur un seul alternateur, afin de régulariser la charge et d'éviter les emballements des turbines. D'une façon générale, en ce qui concerne la conduite des fours, les observations présentées (§ 542) sont applicables aux fours à carbure de calcium.

La production du carbure à 300 litres par HP-24 heures, avec des matières premières pures et de bonnes électrodes, peut varier de $4^{kg},5$ $5^{kg},2$ pour les fours de 500 HP environ à une électrode, de 5 kilogrammes à $5^{kg},5$ pour les fours à deux électrodes en série et les fours biphasés de 500 à 1.000 HP et atteindre et dépasser 6 kilogrammes pour les fours

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 1.000 à 2.500 HP, à trois électrodes montées en mono, bi ou triphasé.

Les fours triphasés l'emportent sur les fours monophasés pour le rendement électrique, qui est très bon.

La forme et la nature des fours, à l'encontre de ce qui se passe pour les ferros, n'ont pas beaucoup d'importance pour le carbure. Il faut les munir de parois épaisses et disposer le trou de coulée au sommet d'une sole de carbure.

Dans certaines usines italiennes puissantes, on coule toutes les quinze minutes, ce qui permet de tenir l'électrode toujours enfouie dans le mélange et diminuer l'usure jusqu'à bien moins de 20 kilogrammes par tonne de carbure. Mais il faut pour cela avoir au moins 15.000 ampères sous chaque électrode, et que celles-ci soient de première qualité.

Il importe, si l'on veut maintenir bon le rendement du carbure, de procéder très rapidement au remplacement des électrodes usées.

Maintenant on se sert de fours de plusieurs milliers de kilowatts; en Norvège on emploie des fours de 8.000 kilow., avec un courant de 100.000 ampères.

662. Fabriques mondiales de carbure de calcium. — On compte actuellement dans le monde près de cent fabriques de carbure de calcium ayant une production totale de 255.000 tonnes. Les forces hydrauliques dont disposent ces usines sont évaluées à 350.000 HP. Le produit de la vente du carbure fabriqué s'élève à 85 millions, et les transactions totales sur ce produit représentent un chiffre d'affaires de 255 millions.

Au point de vue du rendement, on obtient aujourd'hui par kilowatt-an de 1,8 à 2 tonnes de carbure de calcium.

Les principales, usines produisant du carbure sont, en France : les usines d'Épierre, de Saint-Michel de-Maurienne, de Livet, de Bozel, de Saint-Félix, de Saint-Béron, de Serres, de la Bastide-de-Lévis, du Castelet, de Forges, de Bellegarde, de Séchilienne, du Giffre, de Chedde, de Notre-Dame-de-Briançon, de Radia, de la Lauzière, de la Bathie, des Clavaux, de Glandon. d'Arlod, de Crampagna et de la Lonza.

A l'étranger, nous citerons les usines de Flums, de la Volta, de Gampel, de Vernier, de Thusis, de Gartnellen, de Vernaraz, de Vallorbe, de Neuhausen, de Chèvres, de Viéze, de Chavornay, de Martigny, de Hagneck (Suisse), de Collestatte et Papigno (1), de Foligno, de Salesano, de Pont-

(1) A l'usine de Collestatte, la hauteur de chute est de 135 mètres et le débit de la conduite forcée, 6 mètres cubes ; à l'usine de Papigno, la hauteur de chute est de 180 mètres et le débit du canal d'amenée atteindra, après de nouveaux travaux, 25 mètres cubes à la seconde, répartis dans deux conduites en acier, dont une seule est en service. Actuellement la puissance globale de ces deux usines est de 30.000 HP. Ces deux établissements produisent annuellement 24.000 tonnes de carbure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Saint-Martin, de la Valnerina, d'Ascoli, de Saint-Marcel, de Darfo, de Saint-Marcel-d'Aoste (Italie), de Trallhomstan, de Hassburg, d'Alby et de Mansboé, de Kragero, d'Orebio, de Borregaard, d'Hasflund, de Méraker, d'Odda, de Notodden (Suède et Norvège), de Rheinfelden, de Lechbruck, de Freyung, de Grube Ilte (Allemagne), de Niagara-Falls, de Spray, de Sault-Sainte-Marie, de Schawnigan-Falls, d'Ottava (Amérique), de Jajce, de Sebenico, de Landeck, de Lend-Gastein (Autriche), de Berga, d'Esparraguera, de San-Andres de la Barca, de Subira, de Teruel, de Cocurbion (Espagne), de Soki (Japon).

L'usine de Darfo, dont nous avons donné la description, peut être citée comme une installation modèle de carbure de calcium. Le calcaire à 90 0/0 provient de carrières situées à une dizaine de kilomètres en amont de la vallée. Il est amené à l'usine par un petit chemin de fer. Les deux fours à chaux installés derrière la salle des fours à carbure sont à charge continue : ils sont munis chacun d'un ventilateur et de tuyères et peuvent produire 20 tonnes par jour individuellement.

Le calcaire et le combustible sont transportés jusqu'au pied des fours à chaux et élevés jusqu'à la plate-forme supérieure au moyen de monte-charges électriques.

La chaux, dès sa sortie des fours, est déposée dans deux silos couverts à côté des silos à charbon pour la fabrication du carbure. Le coke, allemand généralement, est déchargé directement des wagons du chemin de fer dans le silo traversé par la voie ferrée.

Les matières premières, chaux et charbon, après avoir été concassées et réduites à la grosseur voulue, sont élevées, pesées, dosées et mélangées automatiquement au moyen d'appareils simples, robustes autant qu'ingénieux. Le mélange se dépose dans une grande trémie, d'où il est élevé mécaniquement jusqu'au transporteur qui le distribue automatiquement à tous les fours électriques.

La salle des fours est un grand hall de 90 mètres de long sur 15 mètres de haut, qui contient dix fours doubles Heller de 1.240 HP, dont deux de réserve. Dans une salle parallèle se trouvent les transformateurs statiques.

Le mélange de chaux et de charbon arrive à 2 mètres au-dessus des fours dans lesquels il se déverse automatiquement.

Les fours fermés et continus sont à double capacité ayant chacune leur électrode. Ce sont de robustes appareils montés sur chariots mobiles dont le fonctionnement exige le minimum de main-d'œuvre.

Le carbure de calcium produit passe à des concassages après refroidissement. De la trémie des concasseurs il est élevé par des norias sur des cribles où il se classe automatiquement pour retomber, suivant les grosseurs, dans une série de couloirs fermés par une vanne et d'où il est direc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tement chargé dans les petits bidons carrés réglementaires de 25 kilogrammes.

L'usine fabrique elle-même les bidons à carbure. M. Keller, à qui on doit l'étude de cette belle installation, s'est inspiré, en grande partie, des conditions d'établissement de l'usine de Méran (Tyrol), qui était une des usines de carbure de calcium les plus connues et des mieux aménagées.

Usine de Méran (Tyrol) (chute, 90 mètres). — L'usine de Méran est située sur le torrent de l'Etsche, dont le débit à Méran est de 7 mètres cubes à l'étiage et le débit moyen de 10 à 12 mètres cubes. Le barrage de retenue est établi à 3 kilomètres environ de la station génératrice d'énergie ; son développement lui permet de débiter en déversoir le volume des plus hautes crues avec une lame d'eau de $1^{m},60$. L'eau dérivée pénètre dans une première chambre de décantation, à travers une grille de 30 mètres de longueur. La seconde chambre de décantation, qui fait suite à la grille, a une longueur de 20 mètres et communique avec le canal d'amenée par quatre vannes d'alimentation ; elle est munie d'une vanne de chasse par laquelle se fait l'évacuation des graviers. Le canal d'amenée est à ciel ouvert sur 1 kilomètre, en tunnel pendant 2.800 mètres, et se termine par deux conduites métalliques de 2 mètres de diamètre qui aboutissent à l'usine. Avant l'entrée du tunnel est un déversoir régulateur de 20 mètres de développement, à l'effet de rejeter dans le torrent l'excès momentané du débit, lors de l'arrêt d'une ou plusieurs unités de la station génératrice. A sa partie aval, le tunnel est clos par une chambre d'eau très élargie, afin d'atténuer les tourbillonnements à l'entrée des conduites. Une vanne de décharge placée dans la paroi de la chambre d'eau sert à régler le débit d'après les nécessités du service et complète l'action régulatrice du déversoir placé en amont du tunnel.

Les turbines, du système Ganz, à axe horizontal, sont munies de régulateurs automatiques combinant le principe de l'inversion de l'écoulement avec celui de la fermeture simultanée des orifices d'admission. Les alternateurs sont du type triphasé, accouplés directement aux turbines, tournant à 320 tours par minute et de 1.200 HP chacun. Ils fonctionnent à une tension qui peut, à volonté, être réglée à 10.000 ou 3.650 volts. La ligne primaire dessert à son arrivée 2 groupes de 3 transformateurs, de la puissance respective de 260 kilowatts, pour l'alimentation des fours électriques ; un groupe de 3 transformateurs triphasés de 20 kilowatts chacun donne le courant, à 310 volts, aux moteurs qui actionnent le matériel mécanique. Les secondaires des transformateurs de 260 kilowatts fournissent chacun 2.500 ampères sous 33 volts ; les bobines de même phase sont groupées en parallèle avec retour.

Le broyage, le dosage, le transport des matières, les ascenseurs, les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pertes dans la canalisation absorbaient une dépense de 5 francs par tonne de carbure ; la main-d'œuvre était de 18 francs (3 fr. 50 à 4 francs par ouvrier et par jour) ; l'amortissement du matériel, 22 francs ; les frais généraux, 25 francs ; les transports, 3 francs ; l'entretien du matériel, 7 fr. 50 ; enfin les matières premières (950 kilogrammes de chaux à 20 francs la tonne = 19 francs + 650 kilogrammes de charbon à 40 francs la tonne = 26 francs) donnaient 45 francs, soit en tout 187 fr. 80 par tonne.

L'organisation de l'*usine de Livel* est remarquablement conçue. La chaux et le charbon sont amenés par voie ferrée dans l'usine même, et déchargés sur des couloirs à grande pente, qui les entraînent dans des broyeurs. Les matières concassées sont montées automatiquement dans des trémies, d'où elles s'écoulent dans deux pesons qui s'emplissent spontanément des quantités convenables de chaux et de charbon. Les pesons évacuent simultanément leurs charges sur des tables tournantes, qui rejettent, en un même temps, vers une arrivée commune, les pesées qui viennent d'être faites. Le mélange homogène, ainsi préparé, est enlevé automatiquement jusqu'aux trémies de chargement des wagonnets qu'un plan incliné conduit aux bouches mêmes des fours électriques. Un seul homme suffit à surveiller cette préparation mécanique qui peut produire, en douze heures, 30 tonnes de mélange.

L'usine de Livet comprend 3 fours à carbure, dont chacun absorbe 2.000 à 2.500 HP ; le nombre des fours en activité varie de 2 à 3, assurant une production journalière de 12 à 18 tonnes.

Les blocs de coulée sont transportés dans un hall, où un concasseur débite le carbure en morceaux ; ceux-ci sont élevés automatiquement dans 2 trommels classeurs qui les dirigent dans 8 compartiments, correspondant aux 8 calibres commerciaux ; la poussière résultant du concassage est dirigée dans un neuvième compartiment, d'où elle est renvoyée au four pour être refondue.

On pouvait admettre avant-guerre que le prix de revient de la tonne de carbure variait selon les conditions de l'installation et de la fabrication, de 110 à 140 et même 160 francs.

L'*usine de Flums* (Suisse), qui a une puissance de 2.400 HP, comporte 18 fours, dont 12 toujours en activité. L'intensité du courant est de 2.200 à 2.500 ampères, et l'usure des électrodes, de 3 kilogrammes par tonne de carbure.

L'*usine de la Société piémontaise de Saint-Marcel d'Aoste* (Italie) (2.500 HP) possède des fours du type continu et du type intermittent, du système Memmo, alimentés par du courant triphasé.

Aux *Niagara-Falls*, la puissance affectée à la production du carbure de calcium est de 6.000 HP. Chaque four absorbe un courant de 3.500 am-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pères sous 110 volts et produit environ 670 kilogrammes de carbure par jour.

La puissance de l'*usine de Bellegarde* (Ain) est de 2.400 HP, et celle des fours varie de 300 à 1.000 HP.

Le carbure de l'*usine de Séchilienne* (2.000 HP) (Isère) est principalement utilisé pour le traitement de la vigne (*oïdium*).

L'usine de *Notre-Dame-de-Briançon* (Savoie) et celle de *Radia* (Savoie) ont ensemble une puissance de près de 11.000 HP et appartiennent à la Société des carbures métalliques, propriétaires des brevets Bullier.

L'*usine de Notre-Dame-de-Briançon* est alimentée par la rivière l'Eau-Rousse, affluent de l'Isère, qui prend naissance au pied de la montagne de Célier, à l'altitude de 2.000 mètres. La chute utilisée est de 230 mètres et le débit de 4 mètres cubes à la seconde. Les turbines sont du type centrifuge (admission à l'intérieur de la roue), à axe horizontal, et formées d'une seule roue en fonte, calées en porte-à-faux à l'extrémité des arbres des alternateurs. Ceux-ci, d'une puissance de 700 HP chacun, tournent à 600 tours et sont à courant biphasé et doubles ; ils peuvent alimenter sur chaque phase deux circuits que l'on peut grouper en série ou en parallèle.

L'usine comporte 5 groupes électrogènes de 700 HP chacun ; l'excitation est faite par une seule excitatrice. Une batterie d'accumulateurs sert à assurer l'excitation en cas d'accident.

L'*usine de Radia*, qui est située à 12^{km},5 de l'usine de Notre-Dame-de-Briançon, utilise la force motrice du torrent de Belleville, qui prend naissance dans les glaciers de Péclet, à 3.000 mètres d'altitude.

La hauteur de chute est de 360 mètres. Les travaux de captation comprennent : un tunnel de 3^{km},6 de longueur, continué par un canal à ciel ouvert de 1 kilomètre et dont la section est de 4 mètres carrés ; un déversoir, auquel aboutit le tunnel ; un second tunnel qui amène l'eau dans une chambre de mise en charge à laquelle aboutit un tuyau en ciment armé relié à une tour d'eau faisant les fonctions d'appareil de réglage, de débit et de soupape de sûreté du tuyau en ciment armé. De la tour partent deux conduites métalliques de 0^{m},70 de diamètre et de 700 mètres de longueur, dont l'épaisseur des tubes à la partie basse est de 20 millimètres et de 6 millimètres à la partie haute. Ces conduites sont branchées sur un collecteur commun aux turbines de l'usine.

Les cinq turbines, dont trois de 2.200 HP chacune et deux de 150 HP sont du type centrifuge, à axe horizontal et à deux distributeurs placés à l'intérieur de la roue. Chacun des récepteurs est muni d'une vanne à tiroir étanche permettant d'isoler la machine.

L'*usine de la Lauzière* (Savoie), établie sur l'Arc, qui fournit en cet endroit une chute de 574 mètres, comprend principalement trois groupes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrogènes fournissant du courant biphasé alimentant les fours. Ils représentent ensemble une puissance de 1.800 HP. Une turbine spéciale met en mouvement les appareils de broyage et de concassage des matières premières.

L'*usine du Caslelet* (Ariège) a une puissance de 3.000 HP sous 50 mètres de chute. Les turbines, construites par la maison Bonnet, de Toulouse, sont du genre centripète, aspirantes, doubles et de 760 HP chacune. Les alternateurs biphasés, qui proviennent du Creusot, fournissent un courant de 3.000 ampères. Ces machines sont à deux induits biphasés pouvant donner quatre circuits, qu'il est possible de grouper deux par deux en parallèle ou en tension avec des voltages variables de 40,80, 120 ou 160 volts. Les fours sont pareils à ceux utilisés à l'usine de Notre-Dame-de-Briançon. Les électrodes sont suspendues au-dessus des fours par des mâchoires métalliques et reliées à un système de moteurs électriques qui les élèvent et les abaissent à volonté.

L'*usine des Clavaux* (5.000 HP) atteint une production de 4.000 tonnes.

L'installation de Stalden, dans le Haut-Valais, sur la Viège de Saas et la Viège de Saint-Nicolas (Suisse) utilise une puissance de 20.000 HP.

Les usines de Papigno et de Collestatte (Italie), citées plus haut, ont ensemble une puissance de 30.000 HP et produisent 24.000 tonnes de carbure ; l'usine de Darfo jete sur le marché un stock très important.

Des installations d'usines à carbure conséquentes ont été faites en Russie, au Chili, dans l'Amérique centrale, etc.

Il semble acquis que la fabrication du carbure de calcium ne peut être rémunératrice pour une usine uniquement affectée à cet usage, que si elle est montée sur le pied d'au moins 4.000 à 5.000 HP. Ainsi l'insuccès de l'usine de Méran, décrite plus haut, provient de ce qu'elle ne disposait que d'une puissance de 2.000 HP. L'usine de Terni (appartenant à la Société italienne pour la fabrication du carbure de calcium), qui utilise une puissance de 7.000 HP, a pu abaisser le prix de revient de la tonne de carbure à 117 francs avant-guerre, alors que l'on avait considéré jusqu'à cette époque le prix de 134 francs comme une limite infranchissable.

D'autre part, le développement des industries de l'acétylène et de la cyanamide réclame une production abondante et à bon marché de carbure de calcium. On a d'ailleurs songé pour la cyanamide à utiliser les déchets qui résultent des opérations de granulage et de tamisage du carbure commercial, que l'on porte au four pour être ensuite employés à la fabrication de la cyanamide. D'un autre côté, les usines hydroélectriques ayant des excédents de force pourraient fabriquer du carbure à bon marché, en ne considérant cette opération que comme une industrie annexe.

La production du carbure de calcium dans les diverses usines du monde entier a atteint, en 1910, 362.000 tonnes environ, d'une valeur approxima-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tive de 85 millions. La France entrait dans ce chiffre pour 30.000 tonnes (dont 4.000 tonnes seulement exportées) ; la Suisse, pour 35.000 tonnes (dont 26.000 tonnes exportées) ; l'Allemagne, pour 9.000 tonnes (elle importait 25.000 tonnes) ; l'Italie, pour 32.000 tonnes (dont 6.000 tonnes exportées) ; l'Autriche, pour 30.000 tonnes (dont 4.000 tonnes exportées) ; la Suède et la Norvège, pour 53.000 tonnes (dont la moitié est vendue à l'exportation en Allemagne, en Angleterre et dans l'Amérique du Sud) ; enfin l'Espagne, pour 18.000 tonnes, presque entièrement consommées dans le pays.

L'Allemagne, l'Angleterre, la Belgique, la Hollande et la Suisse, pays importateurs, ne sont soumis à aucun droit de douane pour le carbure de calcium.

Les autres principaux pays ont imposé des droits d'entrée établis soit sur le poids, soit sur la valeur du produit. La France, était la nation la moins protégée, car elle n'était garantie que par un droit *ad valorem* de 5 0/0, bien inférieur à ceux des autres pays.

Le prix de vente du carbure, en France, variait en temps normal de 35 à 40 francs les 100 kilogrammes, selon les régions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXXIII

ÉLECTROMÉTALLURGIE

CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

663. Généralités. — L'électricité, obtenue au moyen de la houille blanche et appliquée à l'électrométallurgie, permet de réaliser une économie énorme en combustible et en main-d'œuvre sur les procédés ordinaires ; de plus, il est possible de se rapprocher autant qu'on le veut des points d'extraction du minerai, puisque l'on n'a pas à se préoccuper de l'approvisionnement du charbon, en tant qu'agent de chauffage des fours.

Dans la métallurgie ordinaire, à de rares exceptions près, les opérations métallurgiques consistent à amener le minerai à l'état d'oxyde, à s'emparer par un réducteur de l'oxygène combiné au métal, puis à procéder par des fusions multiples à l'élimination des diverses impuretés contenues dans la masse métallique. Aussi cette méthode oblige-t-elle à installer des fours très souvent accompagnés d'ateliers de préparation mécanique, constituant ainsi de véritables usines dont l'emplacement n'est pas toujours facile à trouver, surtout quand on a en vue le traitement de minerais pauvres, compliquant la question des transports au point de vue de l'économie générale de l'installation.

En électrométallurgie, l'électricité intervient comme agent économique offrant le moyen d'obtenir le calorique nécessaire aux réactions usuelles à meilleur marché qu'avec l'emploi de la houille noire (1), grâce à une force hydraulique convenablement captée, ou comme agent opérant la décomposition des matières composant le minerai. Dans le premier cas, on est en présence d'une méthode que l'on désigne sous le nom d'électrothermie et, dans le second cas, il y a lieu de distinguer entre l'électrolyse à voie ignée, où l'on soumet à l'action galvanique le corps fondu, et l'électrolyse par voie humide, auquel cas on expose le corps, à l'état de dissolution, dans un liquide approprié à l'action du courant électrique.

---

(1) Au VI[e] Congrès international de chimie appliquée tenu à Milan, M. Stassano a montré qu'il faut 4,5 HP électriques pour produire le même travail théorique qu'avec 1 kilogramme de charbon, et il a établi qu'avec des forces motrices produisant le cheval-an à 40 francs, on peut travailler dans les mêmes conditions économiques qu'avec du charbon à 21 francs la tonne au maximum.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'électrolyse par voie de fusion offre sur l'électrolyse par voie humide les avantages suivants : densité de courant à la cathode plus élevée (elle peut atteindre des centaines de fois celle utilisée dans l'électrolyse des dissolutions salines et métalliques) et force électromotrice minima plus petite ; de plus, le four électrique par lui-même présente un intérêt de la plus grande importance, que la haute valeur du rendement d'utilisation et la précision des manœuvres justifient pleinement.

664. Classification et nature des fours électriques. — La conception du four électrique, qui est due à Pichon et Johnson, date de l'année 1853 ; mais ce n'est qu'en 1879 qu'apparut le véritable premier four, créé par Siemens. L'année d'après, Borchers invente le four à résistance et, en même temps, Louis Clerc fait surgir le four à électrodes ; puis, en 1885, de Ferranti trouve le four à induction. En 1892, Wilson et Moissan entreprennent des recherches importantes au moyen du four électrique, et Bullier, en 1894, prépare le carbure de calcium, premier produit industriel fabriqué au four électrique. L'année 1897 signale les brevets Gin et Leleux pour la production d'un carbure de fer et, l'année suivante, Stassano revendique l'utilisation de l'arc électrique pour la réduction des oxydes métalliques, créant ainsi l'électrosidérurgie ; puis successivement, de l'année 1899 à nos jours, on vit éclore les fours Keeler, Héroult, Kjellin, Harmet, Girod, Chapelet, Schneider et Cie, Roechling et Rodauhausen, Nathasius-Frick, Hiorth, etc.

On classe actuellement les fours en quatre catégories : les fours à arc, les fours à résistance, les fours à incandescence ou à résistance superficielle et les fours à induction.

Quelques auteurs classent les fours seulement en deux catégories : les fours à électrodes et les fours à induction.

Dans les fours de la première catégorie, il faut distinguer les fours à un seul arc et une seule électrode mobile, les fours à un seul arc et à deux électrodes mobiles et les fours à arcs multiples et à plusieurs électrodes. Les fours sont dits aussi à action continue ou à action intermittente.

Les fours à deux arcs en série utilisent 50 volts pour chaque arc (arc de 40 millimètres de hauteur environ). Les fours à un arc marchent pour la plupart à 50 volts.

Sous un autre rapport, on peut dire que le four électrique se rattache à deux types : le four à sole conductrice, ayant une ou plusieurs électrodes montées en quantité, et celui où la sole n'est pas ou partiellement utilisée pour la conduite du courant ; alors ce dernier est amené par deux électrodes ou par plusieurs paires d'électrodes de polarités différentes. Le premier genre de four est adopté généralement lorsqu'il est possible d'employer une sole composée de graphite aggloméré, et le second dans presque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tous les cas où il s'agit, dans le but d'éviter la présence du carbone dans le produit à obtenir, de constituer une sole neutre ou même affinante.

De nos jours, les fours à soles conductrices non carburantes se divisent en sole à conductibilité simple et en sole à conductibilité mixte.

Pour les soles de la première catégorie, elles sont obtenues soit par un fond de four entièrement métallique, ou par un ou plusieurs pôles métalliques noyés dans une maçonnerie non conductrice, ou enfin au moyen d'un pisé-conducteur.

Passons maintenant à la description des différents types de fours.

a) *Four à un seul arc et à une seule électrode mobile.* — Dans ce genre de four, l'arc s'établit entre la partie inférieure de l'appareil ou sole (électrode négative) et l'électrode positive, généralement disposée verticalement. Quand la matière à traiter entre en fusion, elle sert elle-même d'électrode négative. L'arc est réglé au moyen de dispositifs analogues à ceux employés dans les lampes électriques à arc. Les électrodes ne pénètrent pas dans la masse en fusion ; elles laissent un espace libre au-dessous d'elles. Le chauffage a lieu par la chaleur directe de l'arc et par la réverbération obtenue avec des voûtes recouvrant le foyer. Ces fours conviennent surtout pour l'affinage des bains métalliques (fours Moissan, Bullier, Gin et Leleux, Siemens et Halske, Héroult ou de Froges, Schuckert, etc.).

Dans tous les cas où la sole en charbon n'est pas un inconvénient, le four monophasé, à une seule électrode, est susceptible de fournir une bonne solution.

Si l'on compare non la puissance globale des fours, mais la puissance par électrode, le rendement par unité de puissance peut être dans un four à une seule électrode, du même ordre que le four triphasé d'une puissance totale trois fois plus élevée. Il en est de même du décalage du courant.

La conduite d'un four à une seule électrode est plus facile que celle d'un four à électrodes multiples et, toutes choses égales d'ailleurs, la consommation d'électrodes y est moindre, à cause de l'absence du rayonnement réciproque des foyers voisins.

Mais ce type est limité comme capacité, ce qui est un inconvénient aujourd'hui que la tendance se porte vers les fours à grande capacité.

Les fours monophasés à deux électrodes en série s'appliquent fort bien à la majorité des cas que l'on rencontre dans la pratique.

b) *Four à un seul arc et deux électrodes mobiles.* — Les deux électrodes, le plus souvent disposées horizontales, se déplacent au-dessus de la matière à traiter. Parfois c'est celle-ci qui est animée d'un mouvement vertical. Un des fours les plus connus, celui de Moissan, fait partie de cette catégorie.

c) *Four à arcs mulliples.* — L'avantage de ce genre de four, sur celui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à un seul arc, est qu'il se prête à une répartition plus complète et plus uniforme de l'action calorifique. Mais, d'une façon générale, tous les fours à arc présentent l'inconvénient de produire une température non uniforme, car celle-ci varie avec l'intensité du courant et la longueur de l'arc (fours Keller et Leleux, Nicolaï, Memmo, Bertolus, etc.).

Les fours à arc sont très utilisés. Leur température est à 3.500° et leur marche est assez irrégulière au commencement de leur mise en marche ; au bout de quelque temps, le fonctionnement se régularise, et de bruissant qu'il était au début, l'arc devient silencieux. A ce moment, il n'y a pour ainsi dire plus d'arc, car la matière à traiter, plus ou moins conductrice, le devient par la chaleur dégagée ; des particules de métal aident cette conductibilité, et le four fonctionne comme four à résistance.

Pour obtenir des rendements élevés, 65 à 70 0/0 de l'énergie absorbée, il faut incurver l'arc au moyen d'électro-aimants, et le forcer ainsi à balayer la sole des fours dans lesquels sont placés les métaux ou les oxydes.

d) *Four à résistance.* — Dans ces appareils, les électrodes plongent dans les matières en voie de fusion, ces dernières constituant un conducteur résistant réunissant les électrodes à la sole. Le fonctionnement élémentaire du foyer d'un four à résistance, d'après M. Keller, est comparable à celui d'un *haut fourneau*. La jonction de la partie inférieure de l'électrode avec la masse interposée entre les deux pôles du four est la partie la plus chaude, et cette zone de fusion est comparable avec la région des tuyères. Le métal réduit passe en minces filets au travers de toute la masse en fusion et se réunit dans la partie inférieure du four qui constitue le creuset, où il se tient chaud. La région du four située au-dessus de la partie inférieure de l'électrode représente les étalages et doit être construite sur les mêmes principes.

Avec ces fours, il est plus facile de régler la température suivant les besoins de l'opération, car la quantité de chaleur croît proportionnellement à la résistance du circuit et au temps pendant lequel celui-ci agit. Ils fonctionnent généralement à une tension de 20 à 25 volts. On obtient une température de 2.200° avec un rendement de 35 0/0 de l'énergie absorbée (fours Gin et Leleux, Acheson, Minet, etc.).

La quantité de chaleur est fournie par la formule :

$$q = 0{,}24\,\mathrm{R}\,\mathrm{I}^2 t \qquad \text{ou} \qquad q = 0{,}24\,\frac{\mathrm{E}^2 t}{\mathrm{R}}.$$

e) *Four à incandescence ou à résistance superficielle.* — Ici il faut, pour que le courant puisse s'établir, que les électrodes soient réunies par une substance conductrice telle qu'une couche de morceaux de charbon, par exemple ; ceux-ci sont portés à une vive incandescence et forment le lit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de fusion sur lequel sont portées les matières à traiter. Ces dernières, une fois fondues, deviennent conductrices, et l'opération se continue par leur intermédiaire. Dans le four précédent, le courant traverse la matière à traiter seulement verticalement ; ici il la traverse partie verticalement et partie en largeur.

Lorsque la masse à chauffer entoure les électrodes, le four est dit à *résistance centrale*. Quand l'un des pôles est constitué par le four lui-même (ou par la sole), cette dernière étant utilisée comme cathode, le four est dit : *four-cathode*.

Ce genre de four peut être appliqué à la réduction ou à l'affinage d'un métal. Dans le premier cas, les électrodes ne plongent pas dans les matières à transformer, elles restent au-dessus ou touchent simplement la masse liquide ; dans le second cas, le four doit fonctionner plein de matières. Ces appareils sont économiques d'exploitation ; ils demandent des courants moins intenses que ceux à arc (four Cowles).

Les fours à électrodes comportent une bonne utilisation du courant, un chauffage simultané du métal et du laitier — d'où épuration possible — le transformateur étant supprimé, les fours s'allègent d'autant ; leur mise en route est facile. Mais le coût en est élevé, et l'entretien des électrodes est assez dispendieux. On n'y constate qu'une faible circulation du métal, car le chauffage se fait surtout à la surface. De plus, il y a beaucoup de chaleur perdue par la volatilisation du laitier chauffé par l'arc. Enfin, il exige l'établissement de grosses canalisations dans le voisinage du four.

f) *Four à induction*. — Un tel système de four est composé, en principe, d'un creuset de forme circulaire, dont la matière qu'il renferme constitue le circuit secondaire d'un transformateur statique (le secondaire n'est ainsi composé que d'une seule spire), et dont le circuit primaire est formé par une bobine comme à l'ordinaire.

La scorie qui surnage n'est chauffée que par rayonnement et conductibilité calorifique du métal. Le grave inconvénient de ce type de four, appliqué à l'électrosidérurgie, est de donner un métal à une température très supérieure à son point de solidification, sous un laitier insuffisamment chaud. Le rendement électrique est moindre à cause du décalage du courant (φ augmente, et par suite, cos φ diminue, et *ei* cos φ également). Si on veut augmenter cos φ, on est obligé de prendre une basse fréquence, ce qui implique des masses considérables de tôles minces pour le circuit primaire, procédé coûteux et encombrant.

Enfin, les réparations exigent presque toujours le démontage de l'inducteur primaire ; celui-ci doit être isolé, refroidi et protégé en marche normale.

Comme avantage qu'offre ce four, il faut signaler la suppression des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrodes, le réglage facile du courant, et l'éloignement possible des génératrices par l'emploi de courants à haute tension dans le primaire.

Les fours à induction se divisent en deux groupes : fours simples dans lesquels la fusion dans le secondaire est déterminée seulement par induction, fours combinés dans lesquels l'échauffement se fait par résistance, ou bien dans lesquels le secondaire n'est constitué qu'en partie par le conducteur fluide.

Dans les fours simples, le métal et les scories sont couplés en parallèle dans le secondaire (fours Colby, Kjellin, Hiorth), ou la bobine primaire est en forme de disque (fours Ferranti, de Frick, Schneider, Gin, Vallin).

Les fours de la seconde catégorie sont caractérisés par ceux de Roechling-Rodenhauser et Hiorth.

Les fours à induction se prêtent à toutes les opérations sidérurgiques, depuis l'épuration des aciers Siemens-Martin, Bessemer ou Thomas, jusqu'à l'extraction.

Le réglage de la température du bain, nécessaire pour le procédé métallurgique, s'obtient en augmentant ou en diminuant la tension aux bornes de la bobine primaire du transformateur. Dans les petits types de fours, les bobines primaires sont connectées soit en étoile, soit en triangle, au moyen d'un simple transformateur, tandis que, dans les fours à forte charge, le réglage de la tension s'opère par un diviseur réglable (autotransformateur) (four Kjellin, Gin, Girard et Street, Schneider et C^{ie}, Roechling-Rodenhauser, etc.).

Nous donnons ci-après le calcul d'un four à induction, d'après une étude de M. Ch. Louis.

Soient :

D, le diamètre moyen du creuset annulaire ;

C, la section du métal réparti dans le creuset ;

P, la capacité totale du four en tonnes ;

d, la densité du métal (7,5 pour l'acier liquide).

En prenant $C = \frac{D}{10}$, on a :

$$D = \sqrt{\frac{100P}{\pi d}}.$$

Pour le cas d'un four à acier, en exprimant D en mètres et P en tonnes, la formule précédente devient :

$$D = 1{,}62 \sqrt[3]{P}.$$

Pour déterminer la puissance, appelons :

l, le nombre d'heures séparant deux coulées successives ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

P′, le poids de chaque coulée en tonnes ;

K, le nombre de kilowatts-heures nécessaires à la production d'une tonne de métal ;

W, la puissance moyenne cherchée du four en kilowatts.

On a la relation :

$$W = \frac{P'K}{t}.$$

On peut prendre pour valeur moyenne de K, dans le cas de la fabrication de l'acier, 1.000 kilowatts-heures par tonne et la formule devient alors :

$$W = \frac{P' \times 100}{t}.$$

Si e_2 est la force électromotrice induite dans le circuit secondaire et R_2 la résistance de ce circuit, la puissance développée dans le secondaire est égale à $\frac{e^2_2}{R_2}$. Connaissant W et en calculant la résistance R_2 du circuit secondaire, pour une charge normale $\left(R = \frac{al}{s} \right)$, on en déduit la valeur de la force électromotrice E_2, en volts efficaces induite, dans le circuit secondaire, laquelle est donnée par la formule :

$$E_2 = \sqrt{R_2 W}.$$

Appelons :

S, la section utile du noyau feuilleté en décimètres carrés ;

$\sim$, la fréquence adoptée en périodes par seconde ;

$\mathfrak{B}$, l'induction maxima admise en gauss ;

Cos φ, le facteur de puissance $= 0,7$.

La section utile du noyau est fournie par la formule :

$$S = \frac{25 \times 10.000}{4,1 \times 0,7} \times \frac{E_2}{\sim \mathfrak{B}} = 325.000 \times \frac{E_2}{\sim \mathfrak{B}}.$$

Le nombre n de spires primaires se détermine par la relation :

$$n = \frac{E_1 \cos \varphi}{E_2}.$$

Pour diminuer l'importance de la self-induction, d'autant plus forte que le tonnage du four est plus élevé et les dimensions du canal plus considérables, on est conduit à employer des alternateurs à très faible fréquence, 5 à 15 périodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

665. Dispositions particulières de certains fours. — Siemens, qui a fait breveter son premier four en 1879, signalait déjà à ce moment une disposition assez utilisée de nos jours, qui consiste à établir une circulation d eau dans les électrodes, ce qui les a fait dénommer *pôles d'eau* (four Wilson).

Le four Keller, à *capacités mulliples*, constitue un perfectionnement intéressant. Un creuset central commun est alimenté par les matières fondues provenant des réactions qui s'effectuent dans des cavités réunies autour du creuset. Lorsque le métal est amené à la composition voulue dans le creuset, il est évacué par coulées.

Le four Fauchon-Villeplée, qui est un four à induction, présente cette particularité que la matière à traiter, au lieu d'être placée dans une rigole circulaire entourant le noyau du transformateur, est logée dans une cavité réfractaire soumise aux variations du flux du transformateur, sans qu'elle soit traversée par le noyau de celui-ci. D'après l'inventeur, ce four présente les avantages suivants : simplicité et robustesse, facilité de manœuvre, diminution des pertes calorifiques par rayonnement, ainsi que des frais d'entretien. Son fonctionnement demande quelques explications.

Si l'on envoie du courant électrique dans les bobines B (*fig.* 1906), il se produit des lignes de force qui, partant par exemple du pôle A, suivent la cuirasse lamellée C du transformateur et viennent rejoindre par le pôle D, à travers le creuset, l'autre pôle A de l'armature. Avec du courant alternatif, il se produit un flux variable allant de A à D, et réciproquement à travers la cavité de la masse réfractaire E. Si l'on jette dans cette cavité des matériaux conducteurs, tels que fer, fonte, acier, mattes, cuivre, etc., liquides chauds ou froids, il se produit dans leur masse, sous l'influence des variations de flux, des courants induits qui les portent à la température désirée.

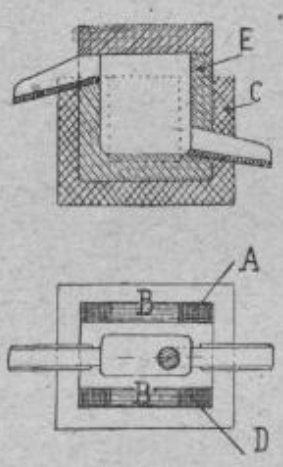


FIG. 1906.

Pour que le rendement électrique de ces fours se rapproche autant que possible de celui des fours annulaires, il faut donner aux pôles une surface assez considérable et réduire au minimum l'épaisseur des parois de la masse réfractaire.

Dans le four *chauffe-creuset* de MM. Girard et Street, le champ magnétique est produit par deux solénoïdes disposés extérieurement à l'enveloppe du four ou par l'action d'un champ tournant obtenu avec des courants diphasés.

L'arc tourne avec une vitesse plus ou moins grande sur la surface du creuset, d'une part, et sur la surface de l'autre électrode, d'autre part,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de façon à utiliser le maximum de chaleur produite, ce qui est d'un grand intérêt pour la conservation des creusets.

Four à arcs tournants ou à arcs interrompus. — Dans un four, lorsque les électrodes horizontales sont reliées à un générateur monté en série avec une bobine d'induction convenable et lorsque, à proximité des électrodes et à angle droit avec leur direction horizontale, on établit un puissant champ magnétique, l'arc développé entre les électrodes se trouve être immédiatement attiré vers le haut ou vers le bas, et, en conséquence, interrompu, en même temps qu'un nouvel arc en ligne droite se forme entre les électrodes, lequel est également attiré au dehors. La vitesse de formation, de déplacement et d'interruption des arcs voltaïques est si grande, qu'il se forme plusieurs milliers de ces arcs par seconde. Mais, dans la pratique, on se contente seulement de quelques centaines d'arcs à la seconde. Quand le champ magnétique est excité par du courant continu et que le générateur alimente l'arc avec du courant également continu, il se forme une série ininterrompue d'arcs qui se déplacent radialement avec une vitesse en rapport avec la puissance du champ magnétique. Les points de la surface des électrodes sur lesquels porte l'arc se déplacent également à partir des pointes, avec une vitesse très grande. L'œil de l'observateur reçoit l'impression d'un disque d'arcs voltaïques ayant la forme d'un demi-cercle presque complet. Le mouvement de l'arc, dans le voisinage des électrodes, est généralement plus rapide du côté de l'électrode négative que du côté de l'électrode positive, en sorte que le centre du disque se déplace d'un côté de la ligne droite qui relie les électrodes. Lorsque le champ magnétique est excité avec des courants alternatifs, tandis que l'arc voltaïque se trouve alimenté par du courant continu, les arcs oscillent entre les faces opposées des électrodes. Les choses se passent exactement de même lorsque l'arc est alimenté par du courant alternatif et que le champ magnétique est excité par du continu.

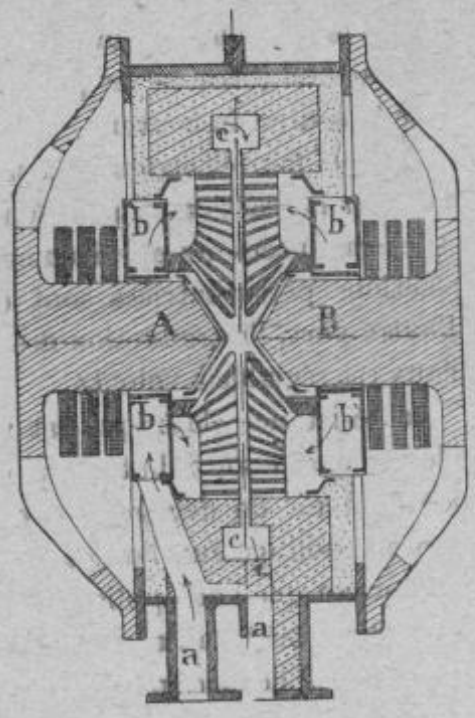


FIG. 1907.

Le four de Birkeland et Eyde (*fig.* 1907), qui sert à la fabrication de l'acide azotique, est un appareil à arcs interrompus.

L'air arrivant en *a* se répand dans deux couronnes *b* et *b'* avant de passer à travers les arcs. Deux électrodes A et B sont placés horizontalement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et perpendiculairement à la direction du champ magnétique, et les électros sont reliés par une culasse formant cuirasse. Les gaz, avant de sortir en *d*, se réunissent dans une couronne collectrice *c*, et l'air est préalablement réchauffé avant de traverser le réseau d'arc. Le plan dans lequel se trouve le disque est balayé totalement par les arcs, et tout l'air qui le traverse est soumis, et un grand nombre de fois, à la décharge électrique.

Pour la fabrication des ferros-alliages, M. Price construit son four à arc avec creuset et fond du four démontables, pour faciliter la substitution d'un creuset vide.

Enfin, le nouveau type de four Jaklatwalla, dit four à résistance en cascade, se compose en réalité de trois fours concentriques qui peuvent tous trois être employés en même temps ou non, et qui sont enfermés dans une poterie en terre réfractaire doublée intérieurement d'un garnissage en terre d'infusoires.

Une canalisation en nickel chauffe électriquement de l'oxyde d'étain, lequel chauffe de la magnésie entourant le corps en essai.

666. Propriétés et avantages du four électrique. — La plupart des fours à sole conductrice sont constitués par une carcasse en fer ou en maçonnerie dans laquelle on dame un aggloméré de graphite de cornue sur tout le fond. La carcasse repose sur un socle quelconque ou sur la plate-forme d'un wagonnet. Le courant est ramené à la masse conductrice d'une façon quelconque, quelquefois par le fond lui-même, d'autres fois par une pièce en fer placée dans le fond du four et mise en relation avec la source du courant.

Dans le four électrique, l'action chimique de l'atmosphère n'intervient pas dans la réaction ; il peut fonctionner sans introduction d'air extérieur, et les gaz intérieurs proviennent simplement de réactions oxydantes. Les réactions perturbatrices sont donc réduites au minimum, tandis que, d'autre part, l'introduction des additions finales ou des constituants spéciaux est réglable à volonté.

La résistance électrique est variable dans tous les fours : en général, elle est élevée au début d'une opération pour devenir faible à la fin, et pour obtenir un dégagement constant de chaleur, il faut souvent faire varier le voltage aux bornes du four.

L'on sait que l'on applique indifféremment le courant continu et le courant alternatif à l'alimentation du four électrique. Le réglage dans le four triphasé est beaucoup plus facile que dans les autres, car, si pour une cause quelconque, un des arcs vient à s'interrompre, le four continue tout de même à fonctionner, les deux autres arcs marchant en série. Ceux-ci peuvent se connecter soit en triangle entre les trois charbons, soit en étoile entre les charbons et une plaque conductrice fonctionnant comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

point neutre, qui peut, si l'on veut, être réuni au point neutre des alternateurs. On a, par ce système, trois arcs au lieu d'un seul, ce qui permet d'obtenir une sphère d'irradiation bien plus grande et plus uniforme.

Pour réduire la section des canalisations électriques, il est indiqué de placer plusieurs fours en série sur le circuit de chaque unité génératrice. D'ailleurs, cette disposition permet d'éviter les courts-circuits possibles et de régulariser le régime de marche des génératrices par les compensations qui s'établissent dans les variations des fours couplés en série.

A chaque groupe de fours il peut être adjoint un four de rechange avec système de connexions permettant la mise en circuit ou non circuit de l'un quelconque des fours.

La densité de puissance D′ dans un foyer de four électrique à résistance est le nombre de watts dépensés par centimètre cube de matière à traiter par le courant électrique ; D représentant la densité du courant, on a : $D' = \frac{\rho I^2}{D^2}$, pour l'expression de la densité de puissance, où le coefficient de résistivité ρ de la couche de la matière constituant le foyer ne varie pas pendant le cours de l'opération. La densité de puissance joue dans une fusion ou une réaction un rôle des plus importants, étant le facteur principal de la température obtenue dans le foyer.

Le grand rendement thermique du four électrique a été constaté et expliqué depuis longtemps par la concentration possible des opérations dans un espace des plus réduits, et, en outre, les pertes par émission sont notablement moindres que celles des fours dans lesquels le véhicule thermique est gazeux.

En ce qui concerne spécialement l'industrie sidérurgique, le four électrique, en l'état actuel, supprime le four à cémentation, marche de pair avec le four à creuset, remplace le four Martin et vient heureusement compléter le Bessemer, en permettant dans tous les cas d'obtenir un métal homogène plus pur et pouvant être coulé très fluide. Ainsi, dans les fours électriques pour l'acier, la source d'énergie est permanente, avantage essentiel par rapport aux convertisseurs à vent dans lesquels l'élaboration de l'air exige, par crainte de refroidissement, l'emploi de réactifs thermogènes et une précipitation incompatible avec la précision que l'on est en droit de souhaiter.

667. L'arc voltaïque dans le four électrique. — Il existe encore peu d'études complètes sur le rôle de l'arc voltaïque au point de vue de son emploi dans le four électrique.

M. A. Minet, qui s'est acquis une grande notoriété par ses travaux en électrochimie et en électrométallurgie, a présenté à l'Académie des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sciences une note particulièrement remarquable sur ce sujet que nous résumons ci-après (1) :

L'étude de l'arc voltaïque jaillissant dans une enceinte limitée par une paroi épaisse comporte l'examen d'un grand nombre de facteurs :

1° Forme et dimensions de l'enceinte ; 2° nature et épaisseur de la paroi ; 3° nature, position et dimensions des électrodes ; 4° section et longueur de l'arc ; 5° sa température ; 6° pression à laquelle est soumise la gaine gazeuse qui le constitue ; 7° différence de potentiel aux électrodes ; 8° force contre-électromotrice et réactions physiques, chimiques ou physico-chimiques qui la provoquent ; 9° intensité et densité du courant (intensité par centimètre carré) ; 10° résistance spécifique des vapeurs formant l'arc, etc.

Dans une série d'expériences, M. Minet a considéré le cas simple d'un

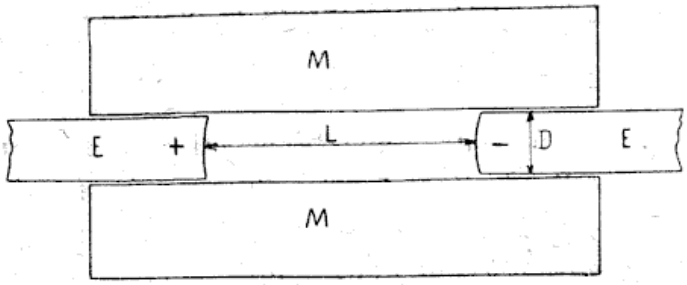


FIG. 1908.

arc jaillissant dans une cavité de forme cylindrique, creusée au centre d'un bloc de magnésie MM, de forme parallélipipédique et de 5 centimètres d'épaisseur (*fig.* 1908).

Voici quelles ont été les observations résultantes pour différents diamètres et longueurs d'arc, le courant employé étant du mode continu :

1° Pour une intensité et un diamètre donnés, et des longueurs L variables, les forces électromotrices sont reliées par l'expression :

$$E = e + \varepsilon l, \qquad (1)$$

où : E est la différence de potentiel aux électrodes ; e, la force contre-électromotrice, dont la valeur oscille suivant certaines conditions entre 14 et 18 volts, et dont le siège se trouve à l'électrode positive ; ε, la différence de potentiel prise sur une longueur d'arc de 1 centimètre, trouvée sensiblement constante sur toute la longueur de l'arc.

Le tableau (I) ci-après montre les valeurs des termes entrant dans la formule (1) pour des intensités variant de 13 à 93 ampères.

(1) Séance du 2 mars 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU I. — *Formule de régime de l'arc.*

$$E = e + \varepsilon L$$

	$d = 1^{cm},1$ $I = 13$ amp.		$d = 1,5$ $I = 20,5$		$d = 2,1$ $I = 34$		$d = 3,1$ $I = 61$		$d = 4,1$ $I = 93$	
	E	ε	E	ε	E	ε	E	ε	E	ε
en n.	en volts	en volts	en volts	en volts	en volts	en volts	en volts	en volts	en volts	en volts
Près de 0	(*e*) 14		(*e*) 14		(*e*) 16		(*e*) 18		(*e*) 18	
1	24	10	21	7	22	6	24	6	22	4
2	36	12	31	10	27	5	29	5	27	5
3	48	12	37	6	33	6	34	5	30	3
4	58	10	43	6	39	6	39	5	33	3
5	69	11	50	7	46	7	43	4	38	4
6	80	11	56	6	52	6	47	4	42	4
	$E = 14+11L$		$E = 14+7L$		$E = 16+6L$		$E = 18+4{,}83L$		$E = 18+4L$	

2° Soient la chaleur totale et les chaleurs partielles engendrées par le courant dans l'arc par seconde :

$$EI = eI + \varepsilon IL ;$$

l'auteur a admis que, étant donnée la constante de ε sur toute la longueur de l'arc, la chaleur *e*I se dissipe complètement dans l'électrode positive et la paroi en contact direct avec cette électrode, et que la chaleur εIL se perd dans les parois en contact avec la masse gazeuse constituant l'arc.

Pour vérifier cette hypothèse, M. Minet a supposé que le refroidissement de la masse gazeuse constituant l'arc suivait la même loi que le refroidissement d'un conducteur solide exposé à l'air ou mis sous moulure.

On sait que pour que la température d'un conducteur solide ainsi disposé reste constante, il faut que l'intensité du courant qui le traverse soit liée à son diamètre par la relation :

$$I = Kd^{\frac{3}{2}}. \qquad (2)$$

Partant de cette base, on a calculé la valeur de K d'après l'intensité I = 34 ampères, adoptée pour le diamètre de l'arc $d = 2^{cm},1$:

$$(a)\ 34 = K_1 \times 2,1^{\frac{3}{2}}; \qquad \text{d'où } K = 11,17.$$

En conséquence les valeurs de I pour les autres diamètres de l'arc ont été calculées par la formule (a) $I = 11,17d^{\frac{3}{2}}$ et ce sont ces valeurs qui figurent dans le tableau I.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans tous les cas, la température de l'arc devait rester constante. Elle n'a pas été mesurée, mais son invariabilité a été démontrée par la constance de la résistance spécifique ρ de la masse gazeuse.

Cette résistance spécifique et les autres grandeurs de l'arc et du courant qui le forme ont été calculées comme suit en s'appuyant sur la formule (2) et sur la mesure directe de l'une d'elles, la différence de potentiel ε pour une longueur d'arc de 1 centimètre.

Densité du courant. — Par définition :

$$\delta = \frac{4I}{\pi d^2};$$

on a donc :

$$\delta = \frac{4}{\pi}\frac{K_1}{d^{\frac{1}{2}}} = \frac{K_2}{d^{\frac{1}{2}}};$$

où $K_2 = 14{,}22$, d'après $K_1 = 11{,}17$.

Différence de potentiel. — $\varepsilon = Ir$, r étant la résistance d'une section d'arc de longueur, $L = 1$ centimètre ; en exprimant r en fonction de la résistance spécifique ρ et I en fonction de la densité δ, il vient :

$$\varepsilon = \rho\delta, \quad \text{d'où} \quad \varepsilon = \frac{\rho K_2}{d^{\frac{1}{2}}} = \frac{K_3}{d^{\frac{1}{2}}};$$

K_3, fourni par l'expérience, a été trouvé égal à 8,7 (toujours pour un diamètre moyen $d = 2{,}1$), d'où pour la *résistance spécifique :*

$$\rho = \frac{K_3}{K_2} = 0{,}61 \text{ ohm.}$$

Longueur d'arc pour une différence de potentiel constante et égale à 64 volts ; en admettant $e = 14$ volts, $\varepsilon L = 64 - 14 = 50$ volts, d'où :

$$L = \frac{50}{K_3} d^{\frac{1}{2}} = 5{,}75 d^{\frac{1}{2}}.$$

Perte de chaleur exprimée en watts, par unité de surface de la paroi et par seconde :

$$p = \frac{\varepsilon I}{\pi d} = \frac{K_2 K_3}{\pi} = 31 \text{ watts.}$$

Le tableau ci-après donne les valeurs des diverses grandeurs mesurées directement ou calculées suivant les expressions ci-dessus.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU II. — *Constantes électriques.*

Grandeurs données			Grandeurs trouvées et calculées					
$I = 11{,}17 d^2$		$\delta = \frac{14{,}22}{d^2}$	$\varepsilon = \frac{8{,}7}{d^2}$ volts		L pour E = 64 volts $L = 5{,}75 d^2$ cm			
			$\rho = 0{,}61$ ohm			$p = 31$ watts		
dcm	ampères	ampères par cm²	trouvées	calculées	trouvées	trouvées	calculées	trouvées
1,1	13	13,6	11	8,3	0,81	4,5	6,04	41,3
1,5	20,5	11,3	7	7	0,61	7,04	7,04	31
2,1	34	9,8	6	6	0,61	8,33	8,33	31
3,1	61	8,1	4,83	4,94	0,60	10,30	10,10	30,4
4,1	93	7,03	4	4,30	0,57	12,50	11,60	29

Les chiffres que donne la mesure directe s'écartent peu de ceux fournis par le calcul, sauf pour ce qui concerne $d = 1^{mc},1$, où la différence en plus ou moins, suivant la grandeur considérée, est assez importante. Il est à prévoir qu'au fur et à mesure que le diamètre augmentera, les valeurs trouvées s'écarteront de celles calculées avec des différences de sens inverse de celles correspondant au diamètre le plus faible.

C'est aussi le cas des conducteurs cylindriques solides sous enveloppe qui présentent des variations analogues. Cela résulte sans doute de ce qu'on ne tient pas compte, dans la formule qui détermine I en fonction de (de) de la vitesse de propagation de la chaleur à travers la masse du conducteur ; cette vitesse n'étant pas infinie, il est certain qu'au fur et à mesure qu'augmentera le diamètre, l'intensité de circulation capable de maintenir constante la température des conducteurs sera de plus en plus inférieure à celle calculée ; autrement dit, l'exposant de d dans la formule (2) n'est pas constant ; il est aussi fonction du diamètre, et ira en diminuant quand le diamètre ira en augmentant.

668. Fabrication de l'aluminium. — Les minerais employés dans la préparation de l'aluminium sont la bauxite (alumine hydratée) et la criolithe (fluorure d'aluminium).

L'industrie de l'aluminium est née avec la houille blanche. C'est aujourd'hui une des branches les plus importantes de l'électrométallurgie. Ces dernières années, la production a atteint 75.000 tonnes par an, alors qu'elle n'était que de 19.000 tonnes en 1908. L'aluminium, dont la densité est de 2,56, qui a une grande ductilité et une grande malléabilité, est très conducteur de l'électricité et de la chaleur [1]. Il est employé sous toutes les formes : barres, cornières, fils, planches, tubes, ustensiles de cuisine, objets moulés divers, poudre, etc. Peu altérable à l'air, il est attaqué

(1) A égalité de section, le coefficient de conductibilité de l'aluminium est de 62 0/0 de celui du cuivre. D'autre part, ce dernier pèse 3,3 fois plus que l'aluminium.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vivement à froid par l'acide chlorhydrique qui le dissout complètement.

On reproche à l'aluminium pur d'être un métal mou, peu résistant, parfait pour un emploi statique, mais d'utilisation limitée, dès que l'on envisage pour lui une action dynamique quelconque ; mais ce n'est là qu'une question d'épaisseur du métal, et il suffit d'augmenter cette épaisseur des pièces résistantes pour les mettre à l'abri de l'usure. Sa résistance à la traction par millimètre carré est de 10 à 15 kilogrammes, suivant qu'il est plus ou moins écroui. L'aluminium de forge se lamine, s'emboutit, se fond, et se moule aisément. Pur, c'est le moins attaquable des métaux.

Aujourd'hui, l'aluminium ne contient plus que 0,5 0/0 d'impuretés.

Récemment, on a appliqué l'aluminium à la fabrication des métaux purs et à la soudure autogène par les procédés dits aluminothermiques (1).

A l'état d'alliage, il présente une résistance à la rupture supérieure à celle des alliages de cuivre. Les principaux alliages d'aluminium sont : le bronze d'aluminium, qui remplace avantageusement le bronze ordinaire, le nickel-aluminium, le nickel-cuivre-aluminium, le nickel-fer-aluminium, le titane-aluminium, l'antimoine-aluminium, l'étain-aluminium, le ferro-aluminium, le magnésium-aluminium, etc.

Le bronze d'aluminium à 10 0/0 est un métal extrêmement intéressant. H. Sainte-Claire Deville a montré que ce métal était comparable à l'acier fondu, et son prix de revient ne dépasse guère celui du cuivre. Son emploi est très justifié dans la construction des pièces demandant à la fois une grande résistance mécanique et une grande résistance chimique, ainsi que pour les ustensiles à l'usage domestique.

Ce sont les frères Cowles qui, en 1884, ont les premiers obtenu des résultats pratiques dans la fabrication de l'aluminium par l'obtention d'alliage d'aluminium.

M. Minet, dès 1888, posa les conditions que doivent remplir l'électrolyte et son dissolvant, à savoir : un point de fusion peu élevé, une fluidité convenable à l'état fondu, une densité inférieure à celle de l'aluminium fondu, une faible tension de volatilisation ainsi qu'une résistivité électrique peu élevée.

M. Héroult vint ensuite avec son procédé, qui consiste à électrolyser

---

(1) On peut augmenter par le refroidissement la résistance et la conductibilité des alliages d'aluminium. Pour produire des résultats satisfaisants, l'aluminium ou l'alliage cuivre-aluminium doivent être refroidis à une température comprise entre le point auquel le métal se solidifie et le point inférieur de 30° au plus, au point de recalescence. Quand cette température est atteinte, le métal est plongé dans de l'eau froide.

Les points de recalescence pour les alliages aluminium-cuivre seraient les suivants : pour 1 0/0 de cuivre, 485° C. ; pour 2 0/0, 501° ; pour 3 0/0, 512° ; pour 4 0/0, 524° ; pour 6 0/0, 530° ; pour 10 0/0, 535° ; pour 15 0/0, 538° ; et pour 33 0/0 ,540°.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'alumine fondue (Al^2O^3) dans un bain de cryolithe. L'alumine, qui absorbe le fluor et régénère le fluorure d'aluminium, se tire de la bauxite rouge, composée de 60 0/0 d'alumine, 15 à 18 0/0 de sesquioxyde de fer et 1 à 4 0/0 de silice. D'après ce savant, l'électrolyte a pour effet de précipiter sur la cathode du sodium qui, s'il est à l'état liquide, réduit le fluorure d'aluminium, alors que la température n'est pas trop haute, et, dans ce cas, il n'apparaît que de l'alumine.

Le procédé Hall ne diffère pas de celui de Héroult, et le procédé Peniakoff est basé sur l'électrolyse du sulfure d'aluminium, comme le procédé Gooch.

La réaction dans le procédé Hall est :

$$Al^2O^3 + 3C = 2Al + 3CO.$$

L'oxyde de carbone se transforme en acide carbonique au contact de l'air.

L'électrolyse du fluorure d'aluminium demande une tension de 2,5 volts (Minet) ; celle de l'oxyde d'aluminium, 2,2 volts, et l'électrolyse du sulfure d'aluminium, 1,3 volt.

Pour la préparation de 1 kilogramme d'aluminium au moyen des électrolyses considérées, l'énergie consommée est respectivement de 26, 25 et 22 kilowatts-heures.

On est arrivé à produire un métal de plus en plus pur atteignant 99,9 0/0 d'aluminium, et quelques traces d'alumine et de silicium.

On prévoit que, d'ici quelques années, la production annuelle d'aluminium sera doublée. Ce métal est maintenant très employé pour les lignes de transmission de force électrique, ainsi que dans la construction des automobiles et la fabrication des ustensiles de cuisine, etc. Il sert à la construction des lorgnettes, des longues-vues, pour les papiers de tenture (cuirs argentés), l'affinage de l'acier, et de désoxydant pour la fabrication des alliages. On l'emploie aussi pour la préparation des métaux réfractaires, la soudure autogène du fer et de l'acier.

Il y a vingt ans, l'aluminium coûtait 60 francs le kilogramme ; aujourd'hui, grâce au four électrique, il a pu descendre jusqu'à 1 fr. 80 le kilogramme ; aussi les industriels ont à peu près complètement abandonné les procédés de préparation par la voie chimique.

Son prix de revient varie de 150 à 200 francs les 100 kilogrammes, selon les usines ; pour la seule dépense d'énergie, en comptant le cheval-an à 50 francs, on a le chiffre de 250 francs par tonne, car il faut 5 chevaux-an pour produire une tonne d'aluminium.

Le capital à immobiliser se chiffre à plus de 3.000 francs par tonne d'aluminium à produire, même pour des installations importantes.

L'alumine, matière première de l'aluminium, est tirée de la bauxite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rouge, dont les principaux gisements, en France, se trouvent dans les départements des Bouches-du-Rhône, du Var, de l'Hérault et du Gard.

La production totale de la France atteint 200.000 tonnes, d'une valeur de 12 à 14 francs la tonne.

L'alumine est généralement préparée par le procédé Bayer, dans lequel la bauxite est attaquée par la soude, pour former de l'aluminate de sodium, qui, abandonné à lui-même, dans de grandes cuves, se décompose pour donner l'alumine pure.

La production d'aluminium pour la France atteint 15.000 tonnes et la production mondiale, 50.000 tonnes.

Le procédé Serpek consiste à chauffer au four électrique un mélange de bauxite et de charbon sur lequel on fait passer un courant d'azote. L'azoture d'aluminium obtenu est traité à l'autoclave par une solution étendue de soude caustique et l'aluminate de sodium ainsi produit se décompose en alumine et en soude caustique.

Avec le procédé Hall la bauxite est mélangée à du charbon puis traitée au four électrique. Le charbon réduit l'oxyde ferrique, la silice, l'acide titanique et l'alumine est cueillie à la surface du creuset.

La fabrication de l'alumine est une opération longue, délicate, exigeant une grande dépense de combustible.

Il faut environ 2 tonnes d'alumine pour obtenir une tonne d'aluminium.

Le prix moyen de ce produit, en France, était de 30 à 40 francs les 100 kilogrammes avant-guerre.

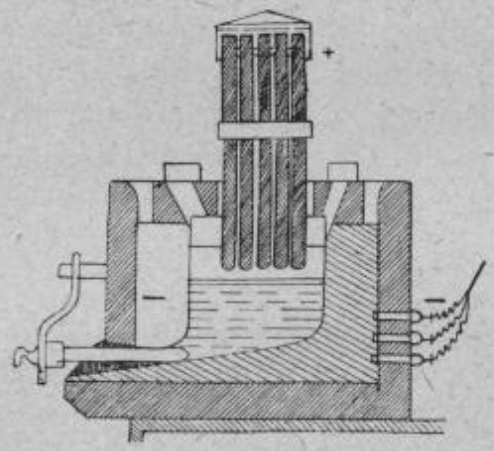


Fig. 1909.

Four Héroult (1). — L'anode (*fig.* 1909) est composée de plusieurs tiges de charbon réunies par des cadres métalliques, et la cathode est formée par du charbon disposé dans une cuve en fonte. L'anode est soulevée et abaissée selon les besoins.

On charge l'appareil au moyen de deux ouvertures pratiquées à la partie supérieure de la cuve, qui servent en même temps au dégagement des gaz produits pendant l'opération. On place, dans le four, de l'alumine mélangée à de la cryolithe ; quand l'arc

(1) Les brevets Héroult sont tombés dans le domaine public en 1901, ceux de Hall, pour l'Europe, en 1904. Les brevets Bradley sont expirés en 1909.

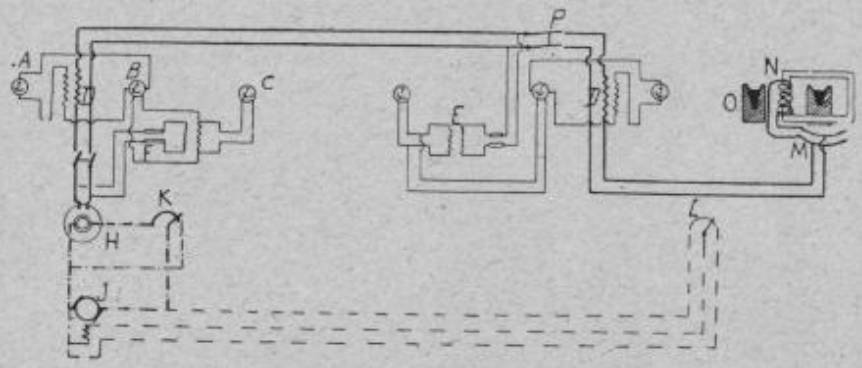
Les cinq grandes firmes : Société électrométallurgique française (Froges), Compagnie des produits chimiques d'Alais et de la Camargue, Aluminium Industrie Aktien-Gesellschaft, British Aluminium C° et Pittsburg Reduction C° (Aluminium C° of America), ont fait un accord pour uniformiser le prix de vente de l'aluminium et se partager le marché mondial de ce métal.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voltaïque a fondu celle-ci, on élève peu à peu l'électrode, et on ajoute du mélange, pour, à partir d'une certaine hauteur, n'introduire que de l'alumine.

Pour une tonne d'alumine, le poids de charbon brûlé à la cathode est au moins de 700 kilogrammes de métal fondu et reçu dans des lingotières.

Four Borchers. — L'électrode positive, mobile et verticale, est constituée par un cylindre de charbon, et la cathode par une plaque d'acier liée à la sole du four. Le creuset dans lequel pénètre l'anode est isolé du sol et rempli intérieurement d'une couche d'alumine. Dès que la charge est en



A, indicateur de courant. — B, indicateur de charge. — C, indicateur de tension. — D, transformateur de courant. — E, transformateur de tension. — F, fusibles. — G, interrupteur automatique. — H, générateur à courant alternatif (machine à 6 pôles, tournant à 100 tours, 1.188 Kw, 4.500 volts, cos φ = 0,63). — J, excitatrice. — K, rhéostat d'excitation principale. — L, rhéostat d'excitation dérivée. — M, contacts à curseurs. — N, bobine primaire. — O, rigole secondaire.

Alternateur { Haute tension. / Basse — } Conducteurs de courant excitateur { principal. / dérivé.

FIG. 1910.

fusion, on relève l'électrode positive et le métal est évacué par le trou de coulée.

Fours Minet. — Les électrodes des divers fours imaginés par M. Minet sont en charbon aggloméré, et le bain est alimenté par un mélange d'alumine, de fluorure d'aluminium et de chlorures et fluorures de métaux alcalins et alcalino-terreux.

Le premier type de four était à deux électrodes verticales, de polarités contraires, et à source de chaleur extérieure ; le second, à une électrode verticale et sans source de chaleur extérieure, et enfin, M. Minet revint à la première disposition, mais en supprimant l'afflux de chaleur extérieure.

Ce dernier four se compose, en principe, d'une cuve garnie intérieurement d'une couche de charbon. Les deux électrodes verticales plongent dans le creuset ainsi formé, et l'aluminium s'écoule par le fond de la cuve. Il n'existe aucune communication entre la cuve métallique et la masse liquide en fusion, et le métal obtenu ne renferme que des traces de silicium.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fours Cowles. — Ici l'électrode positive est constituée par un tube vertical qui sert à introduire les matières dans l'appareil ; la sole du four, entourée d'une matière isolante, fait office d'électrode négative.

L'espace vide qui reste entre les électrodes verticales et la cuve est garni de minerai mélangé avec du charbon de bois et le métal dont on veut obtenir l'alliage. Le courant a une intensité de 4.000 ampères sous 60 volts de tension ; une opération, se traduisant par une production de 90 kilogrammes de bronze d'aluminium, dure environ une heure et demie.

Par suite de l'expiration des brevets Héroult et de l'augmentation du prix du cuivre, l'industrie de l'aluminium prend une extension toujours croissante, et on doit prévoir, de ce fait, une diminution sensible de ce métal. L'on se préoccupe surtout de trouver des gisements de bauxite, en prévision de l'alimentation des usines nouvelles ou de celles en formation pour la fabrication de l'aluminium. La production actuelle de bauxite en France, avons-nous dit, est de 200.000 tonnes, mais une grande partie est affectée à la confection des revêtements réfractaires. La bauxite destinée à la fabrication de l'aluminium est traitée dans un nombre assez important d'usines, tant en France qu'à l'étranger.

Nous donnons à la page suivante le tableau des usines pour l'aluminium et la bauxite actuellement en fonctionnement ou en construction, avec leur puissance en chevaux, employés ou prévus, pour la fabrication de l'aluminium.

Il existe en outre : la Société *Giulini Gebrüder*, à Ludwigshafen-am-Rhein (Allemagne), l'usine *Bergius*, à Lissa-Schlesien (Allemagne) dont la majorité des actions appartient à l'*Aluminium Industrie A. G.*, et la *Société filiale Belge-Néerlandaise d'Aluminium*, à Selzaete (Belgique), qui exportent de grandes quantités d'alumine et de sulfate d'alumine spécialement pour la fabrication de l'aluminium, et qui sont en outre plus ou moins intéressées dans quelques-unes des usines précitées.

Usines d'aluminium de Vigeland (Norvège). — Ces usines sont alimentées par une dérivation prise sur la rivière Otter produisant une chute de 18 mètres de hauteur et un débit de 45 mètres cubes à la seconde.

L'usine hydroélectrique est établie sur le bord de la rivière. Au sous-sol sont installées quatre turbines doubles Francis de 5.000 chevaux chacune et l'usine d'aluminium est adaptée à la station centrale dans un bâtiment à deux étages, raccordée par un embranchement à la voie de fer.

Chaque générateur alimente 35 fours, chacun d'eux absorbant une tension d'environ 7 volts. La capacité de l'usine est d'environ 2.000 tonnes par an. Un générateur auxiliaire sert à alimenter 25 fours.

L'étage supérieur de l'usine se trouve à niveau avec la voie de raccordement au chemin de fer. Le plancher du premier étage, calculé pour une surcharge de 1.500 kilos par mètre carré de surface, est formé d'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NOMS des SOCIÉTÉS ET DES PAYS	EMPLACEMENT des FABRIQUES D'ALUMINIUM	PUISSANCE en chevaux	EMPLACEMENT des FABRIQUES D'ALUMINE
France			
Société des Produits chimiques d'Alais et de la Camargue.....	Calypso (Savoie).....	20.000	Salindres (Gard)
	St-Félix-de-Maurienne (Sav.).	4 000	
	St-Jean-de-Maurienne (Sav.).	28.000	
Société Électrométallurgique française...	L'Argentière.....	50.000	Gardanne (Bouches-du-Rhône)
	La Praz (Savoie).....	15.000	
	La Saussaz (Savoie).....	17.000	
Société des Forces motrices et usines de l'Arve.....	Chedde (Haute-Savoie).....	13.000	
Société des Produits électrochimiques et métallurgiques des Pyrénées.....	Auzat (Hautes-Pyrénées)....	26.000	
Société d'Électrochimie.....	Prémont (Savoie).....	10.000	La Barasse (Bouches-du-Rhône)
	Martigny (Suisse).....	3.000	
Société l'Aluminium du Sud-Ouest.....	Arreau (Hautes-Pyrénées)...	10.000	
Société Électrométallurgique du Sud-Est.	Venthon (Savoie).....	12.000	
Europe centrale			
Aluminium Industrie A. G., à Bâle (Suisse).	Rheinfelden (Allemagne)....	6.000	Lissa-Schlesien (Allemagne)
	Lend (Autriche).....	10.000	
	Lend-Rauris.....	6.000	
Angleterre			
British Aluminium C° à Londres.....	Dolgarogg.....	6.000	Larne (Angleterre)
	Foyers (Ecosse).....	14.000	
	Loch Leven (Ecosse).....	20.000	
Norvège			
Anglo Norvegian Aluminium C°, Londres.	Stangfjord.....	12.000	
	Vigeland (Norvège).....	14.500	
Aluminium Corporation Ltd, à Londres.	Pays de Galles.....	6 800	
Italie			
Società italiana per la Fabbricazione dell' Alluminio, à Rome.	Popoli (Italie).....	4.000	Bussi (Italie)
Etats-Unis			
Aluminium C° of America, à Pittsburg (États-Unis).....	Niagara Falls (New-York)...	45.000	East St-Louis (Etats-Unis)
	Massena (New-York).....	40.000	
Canada			
Northern Aluminium C°, à Québec (Canada) (1).....	Shawinigan Falls (Canada)..	25.000	Id.
Suisse			
British Aluminium	Neuhausen.....	7.000	Marseille (France)
	Osières.....	18.500	
	Chippis.....	50.000	

(1) Cette société est une filiale de l'*Aluminium C° of America.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voûte maçonnée supportée par des piliers, des poutres et des colonnes en fer. Cet étage sert principalement au magasinage des matières premières, argile et cryolithe. Il contient en plus, dans une partie réservée, le magasin de l'aluminium usiné. Ces matières sont envoyées aux fours au moyen de simples trémies.

Les fours se trouvent disposés sur un plancher en béton. Des canaux de ventilation ont été aménagés pour évacuer à l'extérieur les gaz chauds provenant des fours ; ces caniveaux passent sous le premier étage à travers le magasin des matières premières et aboutissent à des soupiraux sous le toit. La ventilation est activée par des moteurs-ventilateurs dont l'air frais est distribué dans toutes les parties du local des fours.

Les barres collectrices se trouvent le long du bâtiment séparant la salle des machines de la salle des fours sur des supports spéciaux. Elles sont munies de couteaux de sectionnement disposés de telle sorte que le générateur de réserve peut être branché par les barres sur n'importe quel groupe de fours. Les conducteurs allant aux fours sont placés au-dessus des barres omnibus en traversant le mur de séparation dans des ouvertures appropriées. Des mesures ont été prises pour que ces connexions puissent être branchées immédiatement après leur passage du mur de séparation à la série des fours correspondante.

La fabrique d'électrodes attenante à l'usine d'aluminium contribue à diminuer les frais de fabrication de l'aluminium. Le bâtiment destiné à loger le four-tunnel de 52 mètres de longueur a $66^m \times 9^m$. Ce bâtiment comporte à côté du four ainsi que devant ses deux extrémités des voies ferrées. Le four est chauffé par du gaz obtenu dans des générateurs placés dans un bâtiment voisin. Chaque générateur seul suffit à alimenter le four.

L'outillage est complété par des presses, des concasseurs, des machines à mélanger les matières sèches et les matières d'agglomération, un compresseur d'air pour la soufflerie à sable, des broyeurs de coke, etc.

De grosses usines se sont installées à Olterdal (Norvège) et à Bussi (Italie).

La production mondiale d'aluminium, en 1912, s'est répartie comme suit : États-Unis, 26.300 tonnes ; France, 13.000 ; Allemagne, Autriche et Suisse, 12.000 ; Angleterre, 7.500, autres pays, 2.500. La consommation qui était de 9.300 tonnes en 1904 s'est élevée à 17.000 tonnes en 1908 et 33.500 tonnes en 1909 pour atteindre 75.000 tonnes en 1914.

669. Coup d'œil sur la sidérurgie ordinaire. — Les minerais de fer utilisés en métallurgie sont : les carbonates de fer, les minerais oxydés et hydratés dont la plus haute expression est l'hématite, les minerais oxydés anhydres (hématites) et les minerais oxydulés (magnétites).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On fait aussi apport des scories de puddlage et des pyrites grillées.

Les minerais de fer sont dits pauvres lorsque leur teneur en fer est inférieure à 35 0 /0, moyens entre 30 et 45 0 /0 et riches au-dessus de 45 0 /0.

Les minerais de manganèse se divisent en : minerais carbonatés (dialogite), minerais oxydés hydratés (manganite) et minerais oxydés anhydres (hausmanite, braunite et pyrolutite).

A la veille de la guerre, la production mondiale du minerai de fer se décomposait comme suit : États-Unis 55.000.000 tonnes ; Allemagne 30.000.000 ; Angleterre 18.000.000 ; la France 19.000.000 ; l'Espagne 10.000.000 ; la Russie 6.000.000 ; la Suède 6.000.000 et l'Autriche 5.000000. Le tout correspondant à 60.000.000 de tonnes de fonte.

Les minerais de chrome sont caractérisés par la chromite ou fer chromé (oxyde de chrome et de fer), contenant, en outre, du manganèse et de l'aluminium. Les minerais de tungstène sont caractérisés par le wolfram ou tungstène de fer et de manganèse et par la schéelite ou tungstate de calcium.

Les fontes produites au haut fourneau se divisent en : fontes grises et ferros-siliciums (de 0 à 0,3 de manganèse), fontes blanches et ferros-manganèses (de 0 à 0,8 de silice) et silicospiegels (15 à 25 0 /0 de manganèse et 10 à 25 0 /0 de silice).

D'après leur usage industriel, les fontes se classent en : fontes de moulage, en première ou deuxième fusion ; en fontes Bessemer, destinées à être transformées en acier dans un convertisseur à garnissage acide ; en fontes Thomas pour être transformées aussi en acier mais dans un convertisseur à garnissage basique ; en fontes pour acier sur sole, traitées par le procédé Martin ; en fontes d'affinage, pour la fabrication du fer par le puddlage ; en fonte aciérée (projectiles de guerre).

La seconde fusion de la fonte se fait dans les fonderies soit au creuset, soit au four réverbère, soit au cubilot.

Les ferros-alliages traités au haut fourneau sont : les ferros-siliciums, les silicospiegels, les ferros-manganèses, les spiegels, les ferros-chromes.

Les hauts fourneaux actuels sont à double fermeture du gueulard et les machines soufflantes modernes sont horizontales ; leur rendement a été très amélioré par l'emploi de vent chaud pour le soufflage. Ces machines ont toutes comme combustible les gaz des hauts fourneaux préalablement épurés des vapeurs d'eau et des poussières.

La préparation du fer est faite au four à puddler et au sortir du four on améliore la qualité du fer en l'étirant à nouveau.

Les aciers sont préparés soit au creuset, soit au convertisseur, soit sur sole.

Les creusets contiennent de 12 à 60 kilogrammes d'acier et ils sont chauffés au gaz de gazogènes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les convertisseurs acide ou Bessemer, on traite des fontes non phosphoreuses et dans les convertisseurs basiques ou Thomas, des fontes phosphoreuses. L'affinage sur sole se fait acide, scrap-process ou process, scrap-processore, process ou basique ; les opérations ont lieu dans les fours Martin-Siemens. Les aciéries de conversion (Bessemer ou Thomas) marchant en première fusion emploient des mélangeurs à bascule ou rotatifs pour assurer la régularité de composition et la régularité de production.

Une aciérie Bessemer moderne comporte au moins trois convertisseurs et une aciérie Thomas au moins quatre.

Les aciéries Martin permettent d'utiliser les riblons (scrap process) ; le pourcentage de fonte varie de 1 /5 à 2 /5 et les riblons 25 à 35 0 /0. Dans ce cas l'affinage peut être réalisé sans minerai. Ce procédé peut se pratiquer sur sole acide (fontes hématites et ferrailles exemptes de phosphore et de soufre) et sur sole basique. Dans le procédé au minerai (ou process) le pourcentage de fonte est habituellement compris entre les 4 /5 et à 0 20 0 /0 de riblons. Il est pratiqué sur sole basique et nécessite l'intervention d'une quantité importante de minerai.

Le haut fourneau semble parvenu actuellement à l'extrême limite de son perfectionnement ; il en est de même du procédé Bessemer, qui a pour but de convertir en acier une fonte type de composition bien déterminée par l'insufflation d'air dans le métal liquide. Les efforts des métallurgistes, de nos jours, tendent à affiner aussi complètement que possible une fonte quelconque, dans les conditions les plus économiques, et en réalisant, dans des appareils différents, les phases successives de l'affinage. On espère même concurrencer, dans une certaine mesure, grâce à cette méthode combinée avec les effets du chauffage électrique, l'antique procédé du creuset, lequel n'a pas encore été détrôné pour la fabrication des aciers fins.

D'ailleurs, on a déjà obtenu d'excellents résultats en adoptant pour le chauffage des creusets le four Siemens à récupération. On est ainsi arrivé à réaliser des lingots, **et,** par suite, des pièces forgées de plus de 50 tonnes.

Le manque de souplesse du convertisseur pour la fabrication de certaines nuances de qualités a fait converger les efforts des métallurgistes vers l'amélioration du four Martin à sole acide et basique surtout. Ces efforts ont abouti à une augmentation sensible du rendement et de la production.

La capacité des fours ordinaires a été sensiblement élevée : on les construit aujourd'hui de 30, 40, et 50 tonnes et plus. On a remplacé les gazogènes de petites dimensions et on leur a substitué des appareils bien plus grands, dont un seul suffit par four de 20 tonnes environ. Au point de vue des phases de l'opération de l'affinage, on commence par opérer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce dernier dans un grand four jouant le rôle de mélangeur actif, en marche continue, à température relativement basse, et on déverse périodiquement une fraction de son contenu dans des fours de moindre capacité, à l'allure plus rapide, où l'affinage est terminé et l'acier obtenu aux nuances demandées.

Mais l'affinage de l'acier au four Martin, quoi qu'on fasse, est limité en raison de l'insuffisance de température et de l'importance des déchets qui se produisent par oxydation quand on veut pousser trop loin l'affinage. Pour reculer la limite de réaction d'affinage, une excessive basité du laitier est obligatoire, mais, pour maintenir la fluidité du laitier à très forte teneur d'oxyde de calcium, la température du four à récupération est insuffisante. D'autre part, dans ces fours, le maximum de température ne s'obtient guère qu'en un milieu trop oxydant. De là, la venue des fours électriques, avec ou sans électrodes, qui ont permis d'atteindre, en partant d'une fonte de qualité courante, un produit comparable à celui que donna le creuset — l'acier fin — en grande masse et relativement bon marché.

Les progrès industriels ont permis la substitution de l'acier au fer puddlé, la création d'aciers spéciaux et l'application des principes scientifiques au traitement thermique des aciers obtenus. L'acier au carbone (fer-carbone) et les alliages fer-carbone (silicium, nickel, chrome, tungstène, molybdène, vanadium) dominent le marché de l'industrie sidérurgique.

Comme l'a dit avec beaucoup d'à-propos M. Métayer, professeur de métallurgie à l'École centrale des Arts et Manufactures [1], notre siècle pourrait être dénommé le « siècle de l'acier ».

Le plus grand événement qu'ait vu surgir l'univers : la tentative d'hégémonie de l'Allemagne sur le monde, qui s'est produite par une guerre inouïe de matériel, ne peut que fortifier de la plus haute façon l'expression que nous venons de signaler.

670. Caractères généraux des fours à acier. — L'électrosidérurgie est, au premier chef, une conquête française dont MM. Héroult, Keller, Chaplet, Gin et Girod ont été les artisans de la première heure.

La production de l'acier au four électrique est réalisée au moyen de quatre méthodes de travail différentes : par simple fusion de matières suffisamment pures comme pour l'acier au creuset ; par fusion, affinage et recarburation, comme dans le four Martin basique ; par raffinage d'acier déjà fondu et partiellement affiné dans un four ordinaire en marche mixte ; enfin, par fusion directe du minerai avec un réducteur et un fondant.

---

[1] Conférence à la Société industrielle du Nord de la France.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La réduction, au four électrique, des minerais de fer, n'apparaît pas, en thèse générale, comme pratique en vue de fabriquer des fontes ordinaires. Pour rendre cette fabrication réalisable, il faudrait disposer d'un minerai pur dans la région même de la station hydroélectrique et que le prix du kilowatt-an ne dépassât pas 30 francs. La pureté du produit obtenu au four est incontestable, et elle provient de ce fait qu'avec le four électrique le charbon n'est employé que comme réducteur et, comme il en faut peu, on peut le prendre de tout premier ordre. Aussi le four électrique est un agent tout indiqué quand il s'agit de la production de fontes spéciales.

Pour la fabrication de l'acier en partant des minerais, les conditions de possibilité sont du même ordre que celles précitées ci-avant.

Mais la production de l'acier par la fusion de riblons ou affinage de la fonte liquide est d'ordre absolument pratique, et l'extension qu'a prise cette industrie est le plus sûr garant de son brillant avenir.

Nous n'étudierons pas ici ces opérations qui comportent généralement des périodes distinctes d'épuration chimique et de désoxydation.

C'est à la fin de cette dernière que certains éléments, tels que le nickel, le chrome, le vanadium, le tungstène, etc., sont introduits pour l'obtention des aciers spéciaux, à la fabrication desquels le four électrique se prête excessivement bien.

Ainsi l'on peut maintenant, avec les moyens dont on dispose, fabriquer au four électrique tous les aciers usités dans l'industrie : acier au nickel, acier au chrome, acier au tungstène-nickel, acier au tungstène, acier au phosphore, acier au molybdène-nickel, etc.

Lorsqu'il s'agit de la transformation en acier de la fonte brute, le four électrique est supérieur au four Martin, si l'énergie électrique est obtenue à un prix acceptable. Aussi, dès que sera accomplie, par le moyen de l'utilisation de l'énergie disponible dans les gaz des hauts fourneaux, l'union du haut fourneau pour la fonte, du convertisseur Bessemer pour les aciers communs et de l'épurateur électrique pour les autres aciers, l'industrie sidérurgique aura réalisé l'utilisation la plus parfaite de la puissance calorifique de la houille noire.

Le four électrique permet d'obtenir des températures supérieures à celles produites dans les fours métallurgiques, et cela avec une source de chaleur exempte de toute oxydation ; on arrive ainsi à une désoxydation plus complète de l'acier, une désulfuration et une déphosphoration presque parfaites, cette haute température supprimant la crainte de voir le métal se suroxyder et devenir pâteux, comme cela se produit lorsqu'on prolonge trop l'affinage au four métallurgique ordinaire. La température spéciale du courant électrique offre le moyen de supprimer presque complètement les scories interposées et inutilement mélangées au métal.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin la température neutre qui règne à la surface du bain dans le four électrique détermine des laitiers et des fondants très basiques, impossibles à obtenir avec l'atmosphère oxydante des produits du gazogène Siemens, dans le Martin ordinaire, ce qui facilite la production, à la fin de l'opération de l'affinage, d'un laitier dans lequel les derniers vestiges de phosphore sont éliminés.

Le rendement thermique des fours électriques est excellent et varie de 0,50 à 0,80, suivant leur capacité, qui est généralement comprise aujourd'hui entre 1 et 10 tonnes.

Pour l'élaboration thermique de l'acier, consistant en un complément d'affinage du métal Thomas ou Martin, la consommation d'énergie n'est plus (pour des fours de 5 tonnes) par tonne d'acier que 200 kilowatts-heures en marche basique et 100 kilowatts-heures en marche acide. Cet affinage peut être obtenu avec une dépense de 10 à 15 francs par tonne.

On peut obtenir, avec l'emploi de matières bon marché, des produits aussi fins que les aciers au creuset, qui exigent l'usage exclusif d'aciers cémentés fabriqués au moyen des fers de Suède, c'est-à-dire de matières premières d'un prix très élevé.

On produit des aciers doux contenant seulement des traces de carbone et des aciers à très haute tension en carbure jusqu'à 4,06 0 /0.

De nos jours, on réalise d'une façon précise et presque mathématique des aciers de nuances définies, et on peut dire que le four électrique a le monopole de la fabrication des aciers fins et spéciaux, comme il en est ainsi pour les ferros-siliciums riches et les ferros-chromes à basse teneur en carbone.

Les électrométallurgistes visent aussi le relèvement de la qualité des aciers mi-fins, tels que ceux pour blindages, canons, etc., et même des produits courants, tels que les tôles pour chaudières, pour dynamos, les moulages d'acier, etc.

On peut aussi, avec le four électrique, réaliser une fabrication mixte, basée sur des principes analogues à ceux du procédé Witkowitz (convertisseur complété par un four Martin), ou de la méthode duplex Talbot (affinage de la fonte dans le Talbot et dans un four Martin), ou de la méthode Bertrand-Thiel.

Quoi qu'il en soit, à l'heure actuelle, l'électrométallurgie, qui ne pouvait limiter son champ à la fabrication des réactifs métallurgiques, a haussé ses vues au point de vouloir prendre les lieu et place du haut fourneau.

Celui-ci a, il est vrai, un grand rendement calorifique (près de 90 0 /0) ; mais il est d'une installation très coûteuse, demande une surveillance de tous les instants, ne peut supporter d'arrêts en cours de marche et sa consommation en combustible est énorme. Le four électrique, au contraire, a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une marche plus élastique, des frais de premier établissement abaissés dans de grandes limites ; il peut fonctionner d'une façon discontinue, n'emploie que peu de charbon et se présente comme facilement adaptable à toutes les exigences économiques.

L'énergie nécessaire pour la fabrication d'une tonne d'acier, par fusion et affinage électriques de déchets de fer et d'acier, est de 800 à 1.000 kilowatts-heures environ.

D'après les résultats d'exploitation d'un four électrique Girod de 1 à 5 tonnes, on peut estimer à 25 francs, dont 7 francs pour l'énergie électrique, c'est-à-dire 1.000 kilowatts-heures, le coût de transformation à ajouter au prix des riblons pour obtenir le prix de revient de l'acier pris dans la poche de coulée. Si on compte la tonne de riblons à 60 francs, on arrive ainsi au chiffre de 125 francs pour une tonne d'acier de qualité supérieure en lingots.

M. Gin a indiqué les chiffres suivants pour les divers moyens de production de l'acier : fabrication intégrale partant du minerai, 2.800 à 3.200 kilowatts-heures ; fabrication partant de la fonte solide, 1.000 à 1.100 kilowatts-heures ; partant d'un mélange de fonte et riblons solides, 850 à 1.000 kilowatts-heures ; partant de la fonte liquide, 450 à 600 kilowatts-heures ; partant de la fonte liquide et de riblons solides, 700 à 800 kilowatts-heures ; enfin, partant de l'acier inachevé d'un convertisseur ou d'un four Martin, 200 à 300 kilowatts-heures.

A l'usine de Livet, où on applique le procédé Keller en traitant les riblons, tournures de fer et d'acier de faible teneur pour en faire des fontes synthétiques ou ordinaires, on procède par une ou plusieurs opérations dans des fours accouplés. L'opération se fait soit par fusion et désulfuration, soit par fusion, déphosphoration et désulfuration. La dépense en énergie électrique est de 600 à 700 kilowatts-heures par tonne. Le prix de revient de la tonne de fonte est 66 francs environ. Le produit renferme : 3 à 3,5 0 /0 de carbone, 0,6 0 /0 silicium, 0,3 à 0,5 0 /0 manganèse, 0,04 à 0,06 0 /0 de phosphore et 0,01 0 /0 de soufre.

Dans les régions industrielles, où l'on ne dispose pas de forces motrices hydrauliques importantes et à bon marché, on a tout avantage à réduire le rôle du four électrique à celui d'appareil finisseur de charges d'acier liquide préalablement fondu au convertisseur ou au four Martin. Le résultat de cette opération est la réduction de la consommation d'énergie électrique à 300 kilowatts-heures environ par tonne, et une forte augmentation de production pour le four électrique.

Des installations de ce genre existent en France, en Allemagne et en Belgique.

Le coût de ce traitement électrique vient évidemment s'ajouter au prix de l'acier traité aux fours Thomas ou Martin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut l'évaluer de 20 à 30 francs par tonne, suivant le prix de revient de l'énergie électrique.

Dans d'autres installations, on traite au four électrique la fonte en fusion provenant directement du haut fourneau. Dans un premier four, on épure partiellement le métal en carbone et on le déphosphore en grande partie. Puis, un second four finisseur reçoit environ le tiers de la charge traitée dans le premier four, et l'on complète la charge de celui-ci par une nouvelle quantité de fonte.

Pour l'emploi du four électrique comme convertisseur, il faut un canal large, d'un accès facile, permettant de réparer et d'entretenir le revêtement ; il n'y a pas beaucoup de laitier ; l'opération est relativement longue. Lorsque le four est fixe, la décharge se fait par un trou de coulée. Si l'on part du métal froid, il faut laisser une partie de la charge pour la mise en marche ; quand on veut modifier la composition du produit, il faut donc passer par des charges intermédiaires à moins de décharger le four et de le remettre en marche avec une charge prise directement au cubilot. Dans le cas du raffinage, la charge est généralement considérable, le laitier abondant, la durée de l'opération courte ; le four doit donc être monté de manière spéciale et pouvoir basculer. Le mouvement est provoqué mécaniquement, hydrauliquement ou à l'aide d'un moteur électrique.

Il n'est possible de fabriquer commercialement de la fonte à un prix pouvant concurrencer le même produit de haut fourneau que si l'électricité ne dépasse pas 50 francs le cheval-an, et le coke, 35 francs.

En 1913, on comptait à la Praz : 1 four de 500 HP ; à Allevard, 8 fours Chapelet représentant 4.500 HP ; à Unieux, 2 fours Keller de 1.300 HP ; à Saint-Juery, 1 four Héroult de 700 ; aux forges de Châtillon, 1 four Kjellin de 500 HP ; aux usines métallurgiques de la Basse-Loire, 1 four Héroult de 800 HP ; chez Marrel frères, 1 four Girod de 800 HP ; à Livet 3 fours Keller de 900 HP ; à Homécourt, 1 four Rochling de 400 HP ; à Ugine, 6 fours Girod représentant 7.000 chevaux.

671. Fours de grande puissance. — D'après V. Engelhardt, la dépense en kilowatts-heure par tonne dans des fours de grandes dimensions se répartit comme suit :

Fonte obtenue directement du minerai	2.000 kw.-h.
Acier — — —	3.000 —
— — au moyen de fonte	1.500 —
— — — — en fusion	1.100 —
— — — — froide et de riblons froids	700 —
— — au moyen de fonte en fusion et de riblons froids	600 —
— — au moyen de riblons froids	900 —

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Épuration de fonte en fusion pour obtenir de l'acier très pur (acier au creuset).....	250 kw.-h.
Épuration de fonte en fusion pour obtenir de l'acier ordinaire (rails).....	120 —
Pour maintenir de la fonte en fusion, poids du moulage.....	58 —

Sous le rapport de la meilleure utilisation de l'énergie, il semble incontestablement que les fours de grande puissance doivent être avantageux. Quant au travail rationnel et continu des fours, il est bien du domaine des grandes ou fortes unités à grande puissance.

L'examen des fours en exploitation montre, pour des appareils à marche continue, que l'on doit y assurer l'indépendance des électrodes, c'est-à-dire être dégagées de la charge ambiante du four ; que la liaison de fond, c'est-à-dire l'apport du courant au fond du four, doit être évitée, et que la doublure du four doit être constituée par la charge même. Le refroidissement de la paroi du four est une nécessité depuis longtemps connue dans la pratique des usines de fer, et a été appliqué à bon escient.

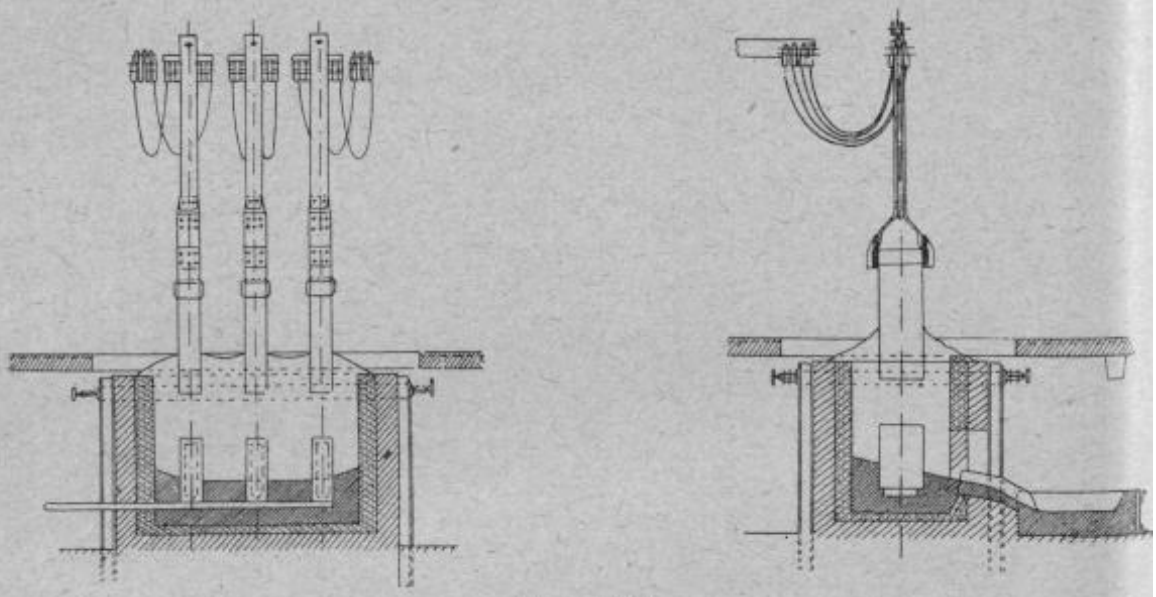


FIG. 1911.

En métallurgie électrique, il faut, comme dans la métallurgie ordinaire, tenir le mur du four le plus mince possible, et y appliquer de l'air du dehors ou le cuirasser de fer, ce qui agit comme radiateur. L'emploi d'eau comme moyen de rafraîchir le corps du four est exclu dans la fabrication du carbure à cause du danger de la production d'acétylène, mais il peut, au contraire, être pratiqué dans l'industrie des alliages ferreux.

La (*fig.* 1911) donne la disposition d'un four triphasé de plusieurs milliers de chevaux qui est le dernier mot de la nouvelle grande industrie. Il consiste en un creuset de maçonnerie, garni extérieurement d'une mature de poutrelles et revêtu à l'intérieur d'une paroi réfractaire. Pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la maçonnerie, considérant qu'il s'agit d'un procédé acide, on a employé de la brique de quartz avec du sable agglutinant comme liant ; le fond est formé de carbone foulé et on y ajoute un large fer méplat sur lequel, juste au-dessous des trois électrodes, sont placés, émergeant du bain, trois tronçons d'électrodes, tronçons qui ont, au point de vue des brevets, une grande valeur.

Comme nouveau progrès, il faut considérer le four à courant continu de 3.000 kilowatts pour la fabrication du carbure de calcium où le creuset y est si fortement élargi, que la maçonnerie est hors de portée de la plus

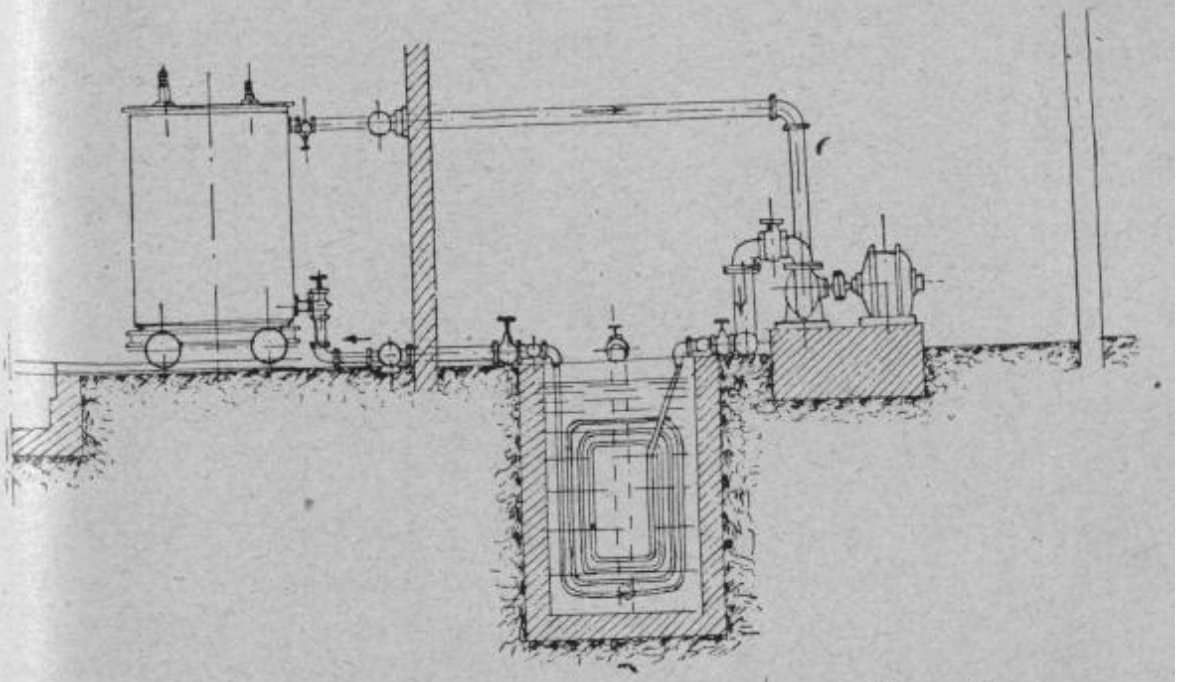


FIG. 1912. — Transformateur d'huile dans un serpentin pour l'alimentation des fours électriques.

haute chaleur et la paroi de la zone de fusion peut se former de la charge même du four. Le revêtement intérieur consiste en carbone appliqué immédiatement sur la plaque de fond, tandis qu'il est séparé du manteau de tôle par une couche de chamotte. La plaque de fond est, en vue du rafraîchissement par l'air, pourvue de rainures. Le dispositif de coulée à l'arc a été pour ces fours un élément vital.

En Norvège et en Autriche, on a mis en action des fours triphasés à carbure de calcium de 4.000-6.000 kilowatts dont la (*fig.* 1914) donne la disposition schématique. Devant le four, on voit le wagonnet de coulée qui supporte à l'extrémité d'une tige longue de 6 mètres l'électrode pointue de coulée à laquelle est amené, par un câble de cuivre, un puissant courant de branchement. Avec une telle installation on est à même de perforer par fusion des blocs de carbure et de scorie d'une force de 50 centimètres dans l'espace de vingt minutes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On admet, en général, que le rendement d'un four dépend en grande partie de l'application judicieuse de la densité du courant des électrodes ; toutes les dimensions du four, par suite, dépendent de cette densité d'ampérage, qui, à puissance fixe, établit les dimensions de l'électrode supérieure.

Si on vient à augmenter l'énergie dans un même type de four, en maintenant toujours identiques le voltage de travail et la densité de courant des électrodes, l'effet utile devient plus appréciable. Dans les fours triphasés, si l'on considère le type à trois électrodes suspendues et introduites en grande partie dans le mélange à traiter, et placées de manière que chacune reçoive un courant de phase, il est certain que l'influence du

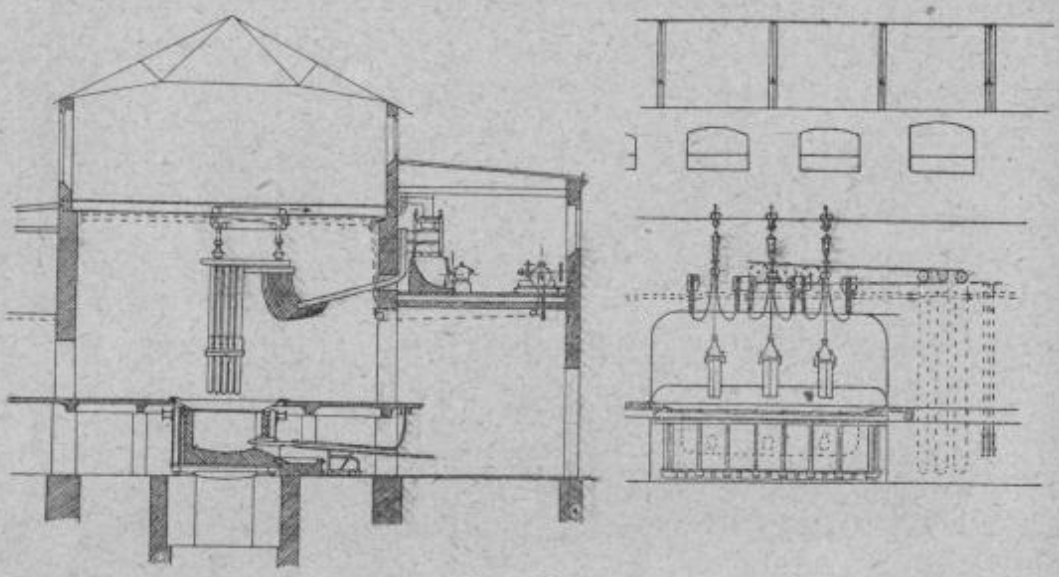


FIG. 1914.

voltage de travail est notable, étant donné que si entre les extrémités d'une électrode et le bain, il existe une tension de x volts, il en surgit une plus grande ($\sqrt{3} \times x$) entre les électrodes. On comprend facilement pourquoi la fermeture du circuit, à travers les parois et les parties supérieures sans que le courant passe par l'extrémité de l'électrode et par le matériel incandescent qui est au fond du four, est facile et préjudiciable. De plus, comme toutes les électrodes sont placées au-dessus du four, il est certain qu'à égalité d'énergie usitée sous un même voltage sur le bain fondu, et à égalité de densité de courant des électrodes, le four présentera une section plus grande comme total des zones de travail, par rapport à un autre four avec électrode au fond et une seule électrode au-dessus.

On a remarqué que dans des fours triphasés, où la marche continue et rationnelle était assez difficile avec une puissance de 600 HP, cette marche devenait facile avec 1.500 HP, même avec des voltages légèrement supérieurs, et tout à fait pratique au delà de 2.000 HP.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a construit des fours Kjellin permettant de traiter des charges de 8 tonnes ; mais on est allé plus loin, car il y a grand avantage à pouvoir reprendre, d'un seul coup, au four électrique, toute la charge d'un four Thomas ou d'un four Siemens-Martin.

Mais quand la charge augmente, la résistance du secondaire du four diminue, sa self-induction s'élève, le facteur de puissance décroît. Pour remédier à cet inconvénient, il faut abaisser la fréquence du courant [M. Kjellin est descendu jusqu'à 5 périodes par seconde(1)], et faire usage de machines génératrices spéciales très coûteuses. Mais par sa grandeur déjà, le four justifie, dans ce cas, l'installation d'un matériel particulier, car l'on récupère par les avantages que l'on retire d'un engin de grande capacité, le surcroît de dépenses d'installation.

Pour restreindre dans ces fours volumineux les pertes calorifiques, il faut recouvrir le four de voûtes, là où ce procédé est possible, et de couvercles mobiles dans les parties restées libres pour le chargement.

M. Valter Courad, qui a particulièrement étudié la marche des fours de carbure de calcium et de ferros-siliciums, a trouvé qu'un four de 3.000 kilogrammes, comparativement avec un four de 1.500 kilogrammes, ne demandait qu'un accroissement de 10 0/0 dans la consommation effective du courant. D'après le même praticien, il n'y a aucun doute que le travail électrique subséquent au procédé Martin fera sûrement son chemin, et que l'on emploiera pour les fours électriques des unités de la même grandeur que les fours à flammes d'aujourd'hui.

On arrive à des conditions plus acceptables avec les fours à induction à courant triphasé que ceux à courant monophasé. Des fours triphasés de 8 à 10 tonnes et à 25 périodes sont en fonctionnement. Les avantages de ce type de four sont de permettre l'emploi de génératrices à champ magnétique tournant, d'une construction peu coûteuse, et de pouvoir puiser directement le courant au circuit d'une station centrale, sans avoir à subir les pertes provoquées par une transformation.

Avec les fours simples, ouverts, on ne peut dépasser 3.000 kilowatts, parce que le dégagement des gaz résultant de la réaction est tel que des dispositifs de protection spéciaux sont nécessaires pour mettre le personnel et les canalisations à l'abri, et que ces dispositifs sont très compliqués pour les grandes capacités. Le chargement est en outre très difficile à la main, et il devient utile de pouvoir utiliser les gaz résultant de la réaction.

Ce sont ces considérations qui ont amené les constructeurs à envisager l'emploi des fours fermés. M. Helfeinstein a établi des appareils de cette espèce pour une capacité de 8.000 à 10.000 HP. Le chargement se fait

(1) Le four Kjellin installé à Volklingen est alimenté par un courant de 7.500-4.900 volts, 5 périodes. La puissance du four est de 750 kilowatts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le moyen de cheminées obliques débouchant de part et d'autre de l'électrode et pouvant contenir de 5.000 à 7.000 kilogrammes de matière. Le chargement est continu et s'effectue mécaniquement. De la même manière, on pourrait établir des fours fermés à trois électrodes ayant une capacité de 25.000 HP.

Les fours à électrodes paraissent les plus intéressants. On compte actuellement près de deux cents fours en marche ou en construction ; les fours Héroult viennent en tête, puis les fours Girod, Keller, Chaplet, Stassano ou Nathusius, Kjellin, Röhling, Frick, Niorth, etc. En 1913 la production a été de 160.000 tonnes d'acier, savoir : en France 21.000 tonnes, en Allemagne 89.000 tonnes, en Autriche-Hongrie 27.000 tonnes et États-Unis, 20.000 tonnes.

Les variations brusques de charge occasionnées par les fours à électrodes, employés généralement, ont pour effet de produire des surtensions importantes dans les lignes. En raison de l'intensité du courant secondaire, qui atteint parfois 40.000 ampères, celui-ci est le siège de pertes par courants de Foucault, souvent plus grandes que les pertes ohmiques elles-mêmes.

Les transformateurs ayant à supporter de telles charges doivent avoir toutes leurs parties soigneusement isolées, un espace de ventilation largement suffisant entre les bobines, être établis avec des tôles électrolytiques de grande homogénéité, posséder une forte réactance de court-circuit, et enfin il est nécessaire que la courbe de tension des génératrices alimentant les transformateurs se rapproche sensiblement de la sinusoïde pour éviter les surtensions produites par les phénomènes de résonance dus aux harmoniques supérieurs. Enfin, il convient, autant que possible, d'éviter les variations brusques de charge dans les fours.

On peut, sans hésiter, admettre pour ces puissants transformateurs une chute de tension inductive de 6 à 8 0/0.

Le tableau ci-après permet de comparer, au point de vue du poids et du mode de refroidissement, des transformateurs monophasés de grande puissance établis par différentes maisons de construction.

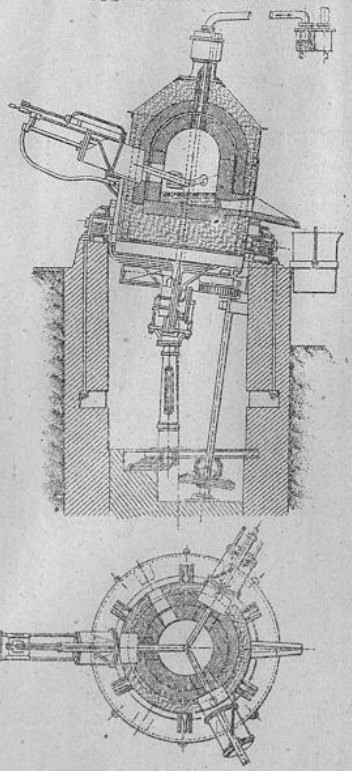
PUISSANCE en KVA	FRÉQUENCE	MODE DE REFROIDISSEMENT	POIDS total en tonnes	POIDS par KVA transformé en kilog	MAISONS DE CONSTRUCTION
6.750	50	Circulation d'huile.	38	5,63	Siemens-Schuckert.
10.000	60	Huile avec refroidissement par l'eau.	85	8,50	Gl Electric Co Shenectady.
2.200	60	*Id.*	26,2	11,80	*Id.*
3.060	50	Circulation d'huile.	14,5	4,75	Ateliers Oerlikon.
2.000	50	Ventilation forcée.	8	4 »	»
3.500	50	*Id.*	11,5	3,28	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

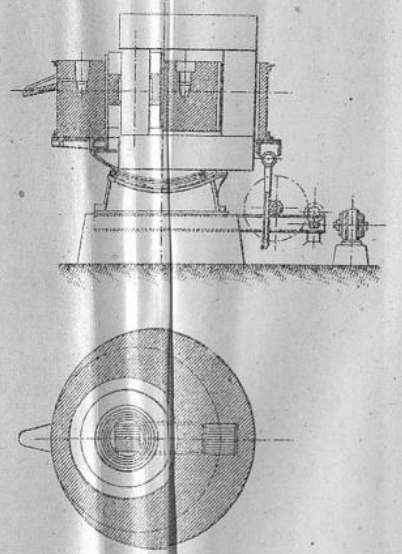
FOURS ÉLECTRIQUES DIVERS POUR LA FABRICATION DE L'ACIER

Planche XXIV.

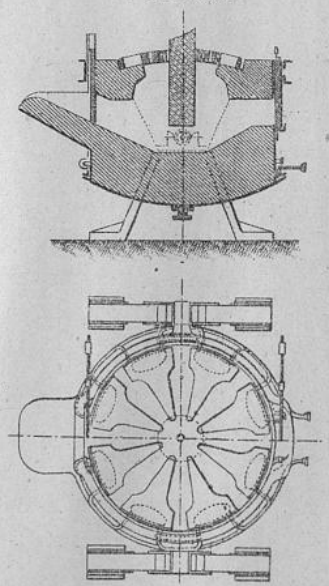
Four STASSANO tournant



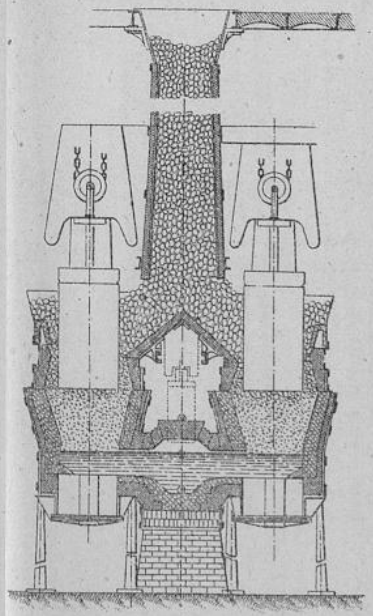
Four KJELLIN tournant



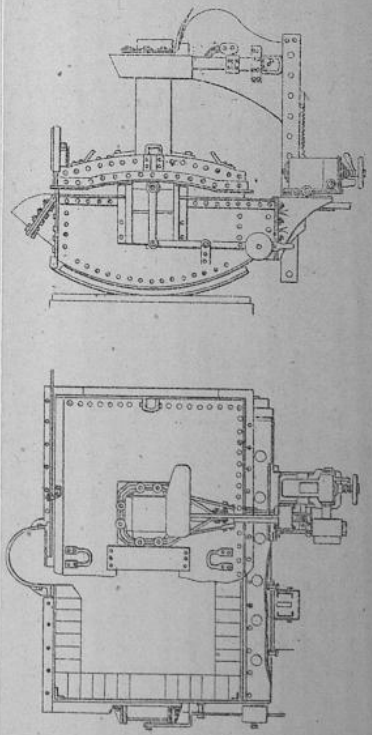
Four GIROD à électrode



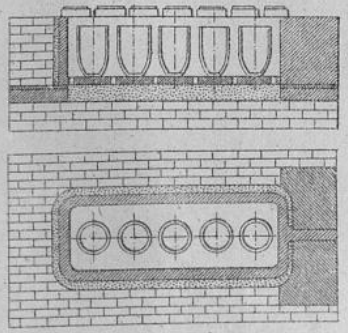
Four KELLER à pluralité de foyers



Four HEROULT à bascule



Four GIROD à creusets



ÉPREUVES MÉCANIQUES DES ACIERS DU FOUR KJELLIN

Numéros des Essais	Description des échantillons	Section de rupture Superficie en pouces carrés	Limite élastique Tonnes par pouce carré	Limite élastique Livres par pouce carré	Charge de rupture Tonnes par pouce carré	Charge de rupture Livres par pouce carré	Allongement % sur 203 millimètres ou 8 pouces de longueur ou 150 millimètres	Réduction % de superficie à la fracture	Rapport % de la limite d'allongement à la rupture	Point de flexion Tonnes par pouce carré	Point de flexion Tonnes par pouce carré	Distance en pouces de la fracture au point de soudage le plus près	Carbone %
43		0.385	29.50	66080	56.93	127.523	7.10 / 7.33	6.80	51.80	31.19	69.462	»	»
4	Barres rondes forgées	»	18.57	41600	32.14	72.000	22.00 / 22.40	56.12	57.73	20.39	45.836	1.75	»
5		»	16.23	36355	23.41	52.438	23.56 / 23.80	67.86	69.32	19.48	43.636	0.25	»
10		»	29.87	66918	47.93	107.364	15.53 / 15.96	39.50	62.33	32.47	72.732	2.25	0.600
11	Barres rondes forgées	»	28.88	64.716	47.10	105.506	16.05 / 16.40	42.08	61.35	31.18	69.144	3.00	0.700
12		»	33.27	75644	63.28	141.768	8.86 / 8.80	13.69	54.23	35.17	78.780	0.80	0.800
13			34.42	77.100	60.42	135.340	10.53 / 10.33	21.56	56.98	36.03	80.708	2.30	1.100

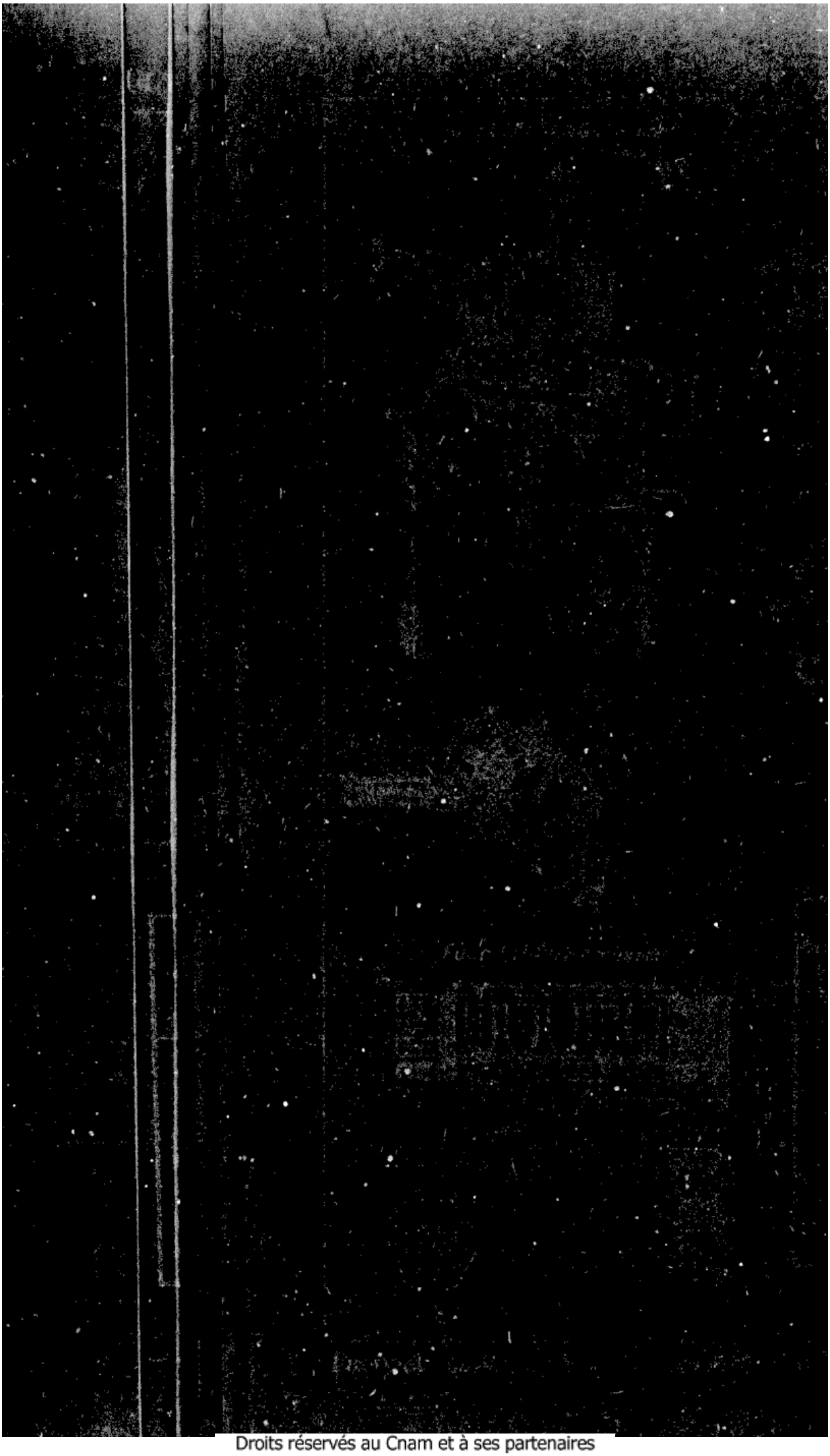
ÉPREUVES MÉCANIQUES DES ACIERS DU FOUR HÉROULT

Numéros des essais	Description des échantillons	Section de rupture Superficie en pouces carrés	Limite élastique Tonnes par pouce carré	Limite élastique Livres par pouce carré	Charge de rupture Tonnes par pouce carré	Charge de rupture Livres par pouce carré	Allongement % sur 203 millimètres ou 8 pouces de longueur ou 150 millimètres	Réduction % de superficie à la fracture	Rapport % de la limite d'allongement à la rupture	Point de flexion Tonnes par pouce carré	Point de flexion Livres par pouce carré	Distance en pouces de la fracture au point de soudage le plus près	Carbone %
6	Barre carrée	0.385	50.52	112.156	25.33	56.735	11.06 / 11.26	21.04	50.15	25.98	58.196	1.60	0.850
7	Barre ronde forgée	»	22.19	49.504	18.18	40.724	30.83 / 30.68	72.48	82.28	18.44	41.306	2.60	0.078
8	»	»	54.60	122.304	25.07	56.156	6.76 / 6.60	8.00	65.91	25.98	58.196	Point de soudage	1.016
9	»	»	24.69	55.026	19.48	43.636	22.20 / 22.20	69.90	70.61	20.13	45.090	2.50	0.122

DUNOD, Editeur, Paris.

Imp. L. BRAUN, Paris

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

672. Descriptions des fours employés pour la fabrication de l'acier. — Four Kjellin. — L'aciérie de Gysinge (Suède), qui produit quelques milliers de tonnes d'acier par an, utilise un four à induction du type Kjellin (Pl. XXIV), qui consiste en une construction en matière réfractaire dans laquelle est ménagée une rainure circulaire servant de creuset de fusion. Au centre se trouve un noyau feuilleté en fer de forme quadrangulaire et entouré de fils de cuivre. Une tuyère permet de refroidir le circuit primaire. Dans le type de 600 HP utilisé à Gysinge, le courant alternatif a 90 ampères et 5.000 volts, donnant au secondaire 7.000 ampères sous 60 volts.

Pour mettre l'appareil en jeu, on procède par la méthode *scrap process* ; on charge la rigole circulaire avec de la fonte et des riblons de fer ; puis, une fois la masse fondue, on ajoute un peu de fer manganésé (spiegel) ; on continue l'opération pendant une demi-heure et l'acier est prêt pour être coulé.

Un four prenant une puissance de 300 HP sur la turbine peut recevoir 1.800 kilogrammes de minerai et fournir 4.100 kilogrammes d'acier en vingt-quatre heures avec 165 kilowatts de dépense d'énergie. Chaque coulée fournit environ 1.000 kilogrammes d'acier, et le cheval-heure est produit à 0 fr. 015. Avec un four de 736 kilowatts, on réalise 35.000 kilogrammes d'acier par vingt-quatre heures, et l'on se trouve ainsi dans des conditions telles que l'acier électrique peut soutenir la concurrence avec l'acier des usines métallurgiques ordinaires.

Les coulées de fonte blanche (à 4 0/0 de carbone), de scrap, d'acier et de minerai aggloméré (Fe = 59 0/0, SiO^2 = 11 0/0 et CaO = 2 0/0) ont une durée de sept heures avec une consommation d'énergie de 1.128 kilowatts-heures pour une tonne rendue. Les opérations avec fonte blanche et riblons d'acier n'ont qu'une durée de cinq heures et demie et consomment 800 kilowatts-heures par tonne de métal, que l'on pense pouvoir réduire facilement à 600 kilowatts-heures.

L'acier fabriqué à Gysinge est de très bonne qualité et se comporte mieux à la trempe que l'acier ordinaire ; il est, de plus, très homogène. En particulier, l'acier au tungstène obtenu de cette façon permet d'avoir des aimants permanents plus puissants qu'avec l'acier ordinaire. La (planche XXIV) comporte un tableau qui renseigne sur la résistance mécanique de ces fers.

Aux usines d'acier Rochling frères, à Volklingen, on a installé un four Kjellin de 1.000 HP et d'une capacité maxima de 8 tonnes. Il est consacré à l'affinage des produits de la qualité Thomas. Il se compose d'une tôle de fer contenant le bâti de maçonnerie réfractaire à l'intérieur duquel est ménagé, dans une sole basique, le canal de fusion circulaire. Ce canal fermé, on laisse sécher le revêtement, puis on le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chauffe au moyen d'une charge préparatoire qui est reprise avant la charge définitive.

Cette chambre est fermée pendant l'opération, à l'aide de couvercles en matière réfractaire, à armature de fer ; la manœuvre de ces couvercles se fait à l'aide d'une petite grue pivotante.

Tout l'appareil est mobile sur deux tourillons dentés et mis en mouvement au moyen d'un segment denté fixé à l'enveloppe du côté opposé au bec et avec lequel engrène un pignon.

L'axe de celui-ci reçoit le mouvement, par l'intermédiaire de roues d'angle et d'engrenages réducteurs, d'un moteur électrique triphasé de 13 kilowatts, 50 périodes, 400 volts, 750 tours par minute.

Par mesure de précaution, le four est muni d'un trou de coulée, qui permet de le vider sans qu'on ait à le faire basculer.

L'alternateur qui commande le four a une puissance de 1.188 kilowatts, sous 4.500 volts, 5 périodes et pour un $\cos \varphi = 0{,}63$.

On connaît tout l'avantage qu'il y a à produire un mouvement de la matière traitée dans les fours électriques, de façon à permettre l'équilibre de la température.

M. Kjellin, à cet égard, a fait breveter un dispositif (brev. n° 375.192) en vue d'une circulation plus rapide de la matière, telle que la différence de température dans les canaux à la chambre de fusion devienne très faible. Ce résultat est obtenu par l'emploi de plusieurs moyens mécaniques dont le mouvement de balancement est donné aux fours, par l'immersion intermittente d'un corps réfractaire dans la matière fondue, par l'introduction de ce même corps en lui donnant un mouvement longitudinal de va-et-vient et par le mouvement du four autour d'un axe incliné.

Four Cowley. — Ce four, de forme cylindrique (*fig.* 1915), comporte une partie tronconique à sa partie supérieure et un creuset à la partie inférieure. A mi-hauteur environ de la hauteur du creuset est disposée une couronne formée de plombagine et d'argile ; une autre couronne semblable est placée à l'étranglement qui existe entre le haut du creuset et la partie inférieure de la cheminée du four. Le courant électrique arrive dans l'appareil par les couronnes qui constituent une résistance et les matières sont chauffées à leur contact. Le prix de revient de la tonne d'acier, au moyen d'un four d'un rendement de 100 tonnes par jour, ne dépasse pas 60 francs, le cheval-an étant compté 75 francs, la tonne de coke 10 francs et la tonne de minerai 17 fr. 50.

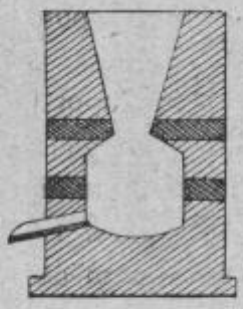


Fig. 1915.

Four Stassano. — Ce four, représenté schématiquement par la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(*fig.* 1916) est chargé au moyen d'un dispositif spécial placé en haut de l'appareil. Le minerai (carbonate de fer) mélangé à du charbon et de la chaux est préalablement pulvérisé, réduit en pâte et transformé en briquettes que l'on introduit dans le four. Sous l'action de la température développée par l'arc voltaïque, les briquettes se décomposent et donnent avec le charbon, de l'acide carbonique qui se transforme en oxyde de carbone.

L'arc électrique se produit à quelques décimètres au-dessus du bain dans l'espace libre du four. Sa chaleur ne peut agir sur le bain que par rayonnement de la couche de scorie. L'échauffement se produit d'une manière toute semblable à ce qui se passe au four à flammes.

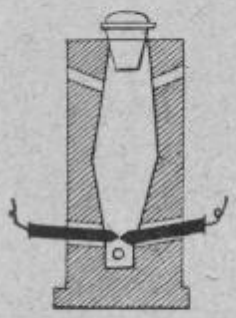


FIG. 1916.

Dans des fours plus récents, le minerai, le fondant et le charbon sont jetés dans l'appareil sous forme de poudre, et l'appareil reçoit un mouvement de rotation d'un axe légèrement incliné par rapport à la verticale pour faciliter le mélange.

La dépense d'énergie est de 4.220 HP par tonne de métal, dont le prix de revient est sensiblement le même que celui des hauts fourneaux.

Le four tournant Stassano (Pl. XXIV) est constitué par une cuirasse métallique, en forme de cylindre, se terminant à la partie supérieure par une partie en tronc de cône. Elle est revêtue à l'intérieur de matériaux réfractaires et, dans la chambre de fusion pénètrent les électrodes produisant un arc voltaïque au-dessus de la sole du four et à distance convenable. Les électrodes sont reliées, par l'intermédiaire de cylindres métalliques à double paroi et de cordons flexibles, au collecteur du courant placé dans la partie inférieure de la carcasse.

Dans les parois desdits cylindres circule un courant d'eau à l'effet de refroidir la partie métallique du porte-charbon et l'électrode même. Un cylindre hydraulique, pénétrant dans chacun des porte-charbons, sert à la manœuvre de l'électrode et assure son mouvement d'avancement.

L'ensemble du four repose sur une couronne métallique munie de rouleaux tronconiques, laquelle s'appuie à son tour sur un rail circulaire en fonte où la couronne peut librement tourner. Un train d'engrenages droits, commandé par un train d'engrenages coniques, sert à imprimer un mouvement de rotation à tout le four autour de son axe de figure. Les connexions électriques sont établies de façon à assurer les contacts nécessaires dans les diverses évolutions du four.

Des ouvertures différentes sont aménagées pour la sortie de la matière traitée, pour le chargement du four et pour l'expulsion des gaz qui se pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duisent dans la chambre de fusion pendant le travail ; cette dernière ouverture est pratiquée de telle sorte que l'air atmosphérique ne puisse circuler librement dans la chambre de fusion, et qu'en ouvrant la porte il ne s'établisse des courants d'air. Avec de telles dispositions, le temps nécessaire pour produire les réactions est réduit au minimum, de manière qu'on peut toujours travailler à pleine charge et obtenir le maximum d'utilisation de l'énergie employée.

Aux aciéries de Turin se trouvent en opération : un four rotatif de 200 HP, un autre de 1.000 HP du même système, ainsi que trois fours stationnaires dont un de 1.000 HP, et deux de 200 HP. Ces derniers, quoique un tiers meilleur marché, ne peuvent être utilisés que pour de simples fusions, telles qu'on les opère dans le four Martin. Les fours rotatifs coûtent respectivement 21.000 et 52.000 francs, et sont capables de produire 1,5 à 3 tonnes, et 16 à 18 tonnes dans vingt-quatre heures. Le four stationnaire de 100 HP coûte environ 3.500 francs, et produit à peu près une tonne par vingt-quatre heures. Pour alimenter ces fours, le courant triphasé de 21.500 volts est pris au réseau public et réduit en courant monophasé à 80 volts pour le four de 100 HP, à 100 volts en courant diphasé pour celui de 200 HP et à 100-150 volts pour celui de 1.000 HP.

Le four de 100 HP est alimenté par du monophasé et prend du courant jusqu'à 100 ampères. L'autre four de 200 HP est triphasé, et celui de 1.000 HP a six électrodes et prend 1.800 ampères sur chaque phase.

La quantité d'énergie nécessaire s'élève : dans les fours de 200 HP, pour la transformation directe du minerai en fer ou en acier, à 4,2-4,5 kilowatts-heures par kilogramme ; dans le four de 100 HP, pour la production d'alliages tirés du minerai, à 6-7,5 kilowatts-heures par kilogramme du produit de fusion ; dans le four de 200 HP, pour l'affinage de l'acier destiné à la fabrication des projectiles, des cadres d'automobiles, etc., à 1,25 kilowatt-heure par kilogramme d'acier ; dans le four de 1.000 HP, pour la fabrication des lingots d'acier, à 0,958 kilowatt-heure ; dans le four tournant de 1.000 HP également, à 0,918 kilowatt-heure par kilogramme d'acier raffiné.

La consommation moyenne d'électrodes par tonne d'acier produite s'élève à 10 kilogrammes ; le revêtement intérieur revient à 10-15 francs par tonne d'acier.

Four Schneider et Cie. — Il est du type à induction ; il consiste, en principe, en un grand réservoir ou cuve reliée à deux tubes rectilignes passant entre les branches d'un noyau magnétique en fer feuilleté portant l'enroulement primaire. Un des tubes est horizontal, l'autre est incliné. On a cherché dans cet appareil à utiliser le principe des chau-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dières à circulation d'eau dans les tubes, en chauffant par induction un tube relié à un réservoir et rempli de métal fondu pour provoquer et entretenir la température nécessaire dans le bain métallique. L'appareil permet d'obtenir de grandes masses de métal et un affinage comme dans le four Stassano.

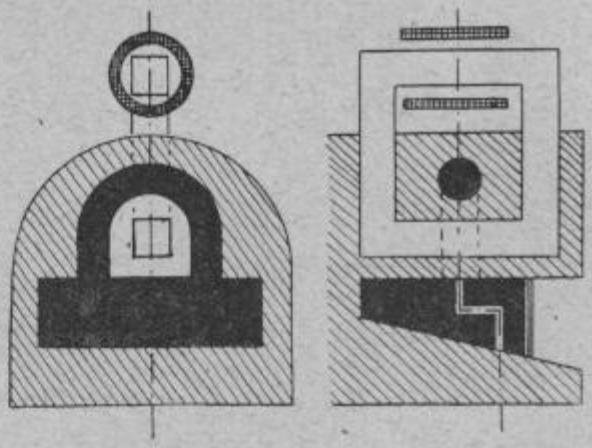


Fig. 1917. — Schéma du four Schneider.

Four Rochling-Rodenhauser. — Ce four est une combinaison du four Kjellin avec le four à chauffage direct par résistance. Il a sur le four Kjellin simple, entre autres avantages, celui de permettre l'exécution des opérations métallurgiques sur une sole, comme dans le four Siemens-Martin. Au point de vue électrique, le Rochling-Rodenhauser possède les qualités fondamentales suivantes : les deux branches du fer peuvent recevoir un enroulement ; le secondaire est en forme de ∞ ; sa section est réduite et sa résistance augmentée ; la sole étant chauffée directement, le facteur de puissance est relevé ; il en résulte que, pour les capacités ordinaires, on peut conserver une fréquence de 50 périodes, et que, même avec les gros appareils, on peut ne pas descendre au-dessous de 15 périodes.

Le rendement est légèrement supérieur à celui du four Kjellin, lequel est de 50 0/0 dans les unités moyennes et peut atteindre jusqu'à 80 0/0 dans les engins de grande capacité. Par suite de l'inégale perméabilité du champ, le flux produit, dans le fer traité, une force radiale horizontale qui, combinée avec l'action de la pesanteur, donne une résultante oblique. En vertu de ce phénomène, la masse liquide incline sa surface vers l'intérieur du four ; de ce fait, on obtient un refroidissement plus rapide sur le bord extérieur, et des courants de convection circulaires qui assurent le mélange parfait du produit.

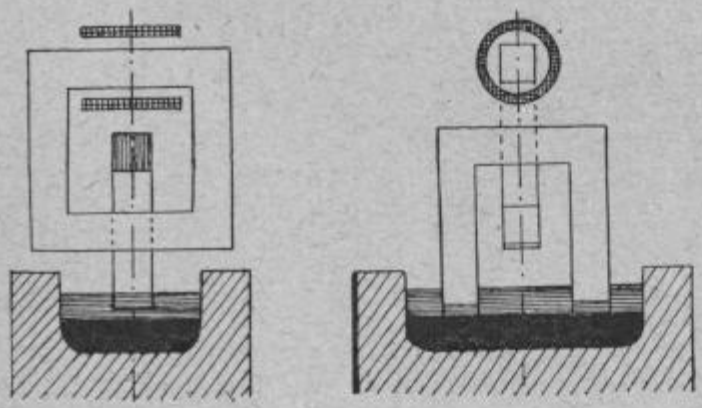


Fig. 1918. — Schéma du four d'induction Hjorth.

Le four Rochling-Rodenhauser à courant monophasé se compose d'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

corps ayant en plan une section à peu près ovale et formant une cuvette doublée d'une garniture basique. Dans l'intérieur de cette cuvette, sont ménagées deux ouvertures verticales entourées de fourreaux réfractaires par lesquelles passent les deux noyaux verticaux du transformateur. La partie de la cuvette de ce four destinée à recevoir le métal est constituée par trois canaux parallèles : deux, contournant extérieurement les noyaux, et un canal central de grande section, entre ces deux noyaux.

Le primaire du transformateur est formé par deux bobines ; son secondaire, d'une part, par l'anneau de métal liquide contenu dans les canaux, d'autre part, par les deux bobines à basse tension.

Ces dernières sont reliées à deux électrodes, en contact direct avec des murettes construites en matières qui deviennent conductrices aux températures élevées et transmettent alors le courant des bobines à basse tension au bain métallique liquide. Avec ce dispositif, l'usure des électrodes est très réduite. Les connexions entre les bobines et les électrodes sont faites de telle sorte que les courants induits directement dans le bain et circulant entre les électrodes soient toujours dirigés dans le même sens à travers le métal.

Pour faciliter la coulée, ce four est monté sur des galets roulant le long d'un rail concave ; son inclinaison dans le sens de la longueur des canaux est obtenue au moyen de deux pistons hydrauliques. Les pertes de chaleur par radiation sont réduites autant que possible, grâce aux couvercles placés sur les canaux et aux deux portes qui ferment hermétiquement les ouvertures de chargement et de coulée terminant le canal central. Enfin les bobines du transformateur sont protégées contre l'élévation de température par une enveloppe en cuivre mince dans l'intérieur de laquelle circule de l'air amené par les tubes. Avec cet appareil, la consommation de courant par tonne d'acier varie entre 200 et 300 kilowatts-heures. Un four de 3 tonnes de ce genre fonctionne à l'usine de Volklingen (Allemagne).

Le nouveau four à courant triphasé Rochling-Rodenhauser (*fig.* 1919 et 1920) qui est de forme circulaire, est assez analogue à celui monophasé décrit ci-avant. Les fils des trois enroulements induits sont connectés : d'une part au point neutre, d'autre part, et pour chacun d'eux, à l'un des contacts des parois intérieures de ce four. Celui-ci est muni de trois portes de chargement, par lesquelles on introduit le métal, soit à l'état liquide, soit en grenailles, ainsi que les matériaux additionnels.

Les culasses de la carcasse magnétique ont une forme spéciale en fer à cheval, qui n'établit pas de connexion magnétique directe entre deux des noyaux, et ce dispositif a pour but de créer à travers le bain métallique un brassage énergique de la masse du métal en travail.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le bain métallique se trouve dans un espace central, formant chambre de travail, et communiquant avec trois rigoles formant boucles, contenant également du métal en fusion, et qui sont le siège des courants induits. Dans l'espace central de chacune de ces rigoles, passe l'une des branches

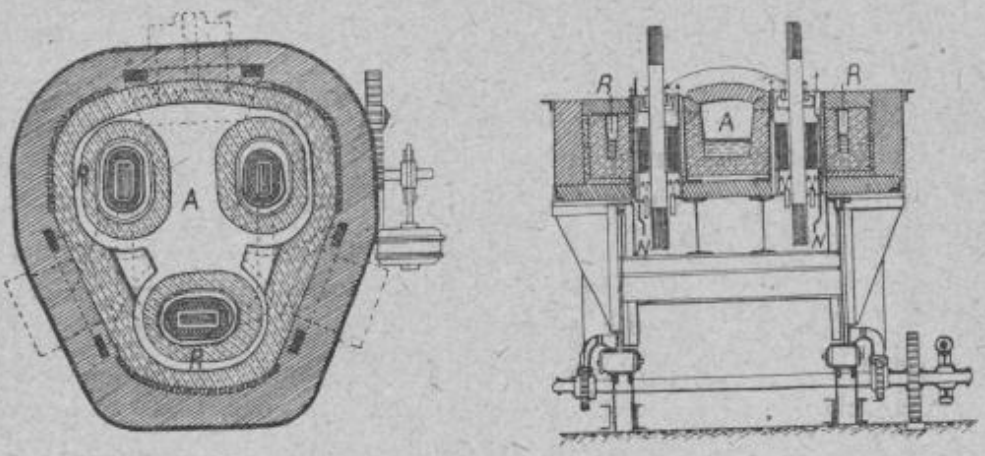


FIG. 1919.

du circuit magnétique. Chacune de ces branches porte une bobine primaire recevant une des phases du courant inducteur, et un enroulement secondaire, utilisé pour la chauffe par résistance du métal contenu dans la chambre de travail. Les trois enroulements primaires peuvent être montés soit en triangle, soit en étoile. Les circuits des bobines secondaires sont complétés par des pièces polaires logées dans la partie des

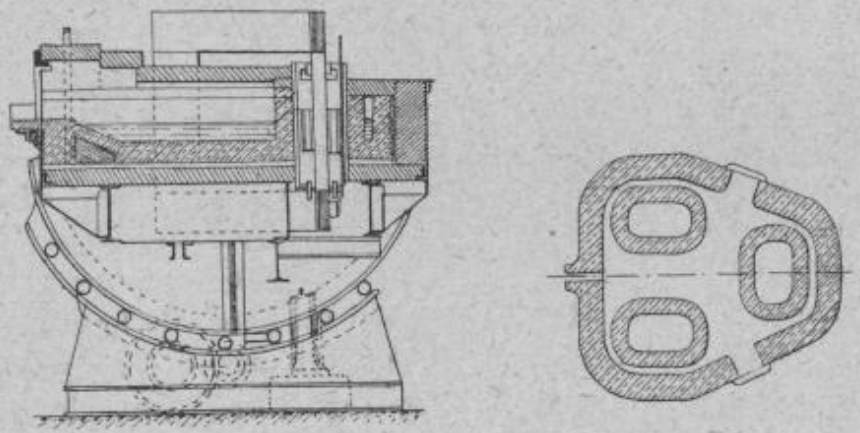


FIG. 1920.

parois formant promontoire entre les boucles, par ces parois elles-mêmes et par le bain métallique. Ces circuits, entièrement protégés, sont refroidis d'une façon satisfaisante en y injectant de petites quantités d'air froid.

Le four est recouvert de pièces voûtées, dont l'enlèvement n'est nécessaire que lors des réparations. L'introduction des charges (fer fondu,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaux, etc.) se fait sans difficulté, ainsi que l'enlèvement des scories, par les deux portes de travail situées à la partie postérieure de l'appareil. Pour vider le four de sa charge métallique, on l'incline en avant, et on n'a qu'à recueillir dans des poches le métal sortant du trou de coulée.

La conduite des fours triphasés se rapproche beaucoup de celle des fours alternatifs.

A Volklingen, les fours sont munis par compression de leur revêtement, ce qui peut se faire très rapidement ; d'ailleurs, l'usure est assez faible et le renouvellement du revêtement n'est indispensable qu'au bout d'un certain nombre de chauffes. Ce travail exige environ huit heures. Deux heures suffisent ensuite à replacer les pièces voûtées formant couvercle. La calcination du four dure ensuite quatre heures, au bout desquelles l'appareil est prêt à recevoir sa première charge. A Volklingen, on emploie comme première charge du fer brut, et on amène ainsi le four à sa température de travail, cette phase nouvelle durant également quatre heures. Toute cette période de chauffe absorbe, pour un four alternatif de 3 tonnes 1/2 environ, 2.000 kilowatts-heures, et pour un four triphasé de 1 tonne 1/2, à peu près 1.500 kilowatts-heures. Nous retrouvons là le fait déjà souvent signalé dans d'autres fours, que la consommation d'énergie dans la période de chauffe est, toutes proportions gardées, d'autant plus faible que la contenance du four est plus grande.

Deux points, dans l'appareil que nous venons de décrire, méritent d'attirer particulièrement l'attention. Ce sont le mode de calcination et de chauffage du four neuf, et la pratique consistant à maintenir le four chaud dans l'intervalle de ses périodes de service.

On supprime pour la chauffe les anneaux de fer doux que l'on plaçait dans les rigoles de fusion, et que l'on amenait au rouge vif par passage du courant. On devait ensuite charger avec du métal liquide, fondu à part au creuset ou au four à réverbère. C'est avec cette charge que l'on amenait l'appareil à la température nécessaire aux opérations de l'affinage. Ici, l'anneau de fer est placé à l'intérieur des parois du four. Il échauffe ainsi ces parois, puis la charge, que l'on introduit solide, par morceaux, jusqu'à ce que celle-ci soit elle-même amenée à l'état liquide. Un autre progrès consiste à maintenir le four chaud lorsqu'il n'est pas en service. Ce maintien est obtenu à l'aide d'un courant égal au tiers ou au quart du courant normal.

Le four étant enfin prêt à fonctionner, on le charge d'acier Thomas sortant du convertisseur ; le travail ultérieur est le même que dans le cas des fours alternatifs. On ajoute au bain de la chaux calcinée, puis des battitures ou du minerai. Cette scorie de déphosphoration reste environ une heure en contact avec le métal. Ce laitier une fois enlevé, c'est le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moment, pour les aciers carburés, d'ajouter après analyse le carbone nécessaire. On introduit ensuite un laitier, destiné à la désulfuration, en ajoutant de la chaux ; on la laisse agir jusqu'à ce que le bain métallique n'émette plus de flammes par dégagement de gaz.

Cette deuxième scorie doit être blanche et ne pas contenir de fer ; elle se résout à l'air en une poudre blanche. La désoxydation du bain se termine ensuite par addition de ferro-silicium.

Pour obtenir des aciers très durs, on désulfure à l'aide du manganèse en élevant la température aussi haut que possible.

On coule immédiatement les aciers carburés, tandis que pour les aciers alliés, on fait à ce moment les additions nécessaires.

Comme nous allons le voir, le contenu du four est animé d'un vif mouvement de rotation, qui amène rapidement l'homogénéité du mélange.

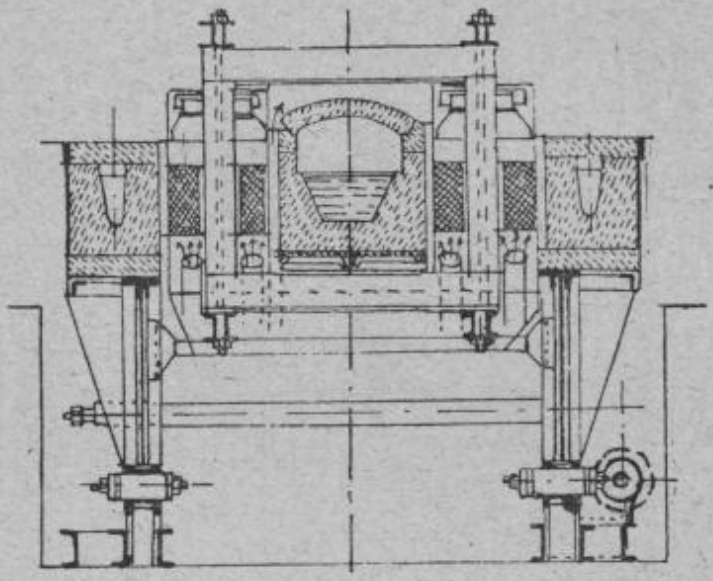


FIG. 1921. — Coupe verticale d'un four monophasé Rochling-Rodenhauser.

A l'intérieur du four, il se forme, grâce aux trois boucles, un champ tournant, comme dans les moteurs triphasés, et il en résulte que le contenu du four, agissant comme rotor d'un tel moteur, se met en mouvement.

Les fours qui nous occupent sont les seuls où ce mouvement s'effectue de la sorte. Rappelons-nous en effet qu'il ne se passe rien d'analogue dans les fours à arc, où les parties métalliques les plus chaudes et les plus légères ont constamment tendance à demeurer à la surface. Toutefois, dans le four Stassano, on a cherché à obtenir par des moyens mécaniques un résultat analogue. Cette agitation de la masse du bain exerce naturellement une excellente influence sur la marche du processus métallurgique, toutes les parties du métal se trouvant amenées en contact sans cesse renouvelé avec le laitier, et le travail d'affinage en est considérablement accéléré.

Le produit terminé possède une homogénéité parfaite ; nous ne pouvons mieux faire pour les mettre en évidence que de rapporter les résultats des recherches effectuées par l'usine Poldi, de Kladno (Bohême) sur les fours de Volklingen.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En sept points du four triphasé furent prélevés, en six minutes, des échantillons. Voici les résultats de l'analyse chimique de ces échantillons :

N°s	CARBONE	MANGANÈSE	SILICIUM	PHOSPHORE	SOUFRE	CHROME
1	0,81	0,27	0,335	0,031	0,007	1,00
2	0,77	0,25	0,340	0,030	0,008	1,00
3	0,85	0,28	0,345	0,029	0,007	1,00
4	0,82	0,27	0,335	0,030	0,009	0,99
5	0,83	0,25	0,335	0,030	0,009	0,98
6	0,78	0,27	0,419	0,031	0,010	0,99
7	0,79	0,28	0,326	0,030	0,009	0,98

Une demi-heure plus tard, le four ayant été coulé, un échantillon prélevé dans la poche a donné :

Carbone.....	0,77	Phosphore.....	0,031
Manganèse.....	0,29	Soufre.....	0,009
Silicium.....	0,396	Chrome.....	0,99

Voici maintenant des données sur les essais mécaniques auxquels furent soumis quelques-uns de ces échantillons :

Essai au choc

Poids du marteau : 800 kilogrammes. — Portée de l'échantillon : 1m067

N° DU CHOC	HAUTEUR DE CHUTE	KILOGRAMMÈTRES	FLEXION	N° DU CHOC	HAUTEUR DE CHUTE	KILOGRAMMÈTRES	FLEXION
	ÉCHANTILLON N° I				ÉCHANTILLON N° III		
1	7,6	6.080	60°	1	1,875	1.500	16°
2	5,0	4.000	redressé	2	»	»	30°
3	8,1	6.480	74°	3	»	»	41°
4	5,5	4.400	redressé	4	»	»	49°
5	8,5	6.800	90°	5	»	»	58°
6	8,5	6.800	brisé	6	»	»	67°
	ÉCHANTILLON N° II			7	»	»	76°
				8	»	»	84°
				9	»	»	92°
1	8,5	6.800	66°	10	»	»	100°
2	5,0	4.000	redressé	11	»	»	109°
3	8,5	6.800	80°	12	»	»	117°
4	6,1	4.880	brisé	13	»	»	125°
				14	»	»	135°
				15	5,000	4.000	brisé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Essai de dureté de Brinell

Diamètre de la bille : 19 millimètres — Pression : 51.000 kilogrammes.

	ÉCHANTILLON I	ÉCHANTILLON II	ÉCHANTILLON III
Profondeur de l'empreinte (en millimètres)	3,4	3,4	3,5
Coefficient de dureté	25.032	25.032	24.318

Essai à la traction

N° DE L'ÉCHANTILLON	LONGUEUR en millimètres	DIAMÈTRE en millimètres	CHARGE DE RUPTURE en kg par mm²	ALLONGEMENT 0/0	CONTRACTION 0/0
1	200	24,9	86,9	12,25	21,0
2	200	24,9	88,9	12,25	16,6
3	200	25,0	86,5	13,50	20,4

Quant aux prix de fabrication, Welding a donné, d'après les résultats constatés à Volklingen, les évaluations suivantes, pour un four de 5 tonnes :

Fours et accessoires, frais d'installations		212.500	francs
Intérêt à 5 0/0. Amortissement à 10 0/0 l'an		31.875	—
Soit, à raison de 250 jours de travail et 8 coulées de 5 tonnes par jour		3 fr. 1875	par tonne
Consommation d'énergie, 300 kwh à 0 fr. 0625	18	7500	—
Fondants et pertes en fer	1	8750	—
Frais de revêtement (1 revêtement supportant 100 coulées)	3	1250	—
Mise en feu	1	2500	—
Salaires (3 ouvriers à 6 fr. 25 faisant 4 coulées)	0	9395	—
		29 fr. 1250	par tonne

Remarquons toutefois que le coût de l'énergie électrique dépensée serait réduit de moitié si les génératrices étaient actionnées par des moteurs à gaz de haut fourneau, au lieu de moteurs à vapeur.

On obtient la tonne d'acier, équivalente à celle du creuset d'acier, avec une dépense de 200-300 kilowatts-heures.

La durée du traitement est de deux à trois heures, et le facteur de puissance varie entre 0,8 et 0,7. La fabrication des aciers pour moulages demande une dépense de 900 kilowatts-heures par tonne d'acier extraite du four.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quant au prix de revient de l'acier fabriqué dans le four de 1 tonne et demie en marche à Volklingen, il est évalué à 130 marks environ (162 fr.50) par tonne d'acier de moulage obtenu en chargeant des grenailles solides, y compris les frais d'amortissement et d'entretien du four, mais sans compter les redevances pour l'exploitation des licences.

On s'est également servi du four de Volklingen, pour fabriquer, dans de bonnes conditions économiques, plus de 3.000 tonnes d'acier pour rails, en y raffinant pendant quelques minutes l'acier provenant des convertisseurs Thomas. On obtient un acier beaucoup plus homogène et plus compact.

Le dernier perfectionnement est la création d'un appareil diphasé donnant une économie considérable d'énergie électrique en réduisant les pertes par rayonnement et en améliorant les conditions de fonctionnement au point de vue électromagnétique. Ce système est supérieur au four monophasé lui-même.

De plus on peut alimenter le four diphasé avec des courants de fréquence ordinaire sans recourir à des générateurs spéciaux à basse fréquence. Le réglage du four s'effectue en agissant à la main sur le transformateur alimentant l'appareil.

Un four de 8 tonnes reprenant l'acier d'un Bessemer peut affiner 48 à 50 tonnes d'acier en vingt-quatre heures avec un courant d'énergie de 250 à 300 kilowatts-heure par tonnes d'acier.

Le four Roeckling-Rodenhäuser est une application très rationnelle du four à acier. Il a prouvé avec succès son utilité et sa capacité productive. Les résultats comme qualité et consommation peuvent soutenir la comparaison avec tous les autres systèmes, mais ce qui distingue particulièrement ce four, c'est sa simplicité de construction, sa grande surface de chauffe libre, sans encombrement d'aucune électrode, l'accès facile du travail et surtout le brassage automatique du bain de métal.

Fours Gin. — M. Gin a modifié successivement les dispositions adoptées primitivement dans son système de four à canal, qui consistait d'abord en un bloc réfractaire enroulé d'une enveloppe métallique, bloc portant le creuset-métal. Les prises de courant étaient fournies par d'énormes blocs en acier.

Fours à canaux et à cuvelles. — La (*fig.* 1922) représente un four de ce genre absorbant 7.200 kilowatts (60.000 ampères sous 120 volts) et pouvant produire, par affinage de fonte liquide, 35 tonnes d'acier en vingt-quatre heures.

Dans cet engin, le chauffage et les opérations de réduction ou d'affinage sont faits dans des capacités différentes ; elles ont lieu dans des cuvettes A qui communiquent entre elles et avec les prises de courant B,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

continuées par les conducteurs concentriques *b* et *c*, et par les canaux de chauffage proprement dits. Le métal, une fois fondu, remplit le canal aboutissant à une cuvette pour arriver à l'orifice de coulée, de façon à ce qu'il y ait constamment une circulation de fonte liquide dans toutes les parties du four. Avec ce genre d'appareil, le prix de revient de la tonne de métal est inférieur à celui des fours à houille, dans les régions où l'énergie hydraulique peut être obtenue à un prix peu élevé.

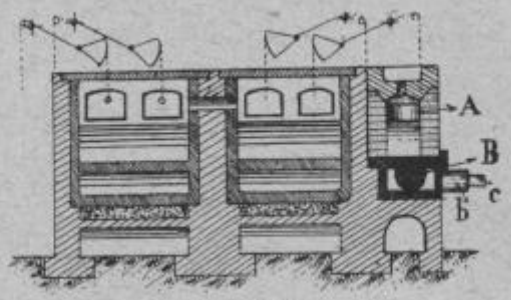


FIG. 1922.

Avec le procédé par oxydation, la production d'une tonne d'acier exige, d'après M. Gin : 924 kilogrammes de fonte, 320 kilogrammes de minerai de fer à 75 0/0 de Fe^2O^3 et 56 kilogrammes de chaux. Quant au procédé mixte, il faut compter : 670 kilogrammes de fonte, 210 de Fe^2O^3, 45 de chaux et 285 de riblons.

Le *four à induction Gin* affecte la forme rectangulaire et comporte des canaux placés parallèlement, inclinés longitudinalement et réunis par des conduits à section circulaire dits conduits de chauffage, qui mettent en communication l'extrémité profonde de chaque canal avec l'origine moins profonde du canal suivant.

L'enroulement du circuit primaire est constitué par du cuivre isolé, et le courant secondaire est le métal en fusion. Un ventilateur extérieur envoie un courant d'air qui se répartit autour d'un noyau magnétique et des bobines primaires, de manière à refroidir continuellement le circuit primaire et les tôles de l'inducteur. Le garnissage du four (qui est un caisson en tôle) repose sur une assise en briques de magnésie ; il est formé par de la dolomie pilonnée et agglomérée au goudron comme les soles du four Martin. La voûte est faite au moyen de pièces réfractaires.

M. Gin établit comme suit le prix de revient de l'acier électrique, en supposant que les fours électriques reçoivent directement du haut fourneau la fonte de première fusion, dans le cas de fours de 650 kilowatts et pour une production de 30.000 tonnes d'acier par an :

Fours : $30.000 \times 540 = 16.200.000$ kilowatts..
Cowper et appareils mécaniques :
$330 \times 8.000 = 2.640.000$ kilowatts.
} Ensemble 18.840.000 kilowatts,

soit, pour 8.000 heures de travail annuel, une puissance de 2.355 kilowatts.

Par le procédé mixte, on arrive à 20.400.000 kilowatts-heures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les dépenses sont fixées comme suit pour la méthode *ore process* :

a) Frais d'administration et de direction	72.000f
b) Production de la fonte (minerai 14 fr., scories 3 à 6 fr., boccages 46 fr., castine 6 fr., coke 20 fr. la tonne)	1.328.000
c) Transformation en acier (chaux 20 fr., ferros-alliages 250 fr., chromate de fer 110 la tonne)	268.000
d) Énergie électrique, 2.400 kilowatts-an (en nombre rond) à 75 francs	180.000
e) Main-d'œuvre, 40.000 journées à 4f,50	180.000
f) Entretien et réparations, frais généraux par tonne d'acier fini, environ 80 francs	160.000
TOTAL	2.388.000f

FOURS HARMET. — Ce four comprend un appareil destiné à la fusion des minerais, puis un autre pour la réduction, et un troisième pour la mise au point du métal. L'énergie électrique nécessaire arrive dans le four par plusieurs blocs de charbons pénétrant au-dessus de la sole du four de fusion.

Dans l'appareil réducteur sont ménagées des ouvertures pour le passage des électrodes de charbon, et il existe deux trous de coulée, un pour le laitier et l'autre pour le métal brut. A la sortie du réducteur, le métal passe dans le four d'affinage, construit en maçonnerie réfractaire.

D'après M. Harmet, l'immobilité du régulateur, avec sa coulée par le dessous du métal, présenterait un grand avantage sur le convertisseur Bessemer, dont l'oscillation et la coulée par le dessus sont des causes sensibles d'altération.

FOUR HÉROULT-FROGES. — Dès 1887, Héroult breveta le type de four désigné sous le nom de four de Froges, four-cathode à marche continue, ou four Héroult. Ce fut en somme le premier four électrique véritablement industriel, grâce à ses heureuses dispositions pour la suspension et la manœuvre des électrodes et à la robustesse de sa construction qui lui permet de supporter des campagnes de plusieurs semaines et même de mois.

Avec les fours créés par la Société électro-métallurgique française, on peut obtenir à volonté de la fonte, du fer et de l'acier, la réduction, l'affinage et l'épuration se faisant l'une à la suite de l'autre au moyen des réactifs et de la température convenables. On charge les fours avec le mélange de charbon et de minerai ou avec des riblons et de la fonte, et le trou de coulée supérieur sert à évacuer les laitiers, et celui inférieur à l'écoulement du métal.

En 1904, l'usine de Froges a mis en marche un four pour la fabrication de la fonte phosphorescente ou siliceuse permettant d'obtenir à la fois de l'acier commun et de l'acier fin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ce four, la moitié du minerai seulement est réduit par le charbon, l'autre moitié se faisant à l'aide des gaz de la réaction. On obtient par l'application de ce procédé les réactions : $FeO + C = Fe + CO$ et $FeO + CO = Fe + CO^2$. Ce four fonctionne à la fois par arc et résistance montés en série. L'arc fond le minerai qui se répand à travers le charbon, lequel effectue la réduction et aussi la saturation du fer par le carbone.

Les gaz qui se dégagent à la partie supérieure du four sont à une température relativement faible et inflammables.

Avec une puissance de 1.000 HP, un tel four permet de fabriquer 10 à 12 tonnes par jour avec des minerais ayant des teneurs de 50 à 60 0/0 de fer.

La consommation d'électrodes est de 1 franc par tonne d'acier en partant du métal fondu ; le prix de la main-d'œuvre de 6 fr. 75 ; les frais de revêtement 7 francs ; la dépense d'énergie 20 francs.

Dans le four oscillant Héroult, la source de chaleur réside dans la couche de scories même, à quelques millimètres seulement de la surface de réaction. Le bain fluide forme la couche supérieure du contenu du four, et on a réussi à trouver la construction d'une couverture qui résiste à la chaleur rayonnante.

L'appareil est à deux électrodes. On introduit dans le four les matières que l'on veut traiter, telles que minerai, fonte, riblons, soit froids, soit préalablement chauffés dans un four séparé. On peut aussi opérer sur l'acier liquide.

On ajoute les éléments (chaux, sable, etc.), pour faire le laitier voulu et pour réaliser l'épuration. On peut conduire l'opération plus ou moins vite. A un moment, on augmente, si c'est nécessaire, la teneur en carbone (par des moyens propres au procédé permettant de doser le carbone).

En somme, on conduit l'opération comme on veut, sans difficulté du fait de la chaleur, des risques d'oxydation, etc.

Une fois l'acier au point, le four est basculé par un dispositif hydraulique. Il verse le métal généralement dans une poche. Le système de four en marche à l'usine de la Praz fait des coulées d'environ 2.500 kilogrammes.

Voici les principales installations qui utilisent les procédés Froges-Héroult, ainsi que la puissance des fours employés : usine de la Praz, four de 2.500 kilogrammes ; usine de Saint-Juerg, four de 5.000 kilogrammes ; usine de Remsched-Hasen, four de 1.800 kilogrammes ; usine de Bismarkutte, four de 1.000 kilogrammes ; usine de Judenburg, four de 2.000 kilogrammes ; usine de Kapjemberg, four de 2.300 kilogrammes ; usine de Pittsburg, four de 5.000 kilogrammes ; usine de Syracuse, four de 5.000 kilogrammes ; usine de Kotjors, four de 3.500 kilogrammes ; usine de Schaffouse, four de 500 kilogrammes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La capacité annuelle de production desf ours Héroult installés, qui sont les plus employés et existant en 1915, a été de près de 1 million et demi de tonnes, dont 403.750 pour l'Allemagne, 371.500 pour les États-Unis, 234.800 pour la France, 189.800 pour la Grande-Bretagne, 74.100 pour l'Autriche-Hongrie, etc., mais les productions réalisées n'ont été en réalité que de 300.000 tonnes dans le monde entier, en 1915.

Une dizaine de ces fours ont une capacité de 15 à 20 tonnes et l'on prévoit la venue de fours de 40 tonnes.

Four Keller a pluralité de foyers. — Celui représenté dans la (planche XXIV) possède quatre cuves réparties extérieurement au creuset, qui se trouve fixé au centre de l'appareil, et auquel elles communiquent par l'intermédiaire de canaux latéraux. Le sol de chaque cuve est constitué par un bloc de charbon qui est connecté à l'un des pôles, ou par le bain lui-même réunissant les différentes capacités. Aux usines d'Unieux (Jacob, Holzter et Cie), on a construit un four Keller alimenté par un courant de 20.000 ampères, pour servir à achever l'épuration d'aciers préparés au four Martin. Les coulées unitaires y sont de 8 tonnes, dont 3 ou 4 en vingt-quatre heures.

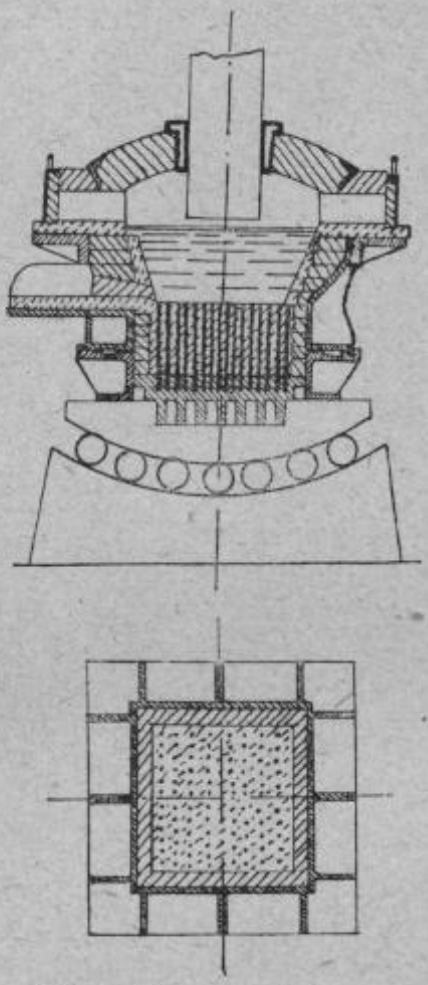


Fig 1923. — Four Keller.

Ce four est du type à électrodes verticales mobiles et chaque pôle comprend deux électrodes en parallèle. Un foyer de chaleur réglable correspond à chacune des quatre électrodes. Chaque électrode est actionnée au moyen d'un servo-moteur hydraulique.

Le courant électrique est amené au-dessus du four et à son centre par un faisceau de barres de cuivre sandwichées, réunies en un bloc central fortement tenu par des supports métalliques et reliées à la charpente du four ; de ce bloc rayonnent les quatre circuits électriques, comportant chacun deux prises de courant pour chaque électrode ; l'une de ces prises est toujours au repos et permet la mise en circuit presque instantanée d'une électrode de rechange.

La position des pôles dans le four et des circuits de distribution avec départ central correspond au minimum d'induction ; le décalage du cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rant fonctionnant avec 750 kilowatts est si faible que le facteur de puissance est sensiblement égal à 1.

Les électrodes entrent dans le four en traversant une voûte sphérique qui recouvre la capacité du four. La cuve contenant l'acier est circulaire et est garnie intérieurement de garnissage magnésien.

Son basculement peut s'effectuer en avant et en arrière pour la coulée de l'acier et des scories ; il est obtenu au moyen de presses hydrauliques.

A Unieux, l'acier est élaboré au four Martin, puis coulé dans une poche qui est vidée immédiatement dans le four électrique ; l'acier liquide est aussitôt mis en circuit, et les opérations de désoxydation, d'épuration complémentaire et de dosage sont entreprises.

Pour une charge introduite dans le four, de 7.500 kilogrammes, la puissance moyenne pendant l'opération est de 750 kilowatts-heures ; l'usure des électrodes est d'environ de 4 francs par tonne d'acier.

Haut fourneau électrique Keller. — Ici la sole (*fig.* 1924) ne sert plus d'électrode, car le courant électrique arrive et sort de l'appareil par deux électrodes verticales pouvant être réglées séparément. En outre, ces dernières sont placées en parallèle à l'effet d'éviter tout arrêt ou variation du courant. Chaque four en comporte deux groupes à deux électrodes chacun, ces deux groupes étant disposés en série et constituant quatre foyers séparés.

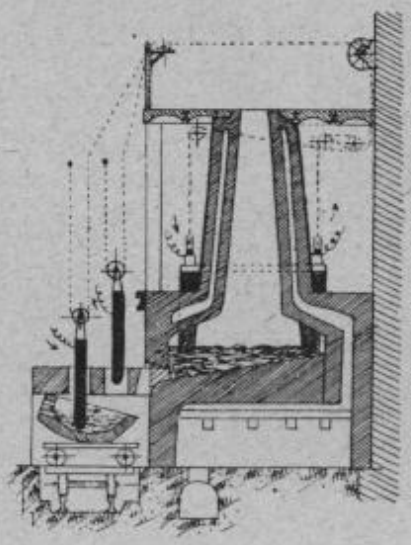


Fig. 1924.

Le mélange de minerai, de charbon et de fondant est versé par la partie supérieure de l'appareil ou gueulard ; lorsque la réaction de l'oxyde de carbone sur le minerai est opérée, et que la réduction est établie, les gaz qui se dégagent se dirigent dans une chambre spéciale où ils brûlent. La coulée du métal se fait soit dans une poche, soit dans un mélangeur.

Le voltage, dans ce four, est maintenu entre 25 et 30 volts. Les laitiers sont évacués du four, de façon telle que les électrodes ne puissent être en contact avec eux.

Le four d'affinage, qui fait partie de l'installation du haut fourneau, ne contient que le métal fondu, et les matières servent à l'affiner. Pour régler la température, on agit à la main sur les deux électrodes du four et, pour oxyder le métal, on se sert plus particulièrement de l'oxyde de fer. Le voltage est maintenu entre 50 et 75 volts par foyer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Four Girod. — Le four électrique Girod est l'appareil le plus simple autant comme engin d'expérience que comme machine industrielle admettant les plus grandes puissances. C'est un four à résistance dont la cuve bascule autour de deux tourillons portés par des supports fixes ou

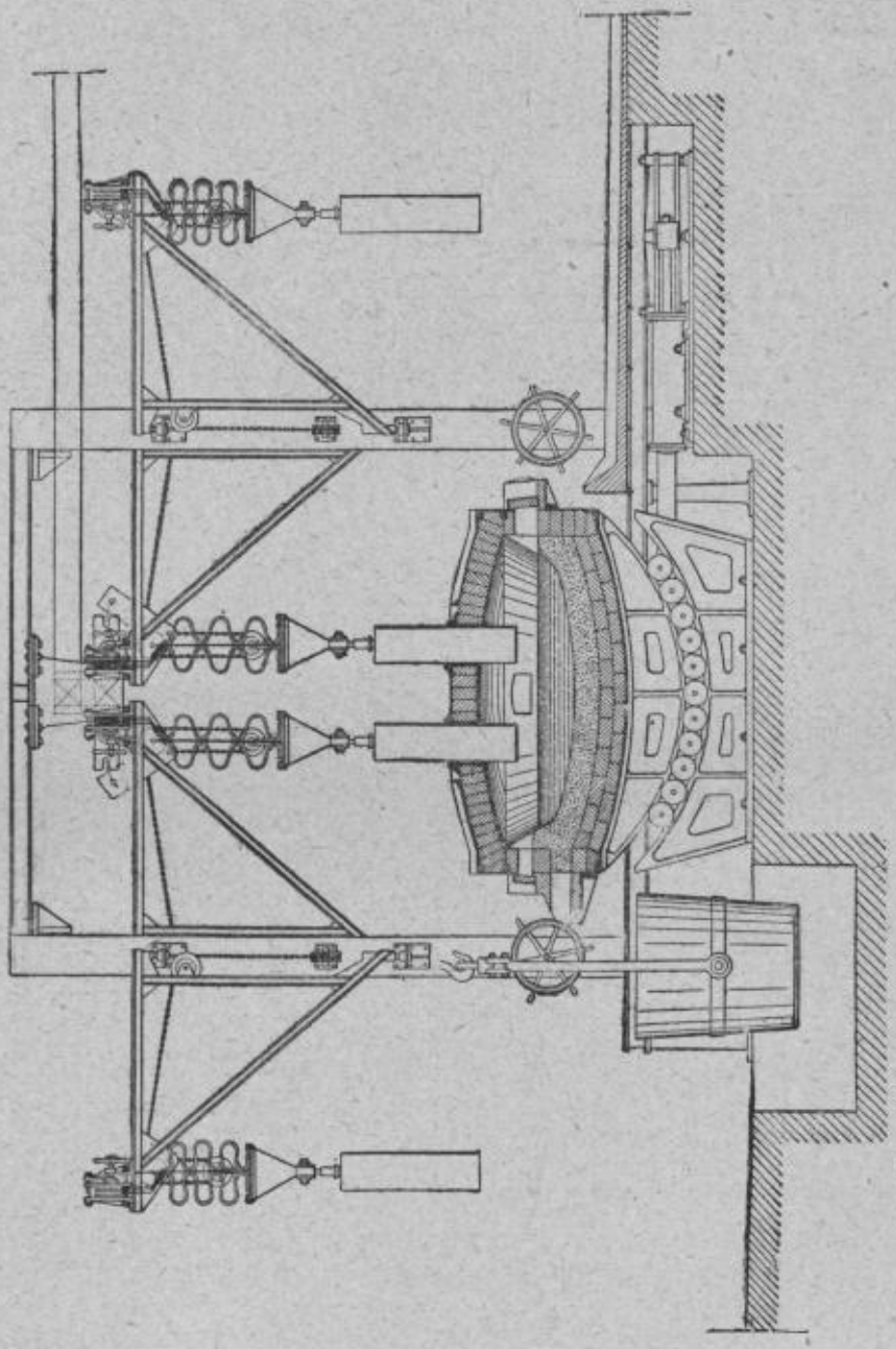


Fig. 1925. — Four électrique des aciéries J. Holtzer à Unieux. Système Ch.-A. Keller.

par un wagonnet, donnant ainsi la possibilité de basculer le four à la main ou mécaniquement et de produire la coulée par celui des orifices de coulée dont la hauteur correspond à l'état d'usure de la sole conductrice qui forme l'un des pôles. L'autre pôle est constitué par une électrode libre. La cuve est remplie d'un mélange de graphite et de goudron que l'on pose

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à chaud et que l'on dame très fortement. Le principal avantage de ce four est de basculer pour la coulée, car on extrait toute la masse à chaque coulée, et l'on arrive à une composition et à un rendement réguliers.

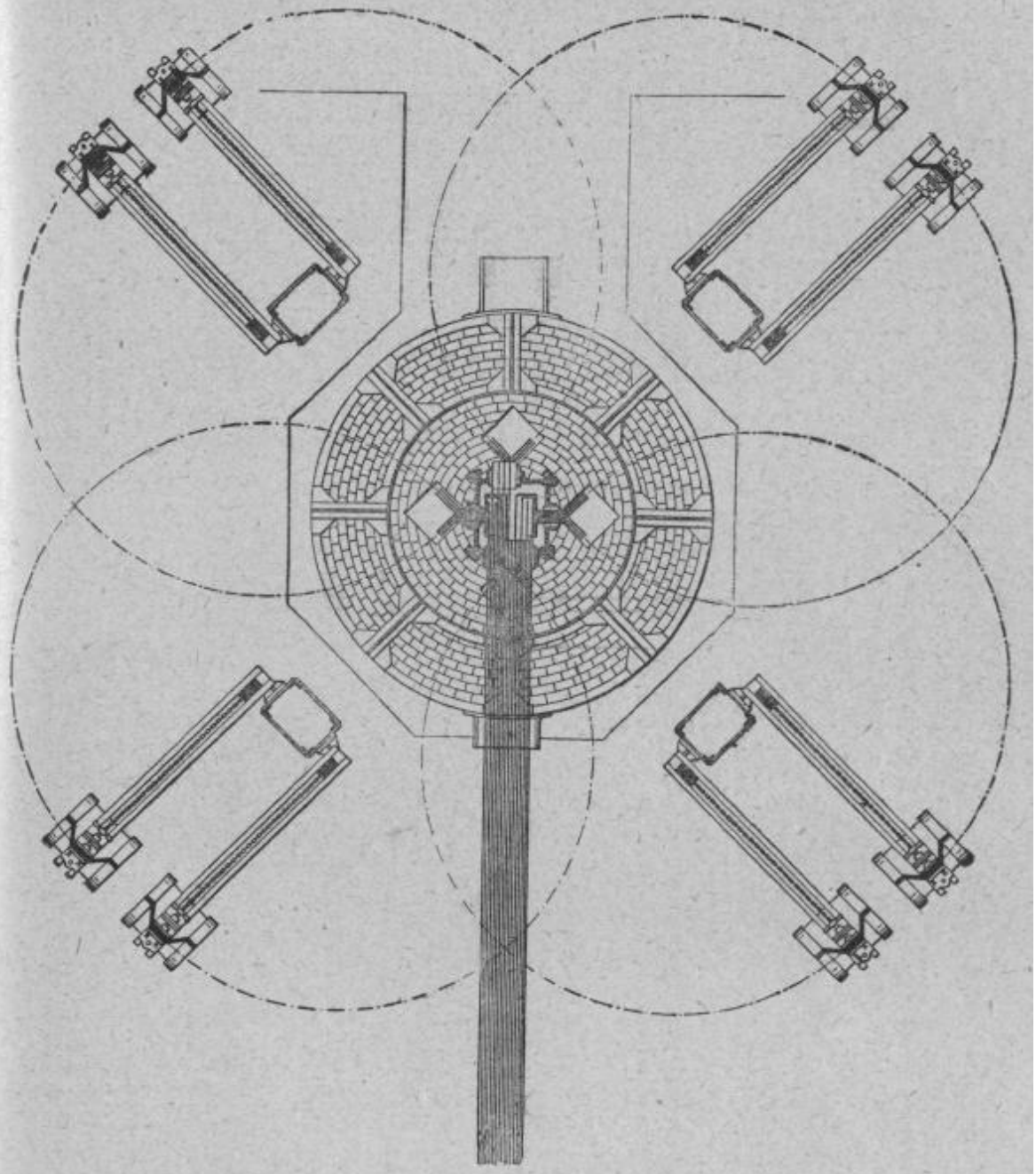


Fig. 1926. — Four électrique des aciéries J. Holtzer à Unieux (Loire). Système Ch.-A. Keller. (Vue en plan.)

Le réglage se fait sur l'ampérage au moyen de régulateurs automatiques.

Le four travaille sous une tension de 60 à 70 volts.

L'avantage de ce four est que l'électrode inférieure ne risque jamais

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

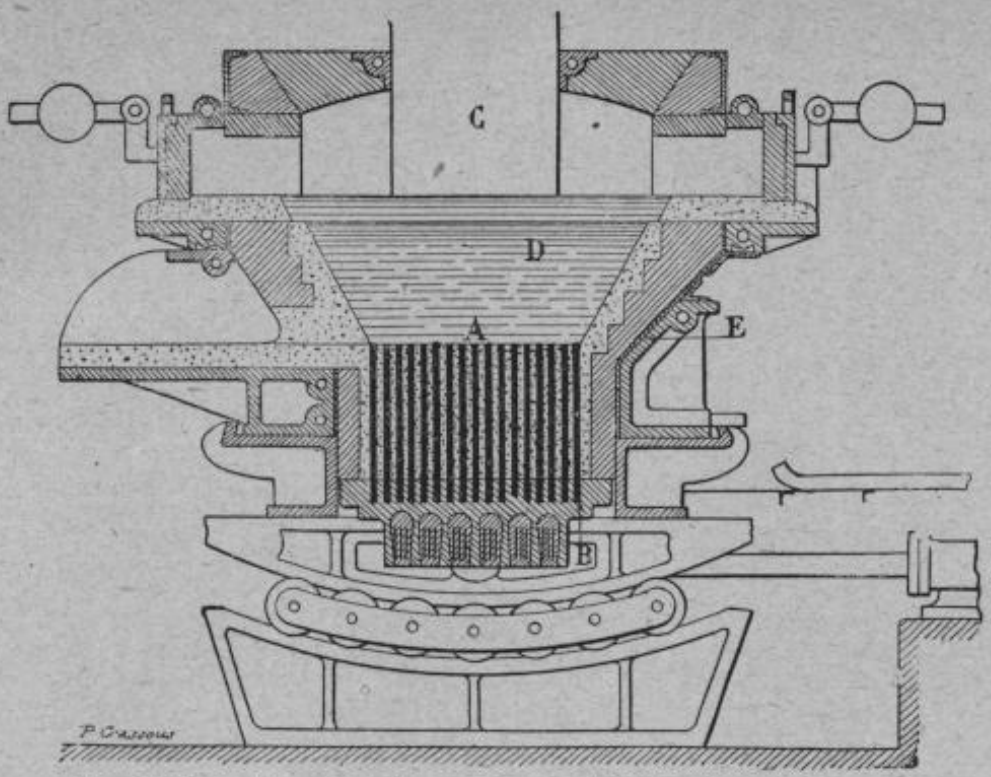


Fig. 1927. — Four Keller à sole à conductibilité mixte, à pisé armé.

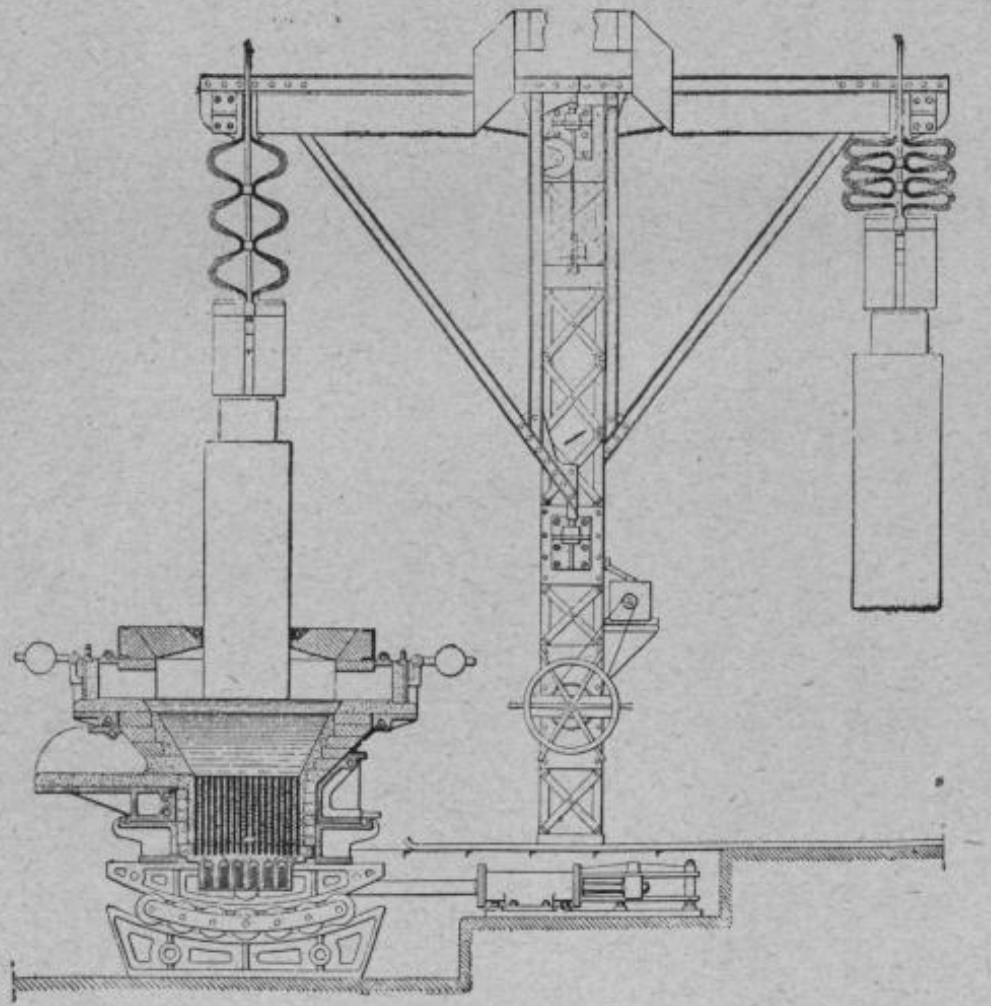


Fig. 1928. — Four Keller à sole à conductibilité mixte. Disposition générale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de carburer le bain, puisque la partie en contact avec le métal en fusion se trouve être du même métal que celui qui fond.

Ceci est obtenu en noyant dans la sole, dès la construction, des pièces d'acier refroidies à leur base. Lors de la mise en marche d'un nouveau four, les pièces d'acier qui, à ce moment-là, émergent des parois du four, conduisent le courant à la charge de ferraille ou de fonte, l'électrode est abaissée, et le circuit établi.

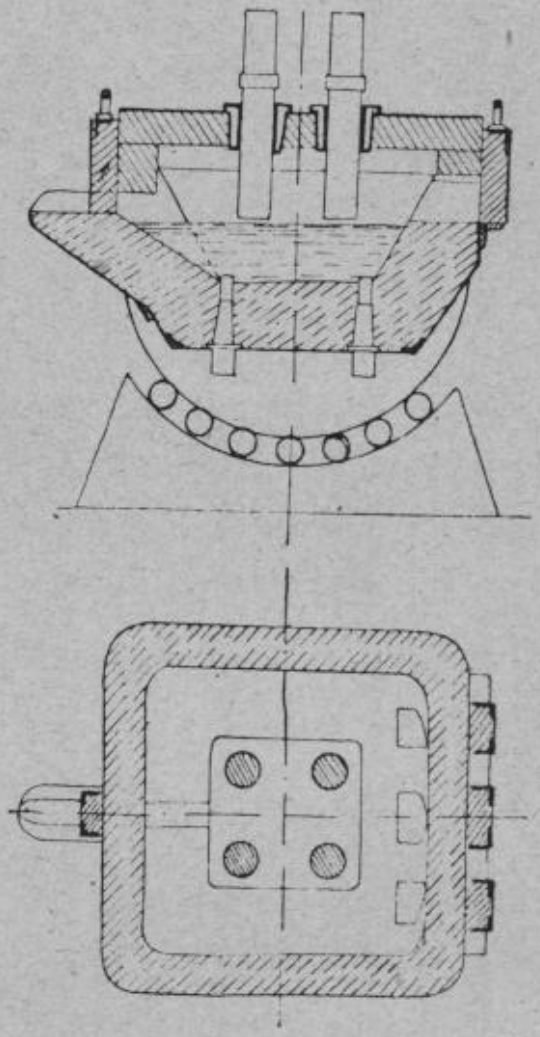


FIG. 19.9. — Four Girod.

Le métal fond dans le creuset les pièces en acier, d'autre part, fondent également, même jusqu'à une dizaine de centimètres dans l'intérieur de la maçonnerie où la fusion s'arrête du fait de l'éloignement du centre générateur de chaleur, et du fait du refroidissement qui est produit par une circulation d'eau dans la partie de la pièce touchant la cuve. On a ainsi constitué une sole conductrice exempte de carbone qui est composée de l'acier lui-même, ce qui permet d'avoir un seul pôle à l'électrode. Suivant les puissances mises en jeu et les dimensions des électrodes, on a un nombre plus ou moins grand de celles-ci, mais elles sont toutes branchées en parallèle. Des régulateurs d'intensité partagent également le courant entre chaque électrode. Les électrodes étant toutes de même polarité, l'on n'a pas à craindre de court-circuit dans le couvercle, si bien que les électrodes sont latéralement ajustées dans celui-ci, et que le four fonctionne toujours en pression. Le couvercle est muni de trous pour l'échappement de la surpression et les dimensions de ces trous sont réglables *ad libitum*.

Le four, tel qu'il est installé à Ugine, est monté sur tourillons et bascules par engrenages ; il pourrait tout aussi bien être placé sur un berceau. L'amorçage, après chaque coulée, se fait d'une façon très régulière,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et le réglage au début, avec la matière froide, est beaucoup plus facile qu'avec les électrodes en série, même s'il y a plusieurs électrodes, le réglage se faisant sur l'ampérage au moyen de régulateurs automatiques.

La disposition spéciale des électrodes et des pièces de contact procure des avantages que n'ont pas les autres fours à électrodes dès que l'on veut opérer sur des riblons froids. Dans ce cas, aussitôt après avoir chargé le creuset du four, l'électrode supérieure est abaissée jusqu'à ce qu'elle repose sur l'amas des riblons ; le circuit est fermé et le courant passe sous la forme de multiples petits arcs qui éclatent entre les diverses parties de la masse entière, du centre vers la périphérie des riblons. L'ensemble s'affaisse simultanément au bout de très peu de temps, et il n'est plus besoin de soulever les pièces froides du fond, et inutile d'opérer un brassage, toujours dangereux pour les revêtements du four. On voit donc que l'on peut alimenter le four soit au moyen du métal fondu, soit de riblons froids ; dans ce dernier cas, toute la charge n'est pas mise en une fois. Après avoir dressé en meule une partie des riblons et opéré de la manière ci-dessus indiquée, le reste y est introduit avec la charge d'affinage. Si l'on prend comme exemple un four de deux tonnes, la charge comprend de 2.000 à 2.500 kilogrammes de riblons, et le fondant consiste ordinairement en 80 kilogrammes de chaux et 220 à 250 kilogrammes d'oxyde de fer sous forme de minerai, qui, avec l'oxyde qui recouvre les riblons, sert d'agent oxydant. La fusion de cette charge exige de quatre heures et demie à cinq heures. On prend alors quelques échantillons du bain afin de s'assurer du degré d'affinage du métal fondu ; selon le degré de purification, le four reçoit alors, après que l'on a évacué les premières scories, une seconde, et, si cela est nécessaire, une troisième charge de chaux et d'oxyde de fer. Après l'enlèvement des dernières scories, la surface du bain métallique est entièrement nettoyée par l'introduction de 30 à 40 kilogrammes de chaux et son évacuation après un instant.

Le traitement complémentaire du bain dépend de l'absence ou de la présence d'impuretés qui peuvent avoir subsisté après l'affinage, et de la qualité de l'acier que l'on désire produire. Suivant les circonstances, on emploie des désoxydants ou d'autres agents d'affinage tels que des ferro-mangano-silicium ou autres alliages. Pour la production d'aciers au charbon, on se sert de charbon de bois suédois ou d'une sorte de fer très riche en carbone que l'on traite dans un four électrique séparé. Enfin, pour obtenir certains aciers spéciaux, on ajoute, après l'opération d'affinage, des alliages de fer avec divers métaux tels que tungstène, nickel ou chrome.

Pendant la fonte, il peut arriver que les extrémités des pièces de contact, qui pénètrent dans la partie inférieure du creuset, subissent un commencement de fusion. Étant donné que ces pièces sont en fer, il est facile de comprendre que cette fusion, dans un mélange d'ailleurs en proportion

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

infinitésimale par rapport à la masse métallique, ne peut influer sur la qualité de l'acier obtenu d'une manière quelconque.

Quant à la durée totale de l'opération depuis la fermeture du circuit jusqu'à la coulée définitive, elle est d'environ huit heures si nous supposons que les matières brutes introduites ne sont pas pures. La (*fig.* 1930) se rapporte à des fours de 12 tonnes comportant plusieurs électrodes radiales supérieures.

Les fours de 2,5 tonnes consomment 300 kilowatts sous 60 et 65 volts ; les seconds, de 12 tonnes, absorbent 1.000 à 1.200 kilowatts sous 70-75 volts. Si l'on admet une perte de 10 à 11 0/0 de la charge métallique par oxydation ou évaporation, l'énergie nécessaire pour obtenir une tonne d'acier dans le premier type est de 900 à 1.000 kilowatts-heures ; et, dans le second, de 800 à 900 kilowatts-heures.

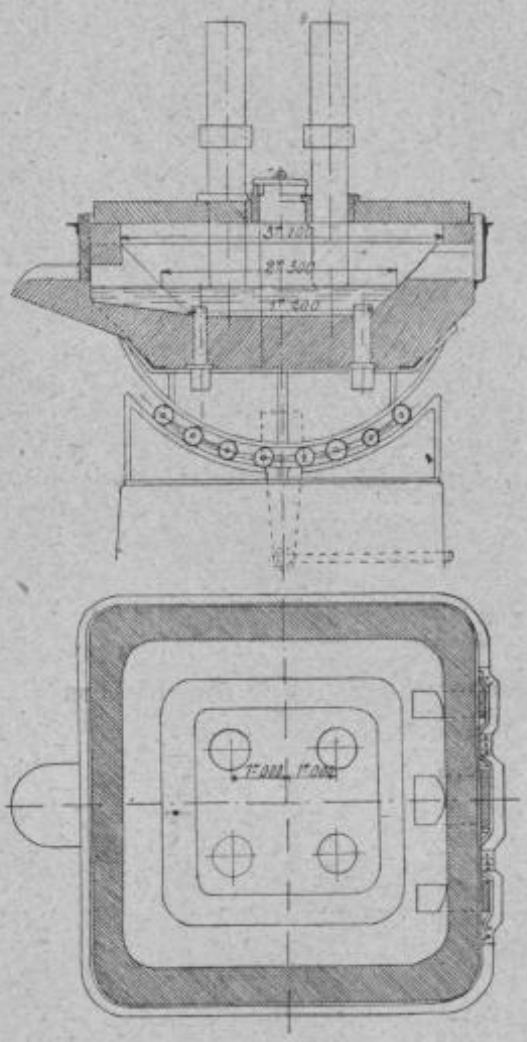


Fig. 1930. — Four Girod.

La consommation des électrodes de charbon est d'environ de 12 à 15 kilogrammes par tonne d'acier, y compris les bouts non utilisés qui restent dans les supports.

Le revêtement intérieur des fours se compose de dolomite calcinée ; sa durée n'est pas la même, bien entendu, pour toutes les parties. C'est ainsi que le fond du creuset pourra supporter de 120 à 160 charges sans réparation ; si même on n'emploie que de la fonte liquide, il faut admettre 200 charges sans aucun dommage. Le revêtement du couvercle, au contraire, ne peut guère supporter plus de 25 à 30 charges, et même de 20 à 25 dans les fours puissants de 12 tonnes. Quant aux côtés, surtout dans les cavités avoisinant la courbe de scorie, ils ont besoin de fréquentes réparations et d'une continuelle surveillance.

A l'usine d'Ugine, on n'emploie, comme matières brutes, que des riblons de fer mélangés à des rognures d'acier, tant pour la fabrication de l'acier ordinaire que pour celle des différents alliages. Le pourcentage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moyen des impuretés contenues dans les matières brutes employées se chiffre comme suit :

Carbone.....	0,40 à 0,50 0/0	Soufre.....	0,06 à 0,10 0/0
Silicium.....	0,15 à 0,25 0/0	Posphore.....	0,08 à 0,10 0/0
Manganèse.....	0,50 à 0,70 0/0		

Il est intéressant également de citer ici les chiffres fournis par M. Borchers et donnant les prix des fours Girod.

C'est ainsi qu'un four électrique de 2,5 tonnes, y compris les électrodes avec support de réglage, instruments de mesure, conducteurs, etc., coûte 15.000 francs. Un grand four de 12,5 tonnes avec le même matériel coûte 30.000 francs. Les frais de fabrication des électrodes s'élèvent à 3 ou 4 francs par tonne de charbon. Quant au prix du matériel complet prêt à un fonctionnement régulier avec four de réserve, tout compris, sauf la dynamo et le transformateur, il est en moyenne de 250.000 francs pour les fours de 2,5 tonnes et de 350.000 francs pour les fours de 12,5 tonnes.

Four a creusets Girod (Pl. XXV). — Les creusets sont placés dans des compartiments séparés les uns des autres, et aussi de l'extérieur, par des cloisons qui forment résistance électrique, et dans lesquelles passe le courant. Dans des fours du même genre établis par M. Girod, les creusets sont chauffés individuellement, ce qui permet d'atteindre une température plus élevée. Des résistances électriques placées au-dessous du creuset forment le fond de chaque compartiment. On obtient dans ces fours une température constante.

Four Frick. — Ce four, du type à induction, expérimenté aux usines Krupp et à Sheffield, ne diffère du type Kjellin que par la position relative des parties (*fig.* 1931).

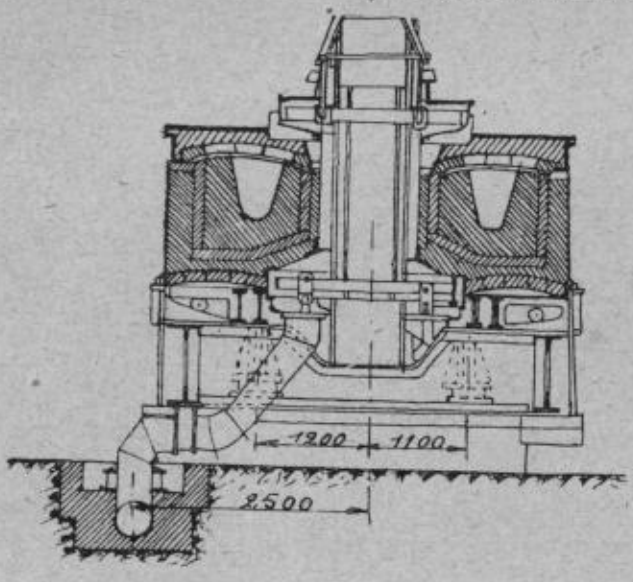


Fig. 1931. — Four Frick, coupe transversale.

La bobine primaire est plate et disposée au-dessus ou au-dessous de la rigole de fusion ; l'appareil forme donc un transformateur à disque, alors que dans le four Kjellin, le transformateur est à bobine cylindrique. Il n'y a qu'une porte à la partie supérieure.

Le rendement global est de 33 0/0, supérieur à 8 ou 10 0/0 à celui d'une installation avec fours Martin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Four Grönwall. — Les inventeurs de ce four ont eu en vue une amélioration du facteur de puissance dans le fonctionnement du four Kjellin. Le procédé consiste à disposer sur le circuit magnétique du four deux bobinages en opposition fonctionnant comme compensateurs, et à allonger les canaux de fusion en leur faisant prendre une forme oblongue.

Le four installé à Domnarfvet présente une analogie presque complète avec un haut fourneau ordinaire.

L'appareil est alimenté en courant triphasé et les trois électrodes convergent vers l'axe du four. Pour que la voûte ne s'échauffe pas d'une façon exagérée à proximité des électrodes, elle est refroidie par un jet de gaz qui y dirigent des tuyères convenablement placées. Les électrodes sont refroidies par une distribution d'eau froide.

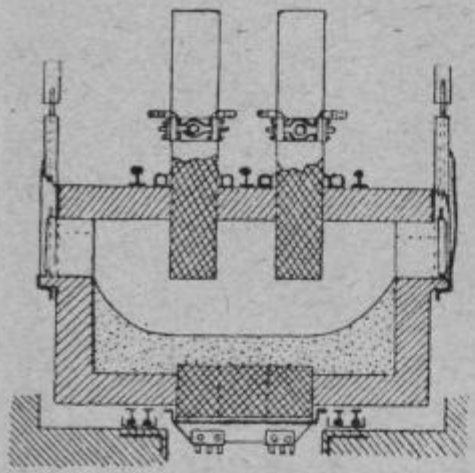


Fig. 1932. — Four Gronwall.

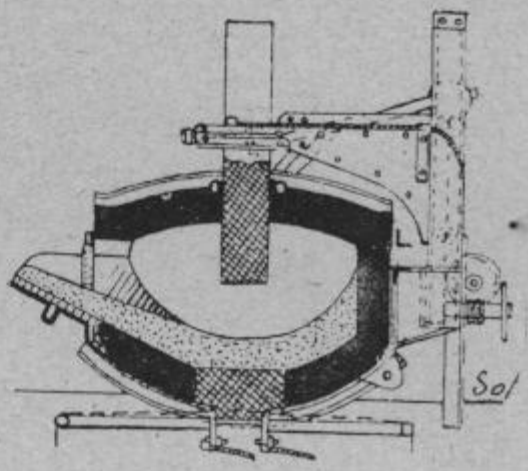


Fig. 1933. — Four Gronwall.

La consommation de coke est d'environ de 29 kilogrammes par tonne de fonte.

Le pourcentage moyen de carbone a été, dans les dernières expériences, d'environ 1,80 ; la proportion de silicium a varié de 0,2 à 0,7 0/0, et la proportion de soufre est restée inférieure à 0,005 0/0.

On a obtenu plus de 2 tonnes de fonte par cheval électrique annuel, mais on espère arriver à 3 tonnes dans les mêmes conditions.

Les inventeurs ont étudié un four utilisant du courant triphasé avec deux électrodes seulement, la sole étant formée de magnésie et de graphite, et reliée à la troisième phase. Avec cette disposition, on peut imprimer à la masse en fusion une rotation sur elle-même dans le sens vertical, de sorte que de nouvelles matières sont sans cesse amenées au contact du laitier, ce qui active beaucoup l'affinage.

Four Toussaint-Levoz. — Dans ce four, de section cylindrique, la surface du laboratoire est réduite autant que cela peut se faire pratiquement, la hauteur du four étant augmentée de façon correspondante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On utilise un four de section cylindrique avec voûte en dôme dans lequel on introduit le métal en fusion, les électrodes négatives étant disposées de façon à être en contact électrique avec la partie supérieure du bain qui se trouve, ainsi que les laitiers, amené à une température très élevée assurant un bon affinage. Cette disposition de four permet d'obtenir des résultats aussi satisfaisants que ceux qui sont possibles avec les fours actuellement en usage, tout en nécessitant une consommation de courant beaucoup moins élevée.

Ce fait s'explique aisément par les considérations suivantes. L'affinage se produit sous l'action des laitiers en contact direct avec la surface du bain, porté à une température assez élevée pour provoquer toutes les réactions nécessaires qui se transmettent graduellement et de proche en proche de la surface à la partie inférieure. Il se produit alors une sorte de cémentation inverse de molécule qui se propage dans les parties les plus profondes du bain, la propagation étant favorisée par la différence de densité existant entre le métal affiné et celui à affiner. Il s'établit ainsi dans le bain un mouvement de descente et d'ascension qui amène successivement les molécules en contact intime avec les laitiers, déterminant ainsi un affinage rapide et sûr.

On ne peut donc sans inconvénient donner une hauteur assez considérable au laboratoire du four comparativement à sa surface ; le mouvement de circulation des molécules ne pouvant, par contre, se faire dans le sens horizontal sous l'effet des différences de densité, la surface du laboratoire doit être réduite autant que possible.

Le mode de chauffage est aussi avantagé que l'électrode cylindrique en graphite, entrant verticalement par la voûte du four et d'un diamètre proportionnel au diamètre intérieur du four, cette proportion rapprochant le pourtour de la face inférieure des électrodes négatives noyées dans les parties latérales presque en face, les arcs se produisent très facilement en grandes quantités et, en même temps, voyagent sur la face inférieure de l'électrode.

Ces conditions très favorables au chauffage de la surface du bain sont encore favorisées par la grande surface de la partie inférieure de l'électrode verticale portée à une très haute température qui produit une réverbération très puissante de chaleur sur le bain.

Les électrodes latérales sont confectionnées en matières semi-conductrices ou en pisé armé, plus conducteur. Comme le four travaille toujours à haute température, on peut appliquer pour ces électrodes la disposition des électrodes métalliques ou en graphite noyées dans la maçonnerie et séparées du bain par une couche de matières réfractaires de faible épaisseur. Il est avantageux en outre de réduire à un minimum la rentrée de l'air qui est en général beaucoup plus forte dans les fours en usage, c'est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pourquoi nous n'avons qu'une porte de chargement et le bec de coulée. Les inventeurs croient ainsi réaliser le four électrique de l'avenir pour l'affinage du fer et de l'acier parce qu'il repose sur des principes métallurgiques appliqués peut-être moins efficacement dans les fours ordinaires et sur une disposition électrique permettant un affinage peu coûteux en dépenses d'énergie électrique.

En 1913 on comptait comme hauts fourneaux en service : à Hagfors, deux fours de 2.200 kilowatts chaque ; à Nykroppa, trois fours de 3.500 kilowatts chacun ; à Tyssedahl, un four de 2.200 kilowatts ; à Domnarfvet, un four de 2.000 kilowatts et, à Tinfoss, trois fours de 8.800 kilowatts ; à Trolhättan, un four de 2.000 kilowatts ; à Haranger, trois fours de 2.200 kilowatts et à Arendal, un four de 2.000 kilowatts.

Hauts fourneaux électriques. — Dans la fusion au four électrique, la première difficulté qui se présente consiste dans le calcul exact de la quantité de charbon à ajouter. En effet, quel est le pourcentage de la houille qui sert à la formation de l'acide carbonique et quelle est la quantité qui est transformée en oxyde de carbone? Comme la réduction s'effectue à une température très élevée, l'oxyde de carbone est presque le seul produit, mais en passant peu à peu dans les parties plus froides de la charge non réduite, il est transformé partiellement en acide carbonique, de telle sorte qu'il y a environ la moitié de CO qui passe à l'état de CO^2. Les formules correspondant à ces deux extrêmes sont :

$$Fe^2O^3 + 3C = Fe^2 + 3CO.$$
$$Fe^2O^3 + 2C = Fe^2 + CO + CO^2.$$

En comparant ces formules avec celles de la réaction ordinaire dans le haut fourneau qui demande 9° C. pour la réduction de Fe^2O^3, nous voyons que 3° C., soit le tiers, est la plus forte quantité nécessaire pour la réduction au four électrique et 2° C. (soit environ respectivement 1 /3 et 1 /5) la plus petite quantité nécessaire dans le même cas. Cette incertitude dans la quantité de CO^2 formé au four électrique est peut-être la principale difficulté du travail au four électrique. Voici comment on arrive à sa solution.

Soit un minerai de fer à transformer en fonte dans un four électrique ; sa composition et celle du charbon de bois et du fondant employés sont les suivantes :

Minerai de fer		Calcaire		Charbon de bois	
Fe^2O^3	90	$CaCO^3$	90	C fixe	90
SiO^2	8	$MgCO^3$	8	Matière volatile	6
Al^2O^3	2	SiO^2	2	SiO^2	2
				Al^2O^3	1
				K^2O, Na^2O	1

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons que la fonte à fabriquer contienne 4 0/0 de carbone et 3 0/0 de silicium, que la scorie soit de 65 0/0 SiO^2 plus Al^2O^3, que les gaz contiennent seulement de l'acide carbonique du calcaire, mais pas du tout de CO^2 provenant de réduction. Il faut connaître : 1° les poids de minerai, calcaire et charbon de bois à charger pour faire 100 kilogrammes de fonte ; 2° le pourcentage de la composition des gaz ; 3° le poids et le pourcentage de la composition de la scorie.

Le poids du minerai nécessaire pour fabriquer 93 parties de fer, soit (100 — 4 — 3) de 100 parties de fonte, sera 133 de Fe^2O^3 qui seront contenues dans $133 \times 0{,}9 = 148$ parties de minerai.

Le poids de charbon de bois nécessaire est celui qu'il faut pour donner assez de carbone fixe destiné à la réduction de l'oxyde de fer et de la silice et de plus pour fournir le carbone qui sera contenu dans la fonte, soit :

Réduction de Fe^2O^3	$93 \times \frac{36}{112}$	$= 29{,}9$
Réduction de SiO^2	$3 \times \frac{24}{18}$	$= 2{,}6$
Pour le carbone dissous		$= 4$
Quantité totale nécessaire		$= 36{,}5$
Charbon de bois nécessaire	$\frac{36{,}5}{0{,}9}$	$= 40{,}6$

Soit x le poids du fondant nécessaire. La silice de la scorie sera celle qui est dans le minerai, le fondant et le combustible moins celle qui est réduite en silicium :

Dans le minerai	$148 \times 0{,}08$	$= 11{,}8$
Dans le fondant	$x \times 0{,}02$	$= 0{,}02\,x$
Dans le combustible	$40{,}6 \times 0{,}02$	$= 0{,}8$
Réduite	$3 \times \frac{60}{28}$	$= 6{,}4$
Silice dans la scorie		$= 6{,}2 + 0{,}02\,x$

Par des calculs semblables on trouvera que la scorie contiendra en tout :

Silice	$6{,}2 + 0{,}02\,x$	
Alumine	$3{,}4$	
Chaux		$0{,}50\,x$
Magnésie		$0{,}04\,x$
Alcalis	$0{,}4$	
Poids total	$10{,}0 + 0{,}56\,x$	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si la scorie est de 65 0/0 de silice, avec l'alumine on a :

$$0{,}65\ (10{,}0 + 0{,}65\ x) = 9{,}6 + 0{,}02\ x\ ;$$

d'où :

$$x = 9.$$

La solution ci-dessus est parfaitement générale et s'applique à tous les genres de minerais, de fondants et de combustibles et à la production de tous genres de scories.

2° Les gaz contiendront le carbone fixe du charbon de bois (excepté la partie qui passe dans la fonte) à l'état de CO, l'acide carbonique provenant du fondant et la matière volatile produite par le charbon de bois. On peut admettre que celle-ci se compose de parties égales en volume d'hydrogène, d'oxyde de carbone et d'acide carbonique qui correspondent au poids de ces gaz dans la proportion de 2 : 28 : 44. Les gaz qui s'échappent contiendront donc en poids :

CO du carbone fixe.....	$32{,}5 \times \frac{28}{12} = 75{,}8$	76,8	
CO de la matière volatile	$2{,}7 \times \frac{28}{74} = 1{,}0$		
CO^2 de la matière volatile.....	$2{,}8 \times \frac{44}{74} = 1{,}6$	5,6	
CO^2 en fondant.....	$9{,}0 \times 44 = 4{,}0$		
H^2 de la matière volatile.....	$2{,}7 \times \frac{2}{74} = 0{,}1$	0,1	
Poids total des gaz.....		82,5	

Soit pour la composition pour cent en volume :

CO	76,8 : 1,26 =	61,0 =	94,0 0/0
CO^2.....	5,6 : 1,98 =	2,8 =	4,3 0/0
H^2.....	0,1 : 0,09 =	1,1 =	1,7 0/0

Les volumes 61,0 et 1,1 représentent les mètres cubes de ces gaz par 100 kilogrammes de fonte.

3° La scorie contiendra, en remplaçant x par 9 : silice = 6,4, soit 42,4 0/0 ; alumine = 3,4, soit 22,5 0/0 ; chaux = 4,5, soit 29,8 0/0 ; magnésie = 0,4, soit 2,65 0/0, et alcalis = 0,4, soit 2,65 0/0.

Une question très importante se pose dans le travail de la charge au four électrique. A-t-on intérêt à combiner ce système avec le soufflage par tuyères? En effet, dans le four électrique ordinaire, il y a à craindre un excès de charbon qui, en s'accumulant, bloque le creuset. Pour y remédier, on peut procéder comme suit : 1° On peut mettre une quantité de charbon inférieure à la quantité théorique, l'oxyde de fer réduit est alors entraîné

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans la scorie. Solution peu pratique, car il y a perte de fer, corrosion énergique du revêtement, et consommation très forte d'électrodes. D'autre part, on empêche ainsi la réduction de la silice et la dissolution du carbone dans le fer, ce qui donne un métal à point de fusion élevé se rapprochant comme composition de l'acier. Par contre, cette scorie éliminerait un peu du phosphore de la charge mais pas tout du soufre ; 2° on met une nouvelle charge de minerai et de fondant quand on voit qu'il y a accumulation de combustible. C'est le système employé dans les essais de la commission canadienne à Sault Sainte-Marie, mais en marche normale il ne semble pas que cela soit bien pratique ; 3° on peut calculer le combustible pour la production de CO en éliminant les gaz dans la partie chaude du four sans leur permettre de se refroidir au contact du minerai ; tout le carbone fixe étant alors consommé à l'état de CO, ce qui rend facile le calcul exact de la quantité de combustible à mélanger à la charge ; 4° enfin la meilleure solution consiste à employer un soufflage par tuyères qu'on fait agir dès qu'on constate une accumulation de combustible. Cette combinaison du haut fourneau et du four électrique, telle qu'on la rencontre par exemple dans le dispositif de Taylor, est susceptible de donner les meilleurs résultats.

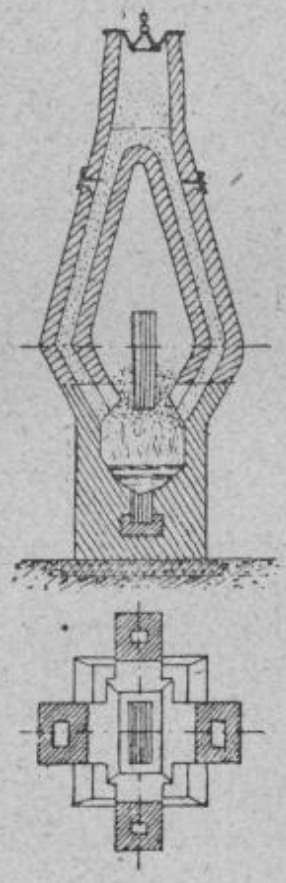


FIG. 1934. — Haut fourneau de Tinfos.

Four de Tinfos. — Le fourneau de Tinfos (Norvège), dû à Hans Bie Lorentzen est un appareil tenant à la fois des fours ouverts à électrodes et des fours à cheminée de réduction préalable des minerais par les gaz dégagés de la réaction. Il peut donc être considéré comme un appareil de transition entre les fours ouverts et les fours suédois de Lindblad, Stalhane et Gronwall ou américain de Dorsey et Lyon.

Un creuset (*fig.* 1934) (four monophasé à une électrode suspendue), où se fait la fusion des matières, communique par sa partie supérieure avec une ou plusieurs cheminées étroites, par où arrivent les matières à traiter, qui sont réduites et réchauffées par les gaz de la réaction. Par les orifices *a* pénètrent l'air nécessaire à la combustion des gaz. Le réducteur, coke en l'occurrence, est introduit dans le creuset autour des électrodes. Un aspirateur fonctionne sur la chambre pour faire circuler les gaz dans les cheminées de réduction. Ces fours ont une puissance individuelle de 1.600 chevaux et sont alimentés par du cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rant triphasé. La production est de 2t.18 par cheval-an ou 3t.12 au kilowatt-an.

Les aciéries de Domnarfvet (Suède) à la suite de nombreux essais possédaient, en 1914, 18 fours électriques correspondant à une puissance de 50.000 chevaux. La forme générale de ces appareils rappelle celle du haut fourneau ordinaire, ainsi que nous l'avons indiqué, mais le creuset a des dimensions plus considérables. L'énergie électrique est utilisée sous forme de courants triphasés, à la tension de 40 volts ; l'intensité du courant est de 8.000 à 9.500 ampères et la puissance de 400 à 500 kilowatts. L'appareil était d'abord du type à induction, actuellement c'est un four à arc à trois électrodes.

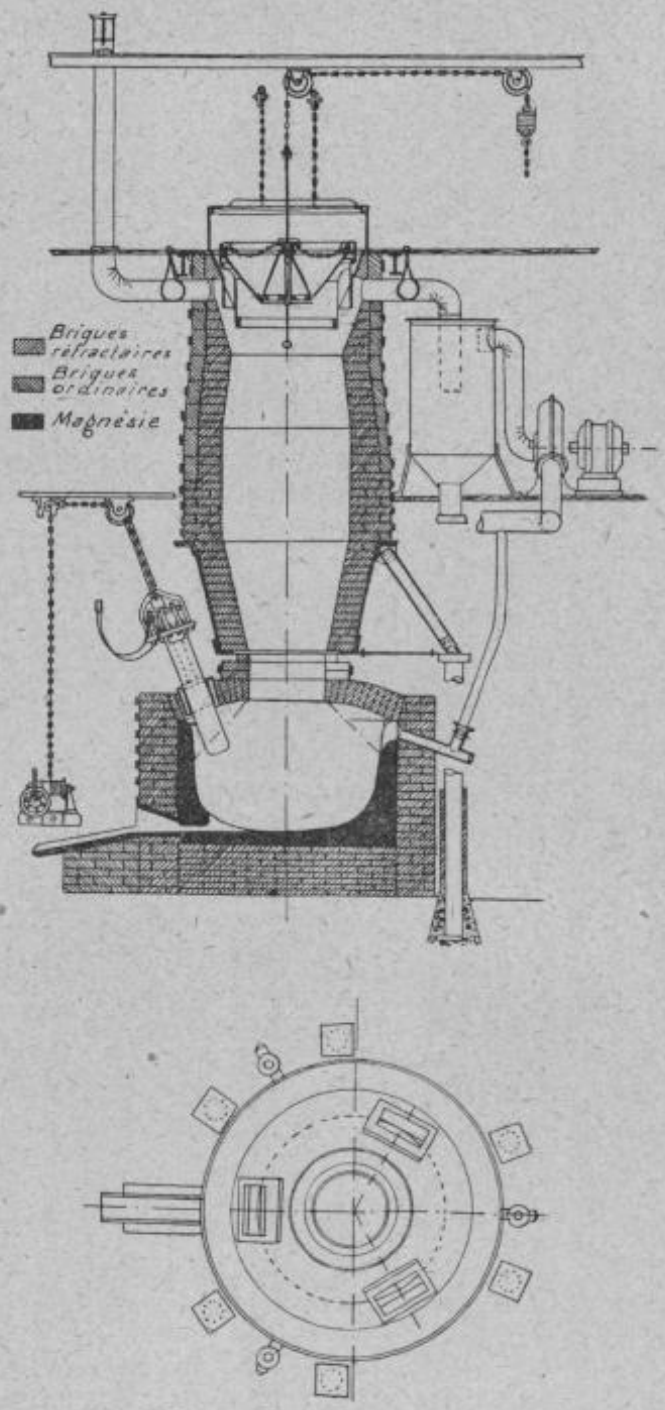


Fig. 1935. — Haut fourneau électrique de Domnarfvet (Suède).

Les charges sont formées de 100 kilogrammes d'hématite et de 18 de coke (ce qui correspond à 300 kilogrammes de coke par tonne de fonte) ; il serait possible de remplacer le coke par du charbon de bois.

En 1912, la production de ces fours était de 17.500 tonnes.

Dans certaines conditions le haut fourneau donne un produit d'une teneur en carbone identique à celle de l'acier, mais il paraît probable qu'il y aura intérêt à lui faire produire de la fonte, que l'on affinera ensuite. Le prix de revient dépend principalement du coût de l'énergie électrique et de celui du coke.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le haut fourneau ordinaire consomme 1.000 kilogrammes de coke, la différence avec 300 kilogrammes s'explique par le fait, que dans le premier, le coke doit fournir la chaleur nécessaire tandis que dans le second c'est l'énergie électrique.

On a obtenu dans certains cas un pourcentage de carbone analogue à celui de l'acier. Mais, en général, c'est de la fonte qui est produite.

Le pourcentage moyen de carbone a été dans les dernières expériences d'environ 1,80 0/0 au lieu de 3,20 0/0 dans les expériences précédentes. La proportion de silicium a varié de 0,2 à 0,7 0/0 ; dans certains cas, elle s'est pourtant élevée jusqu'à 4,40 0/0.

La proportion de soufre est restée inférieure à 0,005 0/0, lorsque le coke employé contenait lui-même 0,5 0/0 de soufre.

On a obtenu plus de 2 tonnes de fonte par cheval électrique annuel, mais on a des raisons d'espérer produire environ 3 tonnes dans les mêmes conditions, car le rendement thermique du four paraît devoir augmenter avec la puissance.

L'installation suédoise donne des résultats favorables, car le prix de l'énergie électrique est faible, et celui du coke élevé. Ce n'est pas le cas en France ; ainsi dans le bassin de Meurthe-et-Moselle on aurait :

1° Four électrique :	
500 kilogrammes de coke à 21,50 fr. la tonne.....	6,50 fr.
2.100 kilowatts-heures à 5 centimes le kilowatt-heure.	105,00
TOTAL.....	111,50 fr.
2° Haut fourneau ordinaire, 1 tonne de coke.....	21,50 fr.

Il faudrait que le prix du kilowatt-heure soit inférieur à 1,08 centime pour qu'il y ait égalité de dépense dans les deux cas.

Le nouveau four Helfeinstein de 12.000 chevaux installé à Domnarfvet utilise le coke comme réducteur. Un haut fourneau Keller de 4.500 chevaux et un four Keller, installés à Darfo, témoignent de l'importance que prend la question de la fonte électrique.

Les hauts fourneaux d'Hagfors ont été établis à la suite de modifications apportées au fourneau de Trolhättan ; on a disposé deux électrodes par phase du courant secondaire triphasé ; on a augmenté le diamètre du col et on a perfectionné la purification des gaz injectés et la pression dans le creuset a été portée à 400 millimètres. On a ainsi obtenu telle variété de fonte que l'on désirait et on est arrivé à une production industrielle de 3 tonnes par kilowatt-an.

Haut fourneau Groenwall, Lindblad et Stalhane. — L'invention des trois électrométallurgistes suédois a pour objet un procédé pour la réduction et la fusion des minerais de fer. La caractéristique de ce four est la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

réunion de deux dispositifs déjà connus : 1° l'amenée du courant par deux électrodes complètement ou partiellement fondues, consistant en métal obtenu et disposées dans deux compartiments (*fig.* 1936) complètement séparés du creuset de fusion ; 2° l'entretien d'une circulation permanente de bas en haut des gaz produits dans le four.

On introduit dans le four le minerai de fer mélangé des fondants nécessaires. On y ajoute comme charbon juste la quantité qui correspond à l'oxygène contenu dans le minerai. Au début les électrodes sont constituées par du fer amené à l'état de fusion par le courant. Les gaz de la réduction repassent constamment dans le four et, comme il n'y a pas d'introduction d'air frais, l'azote existant au début dans le gaz ne tarde pas à disparaître.

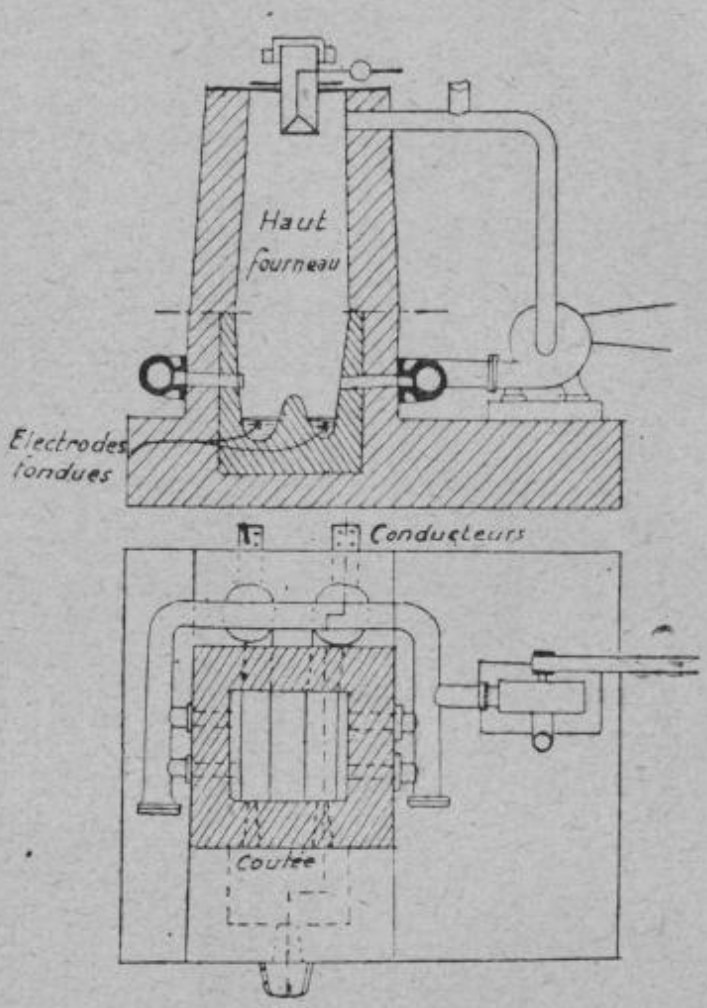


FIG. 1936. — Four Groenwale Lindblat et Stalhane.

Par leur circulation les gaz propagent la chaleur dans la masse par suite de leur chaleur spécifique propre et par la décomposition de l'anhydride carbonique. En faisant varier la quantité et la vitesse des gaz, on peut régler à volonté la marche du four.

Four Nalhusius. — Ce four est une combinaison du four Héroult et du four Girod, mais présente une particularité qui est le chauffage de la sole par le courant provenant des électrodes de ladite sole. C'est par suite un four mixte à arc et à résistance. La section horizontale de la partie médiane est circulaire. A la partie supérieure sont suspendues trois électrodes de charbon dont les extrémités inférieures sont proches de la couche de laitier. Trois électrodes d'acier sont noyées dans la sole du four ; il ne doit pas passer de courant des électrodes au bain métallique direc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tement, mais seulement par l'intermédiaire de la moitié environ de l'épaisseur de la sole qui agit comme résistance. Il est alimenté par du courant triphasé à basse tension (110 volts).

Le four employé à Friedenshütte a une capacité de 5 à 6 tonnes. La section horizontale est circulaire. Il y a trois portes symétriquement disposées à 120° l'une de l'autre. Le diamètre intérieur du four est de $2^m,170$ et la hauteur du centre de la voûte au-dessus de la sole, $0^m,670$. Les électrodes ont une section de $0^m,250 \times 0^m,250$ et elles sont refroidies à l'eau. Le four est basculant.

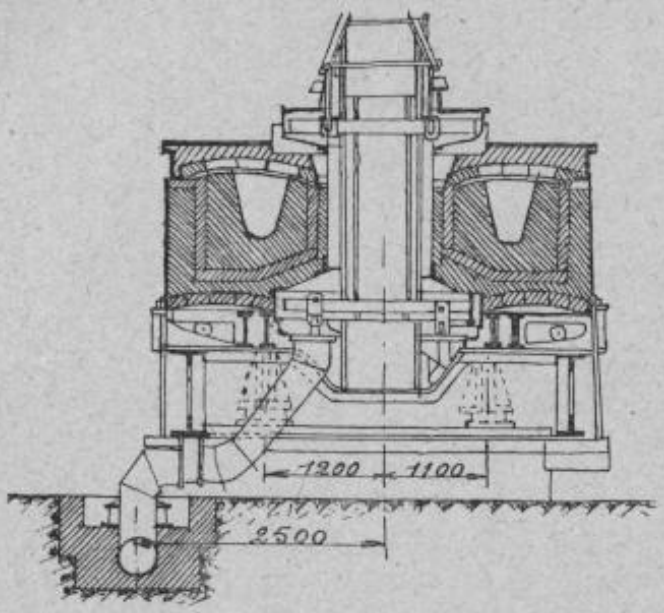


FIG. 1937. — Four Nathusius.

Dans les fours de 12 tonnes, il y a six électrodes de sole.

La principale particularité du four Nathusius est la possibilité de distribuer à volonté l'effet chauffant entre les groupes supérieur et inférieur d'électrodes. Sous une tension de 12 volts entre les électrodes de sole,

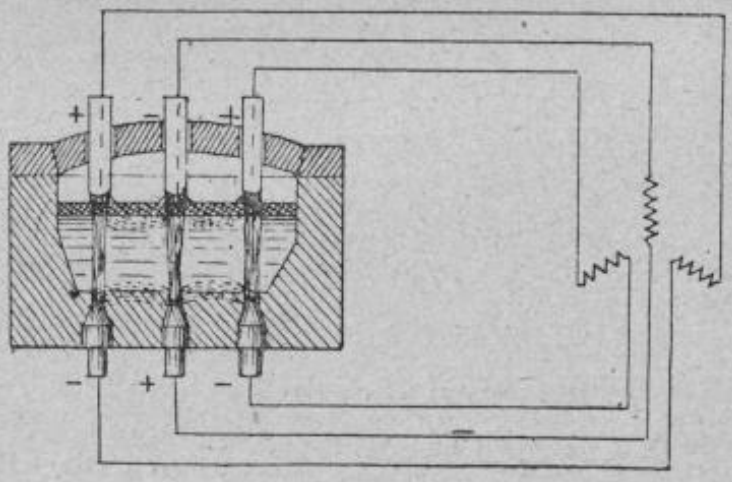


FIG. 1938. — Disposition des électrodes du four Nathusius.

celles-ci amènent 32 à 38 kilowatts, tandis que les électrodes supérieures en amènent 110 à 150.

Le garnissage de la sole consiste en dolomite ordinaire.

La question d'insérer la charge tout entière dans le circuit électrique est résolue de façon fort ingénieuse en disposant le point neutre dans le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bain lui-même, de façon à fixer le trajet du courant, indépendamment des résistances. Comme le circuit, en dehors de l'arc électrique soumis à des variations continuelles, comporte la couche de scorie, le bain d'acier et le pisé qui recouvre les électrodes de sole, tous les à-coups produits par la mise en court-circuit de l'arc électrique se trouvent en quelque sorte compensés par un tampon électrique, ce qui, dans un fonctionnement normal, rend tout réglage du four inutile.

Le courant par phase, dans la première période de l'opération, est de 3.500 à 4.000 ampères et la consommation d'énergie d'environ 200 kilowatts. La durée totale d'une opération est de deux heures et demie à trois

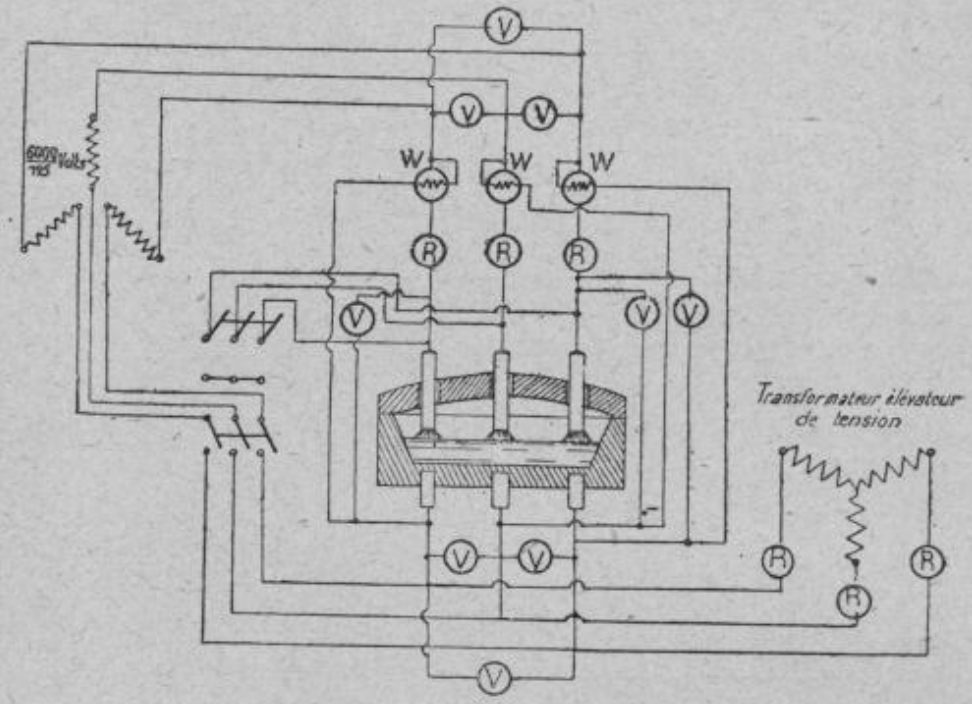


FIG. 1939. — Connexions du four Nathusius.

heures et demie. La consommation d'énergie varie de 270 à 290 kilowatts-heure par tonne pour les opérations dans lesquelles on produit des aciers spéciaux ou ordinaires. Pour un affinage complet, cette consommation s'élève à 400 kilowatts-heure.

L'acier obtenu est d'une pureté très remarquable et sans soufflures.

Le coût de l'affinage par tonne d'acier s'élève à 21 francs.

Four Hiorth. — Ce four en fonctionnement à l'usine Hiorth est alimenté par courant alternatif à 12,5 périodes et a un rendement de 0,75 à 0,85. Des dispositions sont aménagées pour un chauffage complémentaire dans le compartiment central. Il traite de la fonte de Dannemora coûtant 125 francs la tonne et des minerais du prix de 250 francs. Les lingots obtenus sont envoyés à Scheffield. Le garnissage du four est en magnétite venant de Syrie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme consommation d'énergie on compte 685 à 690 kilowatts par tonne de matériel froid. L'acier produit est égal au meilleur acier au creuset Scheffield.

673. Réglage et conduite des fours. — Les électrodes se font le plus couramment avec du charbon aggloméré, obtenues par tréfilage et portées dans des fours à gazogène. Leur densité réelle est d'environ 1,9. Le traitement de ces électrodes au four électrique, pour transformer le carbone amorphe en graphite (procédé Acheson) permet d'améliorer la qualité des électrodes, tant au point de vue électrolytique qu'au point de vue électrothermique. La densité dans ce cas atteint 2,20 et sa résistivité est moins élevée ainsi que l'oxydabilité. Les électrodes en charbon des fours électriques sont généralement suspendues à l'aide de treuils que l'on commande hydrauliquement ou électriquement, pour faciliter des manœuvres précises et rapides.

Pour régler la tension, les électrodes du même pôle sont manœuvrées simultanément ; s'il y a seulement inégalité de voltage entre les deux pôles, on effectue un déplacement simultané et inverse des électrodes de chaque pôle. On réalise ainsi, par une seule manœuvre, une réversibilité de la tension électrique d'un pôle à l'autre.

Dans le cas de la commande hydraulique, ces opérations sont très simplement obtenues en reliant la commande des robinets des servo-moteurs à un arrangement convenable des engrenages.

Lorsqu'on a recours à un moteur électrique, le réglage du four a lieu en mettant, à l'aide d'un commutateur, le moteur de commande du treuil en marche, dans un sens ou dans l'autre, suivant les indications des appareils de mesure, qui contrôlent la marche de l'opération.

On conçoit que les fours électriques, en raison des variations très subites de courant auxquelles leur marche donne lieu, peuvent se prêter à un réglage économique par le moyen de régulateurs automatiques. Parmi les appareils de ce genre, un des mieux compris est le régulateur Thury construit par les ateliers E. Guenot, à Genève, qui comporte un commutateur automatique, comprenant une balance électromagnétique et un mécanisme de réglage.

Le dispositif électromagnétique à courant continu ou alternatif, qui détermine le réglage, fonctionnant comme voltmètre, ampèremètre ou wattmètre, est muni d'une résistance additionnelle réglable, permettant de modifier à volonté le régime du four.

L'appareil automatique est actionné par un petit moteur électrique.

Le réglage sur l'ampérage au moyen de régulateurs automatiques donne des variations plus sensibles que le réglage sur le voltage, surtout dans les fours à électrodes en série où il arrive fréquemment que l'une des élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trodes a tendance à être en court-circuit, et l'autre à absorber tout le voltage.

Les électrodes ont besoin naturellement d'être portées jusqu'au point le plus proche de la partie la plus chaude. Il en résulte qu'elles s'unissent à la matière contenue dans le four ou se transforment d'une façon plus ou moins désagréable. En outre, les porte-électrodes, qui sont généralement en métal, sont exposés à une usure et à une destruction rapides, principalement lorsque les électrodes sont déjà fortement réduites. On remédie à ces inconvénients en adaptant aux électrodes des réfrigérants.

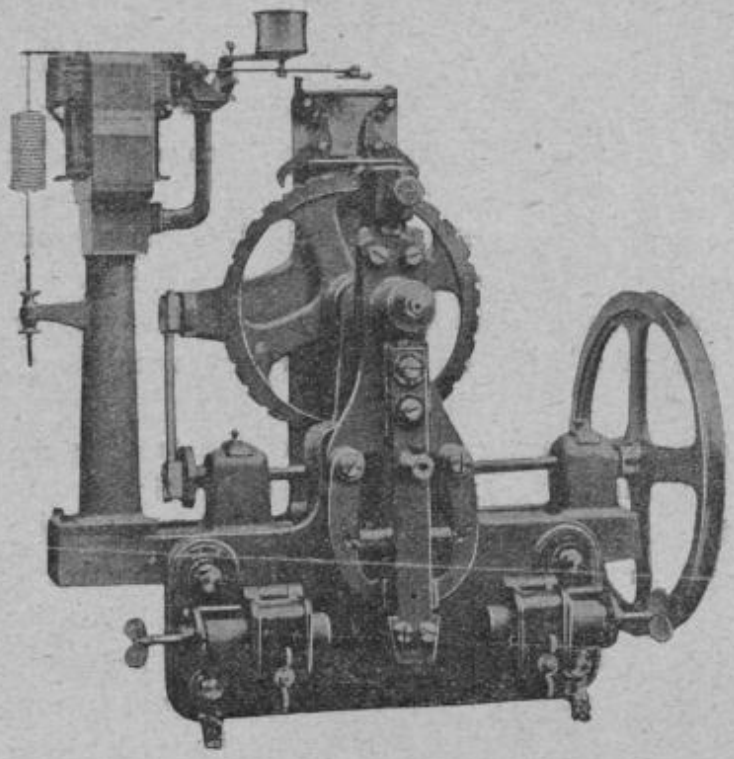


Fig. 1940. — Régulateur pour treuil de commande d'électrodes de four électrique.

Dans les fours où les électrodes ne sont astreintes qu'à se déplacer dans le sens de la hauteur seulement, l'appareil réfrigérant est d'installation assez facilement réalisable. Lorsque les électrodes doivent en outre se prêter à un déplacement latéral, on est obligé d'avoir recours à une construction appropriée à la suspension des électrodes.

Les électrodes en charbon ont pour causes d'une usure normale : la dissociation sous l'action du courant électrique, la combinaison chimique du carbone de l'électrode avec l'oxygène des oxydes métalliques traités dans le four, la dissolution de l'électrode dans le métal en formation et enfin l'oxydation directe par l'oxygène de l'air. Très souvent l'oxydation directe par l'air est le facteur qui met le plus rapidement l'électrode hors d'usage. La dissociation de l'électrode par le courant électrique est d'au-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tant plus importante que la tension de marche du four est plus élevée. On atténue les effets de la combinaison chimique de l'électrode avec l'oxygène des oxydes en traitement, en augmentant la proportion du carbone dans le mélange, et en maintenant l'électrode dans la partie froide du creuset. On évite la dissolution de l'électrode dans le métal en formation en la maintenant le plus loin possible du bain de métal formé.

Lorsqu'on ne dispose pas d'un moyen efficace pour protéger l'électrode contre l'oxydation de l'air, l'emploi des électrodes courtes correspondra toujours à la marche la plus économique, malgré la faible utilisation relative, vu la longueur des déchets. On peut protéger les électrodes contre l'oxydation en garnissant leur surface d'une bourre d'amiante additionnée de silicate de soude, ou d'enveloppes rigides faites de cartons d'amiante ou de tôles de fer, en évitant que l'air puisse circuler entre l'enveloppe et l'électrode.

Quand on ne dispose pas d'électrodes de dimensions suffisantes pour l'intensité du four, on est conduit à employer une électrode formée de plusieurs noyaux séparés. A cet égard le système Gin, avec noyaux d'électrode, dans une masse d'agglomérés de charbon intercalés est très recommandable.

M. Ch. Louis fixe comme suit la durée des électrodes selon les genres de fours et les fabrications auxquelles elles sont destinées.

Dans les fours à chargement continu avec bain liquide (alliages de carbures), on peut compter sur une usure de 8 à 12 millimètres par heure de marche.

Pour les fours couverts à chargement continu, l'usure des électrodes est beaucoup moindre ; on peut tabler sur les chiffres suivants : fabrication du ferro-silicium à 58 0/0 de Si, usure 4 millimètres par heure ; fabrication des siliciures de manganèse, usure moyenne 3 millimètres par heure ; fabrication du carbure de calcium, 2 millimètres par heure ; fabrication de la fonte de fer, $1^{mm},5$ par heure ; fabrication de l'acier brut en partant du minerai, $2^{mm},5$ par heure ; fabrication de l'aluminium, 700 grammes d'électrode par kilogramme d'aluminium produit, déchets compris.

Les électrodes ordinaires, sans garnissage, peuvent supporter une densité de courant de 3 à 4 ampères par centimètre carré, et munies d'un garnissage 8 à 10 ampères.

D'après Borchers, les densités de courant admissibles pouvant éviter une surcharge de l'électrode seraient :

Pour des électrodes de 5, 10, 20, 30 et 40 centimètres de diamètre, respectivement 10,8, 2,5 à 3,3 et 1,5 à 2 ampères par centimètre carré de section.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour des fours de grande puissance, exigeant des courants de très forte intensité, il y a lieu d'envisager des dispositions toutes spéciales, tant pour les canalisations que pour l'appareillage subséquent.

Les régulateurs automatiques pour fours électriques construits par les ateliers H. Guénod S. A. comportent (*fig.* 1942) un treuil actionnant l'électrode muni d'un moteur électrique (MT), un commutateur bipolaire à contacts en charbon (CR) actionné par un régulateur automatique Thury (R), dont le fonctionnement a pour effet de mettre en marche dans

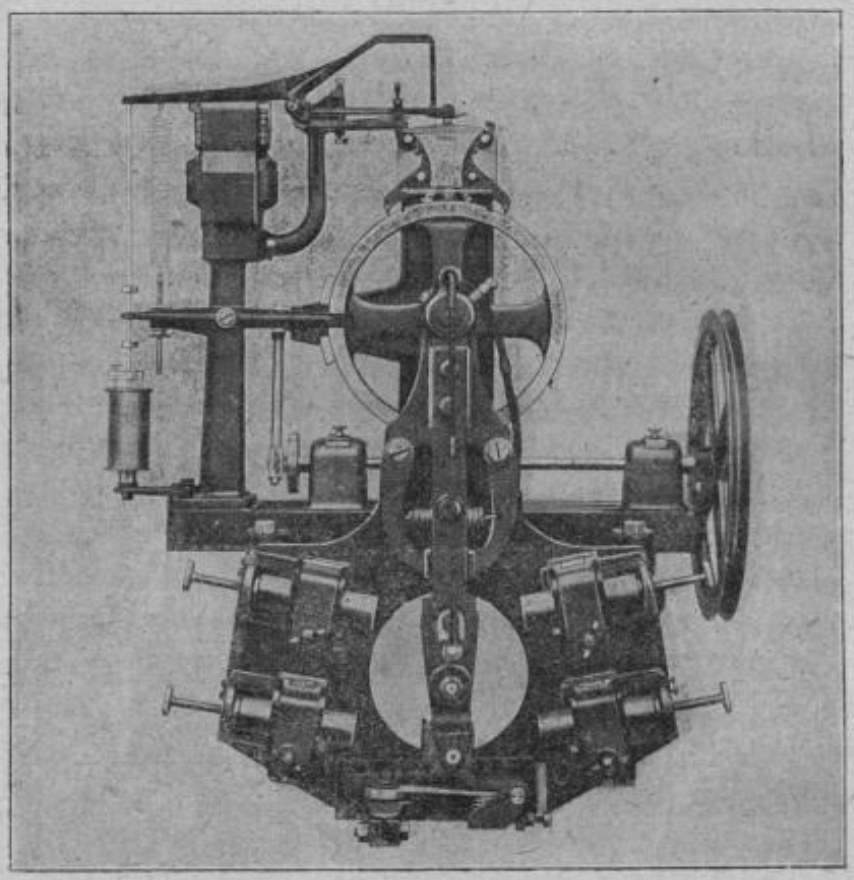


Fig. 1941. — Régulateur pour treuil d'électrode de four électrique. (Construction H. Guénod, S. A.).

le sens voulu le moteur (MT) du treuil ; une résistance additionnelle réglable (RA) ; un contrôller (CM) pour les manœuvres à la main ; éventuellement une résistance de partage (RP) et enfin les appareils accessoires tels que : transformateur (T) pour l'alimentation du solénoïde (S), du régulateur interrupteur (I), coupe-circuit (CC), etc.

Suivant les cas, le réglage a pour but de maintenir constante la tension entre l'électrode et le bain ou entre deux électrodes ou l'intensité du courant absorbé ou encore la résistance de l'arc.

Les conducteurs amenant le courant aux électrodes sont formés par un faisceau de barres nues en cuivre ou en aluminium, disposés de champ

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et espacés entre eux pour faciliter leur refroidissement au contact de l'air, ou mieux on les sandwiche et on les place très près les uns des autres. Quant aux bornes des appareils récepteurs, elles se font parfois en fer ou en acier moulé, alors que les prises de courant doivent supporter une température élevée, souvent supérieure au point de fusion du bronze. Pour

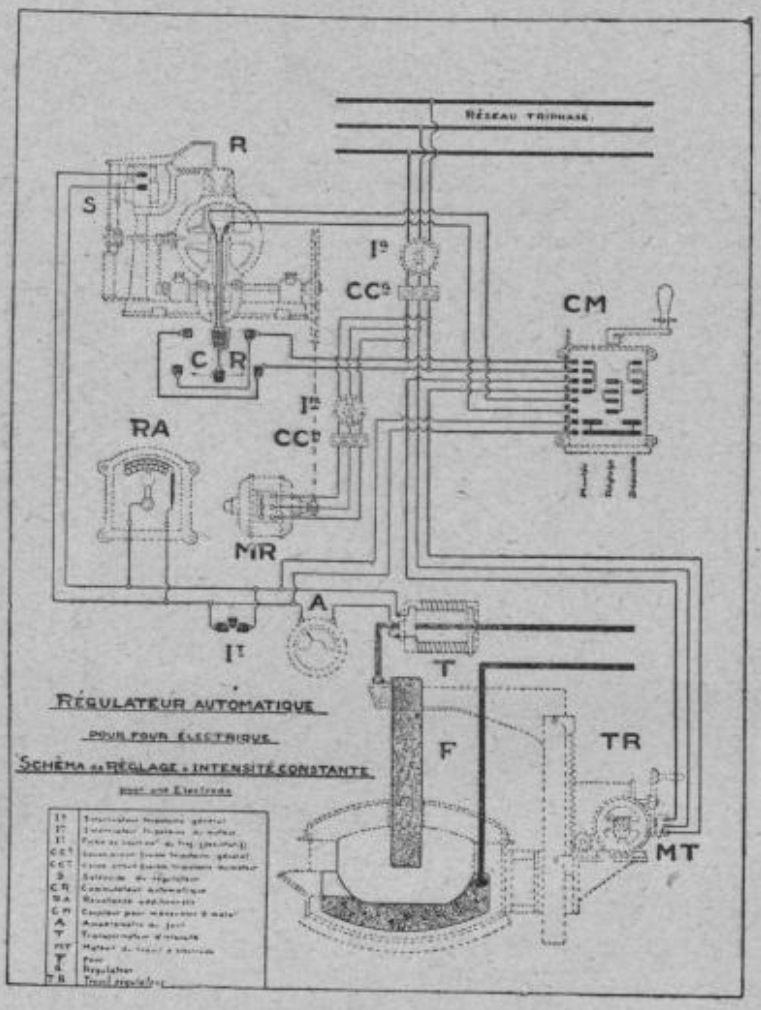


Fig. 1942. — Schéma d'installation d'un régulateur pour treuil d'électrode de four électrique à intensité constante. (Construction H. Guénod, S. A.).

augmenter le pouvoir des conducteurs, par suite leur capacité d'échauffement émissif, qui dans l'espèce limite la densité de courant, on les badigeonne avec une peinture matte, noire ou blanche.

La disposition des barres est diverse, selon la nature des courants utilisés, et il y a certaines précautions à prendre que la pratique seule peut suggérer pour se tenir dans les meilleures conditions au point de vue de la densité de courant, de non-production de courts-circuits et de la plus petite chute de tension dans la ligne.

On peut distinguer les connexions à serrage ou contact extérieur et les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

connexions à contact ou scellement central ; les premières se divisent en deux groupes, celles dans lesquelles la surface de serrage est fixe pour toute la durée de l'électrode et celles dans lesquelles le contact est mobile et permet de faire glisser l'électrode entre les surfaces de contact, à mesure de son usure. Enfin les connexions peuvent être établies sans refroidisse-

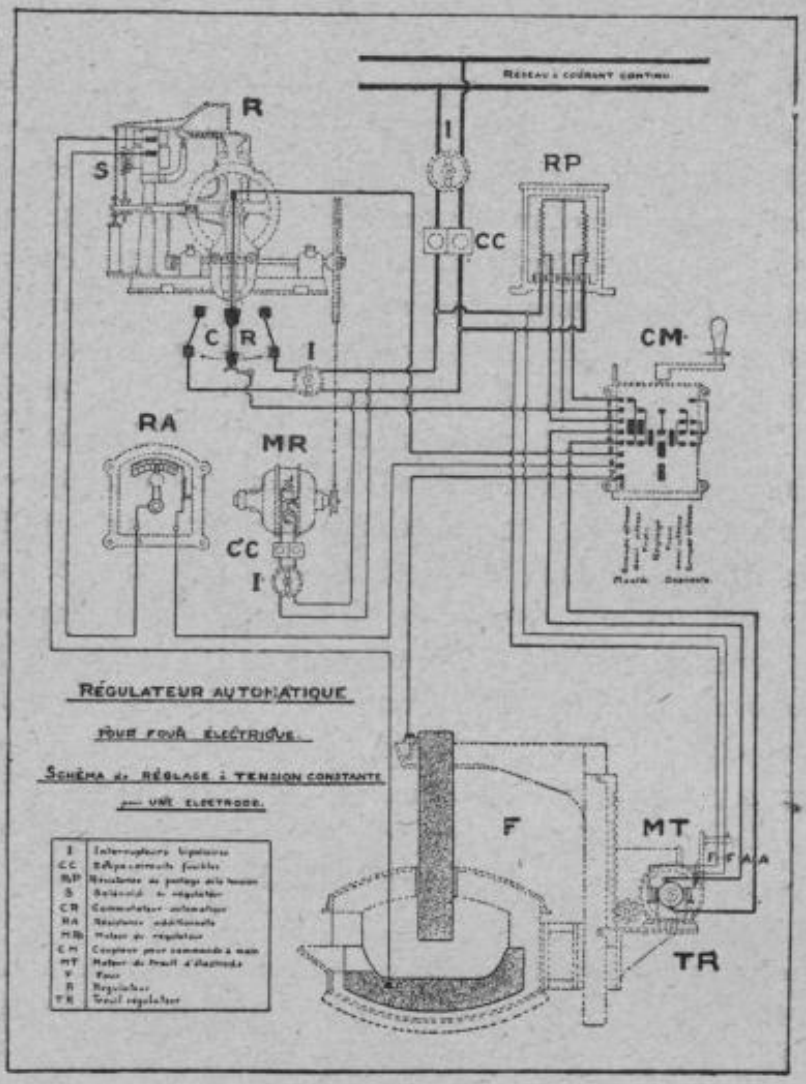


FIG. 1943. — Schéma d'installation d'un régulateur pour treuil d'électrode de four électrique à tension constante. (Construction H. Guénod, S. A.).

ment artificiel, et avec refroidissement par ventilation forcée ou par circulation d'eau.

Dans l'établissement d'une connexion d'électrodes, on doit rechercher avant tout la diminution du nombre des contacts, que ces derniers soient disposés en parallèle ou en série. Dans les pièces de bronze à haute conductibilité électrique, il est prudent de ne pas dépasser une densité de courant maxima de 1 ampère par millimètre carré de section, si les conducteurs n'ont pas de refroidissement artificiel. S'il existe pour ces pièces un refroidissement artificiel, la densité de courant peut être portée à 1,5 et 2 am-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pères. Au contact de deux parties métalliques bien dressées (bronze sur bronze), la densité de courant ne doit pas dépasser 10 ampères par centimètre carré de surface de contact, les parties étant bien ajustées et non étamées. Au contact entre une partie métallique et le noyau de charbon, la densité de courant, si le métal est du cuivre, ne doit pas être supérieure à 5 ampères par centimètre carré de surface, et à 3 ampères si le métal est du fer.

M. Paoloni a imaginé un dispositif en vue d'assurer tout à la fois une bonne conservation de l'électrode inférieure et un contact convenable entre celle-ci et les conducteurs en cuivre. Tout d'abord il choisit des électrodes en charbon prismatique chauffées au préalable à 1.400°. Il interpose entre l'électrode inférieure ainsi formée et les poutres de support une pâte très conductrice ; enfin il fait passer au travers de cette pâte des barres de cuivre qui, sortant des deux côtés de la cuve, viennent se connecter avec les conducteurs inférieurs. On peut fabriquer cette pâte avec des matières charbonneuses mélangées à de la poussière de cuivre additionnée de goudron.

L'élément essentiel qui détermine le rendement d'une électrode est la perte de tension entre son extrémité chaude et son extrémité froide. Or, nous avons vu que, pour une électrode de substance donnée, il existe une chute minima de tension au-dessous de laquelle il n'est pas possible de descendre sans augmenter les pertes totales. Ce curieux phénomène montre combien l'électrode est différente, à ce point de vue, d'un conducteur ordinaire, pour lequel on peut réduire la perte autant qu'on le désire, en augmentant sa section et diminuant sa longueur.

Cette différence provient de ce qu'il y a pour l'électrode une autre cause de perte, à savoir la conduction de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur du four.

M. C. Hering a proposé d'appeler cette chute de voltage minima « voltage de l'électrode » ; c'est une propriété physique caractéristique de chaque substance, au même titre que la densité, la conductivité, etc.

Plus le voltage d'électrode est bas, plus le rendement correspondant est élevé.

Cette quantité est indépendante de la longueur, de la section et du courant.

Elle dépend au contraire de la chute de température dans l'électrode et croît comme sa racine carrée.

Pour une chute de température de 1°, sa valeur en volts est donnée par :

$$e = A\sqrt{\rho K},$$

K étant la conductivité thermique ;

ρ, la résistivité électrique ;

A, une constante qui dépend des unités choisies.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par exemple, pour le graphite, dont la résistivité est $\rho = 0{,}000266$, et $K = 0{,}24$ par pouce cubique (les unités étant l'ohm, la petite calorie et le degré centigrade), on trouve :

$$A = 2{,}894$$

et :

$$e = 2{,}894 \sqrt{0{,}000266 \times 0{,}24} = 0{,}0231 \text{ volt.}$$

Si alors la chute de température dans l'électrode est de 1.600° C., dont la racine carrée est 40, la chute de tension sera :

$$40 \times 0{,}0231 = 0{,}92 \text{ volt,}$$

pour toute électrode en graphite de bonne proportion, quels que soient sa taille et le courant normal.

De même, un four de 50 volts avec électrodes en graphite a un rendement d'électrode de 96,3 0/0, quelles que soient ses dimensions, pourvu qu'il soit bien conçu.

Il est intéressant de remarquer que cette perte minimum aux électrodes est très faible (0,0231 volt pour le graphite et 0,0224 pour le charbon, par degré centigrade).

M. C. Héring a concisé son travail en donnant la formule pratique suivante qui résulte immédiatement des considérations ci-dessus, pour exprimer le rendement des électrodes pour un voltage total E donné du four électrique :

$$\frac{E - 2e}{E},$$

e étant la chute constante dans chaque électrode.

Dans le tableau suivant les valeurs de ρ sont exprimées en microhms-centimètre, celles de K en calories-grammes, par seconde et par centimètre cube.

CARBONE AMORPHE			GRAPHITE		
TEMPÉRATURE en degrés C.	ρ	K	TEMPÉRATURE en degrés C.	ρ	K
20	4606		20	857	
360	4210	0,089	300	839	0,338
751	3820	0,124	546	824	0,324
942	3770	0,129	720	802	0,306
1400	3700	0,137	1400	790	0,280
2000	3600	0,144	2000	690	0,250

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les transformateurs statiques pour fours électriques, utilisant des courants énormes (30.000 ampères et plus) dans les enroulements en basse tension, il se développe des courants de Foucault intenses qui obligent à assurer de bons contacts entre les différentes spires et à fixer solidement les enroulements et tous organes à cause des efforts mécaniques entre conducteurs dus aux phénomènes électrodynamiques, et enfin à limiter les variations et l'intensité de court-circuit en donnant aux transformateurs une chute de tension élevée.

Comme appareils de mesure, on emploie les appareils à shunts et ceux à transformateurs d'intensité. On construit de très bons shunts avec des résistances tubulaires prises entre deux blocs de cuivre rouge, de façon à refroidir l'ensemble par une circulation d'eau. Pour le courant alternatif on doit s'appliquer dans la construction des shunts à rendre la valeur de la self très petite comparativement à la résistance du shunt ; à cet effet, on constitue cette dernière par un métal de grande résistivité et en évitant l'échauffement du shunt, qui résulte de cette grande résistivité, par une circulation d'eau.

Pour les appareils à transformateurs, les plus exacts sont ceux dont les circuits magnétiques sont formés de tôles découpées d'une seule pièce avec bobinage secondaire régulier. Dans leur emploi, il n'y a pas à craindre comme avec les shunts, les effets d'induction, car les conducteurs réunissant les secondaires du transformateur à l'ampèremètre peuvent former des boucles quelconques sans fausser les indications. Il faut aussi prévoir leur installation pour que le bobinage du secondaire ne soit jamais à circuit ouvert, pour la bonne conservation de l'appareil.

Quant aux galvanomètres, pour éviter l'action des courants extérieurs sur ces appareils, M. Ch. Louis indique de les placer au minimum à 50 centimètres par millier d'ampères des canalisations les plus rapprochées et naturellement en dehors du champ d'action des fuites magnétiques des machines, s'il en existe dans le voisinage. Pour les compteurs enregistreurs, le même auteur préconise l'emploi d'appareils ne comportant pas d'aimant permanent.

674. Aciéries électriques mondiales. — La production française de la fonte en 1913 a atteint 5.311.000 tonnes ; sans la guerre cette production aurait atteint 6.500.000 tonnes en 1916, ce qui montre que cette industrie était en bonne voie de progrès.

Pour les aciers, les progrès ont été encore plus marqués. De 1.839.000 tonnes en 1903, elle est passée à 4.635.000 tonnes en 1913, accusant ainsi une plus-value de 152 0 /0, presque deux fois plus marquée que celle de la fonte. Ce résultat n'a été dépassé que par l'Allemagne et de très peu. La production de coke qui joue un si grand rôle en métallurgie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est passée en France de 1.900.000 tonnes en 1901, à 3.667.000 tonnes en 1913, alors que ce chiffre a atteint 32.667.000 en Allemagne, celle-ci ayant triplé sa production pendant le même espace de temps.

Il faut distinguer les usines fabriquant des aciers spéciaux au creuset et celles se livrant à l'obtention des aciers ordinaires. Pour les premières, elles trouvent un emplacement tout naturel au pied des chutes d'eau ; quant aux secondes, elles ont peut-être plus d'avantages à rester à proximité de la main-d'œuvre ou de la consommation, car la question des traitements mécaniques variés du métal obtenu au four a une importance plus considérable que celle du prix de revient des calories. Les principales usines électriques produisant de l'acier sont : en France, les usines de la Praz, de Froges, de Kerrouse, de Livet, de l'Arbine, d'Allevard, de Saint-Léger, du Giffre, d'Ugine, d'Unieux, de Saint-Juéry ; en Italie, la fonderie royale de Turin et l'usine Krupp (12.000 HP) ; en Suède, l'usine de Gysinge ; en Espagne, l'usine d'Araya et l'usine Krupp à Santiago ; en Norvège, l'usine de Kortfors ; en Westphalie, l'usine de Plattemberg ; en Hongrie, l'usine Petrozseny (Krupp) ; en Suisse, les usines de Courtepin et Montbovon et l'usine de Gartnellen ; en Allemagne, les usines de Grub-Isle et de Remscheid ; en Angleterre, l'usine de Sheffield, et aux États-Unis, l'usine de Syracuse.

A l'*usine de Livet* (Isère) le haut fourneau électrique dont nous avons donné la description produit 8.000 kilogrammes d'acier en vingt-quatre heures par réduction directe du minerai et 25.000 kilogrammes par le traitement des déchets de fer ou d'acier. On fabrique dans cette usine des ferros-siliciums très estimés dont la teneur varie entre 25 et 80 0/0 ; elle produit aussi des ferros-chromes durs, des ferros-tungstènes à 78 0/0, des ferros-manganèses à 80 0/0, des alliages ternaires, etc.

Le nombre total des fours de cette usine était de 9 en 1909, dont 6 de 1.200 HP et 3 de 2.000 HP.

La qualité des aciers que produit l'*usine de la Praz* (Savoie), appartenant à la Société électrométallurgique française, est comparable à celle des meilleurs aciers au creuset. On prépare au Bessemer basique ou au Martin, en partant de la fonte, un métal oxydé que l'on porte ensuite dans le four électrique, en ayant soin d'éliminer toute trace de scorie phosphatée. On peut désoxyder complètement le métal au moyen de la carburite et le décarburer au point voulu, dans l'espace d'une heure environ. On fait à la fin les additions convenables de ferros-siliciums, de manganèse ou d'aluminium, et on coule.

Avec ce dernier système, on peut pratiquement aborder la fabrication des aciers mi-fins et même ordinaires. On consomme seulement 400 HP ou 300 kilowatts pendant une heure, soit par tonne 120 kilowatts. Avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un four d'une capacité de 3 tonnes, où on charge 2.500 kilogrammes de ferraille, la préparation directe de l'acier dure huit heures.

L'usine de la Praz fabrique de l'acier extra-doux, de l'acier à très haute teneur en carbone (4,06 0/0), des aciers à coupe rapide au chrome, tungstène, molybdène, vanadium, etc. ; des ferros-chromes, depuis le métal tenant entre 1 et 2 0/0 de carbone jusqu'au métal tenant 8 à 10 0/0 de carbone avec 50 à 70 0/0 de chrome, très employés en France et en Angleterre ; des ferros-siliciums à 25 et 50 0/0, des ferros-nickels, des ferros-tungstènes à 80 0/0.

L'usine de la Praz traite aussi des minerais à 6 0/0 de cuivre et produit des mattes à 40 0/0 de cuivre.

A l'*usine de Gysinge*, où on emploie des fours du système Kjellin, de 175 kilowatts, on obtient 5.200 à 5.500 kilogrammes en lingots par vingt-quatre heures. Chaque coulée est d'environ 850 kilogrammes et le contenu du four, 1.450 tonnes.

A *Essen* et à *Guldsmehulle*, on utilise des fours du même système, d'une puissance de 750 kilowatts et d'une capacité de 8.500 tonnes.

Le four à induction Gin, installé à l'*usine Krupp*, affecte la forme rectangulaire et comporte des canaux placés parallèlement, inclinés longitudinalement et réunis par des conduits à section circulaire dits conduits de chauffage, qui mettent en communication l'extrémité profonde de chaque canal avec l'origine moins profonde du canal suivant.

L'enroulement du circuit primaire est constitué par du cuivre isolé et le courant secondaire est le métal en fusion. Un ventilateur extérieur envoie un courant d'air qui se répartit autour des noyaux magnétiques et des bobines primaires, de manière à refroidir continuellement le circuit primaire et les tôles de l'inducteur. Le garnissage du four (qui est un caisson en tôles) repose sur une assise en briques de magnésie ; il est formé par de la dolomie pilonnée et agglomérée au goudron comme les tôles du four Martin.

La voûte est établie au moyen de pièces réfractaires.

Aciérie d'Ugine (*Savoie*). — L'usine d'Ugine qui appartient à la Société anonyme électrométallurgique, et qui est spécialement affectée à la fabrication de l'acier par l'application des procédés Girod, comprend : 1° sur la rivière l'Arly (d'une chute totale de 400 mètres), la force correspondant à l'utilisation de 130 mètres de chute avec un débit moyen de 5 mètres cubes (7.000 HP) ; 2° sur le torrent le Nan-Rouge, affluent de l'Arly, une force de 4.500 HP, correspondant à une chute de 300 mètres, avec un débit moyen de 1.500 litres.

En outre la Société s'est rendue acquéreur d'importantes forces sur le Bonnant à Saint-Gervais, usines de Bionnay (6.300 HP), des Rateaux (4.500 HP), du Fayet (12.000 HP), combinées avec la location d'autres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

forces de la même région, Quiège (75.00 HP), Villaret (600 HP), Venthon (7.000 HP), le tout formant une puissance de 45.000 chevaux utilisables à l'usine d'Ugine. Les travaux de réalisation de Saint-Gervais ont été décidés avant l'installation des chutes encore disponibles sur l'Arly pour la raison suivante. L'Arly est une rivière essentiellement alimentée par des névés qui ne persistent que jusqu'en juillet, et d'autre part par des sources et les eaux d'infiltration de nombreux pâturages et forêts de la haute vallée de l'Arly et de la chaîne des Aravis. Le régime d'hiver, en année normale, est très favorable, ainsi que le régime d'été, du reste, mais par contre, dans les années de sécheresse, comme l'année 1906 l'a été, l'Arly subit un étiage d'été. En apportant à Ugine la force provenant du Bonnant alimenté par les principaux glaciers de la chaîne du mont Blanc, on marie ainsi deux régimes bien différents, et on obtient une moyenne annuelle de force très régulière et très favorable. Les rivières de glacier donnent leur maximum dans la saison chaude, au moment où l'Arly peut baisser en cas de sécheresse prolongée, et l'Arly, d'autre part, assure en hiver un bon régime également.

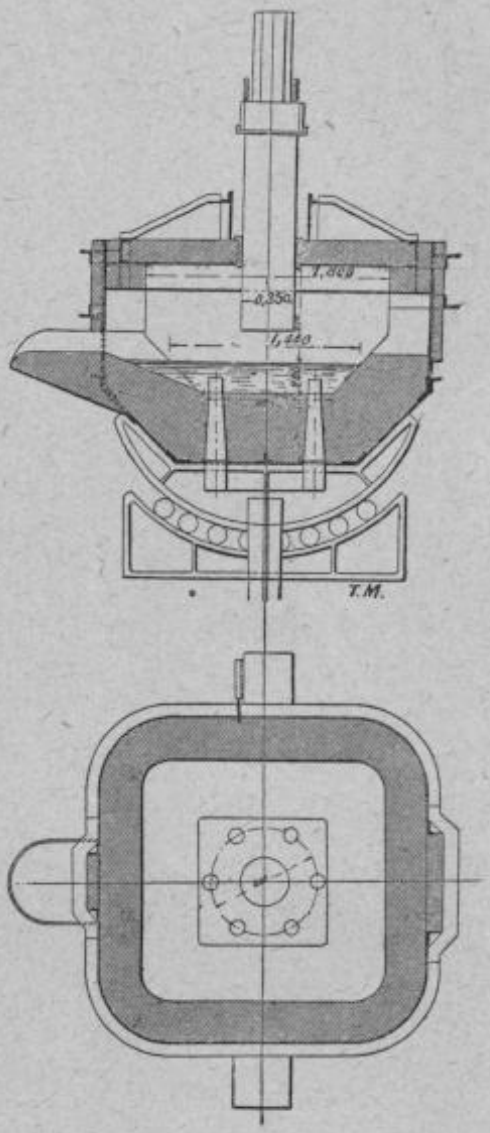


FIG. 1944. — Coupe schématique d'un four Girod de 2 tonnes.

Les aciéries Girod, qui pouvaient produire, en 1912, 75 tonnes par jour ont produit plus du double en 1917.

Elles livrent en outre du courant aux usines de Chedde (Forces de l'Arve), de Brassilly (Forces du Fier) et à la nouvelle usine sur le Fier appartenant à la Société hydroélectrique de Lyon.

L'usine comporte actuellement 20 groupes hydroélectriques, dont 1 alternateur, 600 HP Schneider, fer tournant, spécialement destiné à actionner le four électrique à acier ; 6 dynamos Schneider de 600 HP chaque, 9 dynamos Fives-Lille de 300 HP chacune, et 3 alternateurs Brown-Boveri de 600 HP chacun.

Le voltage des machines varie de 60 à 120 volts, suivant les besoins.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

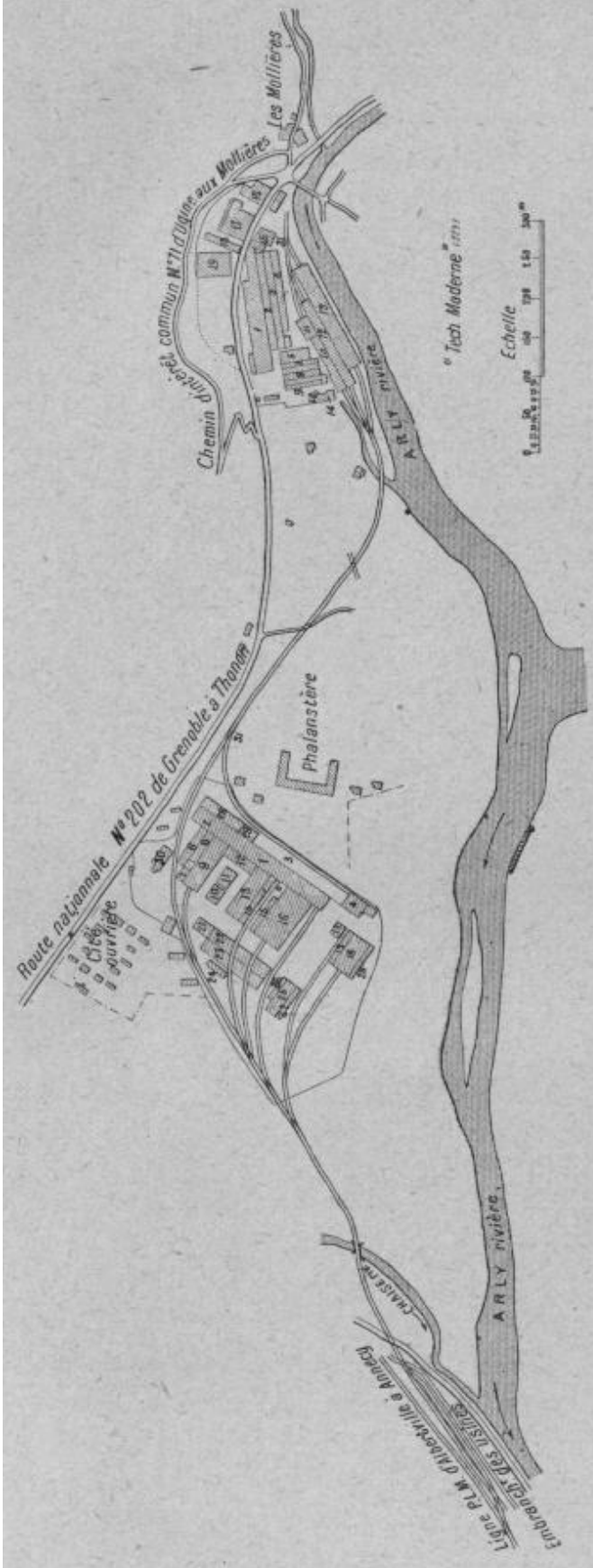


FIG. 1945. — Plan d'ensemble des aciéries d'Ugine (1912).

Toutes les turbines sont des roues Pelton ; les unités de 600 HP sont clavetées directement en porte-à-faux sur l'arbre de la génératrice ; celles de 300 HP sont à accouplement élastique avec les génératrices. En plus des groupes de fabrication, il y a deux groupes, dont l'un de 100 HP pour la force nécessaire dans les différents ateliers, et l'autre de 50 HP pour l'éclairage.

L'usine d'Ugine, vrai type d'aciérie moderne, comportait avant la guerre 3 fours électriques de 2 1/2 tonnes pour la fabrication des aciers spéciaux pour outils et construction d'automobiles ; 2 fours électriques de 8 à 12 tonnes pour la coulée des gros lingots et des aciers de construction et un four de 1,5 tonne à un électrode ; un atelier de laminage avec plusieurs trains de laminoirs ; une forge comprenant huit marteaux-pilons et martinets ; un atelier de moulage d'acier capable de produire quinze tonnes par jour, depuis les pièces de plus petites dimensions jusqu'à 10 tonnes et même 24 tonnes ; un atelier d'ajustage, de finissage et de parachèvement.

Il a été installé, en cours de la guerre, des presses à forger de 2.000 tonnes et des pilons de 10 tonnes.

Cette installation est natu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rellement complétée par un atelier de traitement thermique avec ses annexes réservées aux opérations délicates de recuit, trempe et revenu et par un atelier d'usinage très important.

En outre il a été créé une usine spéciale pour la fabrication courante

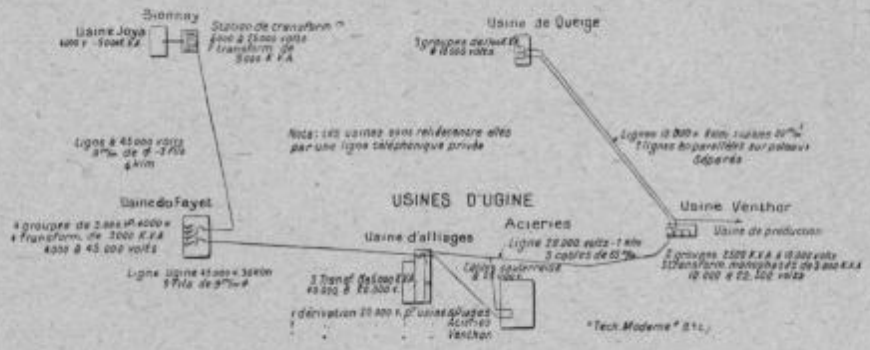


Fig. 1946. — Aciéries d'Ugine. Schéma des installations électriques à haute tension.

des électrodes pour les besoins de l'aciérie, d'après les procédés Paul-Girod, rappelés d'autre part.

L'usine d'Ugine s'est spécialisée depuis longtemps dans la fabrication

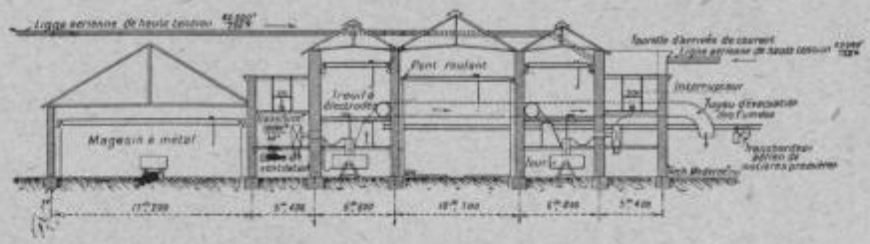


Fig. 1947. — Aciéries d'Ugine. Coupe transversale de la nouvelle usine de ferros-alliages.

des alliages ferreux. C'est d'abord toute la gamme des ferros-chromes, depuis les qualités les plus dures à 8,78 0/0 de carbone, jusqu'aux ferros-chromes extra-doux à 0,55 de carbone, puis les ferros-tungstènes, les

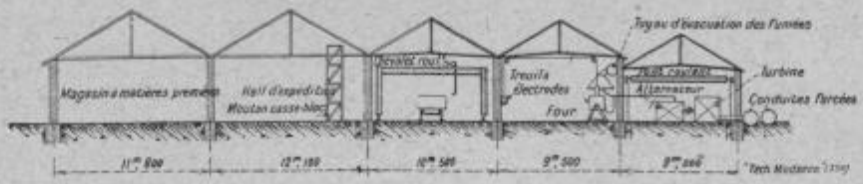


Fig. 1948. — Aciéries d'Ugine. Coupe transversale de l'ancienne usine de ferros-alliages.

ferros-vanadiums, les ferros-molybdènes, les ferros-tantales, les ferros-manganèses, les ferros-titanes, etc.

Elle produit une catégorie d'alliages dans lesquels le fer ne domine plus et obtenus également au four électrique ; c'est le silico-aluminium à 48,47 0/0 de Si et 16,78 0/0 d'aluminium, le silico-alumino-manganèse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(22,8 Si, 11,04 Al et 20,84 Mn), le silico-manganèse à 23,50 de Si et 53,17 Fe, le cuprico-silicium à 38,91 Cu et 54,23 Si, etc.

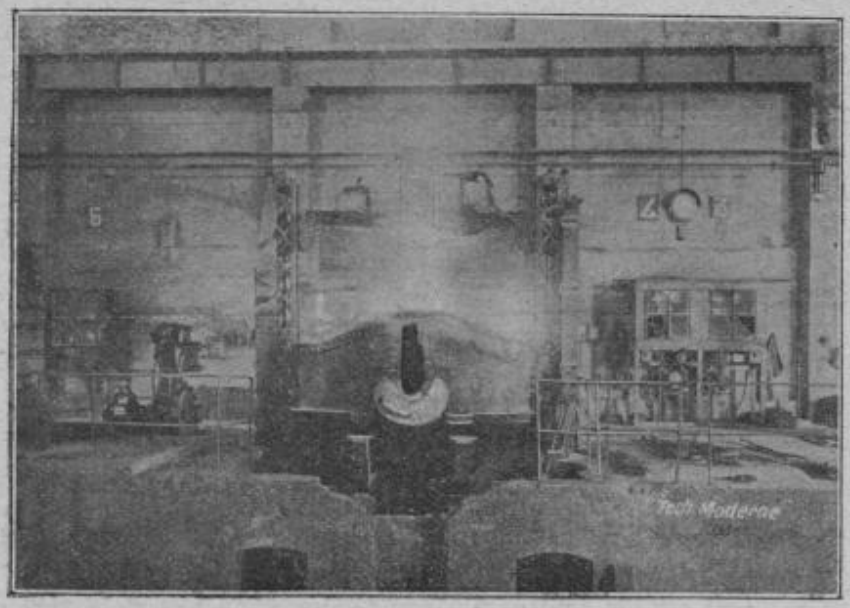


FIG. 1949. — Four à acier Girod de 2,5 tonnes.

Le ferro-silicium est la fabrication courante, non seulement à l'usine

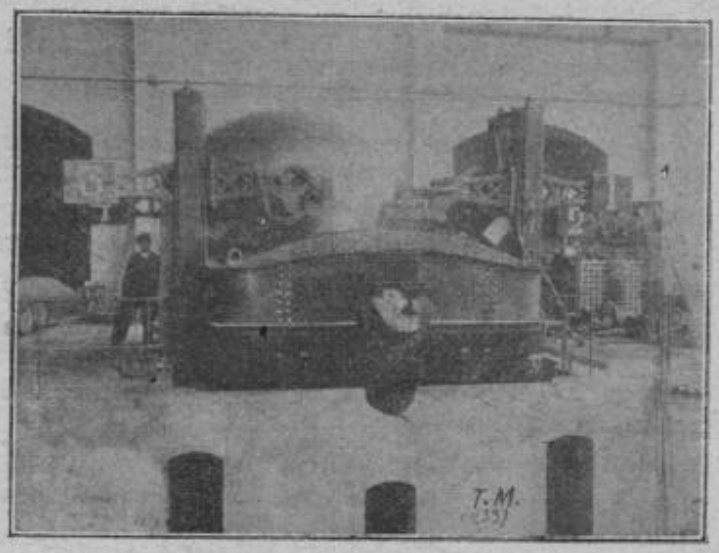


FIG. 1950. — Four à acier Girod de 12 tonnes.

d'Ugine, mais encore aux deux usines de Courtepin et de Montbovon (1) que la Société possède en Suisse.

(1) A Courtepin, on utilise des silices du Jura, et Montbovon consomme des silices du Jura et de la Haute-Savoie. La tournure est achetée en Suisse, dans les nombreuses usines mécaniques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il nous faut aussi signaler les aciers au nickel à toutes les teneurs, jusqu'à 32 0/0 de nickel et en tous degrés de dureté, y compris les aciers doux de cémentation. Les aciers de 2 à 6 0/0 de nickel sont les plus fréquemment employés ; la faveur dont ils jouissent est due à leur remarquable ténacité.

Mais les aciers nickel-chrome sont ceux dont l'emploi s'est le plus déve-

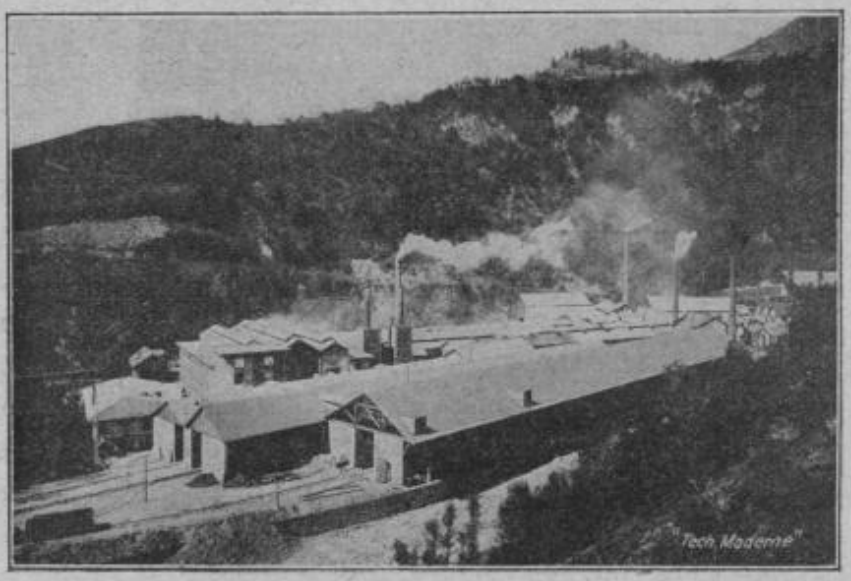


FIG. 1951. — Aciéries d'Ugine. Vue d'ensemble de l'usine de ferro-alliages.

loppé, car ils remplacent dans la plupart des cas les aciers au nickel ; c'est le plus souple des aciers.

Le tableau ci-après donne les caractéristiques des nuances mi-douces et mi-dures les plus fréquemment livrées au commerce par l'usine d'Ugine. Ces résultats sont des plus remarquables.

TRAITEMENT	E	R	A	STRICTION	RÉSILIENCE
Nuance demi-douce					
Recuit à 850°.....	35	50	25	63	13
Trempé à 800°. Recuit à 500°.....	69	75	14,5	65	15
Nuance mi-dure					
Recuit à 850°.....	50	65	17	55	13
Trempé à 800°. Recuit à 600°.....	106	118	10	34	8

La marche normale d'un four de 2 tonnes est la suivante : kilowatts effectifs absorbés, 200 ; on charge à froid environ 1.400 kilogrammes de fonte et riblons de fer ou uniquement de riblons de fer, suivant le genre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de travail que l'on adopte. La charge totale comprend environ 1.400 kilogrammes de métal, soit rien que de riblons, soit riblons, tournure et fonte, soit tournure et fonte, suivant la nature du travail adopté. A cette charge est ajoutée successivement, au fur et à mesure des besoins, de la castine, du minerai de fer, éventuellement de la silice (le four actuel étant revêtu de magnésie, on évite autant que possible la silice) ; la charge du métal à fondre ou à traiter se fait en trois fois, un tiers de suite avec une partie de la castine et du minerai de fer, s'il y a lieu ; un second tiers une heure après, enfin le troisième tiers deux heures après environ la deuxième charge. Au bout de trois à trois heures et demie, la charge entière est fondue et on opère l'affinage du métal en décarburant jusqu'à ce qu'on obtienne une éprouvette entièrement pliable. Une fois ce résultat obtenu, et le métal suffisamment chaud pour la coulée, on ajoute les additions voulues soit pour carburer, désoxyder ou éventuellement modifier la qualité de l'acier par des alliages tels que ferros-tungstènes, ferros-molybdènes, etc. La caractéristique des aciers faits dans ce four est que ces aciers perdent tout leur manganèse et tout leur silicium. C'est pourquoi on ajoute généralement avant la coulée un peu de silico-manganèse et le cas échéant dans la poche de coulée même ou dans le four, après avoir interrompu le courant, du ferro-silicium à 75 0/0. On a ainsi un métal parfaitement calme. En cours d'opération, le laitier est évacué une ou plusieurs fois si nécessaire et remplacé par un nouveau laitier. Avec une charge de 1.400 kilogrammes, on obtient environ 1.250 kilogrammes d'acier dans l'espace de cinq heures, si l'on n'a pas fait d'addition d'alliages dits réfractaires, tels que ferros-chromes, nickel, tungstène, molybdène, vanadium, etc. On arrive donc à une production d'acier ordinaire au carbone de 6.000 kilogrammes par vingt-quatre heures pour un four absorbant 200 kilowatts avec un courant alternatif de 50 à 65 volts, 3.500 à 4.000 ampères environ, suivant le moment de l'opération, c'est-à-dire qu'il faut environ 800 kilowatts pour une production d'une tonne d'acier. Ce rendement favorable est dû particulièrement à la fermeture hermétique du four.

Aciérie d'Unieux. — L'acier est élaboré au four Martin, puis coulé dans une poche qui est vidée immédiatement dans un four Keller permettant la coulée de lingots de 8.000 kilogrammes.

L'acier liquide est aussitôt mis en circuit, et les opérations de désoxydation, d'épuration complémentaire et de dosage sont entreprises. L'épuration est obtenue jusqu'à : soufre, phosphore $< 0{,}01$.

L'installation électromécanique a été mise en marche en avril 1908. Le four est alimenté par un alternateur Westinghouse de 750 kilowatts.

L'*usine du Giffre* fabrique du ferro-chrome affiné ayant une teneur de 0,50 0/0 environ de carbone seulement, du molybdène, à l'état pur, fondu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et affiné avec une teneur en carbone inférieure à 2 0/0, du manganèse avec une teneur en fer de 1 à 2 0/0 et une teneur en carbone inférieure à 2 0/0, du tungstène à moins de 0,50 de carbone, du mangano-silicium à diverses teneurs en silicium, dont les plus courantes sont 25 0/0, 33 0/0, 42 0/0 et 50 0/0, du mangano-silicium d'aluminium dont les proportions des composants peuvent varier, selon les emplois.

Ces deux derniers alliages, exempts de carbone et pratiquement exempts de fer, permettent d'éviter dans l'affinage des aciers, tous les inconvénients connus que donne l'emploi des silico-spiegels, ferros-siliciums et ferros-manganèses.

Les fours du système Chaplet employés à l'usine du Giffre sont du type basculant et de 2.000 HP de puissance. Ils fonctionnent avec une seule électrode correspondant à un foyer, le courant se fermant par le bain métallique et un canal conduisant à une deuxième électrode en court-circuit sur le métal refroidi.

Usines de la Société métallurgique française. — Cette importante société, dont le siège social est à Froges, possède l'usine de la Praz (13.000 HP), l'usine de Saint-Michel-de-Maurienne avec 17.000 HP, et une usine en cours d'installation dans la vallée de la Durance qui pourra donner 35.000 HP.

Ces usines fabriquent de l'acier extra-doux, de l'acier à très haute teneur en carbone (4,06 0/0 de carbone), des aciers à coupe rapide au chrome, du tungstène, du molybdène, du vanadium, etc. ; des ferros-chromes, depuis le métal tenant entre 1 et 2 0/0 de carbone, jusqu'au métal tenant 8 à 10 0/0 avec 50 à 70 0/0 de chrome, très employés en France et en Angleterre ; des ferros-siliciums à 25 et 50 0/0 de silicium, des ferros-nickels à 40 0/0 de nickel, 2 0/0 de carbone et moins de 2 0/0 de silicium, des ferros-tungstènes à 80 0/0 de tungstène.

Les *usines d'Allevard* fabriquent sept types d'acier dénommés : extra-dur, très tenace, très dur, tenace, dur, demi-dur et demi-dur soudant. L'installation comprend des fours de 500 HP, et des fours système Chapelet de 2.000 HP chacun. On marche, soit à l'*ore process*, soit au *scrap process*. Les alternateurs monophasés permettent d'avoir cinq voltages différents : 25, 50, 100, 200 et 400 volts.

A *Volklungen*, sont en fonctionnement un four triphasé Roechling-Rodenhauser pour une charge de 1.500 kilogrammes, relié au réseau général à 450 volts et 50 périodes ; un four de 3.500 kilowatts de charge avec du courant alternatif à 3.000 volts.

Le cos φ du grand four a été mesuré de 0,872, et celui de 1 tonne 1/2 un peu moins élevé.

Les résultats obtenus ont montré que l'on peut sans hésiter relier des fours d'une puissance considérable aux centrales existantes sans néces-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

siter de machines spéciales et sans avoir à craindre de fluctuations nuisibles ni d'irrégularités de charges pour les centrales.

A l'*usine de Remscheid*, le rendement du traitement est très élevé ; il atteint 92,5 0/0 sous la forme de slooms martelés.

La teneur de l'acier en phosphore et en soufre est en moyenne de 0,005 et de 0,012 0/0 respectivement. Quelles que soient les dimensions du four, l'opération demande deux heures à deux heures et demie. Avec un four de 2 tonnes, le prix de revient de l'acier peut être ramené à 120 marks, et on estime qu'avec un four de 10 tonnes, il ne dépassera pas 90 marks, et l'énergie absorbée, 150 kilowatts.

L'*usine de Stassano* à Turin, où le charbon et le coke sont à peu près inconnus, fonctionnent des fours électriques, de 1.000 HP qui permettent des coulées de 5 tonnes à la fois, et ils sont à marche intermittente. A l'*usine de Kortfors*, où on utilise le procédé Froges-Héroult en partant d'un mélange froid de fonte de Suède et de riblons d'acier, il existe des fours de 4 tonnes qui sont surtout employés à la fabrication du ferro-silicium, des aciers à outils. Enfin, à l'*usine de Syracuse*, on utilise des fours Héroult de 5 tonnes marchant en procédé mixte pour la fabrication des aciers spéciaux.

Aciérie électrique de Dommeldange (Grand-Duché de Luxembourg). — Le four électrique ici ne sert que pour obtenir l'affinage final ou mise au

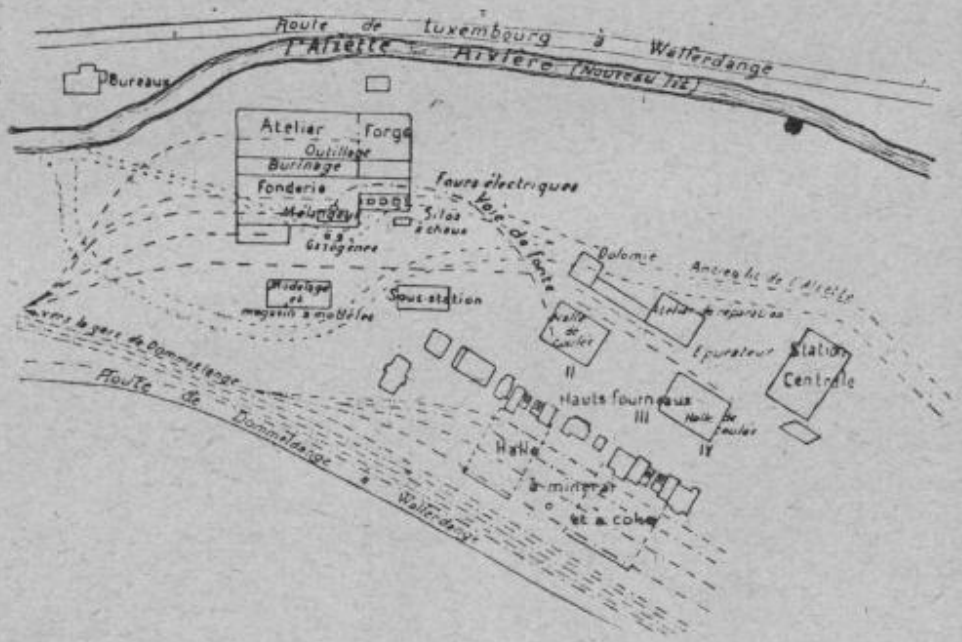


Fig. 1952 — Usines de Dommeldange. Plan d'ensemble.

point de l'acier, la première épuration se faisant par le procédé Thomas.

La fonte liquide Thomas, à Dommeldange, est d'abord traitée dans un four Wellmann-Talbot, à gaz de gazogène. Ce four est oscillant et à récupérateur de chaleur. Sa capacité est de 20 tonnes. La tôle et les revête-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ments sont basiques et le gaz est produit dans une batterie de gazogènes Dowson.

La fonte liquide est amenée aux hauts fourneaux au mélangeur Wellmann à l'aide d'un chariot électrique et les poches de fonte sont enlevées par un pont roulant électrique et déversées dans le mélangeur.

La première charge du four Wellmann comporte un mélange de riblons et de fonte Thomas. Après quelques heures de traitement, on obtient un acier doux à 0,08 à 0,19 0/0 de carbone.

C'est ce métal qu'on traite ensuite aux fours électriques. Il est transporté du mélangeur à ces fours par un pont roulant électrique de 15 tonnes.

L'installation comprend trois fours monophasés de 3.500 kilogrammes et un four triphasé de 1.500 kilogrammes.

Les fours monophasés sont du système Kjellin, modifié par Röchling-Rodenhauser.

La (*fig.* 1952 *bis*) représente en coupe verticale un de ces fours (1). Les bobines primaires A sont refroidies par une circulation d'air frais et protégées extérieurement par un revêtement basique en dolomie. Les canaux C ménagés entre le revêtement des bobines et le revêtement extérieur du four forment l'induit.

La partie centrale commune D constitue la chambre d'affinage. Afin d'obtenir dans la chambre d'affinage une température au moins aussi élevée que dans les canaux étroits C, on a établi une dérivation du courant secondaire du transformateur. Le courant supplémentaire est amené au bain par les lames métalliques E noyées dans la maçonnerie réfractaire et par les pièces G, conductrices de second ordre.

Le courant primaire fourni par les groupes transformateurs de la sous-station est du courant monophasé à 3.000-3.500 volts avec fréquence de 25 périodes par seconde.

L'intensité normale absorbée par chaque four est de 200 ampères dans la bobine primaire. Le voltage secondaire est de 6 à 8 volts et le facteur de puissance varie de 0,5 à 0,6. Les coulées s'effectuent toutes les deux à trois heures et la production journalière s'élève par vingt-quatre heures à 30 tonnes environ.

La consommation d'énergie est de 350 à 390 kilowatts-heure par tonne de métal raffiné et la dépense pour la réfection du garnissage des fours est de 400 à 500 francs par quinzaine.

Les aciers produits sont tous de qualité supérieure.

Les tableaux suivants donnent les résultats de quelques analyses de ces aciers, ainsi que les résultats d'essais à la traction de l'acier forgé et de l'acier moulé.

(1) Voir figure, page 3281.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU I. — **Analyses chimiques**

NATURE DE L'ACIER	TENEURS 0/0				
	C	Si	S	Ph	Mn
Acier de fonderie	0,35 à 0,40	0,50	0,01	0,002	0,5
Acier doux	0,08	0,098	0,007	0,009	0,25
Acier au chrome ($Cr = 0,87$)	1,17	0,19	0,009	0,009	0,16
Acier de cémentation au nickel ($Ni = 3,60$)	0,12	0,20	0,008	0,009	0,40
Acier dur	0,85	0,23	0,009	0,010	0,29

TABLEAU II. — **Essais à la traction**

MARQUE DE L'ACIER (acier forgé)	CHARGE DE RUPTURE en kg : mm²	ALLONGEMENT pour 0/0	MARQUE DE L'ACIER acier coulé	CHARGE DE RUPTURE en kg : mm²	ALLONGEMENT pour 0/0
L. G. M. 1	35-45	35-30	L. G. M. *a*	40-45	25
— 2	45-50	32-25	— *b*	45-50	20
— 3	50-60	25-20	— *c*	50-60	15-18
— 4	60-70	20-18	— *d*	60-70	10-8
— 5	70-80	18-12			
— 6	80-100	10-6			

Les annexes de l'aciérie sont occupées par la fonderie, ou l'acier est coulé en moules pour la fabrication des pièces de fonderies (le chiffre moyen de production mensuelle est de 200 tonnes de pièces en acier coulé vendable) ; par l'atelier d'usinage ; par le hall des forges et enfin les installations auxiliaires (atelier de modelage, magasin à modeler, hall de parachèvement, magasins divers, etc.).

Aciéries de Terni (Italie). — Ces usines sont la plus haute personnification de l'industrie métallurgique en Italie. Terni, qui est à peu près placé au centre de la péninsule, profite de l'abondance des chutes de ce pays et se trouve de ce fait très éloigné de l'unique frontière terrestre et également des deux mers qui baignent l'Italie, ce qui, en cas de conflit armé, est précieux pour un établissement dont la production intéresse la Défense nationale.

Le bassin de Terni doit sa richesse à la rivière Nera et à son affluent principal le Velino qui peuvent développer ensemble à l'étiage une puissance de 150.000 chevaux.

La Société actuelle des Hauts Fourneaux, Fonderies et Aciéries de Terni s'est intéressée très largement aux chantiers navals Orlando, de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 1953. — Usine de Terni. — Conduites d'amenée d'eau aux turbines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Livourne, Odero, de Sestri et Gênes. Elle a en outre fondé, pour le matériel d'artillerie, la Société Vickers-Terni, avec le concours de la maison anglaise Vickers, Son et Maxim.

Les aciéries de Terni disposent d'une puissance hydraulique de 20.000 à 24.000 chevaux.

La prise d'eau de l'usine hydraulique est située sur la rive droite du canal de Curius Dentalus. Deux déversoirs noyés laissent s'écouler 5 mètres cubes d'eau par seconde dans une galerie de 449 mètres de longueur qui débouche dans un vaste bassin de décantation qui a 223 mètres de longueur, 13 mètres de profondeur et une capacité de 130.000 mètres cubes.

Un long déversoir reçoit l'eau décantée qui, par un tunnel long de 230 mètres, arrive dans un bassin muni d'un canal de décharge qui le fait, au besoin, communiquer directement avec la rivière Nera. De là, un nouveau tunnel de 76 mètres amène l'eau dans le bassin de départ d'un siphon pour la traversée de la vallée de la Nera.

La traversée, en siphon, de cette vallée est constituée par une conduite de 886 mètres.

L'extrémité du siphon aboutit à un bassin dit « Bassin de Pennarosa », d'où, par un tunnel de 2.557 mètres, l'eau passe dans un dernier bassin dit « Bassin Magaloti » qui sert de prise à la conduite forcée.

De ce dernier bassin partent quatre tuyaux de 800 millimètres de diamètre qui, après un parcours de 1.510 mètres, aboutissent à un même distributeur placé à Ligobbi sur la colline de Pentima. De celui-ci partent deux groupes de tuyaux, dont un de secours ; à côté du bassin de Magalotti, on installe de petits bassins filtrants dans lesquels l'eau des crues passe successivement et cette eau filtrée est amenée à l'aciérie par deux conduites spéciales.

Les conduites forcées sont placées dans des conduites souterraines en maçonnerie qui servent elles-mêmes à l'écoulement de l'eau de décharge après emploi, laquelle est recueillie dans un grand canal collecteur longeant l'enceinte sud de l'usine et qui se déverse dans la rivière.

Les turbines sont du type Pelton et Girard, à axe horizontal et à admission partielle. Un autre groupe de machines hydrauliques servent à actionner les compresseurs d'air.

La hauteur de chute utilisée est de 205 mètres, soit 180 mètres sur les turbines.

Pour la production du courant électrique il y a : 1° quatre groupes hydroélectriques triphasés à 320 volts et deux groupes donnant du courant continu à 240 volts ; 2° cinq groupes hydroélectriques fournissant du courant continu à 240 volts ; 3° une centrale spéciale.

L'usine possède actuellement deux aciéries Martin et une aciérie au creuset.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

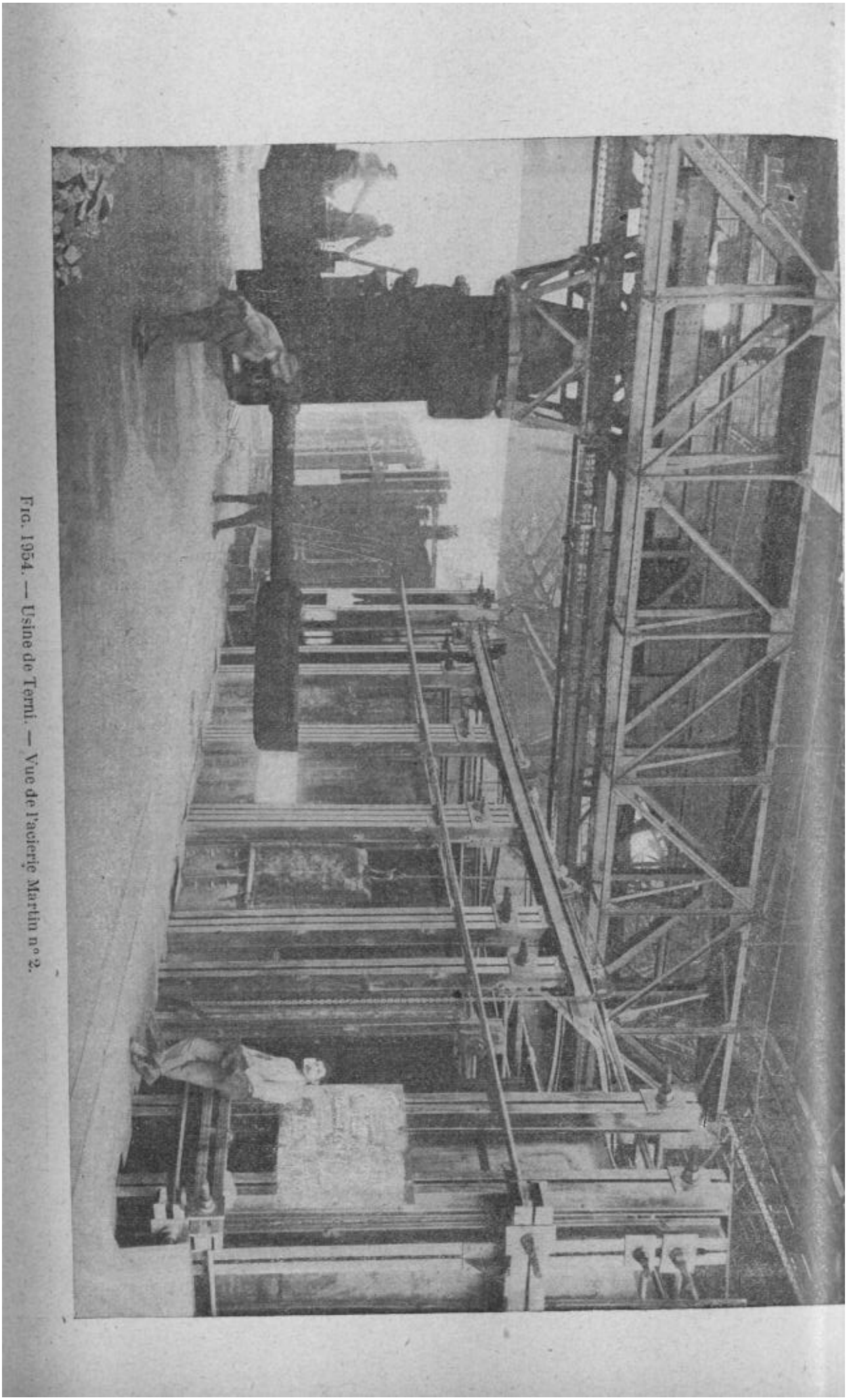


Fig. 1954. — Usine de Terni. — Vue de l'aciérie Martin n° 2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'aciérie Martin nº 1 comprend cinq grands fours acides de 29 et 40 tonnes ; trois ponts roulants électriques de 130, 60 et 10 tonnes desservent cette aciérie.

L'aciérie Martin nº 2 a été créée spécialement pour la fabrication de l'acier pour blindages et pour grosses tôles. Il y a deux grands fours Martin de 50 à 60 tonnes chacun. Des chargeuses mécaniques et des ponts roulants desservent cette aciérie.

Le chauffage des fours est assuré par un groupe de huit gazogènes du type Lackmer.

L'installation ci-avant occupe une surface de 16.000 mètres carrés.

Les fers pudlés sont produits dans deux fours tournants Danks-Bouvard, lesquels produisent journellement 24 tonnes de métal.

Les moulages en acier sont spécialement fabriqués dans un nouveau four Martin d'une capacité de 12 tonnes à revêtement acide. Il peut facilement donner quatre coulées par vingt-quatre heures. La superficie réservée à la fabrication des moulages en acier est de 5.100 mètres carrés.

Des ponts roulants électriques desservent cette partie de l'usine.

Deux fours à charbon servent pour le dessablage, l'ébarbage et le recuit des pièces coulées. Les aciéries de Terni possèdent cinq trains de laminoirs, savoir : un train pour rails et profilés de moyenne grandeur ; un train pour petits profilés ; un train pour tôles et pour plaques de blindages ; un train à bandages ancien et un train à bandages nouveau.

Le premier de ces laminoirs produit 55 tonnes en vingt-quatre heures ; le second, 30 tonnes par vingt-quatre heures. Le train, pour tôles et plaques de blindages, est commandé par une turbine de 1.000 chevaux tournant à 240 tours-minute. Les manœuvres des cylindres se font à l'aide de ponts roulants de 60 et 20 tonnes commandant de grandes pelles à col de cygnes suspendues au crochet des ponts roulants.

La production moyenne du train par vingt-quatre heures est de 130 tonnes de blindages bruts.

Le nouveau train à blindages a été construit pour laminer des lingots d'un poids de 100 tonnes et il est identique, au genre de commande près, à celui qui existe au Creusot. Il est à deux cylindres en acier de $4^{m},50$ de table et $1^{m},250$ de diamètre, pesant plus de 52 tonnes chacun.

Les divers mouvements des moteurs du train, des moteurs des rouleaux, des récepteurs et de l'appareil de retournement sont commandés depuis une plate-forme de manœuvre placée dans l'axe du train, au-dessus des cages d'allonges. Le chauffage des lingots est fait dans deux grands fours à gaz, à sole mobile, d'une longueur de 11 mètres et d'une largeur de $6^{m},50$.

Le laminoir est commandé par une turbine Escher-Wyss de Zurich, de 3.500 chevaux, constituée par deux roues Pelton de 1 mètre de dia-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètre ; sa vitesse varie entre 350 et 400 tours à la minute. La turbine est reliée directement à un grand volant de 4 mètres de diamètre et d'un poids de 50 tonnes et au moyen d'un accouplement semi-élastique à trois dynamos génératrices à courant continu destinées à alimenter les moteurs réversibles du train. Les dynamos peuvent chacune fournir des pointes de 10.000 ampères. Elles sont réunies en série et fournissent une tension de 1.200 volts.

Les deux moteurs électriques sont capables de donner instantanément une puissance de 16.320 chevaux et leur vitesse varie de 90 tours à 30 tours.

La dynamo qui fournit le courant pour les moteurs actionnant les rouleaux et autres manœuvres accessoires a une puissance de 330 kilowatts à la tension de 525 volts.

L'usine possède deux presses à forger de 5.000 tonnes, quantité de petits pilons de 1 à 15 tonnes, une autre presse à forger de 2.000 tonnes, une presse à gabarier de 6.000 tonnes et une récente de 12.000 tonnes.

Il y a, en outre, deux presses pour la fabrication des projectiles, l'une de 1.000 tonnes, l'autre de 500 tonnes de puissance. Elles travaillent à la pression de 140 atmosphères. Trois fours servent au réchauffage des projectiles. Une grosse presse à emboutir complète l'installation.

Les traitements thermiques des éléments des canons, des projectiles et des blindages et la cémentation de ces derniers forment un des services les plus importants de l'usine. Il y a 16 fours à double récupération de chaleur pour la cémentation et le chauffage. Ces fours ont une sole mobile montée sur chariot à seize roues et manœuvrée par un treuil électrique. Deux fours à réchauffer servent pour les plaques après la trempe finale.

La fonderie de fonte forme une usine spéciale ; elle est alimentée par quatre cubilots et très puissamment outillée ; on y peut couler des pièces dépassant 100 tonnes.

Les ateliers de finissage des blindages, des canons et des projectiles et celui de mécanique complètent cette grande installation. Le seul atelier de finissage des blindages comporte huit ponts roulants variant de 80 à 20 tonnes de puissance. Il est pourvu des machines-outils les plus puissantes et les plus perfectionnées. L'atelier de finissage des canons est limité au dégrossissage succédant au traitement thermique, le finissage étant opéré dans les ateliers Vickers-Terni, à la Spezia. L'installation pour le finissage des projectiles peut produire 2.000 tonnes de projectiles par an. La fabrication des blindages atteint 12.000 tonnes par an. Les services auxiliaires sont constitués par un atelier de produits réfractaires, un laboratoire de chimie, un pour les essais mécaniques et un pour les essais métallographiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Aciérie électrique de Latrobe (Pensylvanie). — Cette installation offre un intérêt tout particulier pour les mesures prises selon les derniers progrès. Elle contient deux fours Héroult du type oscillant de 6 tonnes, un de 3 tonnes et un de 1 tonne, ce dernier pour les expériences. Il y a deux laminoirs, l'un de $0^m,30$ et l'autre de $0^m,40$ pour la production des fers plats.

La marche des fours est indiquée par leur chargement. Pour produire par exemple un acier fin contenant 0,98 de carbone, 0,3 de manganèse et 0,35 de chrome, la charge se compose de 590 kilogrammes de fonte, 1.270 kilogrammes de chutes de tôles, 1.000 kilogrammes de tournures et 3.175 kilogrammes de chutes de forge.

Un marteau-pilon à vapeur de 3 tonnes sert à briser les gueuses et les lingots. Une machine à forger de 600 tonnes et deux autres marteaux servent à forger des grosses pièces.

Les lingots sont chauffés avant le laminage dans des fours à charbon. Les trains de laminoirs sont à commande électrique ; le train de $0^m,30$ est actionné par deux moteurs à courant continu, couplés sur l'arbre du train de laminoir ; ils sont alimentés par un groupe de transformateurs rotatifs et la vitesse peut varier de 70 à 200 tours. Le moteur est d'une puissance de 400 HP. Les biellettes sont transportées du four de chauffage jusqu'au laminoir à l'aide d'un trolley. Les trains sont d'autre part desservis par un pont roulant.

Un atelier pour le traitement thermique des aciers avec four de réchauffage et un laboratoire complet d'analyses et de recherches complètent cette installation.

L'atelier des laminoirs contient un four à recuire. La plus grande partie de l'usine est consacrée à produire des aciers au chrome, au nickel, au vanadium, au tungstène, des aciers à outils spéciaux très durs.

La *Compagnie Slobie Steel* de Sheffield a monté une aciérie électrique de toutes pièces, pour la fabrication des outils d'acier, des alliages d'acier, etc.

L'usine comporte : un four de fusion de 15 tonnes à courant triphasé, un four de 5 tonnes à courant diphasé pour aciers spéciaux et un four de 3 quintaux pour la fonte des alliages.

675. Alliages ferros-métalliques. — Aciers spéciaux. — Les propriétés mécaniques des fers et des aciers se caractérisent par leur densité, cassure, constitution moléculaire et leur sonorité (caractères physiques) ; par leur ténacité, malléabilité, ductibilité, dureté, résilience, écrouissage, trempe, recuit, retrait, conductibilité, fusibilité, soudabilité (propriétés physiques) et enfin par leur magnétisme et leur conductibilité électrique (propriétés électro-magnétiques).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Relativement à leur résistance mécanique, les essais de traction auxquels on les soumet portent sur la limite élastique (Re), la résistance à la rupture (Rr), l'allongement proportionnel (A) et la striction ou diminution proportionnelle de section (O). L'allongement est mesuré sur 100 ou 200 millimètres (éprouvettes).

La qualité de l'acier se mesure par l'expression ou nombre (R + 100 A) ou (R + 200 A) ou enfin par le produit (R × A).

La résilience au travail dynamique de rupture par unité de section s'exprime en kilogrammètres par centimètre carré ; les tôles d'acier doux donnent une résilience de 35 kilogrammètres, et les aciers durs ne donnent que quelques kilogrammètres.

On opère au mouton par coups successifs sur éprouvette déterminée ou au moyen du pendule Charpy.

La dureté (résistance à la pénétration) est habituellement déterminée par l'essai à la bille de Brinell ; le nombre de dureté Δ est le quotient de la pression exprimée en kilogrammètres par la surface de l'empreinte, en millimètres carrés. Le nombre de dureté Δ est relativement proportionnel à la résistance à la rupture.

La résistance électrique des aciers augmente avec la température.

L'allotropie qui caractérise le refroidissement d'un métal se présente sous trois états pour le fer : α (au-dessous de 740°) ; β (entre 740° et 860°) et γ (au-dessus de 860°).

Les fers du commerce se classent comme suit :

Fer n° 2 ou fer commun de construction	:	R = 32 à 34	A 0/0 6 à 9
Fer n° 3 fer pour la ferronnerie	:	R = 34 à 37	A 0/0 9 à 12
Fer n° 4 fer de maréchalerie	:	R = 37 à 38	A 0/0 12 à 15
Fer n° 5 fer de forge	:	R = 38 à 39	A 0/0 20 à 25
Fer n° 6 1re catégorie des Cies chemins de fer	:	R = 38 à 40	A 0/0 20 à 25

Les aciers ordinaires se divisent comme suit :

Aciers extra doux. Boulonnerie	:	R=32à38	E=20à24	A0/0 34à28
Aciers doux. Profilés	:	R=38à46	E=24à28	A0/0 28à25
Aciers demi-doux. Pièces de machines	:	R=46à55	E=28à32	A0/0 25à22
Aciers demi-durs. Moulages-Arbres	:	R=55à65	E=32à38	A0/0 22à18
Aciers durs. Ressorts-Rails-Outils	:	R=65à75	E=38à45	A0/0 38à40
Aciers très durs. Coutellerie-Outils	:	R=75à85	E=45à50	A0/0 14à8
Aciers extra-durs. Obus-Cylindres-Outils	:	R=85à100	E=50à55	A0/0 8à5

Les aciers spéciaux comprennent les aciers au nickel, au manganèse, au chrome, au silicium, à l'aluminium, au chrome et nickel et les aciers à coupe rapide.

Les aciers au nickel, d'après leur teneur en carbone et en nickel présentent les structures dites : perlitique, ou structure analogue aux aciers

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à carbone recuits ; martensitique, ou assimilables aux aciers au carbone trempés ; polyédrique ou à fer γ, c'est-à-dire semblable au fer à une température supérieure à 860° C. Selon les usages auxquels sont destinés les aciers au nickel, R varie de 40 à 85, E de 26 à 60 et A 0/0 de 20 à 55.

Les aciers au manganèse sont moins utilisés que les aciers au nickel. Les plus employés présentent les caractéristiques suivantes :

$$R = 95 \qquad E = 35 \quad \text{et} \quad A\ 0/0 = 45 \text{ (acier Hadfield).}$$

Les aciers au chrome et au nickel les plus courants présentent les caractéristiques ci-après :

Plaques de blindages : R = 66 à 83 E = 50 à 65 A 0/0 = 18 à 15
Pièces d'automobiles : R = 55 à 75 E = 35 à 50 A 0/0 = 15 à 25 (bruts de forge)

Les aciers à coupe rapide, qui doivent leurs qualités surtout au chrome, au tungstène et au vanadium ont pris une importance considérable pour l'industrie. En particulier, ils ont été un facteur considérable dans les usines de guerre où ils ont aidé à atteindre une intensification que l'on n'aurait jamais osé soupçonner.

Encore récemment, la seule méthode de production des alliages ferreux était celle du haut fourneau et du creuset (1). Maintenant, depuis l'invention du four de fusion électrique et son succès commercial dans la production des alliages ferreux riches, on a obtenu une grande variété de ceux-ci à des prix relativement modérés et quelques-uns de ceux employés aujourd'hui étaient des curiosités il y a peu de temps.

Jusqu'ici l'importance des alliages ferreux ne s'est guère confinée que dans l'industrie de l'acier ; mais il n'est pas illogique de penser qu'ils occuperont une place importante dans la fonderie avant peu de temps.

La tendance actuelle, dans la fabrication des alliages du fer pour cons-

---

(1) Les alliages obtenus au haut fourneau sont peu nombreux ; ce sont : le ferro-manganèse, le spiegel, le silico-spiegel, le ferro-silicium, le ferro-chrome et le ferro-phosphore. L'inconvénient principal des produits du haut fourneau réside dans le haut pourcentage en carbone.

Le silico-spiegel est un alliage triple renfermant du fer (60 à 65 0/0), du manganèse (20 à 25 0/0) et du silicium (10 à 12 0/0), ainsi qu'une certaine quantité de carbone. Il forme le trait d'union entre le ferro-manganèse et le silico-manganèse.

On peut obtenir économiquement, au four électrique, du silico-spiegel de qualité moyenne au moyen de scories Bessemer acides. Une tonne de ces dernières nécessite pour sa réduction : coke, 200 kilogrammes ; électrodes, 25 kilogrammes, et énergie électrique, 2.400 kilowatts-heures. Elle fournit environ 400 kilogrammes de silico-spiegel, 25 0/0 de silicium, 35 0/0 de manganèse, et donne 350 kilogrammes de scorie deuxième, riche en silice. L'électro-silico-spiegel est obtenu au four électrique (usine de Livet), en réduisant par le charbon un mélange de fer-sicilium, de silice et de minerai de manganèse. Il offre sur le silico-spiegel ordinaire l'avantage d'une plus grande pureté et d'une teneur moindre en carbone (1 0/0 environ). L'électro-silico-spiegel à 22 0/0 Si et 38 0/0 Mn est aujourd'hui adopté par les grandes aciéries européennes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

truction mécanique, est dans l'obtention de produits à teneur extrêmement élevée de l'alliage et à faibles teneurs en carbone.

Le *ferro-chrome* est l'alliage à peu près le plus employé comme addition fixe dans la fabrication des aciers spéciaux ; il est utilisé avec avantage dans les aciers à outils à coupe rapide, les arbres de navigation, les essieux coudés, etc. La teneur en carbone varie de 1 à 7 0/0 pour l'acier à outils et de 7 à 9 0/0 pour les essieux, la teneur en chrome étant en moyenne de 65 0/0. La teneur en carbone exigée varie beaucoup suivant la quantité de chrome ajoutée à l'acier et suivant la méthode de fabrication employée par les différentes usines. Le ferro-chrome généralement employé pour l'acier Martin ou Bessemer destiné à la fabrication des blindages, des canons, des projectiles, etc., contient 9 0/0 de carbone. L'addition de l'alliage se fait à la fin de l'opération d'affinage, de manière à ce que le chrome soit complètement fondu et incorporé à l'acier au moment de la coulée qui se fait dans une poche.

On fabrique des alliages ayant une teneur jusqu'à 82 0/0 de chrome et avec très peu de carbone. La Société La Néo-Métallurgie et la Société Électrochimique du Giffre produisent des ferros-chromes à 66° de Cr et 0,6 0/0 seulement de C.

Les prix moyens de ces dernières années (avant la guerre) étaient de 400 francs la tonne pour 60 0/0 Cr et 8 à 10 0/0 C. et de 1.600 francs pour 60 0/0 Cr et 1 0/0 de C.

Les usines fabriquant en France les ferros-chromes sont : les usines du Giffre, de Livet, de Saint-Bérin, de Notre-Dame de Briançon, des Clavaux, de Moutiers, d'Allevard et de Riouperoux ; en Suisse, les usines de Martigny, de Gampel, Vernayaz et Bodio ; en Suède, l'usine de Trollhättan ; en Norvège, celle de Meraker et en Russie, l'usine de Satka. La production annuelle européenne du ferro-chrome dépasse 12.000 tonnes, dont 8.000 par la France.

On obtient des ferros-chromes à basse teneur en carbone en opérant d'abord la réduction électrique de l'oxyde du métal à produire, en présence d'une proportion convenable de silice. On utilise ensuite ce siliciure comme réducteur d'une nouvelle quantité d'oxyde, ou on soumet ce silicium à une fusion oxydante en présence de l'oxyde ou d'un composé oxygéné du métal à obtenir. La réduction pour silicium se fait dans un four à résistance et l'affinage par l'oxyde dans un four à induction et self-circulation. On peut aussi se servir d'un four ordinaire à deux électrodes en série dans lequel les électrodes sont coulantes, c'est-à-dire que celles-ci sont constituées par le siliciure même qu'il s'agit d'affiner, tandis que le bain est formé par des composés oxydés du métal à libérer.

Les *ferros-tungstènes* sont préparés par le traitement électrique de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

wolfranite ; ils contiennent moins d'impuretés que les poudres de tungstène les mieux préparées, et l'unité de tungstène dans le ferro-tungstène obtenu par les procédés électrométallurgiques est moins coûteuse que celle contenue dans la poudre. Les aciers au tungstène sont de composition très variable selon les usages auxquels on les destine : outils à coupe rapide, aciers à aimants. Certains aciers contiennent de 80 0/0 à 98 0/0 de tungstène avec 1,5 à 0,25 0/0 de carbone ; l'usine de la Praz livre des produits à 80 0/0 de tungstène.

La production de ce minerai en 1912 a atteint 3.800 tonnes. Le prix était de 7 fr. 50 à 8 francs le kilogramme.

Les usines fabriquant le tungstène sont : en France, les usines d'Ugine, de Saint-Béron, d'Épierre et du Giffre ; en Suisse, l'usine de Chèvres ; en Allemagne l'usine de Murg (Bade) ; en Suède, l'usine de Trollhättan ; en Angleterre, celle de Luton ; en Amérique, celles du Niagara.

Les aciers à outils au tungstène-chrome se distinguent par une résistance et une dureté très grandes ; on peut, avec ces aciers, obtenir des vitesses de coupe de 40 à 60 mètres à la minute, en enlevant des copeaux de dimensions moyennes. Ils ont devant eux un grand avenir.

Le tungstène allié au nickel dans l'acier donne d'excellents résultats pour la fabrication des arbres de machines, de bateaux et de toutes pièces mécaniques sujettes à de grands efforts.

Ferros-molybdènes.— Ces produits ont pris une grande importance dans l'industrie métallurgique en raison des qualités toutes spéciales qu'ils communiquent aux aciers : ils sont durs et de structure très fibreuse et très nerveuse. Le ferro-molybdène, titré à 70 ou 80 0/0 de molybdène, s'allie très bien à l'acier fondu, soit au creuset, soit au four Martin.

Il est vendu sous forme d'alliage à 80 0/0 de molybdène environ. Ajouté à l'acier dans des proportions de 10 à 12 0/0, accompagné de 6 à 7 0/0 de chrome, il produit un acier rapide de très bonne qualité.

Le molybdate de magnésium traité par le charbon, à la température du four électrique en présence d'un scorifiant convenablement choisi, permet d'obtenir une fonte de molybdatène très pure avec peu de pertes. Le molybdate de magnésium se prépare facilement en fondant au four électrique la molybdénite (sulfure de molybdène) additionnée de magnésie ou de carbonate de magnésie.

Les ferros-molybdènes peuvent être préparés soit par l'union directe des éléments à une température suffisamment élevée, soit par l'action de l'aluminium sur un mélange de deux oxydes ou d'oxyde de fer et de molybdène métallique, ou enfin par la réduction électrothermique du bioxyde de molybdène en présence du fer, soit :

$$(MoO^2 + 2C + Fe = FeMo^2 + 2CO).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On obtient du ferro-molybdène plus ou moins carburé, et ne contenant pas de silicium en réduisant le molybdate de magnésium par le charbon avec intervention de bauxite ferrugineuse.

Pour produire un alliage à faible teneur de carbone, on peut utiliser comme matière première le carbure de molybdène que l'on réduit au four électrique par le bioxyde en présence du fer, suivant la réaction :

$$(4CMo^2 + 2MoO^2 + 5Fe = 5FeMo^2 + 4CO).$$

Enfin on peut utiliser l'action du ferro-silicium sur le bioxyde de molybdène, avec emploi de chaux comme scorifiant, soit :

$$(2MoO^2 + FeSi^2 + 2CaO = FeMo^2 + 2SiO^2Ca).$$

Il faut compter sur un prix moyen de 5.500 francs pour l'obtention d'une tonne de ferro-molybdène à 80 0/0 de molybdène et 2 à 4 0/0 de carbone.

Il convient très bien aussi à la fabrication des projectiles, mais son emploi est forcément limité à cause de son prix élevé, par suite de la rareté du minerai.

Ferros-vanadiums. — Dans la machinerie moderne, spécialement dans les parties sujettes à se vicier par l'usage, on a besoin, avant tout, d'une résistance supérieure à des chocs simples, répétés ou alternés et à la fatigue qui correspond à une détérioration vibratoire, intermoléculaire. Un nouveau champ a été ouvert, et dans ce champ, le vanadium a été trouvé par l'expérimentation étendue et la pratique comme étant le seul métal appréciable. En ce qui concerne les propriétés statiques, le vanadium augmente considérablement les effets d'un autre métal, tels que le chrome, le tungstène, et permet d'en réduire la proportion dans l'acier, de manière à éviter l'effet du métal sur les qualités dynamiques désirées. De plus, le vanadium contribue lui-même à renforcer les qualités dynamiques de l'acier doux. En retardant la désagrégation, il rend le métal particulièrement susceptible d'une énorme amélioration au point de vue de la température et du traitement calorifique en général. En outre, le vanadium corroie l'acier et il lui confère un pouvoir considérable de résistance à la rupture par tension ; en un mot, il le dote d'un « accroissement de vie » dans l'usage pratique.

Dans les aciers de construction, la proportion maxima requise excède rarement 2 0/0. Par son emploi judicieux, on peut former des combinaisons impossibles sans lui, et qui permettent de satisfaire à des exigences complexes, soit au point de vue statique, soit au point de vue dynamique.

L'acier chrome-vanadium a donné d'excellents résultats, il est employé dans la construction des motrices des roues de chemin de fer, pour la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cémentation et pour les aciers à coupe rapide. En Amérique, on tient en haute estime les plaques de blindage vanadiées.

On obtient des ferros-vanadiums au four électrique en chauffant dans un arc voltaïque puissant un mélange d'oxyde de fer, d'anhydre vanadique et du charbon; une fois la fonte de ferro vanadium ainsi préparée, on fait réagir sur elle une certaine quantité d'acide vanadique dont l'oxygène brûle le carbone de l'alliage fer-carbone-vanadium. On arrive ainsi à réduire à moins de 1 0/0 la proportion de carbone dans l'alliage.

On peut aussi préparer du ferro-vanadium à faible teneur en carbone en partant d'une fonte de vanadium contenant peu de fer, et en l'affinant au moyen d'oxyde de fer ou d'un mélange d'oxyde de fer et d'acide vanadique.

En réduisant par l'aluminium un mélange d'oxyde de fer et d'anhydride vanadique (procédés Matignon-Monnet et E. Vigouroux), on arrive à obtenir des produits très purs et contenant jusqu'à 25 0/0 de vanadium et ayant une teneur en aluminium inférieure à 2 0/0.

L'appareil qui convient le mieux pour ces derniers procédés est le four à creuset.

Les *ferros-tantales* arrivent sur le marché sidérurgique en promettant beaucoup.

Ils proviennent du traitement de la tantalite. Leur développement est entravé par la rareté de ce minerai et par le prix élevé de ce dernier.

Les effets du ferro-tantale sur l'acier sont analogues à ceux du tungstène.

Ferros-titanes. — En raison de son affinité pour l'oxygène, le titane, corps de la famille du silicium, est un agent très efficace de désoxydation des bains d'aciers dont il augmente la fluidité en les débarrassant d'une grande partie de l'oxyde qu'ils renferment. Mais, en outre, il possède la propriété, assez rare, de se combiner avec l'azote, et, en raison de cette propriété, il permet d'éviter la formation de soufflures en absorbant complètement les gaz occlus.

Le titane se rencontre dans la nature sous forme de titanate de fer $FeTiO^3$. Il n'est pas utilisable sous cette forme en métallurgie, mais le four électrique permet d'obtenir facilement de ce minerai du ferro-titane contenant 12 à 15 0/0 d'acide titanique, 6 0/0 de carbone, 5 0/0 d'impuretés diverses et 75 0/0 de fer.

Les meilleurs résultats s'obtiennent en prenant, pour le traitement des bains d'acier, un ferro-titane à 10-15 0/0 d'acide titanique. Si la teneur est plus élevée, le titane, dont le point de fusion est plus haut que celui de l'acier, se dissémine difficilement dans le bain. Il suffit d'ajouter 1 0/0 de ferro-titane à 10 0/0 d'acide titanique pour éliminer tout l'azote et la plus grande partie de l'oxygène restant dans le bain. Dans certains cas on peut même réduire la quantité d'alliage à 0,5 0/0, quantité qui est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

généralement suffisante pour faire disparaître les soufflures et les amas cristallins qu'on rencontre dans l'acier Bessemer. Cette addition augmente le prix de l'acier d'environ 10 francs par tonne. Mais cette augmentation de prix est largement compensée dans le cas de l'acier à rails, car des essais suivis ont permis de constater que les rails en acier au titane ont une durée 3 à 6 fois plus grande que les rails en acier Bessemer. D'ailleurs, quel que soit l'usage auquel on destine l'acier, le traitement au ferro-titane ne présente que des avantages : l'acier au titane est moins fragile que l'acier ordinaire ; en outre, il s'échauffe moins par le frottement que celui-ci et par suite se travaille mieux sur la machine-outil.

Les aciers au *nickel-manganèse* sont susceptibles de remplacer, en de nombreux cas, les aciers au nickel. Ils présentent l'avantage d'avoir un prix de revient moins élevé, même pour les aciers peu carburés, étant donné que le manganèse alumino-thermique vaut encore 3 francs le kilogramme et que le manganèse équivaut à 2,2 de nickel.

Les ferros-siliciums (§ 676), les ferros-manganèses (§ 679) terminent, dans l'état actuel de l'électrométallurgie, la liste des alliages ferreux qui ont pris une importance si considérable dans la métallurgie du fer.

Les alliages que nous venons de signaler sont mieux fondus, plus homogènes que les produits obtenus au cubilot. Ils sont livrés à des prix assez bas pour permettre non seulement la fabrication de produits spéciaux, mais encore pour la fabrication des aciers industriels qui, de plus en plus, sont demandés avec des garanties de résistance élevée.

676. Fabrication du silicium et de ses dérivés. — *Silicium.* — Le silicium, dans la fabrication du fer, a pour effet d'éliminer les oxydes et de dégager, par sa combustion, une quantité de chaleur suffisante pour maintenir toute la masse métallique à affiner au degré de fluidité nécessaire pendant toute la durée de l'opération. Possédant la propriété de s'unir plus facilement au fer que le carbone, il empêche la fonte, rendue liquide dans un cubilot, de se carburer, et, par suite, de devenir cassante. La fabrication en grande masse des alliages à haute teneur de silicium permet d'obtenir l'unité de silicium à un prix d'autant plus faible que le silicium entre en plus grande proportion dans l'alliage.

Au four électrique, le silicium se prépare en réduisant la silice par le charbon.

La production européenne du silicium est à peu près limitée aux besoins de l'aéronautique militaire (gaz hydrogène).

Les principales usines fabriquant le silicium sont : en France, les usines de Bozel et de Riouperoux ; en Amérique, l'usine de Niagara appartenant à la Carborundum Co.

Les dérivés du silicium sont : le ferro-silicium, le cupro-silicium, les sili-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ciures de fer ($SiFe^2$ et SiFe), les siliciures de chrome ($SiCr^3$ et Si^2Cr^3), le siliciure de molybdène (Si^3Mo^2), les siliciures de manganèse ($SiMn^2$ et SiMn), le siliciure de tungstène (Si^3Tu^2), le siliciure de cuivre, le siliciure de ruthénium, les siliciures de vanadium (VSi^2 et V^2Si), le carborundum, le siloxion, etc.

Les *ferros-siliciums* s'obtiennent avec facilité au four électrique ; ce sont les premiers en date obtenus industriellement au four électrique. Pour la fabrication du ferro-silicium, on n'emploie pas le four à induction comme pour l'acier, par la raison que la température à obtenir est voisine de 3.000 degrés et que les réactions se font au voisinage des électrodes dans les régions où il se forme un arc.

Les fours utilisés sont : les fours à une seule électrode mobile, les fours à deux électrodes série avec ou sans sole conductrice, les fours triphasés à trois électrodes mobiles, les fours triphasés à deux électrodes mobiles et enfin les fours à résistance sans électrodes mobiles. Ces fours sont alimentés par du courant continu ou alternatif (25 à 50 volts).

La densité de puissance utilisée varie avec la teneur en silicium de l'alliage. Pour des alliages à 50 0/0, on peut compter 350 watts par décimètre cube de capacité intérieure du creuset. L'énergie consommée varie aussi dans le même sens que la teneur en silicium du métal.

On arrive à obtenir des composés contenant jusqu'à 98 0/0 de silicium et d'une grande pureté.

Des produits contenant 25 et 50 0/0 de silicium correspondent pratiquement aux besoins de la métallurgie, surtout le dernier qui est pour ainsi dire le type conventionnel. La consommation annuelle de ce produit dépasse 35.000 tonnes.

Les alliages du silicium à haute teneur, jusqu'à 98 0/0 de silicium, devenant d'une consommation courante, donneront lieu à un débouché considérable pour la houille blanche lorsque l'industrie électrothermique sera à même de satisfaire aux commandes de silicium à des prix plus faibles que ceux produits dans les hauts fourneaux.

Le ferro-silicium est utilisé pour la production de certains aciers obtenus sur sole au convertisseur Bessemer. Il est employé en fonderie de fonte comme désoxydant pour les aciers, et comme addition dans la fabrication des aciers à ressorts, des aciers pour automobiles et des tôles douces et pour éviter les soufflures dans les aciers.

Le ferro-silicium se prépare en traitant au four électrique un mélange de minerais, de fer (ou de riblons), de quartz et de coke, correspondant à la quantité de carbone juste nécessaire pour réduire l'acide silicique.

Pour avoir un alliage de 50 0/0 de silicium par exemple, le lit de fusion comporte 100 kilogrammes de quartz, 50 kilogrammes de coke et 45 kilogrammes de battitures de fer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fabrication de 1 kilogramme de ferro-silicium à 50 0/0 exige environ 12 kilowatts-heures. Au prix de 0 fr. 005 à 0 fr. 0125 le kilowatt-heure, la dépense d'énergie par tonne varie entre 30 et 75 francs.

Une tonne de ferro-silicium à 50 0/0 exige 2,7 tonnes de produit bruts.

En France, le ferro-silicium à 10 0/0 s'est vendu 180 francs, et à 25 0/0, 300 francs. Au delà, les unités supplémentaires se paient 10 à 12 francs. En 1913, le ferro-silicium à 50 0/0 cotait 240 francs.

La consommation annuelle européenne en ferro-silicium atteint 45.000 tonnes dont 15.000 tonnes par la France.

La fabrication directe du ferro-silicium à l'aide des minerais, aussi bien que la fabrication au moyen des battitures, conduisant à un prix de revient exagéré, M. Gin a fait breveter un système de fabrication du ferro-silicium en employant des scories métallurgiques (scories Martin). Partant d'une scorie qui avait par tonne la composition suivante :

$$8.200\,SiO^2 + 220\,Al^2O^3 + 6.100\,FeO + 1.800\,MnO + 600\,CaO,$$

le mélange nécessaire pour la production d'une tonne de ferro-silicium était : scories Martin, 1.680 kilogrammes, et coke à 80 0/0 de carbone, 600 kilogrammes.

Le ferro-silicium obtenu de cette façon a une teneur en silicium de 29,64 0/0.

Au régime moyen de 6.950 ampères et 29,1 volts, la production de ferro-silicium est de 4.090 kilogrammes correspondant à une consommation de 5.380 kilowatts-heures par tonne. On économise ainsi plus de 12 0/0 de l'énergie consommée pour la production à l'aide de minerais des marais.

Le tableau ci-après renseigne sur le rendement de l'énergie dans la fabrication des ferros-siliciums (Ch. Louis.)

MATIÈRES PREMIÈRES EMPLOYÉES	TENEUR en Si produite	*a* Kilogrammes par kilowatt-jour	*b* Kilogrammes par kilowatt-heure	*c* Kilowatts-heures par tonne	*d* Kilowatts-ans par tonne	*e* Tonnes par kilowatt-an
	0/0					
Quartz pur, coke et tournure de fer	25	6	0,25	4.000	0,476	2,1
	50	3	0,125	8.000	0,952	1,05
	75	2	0,083	12.000	1,43	0,70
Scorie de four à réchauffer et coke	25	6	0,25	4.000	0,476	2,1
Scories de four à réchauffer, charbon de bois et pierre siliceuse	30	5	0,207	4.800	0,572	1,75
	35	4,3	0,179	5.600	0,665	1,50
	50	3	0,125	8.000	0,952	1,05
Quartz et minerai de fer, coke ou anthracite	25	5	0,207	4.800	0,572	1,75
	50	2,50	0,104	9.600	1,144	0,875
Par enrichissement du ferro-silicium à 25 0/0.	50	2,50	0,104	9.600	1,144	0,875

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les prix de revient de la fabrication des ferros-siliciums peuvent se répartir comme suit :

1° Par tonne de ferro-silicium à 25 0/0 de Si.

Dépenses générales	4f »
Énergie à 50 francs le kilowatt-an (0,479 kilowatt-an)	23 70
Électrodes à 35 francs les 100 kg (30 kg)	10 50
Quartz à 6 francs la tonne (900 kg)	5 40
Coke à 36 francs la tonne (400 kg)	14 40
Tournure de fer à 60 francs la tonne (780 kg)	47 »
Matières diverses	1 »
Emballage	6 »
Entretien du matériel	6 »
Main-d'œuvre	15 »
Amortissement	4 »
TOTAL	137f »

2° Par tonne de ferro-silicium à 50 0/0 de Si.

Dépenses générales	8f »
Énergie à 50 francs le kilowatt-an (0,951 kilowatt-an)	47 40
Matières premières :	
Électrodes à 35 francs les 100 kg (50 kg)	17 50
Quartz à 6 francs la tonne (1.850 kg)	11 10
Coke à 36 francs la tonne (825 kg)	29 70
Tournure de fer à 60 francs la tonne (525 kg)	31 50
Emballage	6 »
Entretien du matériel	9 »
Main-d'œuvre	25 »
Amortissement	7 »
TOTAL	193f,70

Les usines françaises produisant des ferros-siliciums sont : Notre-Dame de Briançon (Savoie), Livet (Isère), Ugine (Savoie), Saint-Jeoire (Haute-Savoie), Les Clavaux (Isère), Bozel (Savoie), Bellegarde (Ain), Allevard (Isère), Moutiers (Savoie) et Riouperoux (Isère).

Les usines étrangères sont : usine Martigny (Suisse), usine de Darfo (Italie) et les usines de Trollhättan, de Gullspang, de Domnarfvet et de Kortfors (Suède).

Le *cuprosilicium* est utilisé dans la métallurgie du cuivre comme réducteur sur l'oxyde et sur les composés d'arsenic et d'antimoine contenus dans le métal. Il se prépare au four électrique comme le ferro-silicium. Le bronze à 1 0/0 de silicium convient parfaitement pour les conducteurs électriques destinés à la confection des lignes d'éclairage et de la téléphonie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

677. Ferros-alliages de fonderie. — Les heureux résultats obtenus par l'introduction des ferros-alliages dans la fabrication de l'acier ont conduit les métallurgistes fondeurs à essayer ces mêmes produits dans la fonte, à la suite des progrès de l'électrométallurgie.

Les moulages à haute teneur en manganèse sont seulement employés dans quelques cas particuliers où une dureté exceptionnelle est demandée.

Le *ferro-manganèse* joue un rôle important dans l'amélioration des fontes ; il durcit celles-ci en augmentant la teneur en Mn, amélioration qui a une grande valeur. Il élimine le soufre par formation de sulfure de manganèse sous forme de scorie, mais seulement quand la fonte est très chaude. Enfin, il agit comme désoxydant.

Les ferros-manganèses dont la teneur en Mn est supérieure à 25 0 /0 sont très oxydables et magnétiques.

Les spiegels dont la teneur en Mn est inférieure à 25 0 /0 sont magnétiques, mais moins oxydables que les précédents.

On utilise ces produits pour préparer quelques alliages, comme les bronzes, les laitons ferro-manganésés. Le ferro-manganèse est surtout fabriqué au haut fourneau électrique. La préparation du manganèse très riche à 96 0 /0 Mn, 1 à 1,5 C et 2 à 3 0 /0 fer et silicium a lieu à l'usine du Giffre et à la Néo-Métallurgie. Le prix de la tonne de ferro-manganèse avant la guerre, à 80 0 /0 était de 270 francs. La refusion du ferro-manganèse au four électrique s'opère le plus souvent dans les usines métallurgiques ordinaires.

Le *ferro-silicium* fondu au cubilot avec la fonte augmente la douceur et diminue la résistance de celle-ci ; le ferro-silicium à 50 0 /0 augmente la résistance de la fonte à la flexion de 15 à 25 0 /0. Les fontes surchauffées dans les fours peuvent être régénérées avec une addition suffisante de ferro-silicium, le silicium désoxydant la fonte, jusqu'à les rendre de nouveau propres au moulage.

Le *silico-manganèse* contenant 45 à 85 0 /0 Mn et 20 à 25 0 /0 Si est quelquefois employé pour augmenter à la fois la teneur en Si et en Mn dans les fontes.

Pour la fabrication de ce produit on part, soit d'un mélange de minerais oxydés de manganèse et de silicium, soit de silicates de manganèse et on réduit ces minerais au four électrique. Pour les alliages peu riches, on part du ferro-manganèse et du ferro-silicium fabriqués séparément et on mélange ces deux produits liquides ; ou bien on fond leur mélange fait à froid en proportions convenables.

La France produit environ 5.000 tonnes de silico manganèse et la Norvège 1.000 tonnes.

Les principales usines en France sont : usine de la Société pyrénéenne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du silico-manganèse, à Villelongue (Hautes-Pyrénées) et l'usine de Livet.

Le silico-manganèse à 10 à 15 0/0 de Si, 80 à 85 0/0 de Mn, 2 0/0 C se vend de 600 à 700 francs la tonne.

Le carbure de silicium, chargé en petits morceaux avec la fonte dans le cubilot, sert à élever à la fois, dans de certaines limites, le carbone et le silicium.

L'influence de l'aluminium dans la fonte ressemble sur bien des points à celle du silicium. Une fonte blanche, à laquelle on ajoute de 1/2 à 1 0/0 d'aluminium, prend l'aspect de la fonte grise. L'aluminium ajouté en grandes parties réduit le carbone total en éliminant le graphite ; il diminue la tendance à la trempe, abaisse le retrait et, en petites quantités, augmente la résistance.

Le *ferro-phosphore* sert à élever, par additions dans la poche, la teneur en phosphore des fontes dont on veut augmenter la fluidité pour les moulages minces, par exemple.

Le *ferro-titane*, employé en petites quantités, sert à expulser les gaz absorbés par le métal fondu : l'expulsion du titane, qui passe dans les scories, permet d'avoir une fonte douce. Avec de grandes additions d'alliage, on peut arriver à obtenir une faible teneur de titane dans la fonte avec tendance au durcissement.

Des barreaux d'essais ont présenté une résistance à la flexion supérieure de 40 0/0 aux barreaux de fonte dure.

L'addition à 30 0/0 de nickel dans la fonte donne un métal difficilement corrodé par l'eau.

678. Fabrication du carborundum et du corindon. — Le *siliciure de carbone* ou *carborundum*, découvert par le Français Schutzemberger, a son emploi industriel dans la fabrication des meules pour le polissage des métaux, en raison de sa dureté presque égale à celle du diamant et de son faible prix qui ne dépasse pas celui du corindon. On l'utilise aussi pour constituer des trottoirs et des marches non glissantes et absolument inusables ; employé en mélange avec d'autres corps, il sert à faire des résistances électriques calorigènes.

Enfin, on a adopté ce produit pour le garnissage des fours métallurgiques, étant insoluble dans le fer en fusion.

Au point de vue métallurgique, on a cherché à utiliser sa haute teneur en silicium pour remplacer dans l'épuration des aciers, par exemple, les ferros-siliciums peu riches.

La température de formation du carborundun est seulement de 1.950° au lieu de 3.500°, comme on l'a cru assez longtemps. A 2.200°, il est entièrement dissocié en silicium et carbone fixe.

Les matières premières destinées à cette fabrication sont le sable, le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sel marin, le coke pulvérisé et la sciure de bois. On remplit le four aux 4/5 avec le mélange ci-dessus et, au centre, est disposée une plaque de fer percée d'ouvertures dans lesquelles passent les électrodes. Chaque four absorbe environ 1.000 HP sous la tension de 100 à 250 volts ; la résistance est très grande au début de l'opération, qui dure trente-six heures et diminue à mesure que le coke s'échauffe (four Acheson).

Lors de la combinaison du carbone et de la silice, il se forme à la périphérie de la zone de production un léger dépôt d'une matière amorphe, qui est un produit intermédiaire dont les températures de formation et de décomposition sont très rapprochées l'une de l'autre, condition qui rend sa fabrication des plus délicates. On peut régulariser la température en employant plusieurs conducteurs centraux réunis, en certains points déterminés, par les conditions du travail du four.

Les cristaux de carborundum retirés du four sont portés aux machines à broyer, puis la matière est mise dans de grands réservoirs doublés de plomb et traités pendant trois jours par de l'acide sulfurique, à l'effet de faire disparaître les impuretés. Les cristaux sont ensuite ramassés à la pelle, séchés et triés sur de longs tamis mobiles et inclinés.

Pour la plus grande partie des objets moulés, le carborundum est mélangé avec une certaine proportion de kaolin et de feldspath ; puis le mélange est placé dans des moules et soumis à la pression hydraulique. La production du carborundum en 1905 a été de 9.000 tonnes. Les principales usines sont celles de la Bathie (France), de Benateck (Bohême), de Dusseldorf (Allemagne) et de Niagara (Amérique).

Le *corindon artificiel* (Al^2O^3) sert aux mêmes usages que le carborundum. A Froges, on prépare du corindon par le *procédé Verlein*. D'ailleurs, tous les procédés consistent à fondre simplement de l'alumine anhydre dans le creuset d'un four électrique. Dans le procédé Gin et Leleux, de l'alumine anhydre (97 0/0) et du sesquioxyde de chrome (3 0/0) se combinent sous l'influence de la chaleur développée par l'arc électrique. On obtient du *rubis* sous forme de gros cristaux. Le four comporte deux foyers, l'un qui est destiné à fondre la matière, l'autre à la volatiliser. Quand on arrête l'opération, il reste dans le creuset du four une scorie de corindon cristallisé, qui est susceptible d'être substitué à l'émeri dans ses usages industriels.

L'*alundum*, qui possède une dureté supérieure au carborundum, est préparé en faisant fondre au four électrique la bauxite naturelle, composée de 40 à 55 0/0 d'alumine, 27 à 33 0/0 de sesquioxyde de fer et 20 à 24 0/0 d'eau.

679. Fabrication du manganèse et de ses alliages. — Le manganèse est un des métaux qui, avec le nickel et le chrome, ont pris la place

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la plus importante dans la métallurgie. Il est à la fois un désoxydant et un constituant ; sa présence dans l'acier a pour effet d'accroître la résistance du métal, sa dureté et son aptitude à prendre la trempe.

Moissan a indiqué comme point de fusion du manganèse une température comprise entre celle du fer et celle du platine. M. Borchers admet qu'il fond entre 1.200° et 1.500°, et M. Gin entre 1.200° et 1.400°.

C'est en 1880 que les nouveaux procédés de fabrication de l'acier (Bessemer, Martin, Thomas) amenèrent la métallurgie à consommer des ferros-manganèses, des silicos-spiegels et des silicos-manganèses.

Manganèse. — Les combinaisons naturelles de ce métal se présentent sous les états d'oxyde, de carbonate et de sulfure. Moissan a réduit au four électrique le protoxyde de manganèse par le charbon et a obtenu des carbures de manganèse dont la teneur en carbone varie de 15 à 6 0/0. Cette fonte de manganèse, amenée à l'état de fusion et mise en présence d'un excès d'oxyde de cuivre, fournit du manganèse exempt de carbone.

Les principaux usages des minerais de manganèse sont, au point de vue métallurgique, la fabrication du ferro-manganèse, du spiegelsein et de la fonte Thomas.

Le rôle du manganèse dans la métallurgie du fer, qui est des plus considérables, est dû : 1° à la formation de composés qui se produisent avec un dégagement de chaleur plus grand que celui qui correspond aux composés correspondants du fer ; 2° à la scorification facile de ces composés, qui disparaissent ainsi du métal au lieu d'y rester intimement mélangés, comme le fait l'oxyde de fer produit par l'oxydation prolongée nécessitée par les opérations du convertissage, en vue de l'élimination du soufre et du phosphore.

Ferro-manganèse. — C'est comme spiegel riche et surtout comme ferro-manganèse à haute teneur, 70 à 82 0/0, que le manganèse est employé dans la fabrication des aciers.

En 1866, W. Henderson, de Glascow, prit un brevet pour la fabrication sur sole des alliages de manganèse au four à gaz à régénérateurs Siemens, et, dès l'année 1867, les usines de Terre-Noire fabriquèrent le ferro-manganèse par le procédé Prieger, de Bonn, et, à partir de 1869, par le procédé Henderson. Depuis cette époque, les hauts fourneaux de Saint-Louis ont produit la majeure partie des ferros-manganèses consommés en France. Mais le ferro-manganèse a dû, au fur et à mesure que se développait la production de l'acier à des prix de plus en plus réduits, être fabriqué à un prix de revient de plus en plus bas. Il faut donc pouvoir se placer dans les meilleures conditions économiques pour obtenir un prix de revient minimum.

La fabrication d'une tonne de ferro-manganèse au haut fourneau exige

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

environ 3 tonnes de coke (réduction et force motrice), alors qu'avec le four électrique cette consommation n'est plus que de 500 kilogrammes.

La consommation du manganèse en France dépasse 15.000 tonnes, et celle du monde entier 280.000 ; aussi la production électrique du ferro-manganèse, à haute teneur de manganèse, a-t-elle pris une grande importance.

Les silicos-manganèses produits au four électrique sont d'une pureté remarquable en ce qui concerne le phosphore et le soufre qui, rarement, dépassent 1 ou 2 centièmes pour 0 /0, la teneur en carbone étant inférieure à 0,15 0 /0. Ce produit est obtenu au four électrique en traitant directement soit du minerai, soit des silicates de manganèse naturels.

On peut partir soit de la rhodonite, soit d'un mélange de silice et de minerais oxydés de manganèse, soit en utilisant un mélange de ces trois composés.

La production d'une tonne, en partant de la rhodonite, demande :

Minerai à 38 Mn	2.900 kilogrammes
Coke de réduction	420 —
Électrodes	60 —
Énergie électrique	7.100 kw.-h.

ce qui met la tonne à 330 francs.

Il existe deux types courants de silico-manganèse, l'un avec 60 à 70 0 /0 de manganèse et 20 à 25 0 /0 de silicium ; l'autre titrant 45 0 /0 de Mn et 22 à 25 0 /0 de Si.

La réaction du silico-manganèse sur l'acier oxydé peut être rendue plus énergique encore par l'addition de 10 à 12 0 /0 d'aluminium.

Procédé Gin. — En 1896, M. Gin a obtenu au four électrique des ferros-manganèses à 85 et 86 0 /0, en traitant des minerais riches provenant du Brésil. Le procédé consiste à mélanger au minerai des matières qui le scorifient ou le dissolvent et abaissent son point de fusion au-dessous de la température d'ébullition du métal. La formule suivante indique les réactions qui ont lieu dans le four :

$$\underbrace{15MnO^2}_{\text{minerai}} + \underbrace{3SO^4Na^2}_{\text{sulfate de sodium}} + \underbrace{11C}_{\text{carbone}} = 3MnO^3Na^2 + 4Mn^3O^4 + 3SO^2 + 11CO.$$

Avec un four double, à pont, la densité de courant la plus favorable correspond à une dépense d'énergie de 70 à 80 watts par centimètre carré de section droite de l'électrode. La tension moyenne de chaque foyer est de 25 volts environ, et la densité de courant est un peu supérieure à 3 ampères par centimètre carré. Chaque four comporte deux électrodes de 2.700 centimètres carrés de section et l'intensité à pleine charge atteint

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8.400 ampères. La puissance d'un four double est donc voisine de 420 kilowatts.

En prenant pour base une usine hydroélectrique pouvant produire annuellement 10.000 tonnes de ferro-manganèse à 80-83 0/0, avec les prix suivants par tonne pour les matières entrant dans la fabrication : minerai, 15 francs rendu à l'usine (2 tonnes) ; sulfure de sodium, 40 francs (320 kilogrammes) ; électrodes, 280 francs (1.200 tonnes par an) ; charbon de réduction, 32 francs (750 kilogrammes), le prix de revient de la tonne de ferro-manganèse ressortirait à 145 francs au lieu de 219 francs par les hauts fourneaux.

Procédé Simon. — Ce procédé comporte l'emploi du spath fluor comme dissolvant des oxydes de manganèse, en vue de la libération électrolytique du métal et de la possibilité de régler la température de régime du four électrique, résultat obtenu par l'intervention du fluorure de calcium, dont le point de fusion n'est que de 902°.

De cette façon le métal peut couler, et la tension de volatilisation étant relativement peu élevée, la perte par évaporation se trouve réduite à une limite acceptable.

Le fluorure de calcium détermine donc la séparation électrolytique et réduit le manganèse en présence du charbon.

Le fluor mis en liberté par l'action électrolytique du courant forme du fluorure de manganèse qui s'électrolyse à son tour pour former le métal à la cathode. D'autre part, il se dépose du tétrafluorure de carbone par l'action du fluor sur l'anode. Les réactions successives sont exprimées par les formules suivantes :

$$1^{\circ}\ 2P^2Mn^3 + 3Mn + 3CF^4 = 4PF^3 + 3Mn^3C;$$
$$2^{\circ}\ CF^4 + SiO^2 = CO^2 + SiP;$$
$$3^{\circ}\ 4PF^3 + 3SiO^2 = 3SiF^4 + 3O^2 + 4P.$$

La quantité d'énergie à mettre en jeu est celle que nécessitent le chauffage du bain et la dissociation de l'électrolyte. La quantité de chaleur pour le chauffage, la fusion et la réaction correspond à environ 3.475 kilowatts-heures ou 4.725 HP électriques par tonne de ferro-manganèse.

La marche du four est celle mixte, comportant l'emploi simultané de la dissociation électrique et la réduction par le charbon, et qui permet d'employer des fours marchant à 25 volts.

On estime que des fours de 150 kilowatts peuvent produire une tonne de manganèse par journée de vingt-trois heures de travail effectif en fonctionnant au régime normal de 7.500 ampères et 20 volts. La densité de courant la plus favorable correspond à une dépense d'énergie comprise entre 50 et 65 watts par centimètre carré de section de l'électrode, soit, pour une tension de 20 volts, 2,5 à 3,25 ampères par centimètre carré.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le prix de revient de la tonne de manganèse serait, avec le procédé Simon, de 204 francs.

Fabrication du fer fondu décarburé. — La Société électrochimique française obtient ce produit en faisant refroidir de l'acier extra-doux non désoxydé par l'introduction d'une certaine quantité de métal froid, tel que celui provenant d'opérations antérieures, et cela, jusqu'à solidification partielle ou totale, ou même jusqu'à ce que la masse soit à une température plus basse que la température de solidification. Une fois le fer fondu, on peut couler le métal en lingotières ou en moules convenables ; il reste tranquille sans dégager de gaz. On opère généralement dans un four électrique à acier dans lequel le métal est soustrait à toute action carburante.

Le métal nouveau ainsi obtenu se prête à la fabrication de pièces de fer pur, forgées, laminées ou moulées, pouvant avantageusement être employées dans la construction des appareils mécaniques ou électriques.

On peut encore, une fois le métal décarburé, le désoxyder, en y ajoutant de l'aluminium, et obtenir un métal nouveau décarburé et désoxydé se prêtant aux mêmes emplois que ci-dessus.

680. Fabrication des électrodes des fours électriques. — La Société « Le Carbone », à Levallois-Perret, utilise le *procédé Girard et Street* pour la fabrication des charbons électrographiques, procédé dans lequel on met en jeu la propriété que possède un champ magnétique d'imprimer un mouvement de rotation à un arc voltaïque placé à proximité, et cela à l'effet de répartir le plus uniformément possible la chaleur de l'arc dans un four électrique. Le mouvement de rotation de l'arc est combiné avec un mouvement de translation de la pièce à chauffer, ce dernier imprimé au moyen de galets d'entraînement actionnés par un moteur électrique. L'intensité dans ces fours, qui est au début de 300 ampères, atteint 3.000 ampères à la fin de l'opération.

Les charbons traités de cette manière voient leur masse se transformer en graphite et leur conductibilité électrique augmenter dans la proportion de 1 à 4, ainsi que leur conductibilité calorifique. Employés comme charbons négatifs dans les lampes à arc, ils prennent une usure moitié moindre et, utilisés comme anodes, ils se comportent d'une manière remarquable tant pour l'électrolyse par voie humide que dans les fours électriques.

Les électrodes graphitisées ont une durée au moins 6 fois plus grande que celle des électrodes de carbone amorphe pour l'électrolyse des chlorures alcalins ; elles résistent très bien à l'oxygène, sont quatre fois plus conductrices et, comme densité de courant, on peut aller jusqu'à 20 ampères par centimètre carré.

La fabrication des électrodes est devenue aujourd'hui une grande indus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trie, où le malaxage et la préparation des pâtes, où le dosage exact du charbon de cornue, la bonne préparation du goudron ont une grande importance. Le travail à l'aide de presses hydrauliques étudiées spécialement pour cette industrie, et atteignant des pressions de 2.500.000 kilogrammes, permettant d'obtenir des barres d'une pièce de 300 × 300 millimètres, les nouveaux fours à récupération où ces pièces sont portées aux températures les plus élevées, que l'on puisse obtenir par combustion du charbon, tous ces perfectionnements représentent une série d'efforts qui font le plus grand honneur aux fabricants de charbons.

Les électrodes en carbone sont un élément important du prix de revient des produits électrométallurgiques.

Les matières premières ont en particulier la composition suivante pour l'anthracite, le coke de pétrole et le charbon de cornues :

	Anthracite	Coke de pétrole	Charbon de cornues
Humidité	0,6	0,5	0,7
Matières volatiles	1,2	0,9	0,9
Carbone fixe	95,9	98,3	94,3
Cendres	2,3	0,3	4,1

Pour débarrasser l'anthracite et le coke de pétrole de leurs gaz, on se sert de fours prismatiques verticaux de quelques mètres de hauteur et d'environ un mètre carré de section où les matières subissent une combustion partielle suffisante. Anthracite et coke de pétrole peuvent ensuite être mélangés rouge au charbon de cornues et servir, en s'éteignant, à la dessiccation de ce dernier.

Les matières précédentes, seules ou mélangées entre elles en proportions qui varient avec le coût de chacune d'elles, sont broyées en poudres mi-partie de la finesse du ciment et mi-partie en grains de $\frac{5}{10}$ à $\frac{8}{10}$ de millimètre.

Des meuletons se prêtent avantageusement à ce broyage et sont à préférer à tous autres appareils à cause de leur simplicité et de la facilité de leur entretien.

Les poussières de carbone, intimement mélangées à chaud à un brai demi-gras spécial, sont ensuite travaillées dans des malaxeurs genre Werner et Pfeiderer, ou, de préférence, sous des meuletons.

Le brai employé doit être un produit bien défini de distillation, et un tour de main spécial — simple addition — lui donne la propriété de fournir à la cuisson un coke — c'est-à-dire un ciment — dur et dense.

Ce brai doit être employé en quantité strictement minimum.

La pâte travaillée jusqu'à parfaite homogénéité est moulée dans des presses à filières — c'est le mode des grandes usines — ou dans des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

presses horizontales qui agissent sur la petite dimension de l'électrode, à l'inverse des presses à filières.

Tandis que les dernières coûtent 100.000 francs et plus, les presses horizontales dont il est question ici ne coûtent pas plus de 15 à 18.000 francs et conviennent aux petites installations.

Avec les unes et les autres, les électrodes obtenues sont de 200 à 400 millimètres de côté sur 1.600 millimètres de longueur.

Il est avantageux d'employer des électrodes de 1.000 millimètres seulement de longueur ; mais leur usage est moins général dans les usines électrométallurgiques que celui des pièces de 1.600 millimètres.

La pression à donner est d'environ 200 kilogrammes par centimètre carré de la surface à presser.

Les pièces ainsi obtenues sont cuites dans des fours à moufle, discontinus, ou continus à sole mobile, ou enfin continus, à gaz tournants.

Les premiers, économiques de construction et d'entretien, sont un peu plus difficiles à conduire que les autres : les électrodes doivent en effet être soumises, pendant une durée d'environ huit jours, à une température devant atteindre très graduellement, et d'une façon très continue, 1.200° à 1.500°.

Plus la température de cuisson est élevée, plus la conductibilité de la pièce est parfaite, et moindre est le pourcentage de matières volatiles qu'elle contient.

Les caractéristiques d'une électrode faite de parties égales en anthracite, coke de pétrole et charbon de cornues précités, sont, après cuisson de dix jours à 1.150°, les suivantes :

Matières volatiles	1,0
Cendres	2,3
Résistivité (en microhms-centimètre carré)	5.000

Le mode opératoire dont il est question ici permet d'obtenir des électrodes à un prix très notablement inférieur aux prix de vente des grandes fabriques.

Lorsqu'il s'agit d'employer les électrodes pour carbure de calcium ou ferros communs, leur manufacture peut être plus simple encore : on obtient de bonnes pièces avec un malaxage et un pilonnage fait à la main, sans machines ; les points essentiels sont alors le broyage, la qualité du brai, la conduite du four de cuisson et la soigneuse attention à exiger de la main-d'œuvre.

Les pièces obtenues peuvent être de sections carrées ou rondes ; quelques usines trouvent avantageux d'employer des électrodes cylindriques fort longues, de 2 mètres et plus, que l'on fait glisser dans leur collier au fur et à mesure de leur usure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Procédé Paul Girod. — Les marchandises utilisées, isolément ou mélangées dans une certaine proportion sont : le charbon de cornue, de 1 0/0 à 3 0/0 de teneur en cendres et contenant peu de matières volatiles ; le coke de pétrole, qui subit une distillation dans des fours à cornues horizontales, et ne contenant plus que 2 0/0 de cendres ; l'anthracite, ayant une teneur en cendres d'environ 2 0/0 et enfin la poix comme liant (mélange de poix et d'huile de goudron).

Les matières premières sont mélangées dans des malaxeurs à injection de vapeur, à une certaine quantité de goudron variant de 22 à 30 0/0. La masse pâteuse travaillée dans des broyeurs à meules est comprimée dans un moule cylindrique à l'aide d'une presse. Le bloc produit pesant 1.200 kilogrammes est amené à une presse hydraulique horizontale de 2.400 tonnes de puissance où il donne de 4 à 8 électrodes.

Les électrodes sont noyées dans de la poussière de coke très fine contenue dans des vases en céramique, que l'on chauffe dans des fours à gazogènes verticaux, où règne une température comprise entre 1.100 et 1.250° C.

La cuisson est la partie la plus délicate de la fabrication des électrodes : dans la fabrique Alb. Lessing, à Nuremberg, les électrodes, chauffées à 1.300° C. dans des fours verticaux, y restent pendant quinze jours, y compris la période de chauffage progressif, jusqu'à la période de température maximum et la période de refroidissement lent. La résistance électrique de ces électrodes ne dépasse pas 400 ohms par millimètre carré sur 1 mètre de longueur pour les plus grosses ; quand la section croît, la résistance tombe à 80-100 ohms.

Pour éviter la combustion des électrodes sous l'influence de la chaleur dégagée dans les fours électriques, on fait usage de divers procédés. Par exemple, les électrodes peuvent être placées dans des douilles à double enveloppe refroidies par une circulation d'eau. Un autre dispositif consiste à munir les fours de couvercles pouvant contenir, entre deux enveloppes, de l'eau de réfrigération. On utilise aussi le refroidissement par l'air.

Comme dispositions les plus simples pour relier les électrodes aux pièces de connexions, nous mentionnerons les perforations longitudinales et transversales. Ces perforations servent en général à recevoir des boulons ; les longitudinales sont aussi destinées à emprisonner des baguettes de contact. Quelquefois des baguettes métalliques sont vissées dans les électrodes, dans lesquelles les filets de vis ont été taillés préalablement.

Les anodes en forme de plaques avec entailles et tenons en queue d'aronde à leurs extrémités permettent d'allonger continuellement les plaques de charbon au fur et à mesure de leur destruction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La tonne d'électrode revient environ à 150 francs de fabrication proprement dite.

Les porte-électrodes doivent être d'une construction soignée afin d'assurer un très bon contact avec l'électrode. Il en existe un grand nombre de modèles. Les parties conductrices sont généralement en bronze ou en cuivre, tandis que celles destinées à serrer les surfaces de contact entre les électrodes sont en fer forgé, en acier, ou en acier coulé. On fait généralement supporter à ces contacts une densité de courant de 3 à 5 ampères par centimètre carré.

Les porte-électrodes dits supports de tête permettent d'utiliser l'électrode jusqu'à 50 centimètres dans le cas des fours ouverts; au contraire, pour les fours possédant une voûte, l'on perd jusqu'à 90 centimètres, soit la moitié de la longueur de l'électrode.

Pour les porte-électrodes latéraux, on emploie des dispositifs permettant d'avancer celle-ci dans son support à mesure de son usure. L'électrode n'est pas ici fixée par sa tête. C'est à une certaine distance de ces deux extrémités qu'elle est mise en connexion avec les câbles adducteurs. Quand l'électrode est usée le plus loin possible, on ajoute une nouvelle pièce de charbon à la précédente et on fait glisser l'ensemble dans le support d'une quantité convenable.

La réunion de deux électrodes s'obtient le plus fréquemment par vissage.

La détermination d'une section convenable pour les électrodes est une des questions les plus importantes qu'aient à résoudre les consommateurs. Cette section est déterminée avant tout par la densité de courant et l'expérience est, pour ainsi dire, le seul guide. Les électrodes utilisées dans les fours à acier Héroult, Girod, Keller peuvent supporter 5 ampères environ par centimètre carré avec une surcharge momentanée de 6 à 7 ampères par centimètre carré (section de 400 × 400 millimètres).

La pression à laquelle fonctionne la presse à agglomérer, la grandeur de la surface exposée au refroidissement et la résistance de l'électrode jouent un rôle important dans le dimensionnement des électrodes.

L'emploi de plusieurs petites électrodes combinées offre l'avantage que chacune d'elles peut supporter une densité de courant plus considérable et d'éviter ainsi d'importantes pertes d'énergie.

681. Fabrication du cuivre. — Les minerais employés dans la métallurgie sont de trois sortes : les minerais de cuivre natif ; les minerais oxydés (cuprite, malachite et l'azurite) ; les minerais sulfurés (chalcosine, chalcopyrite). La richesse de ces minerais varie de 2 0/0 à 80 0/0.

Les méthodes utilisées dans la métallurgie ordinaire sont : 1° fusion au four à cuve ou au réverbère pour concentration et rotissage au réver-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bère ; 2° fusion au water-jacket et conversion ; 3° lavage et précipitation.

Les usines traitant des minerais ou des mattes et celles qui raffinent le cuivre ou ses alliages par électrolyse se trouvent en France à Givet (Ardennes), Saint-Denis (Seine), Biache Saint-Waast (Pas-de-Calais) et Dives (Calvados).

Le four électrique peut être employé là où le travail au water-jacket n'est pas admissible et par suite obtention de mattes riches avec les minerais sulfurés ou avec les minerais oxydés, de métal de 91-98 0/0 de cuivre. La consommation d'électrodes varie de 5 à 8 kilogrammes par tonne de minerai et la consommation d'énergie est très variable avec la nature du minerai et la composition du lit de fusion ; elle oscille entre 400 à 1.000 kilowatts-heures par tonne de minerai chargé.

D'après M. Ch. Vattier, le procédé employé à l'usine de Livet (§ 271) pour l'obtention du cuivre au four électrique permet de supprimer la dépense de combustible pour la transformation des minerais en mattes de cuivre. Ce four se compose d'un creuset muni d'un avant-creuset pour effectuer la séparation de la matte de cuivre et de la scorie. Dans chacun de ces compartiments pénètrent des électrodes qui peuvent être amenées au ras du bain ou plongées dans la masse liquide. Le passage du courant est établi en introduisant un mélange de charbon et de matte en petits morceaux au fond du creuset. La fusion du minerai s'effectue très vite et le mélange fondu s'écoule dans l'avant-creuset où s'opèrent les réactions définitives.

Un four employant un courant de 4.750 ampères sous 120 volts fond 25 tonnes de minerai en vingt-quatre heures. La quantité de cuivre entraînée dans les scories est très faible.

M. Vattier indique que la dépense nécessaire pour l'obtention d'une tonne de cuivre serait de 83 francs (?) au lieu de 320 francs par les procédés métallurgiques ordinaires.

Le cuivre peut être distillé avec facilité au four électrique ; lorsque sa vapeur est condensée sur un corps froid, on obtient un feutrage de cuivre filiforme présentant toutes les propriétés du cuivre ordinaire. A sa température d'ébullition, le cuivre dissout le graphite et l'abandonne plus ou moins cristallisé par le refroidissement.

Le procédé *Fauchon-Villeplée* est relatif au traitement des mattes de cuivre dans un four électrique. Celle-ci est surchauffée par l'action de courants induits, pendant que l'on y insuffle de l'air afin de brûler le soufre et le fer. La matte fondue ou non est versée dans le creuset du four ; elle y est amenée à la température convenable, et les courants induits provoquent dans la masse un brassage énergique qui mélange intimement les matières.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

682. Fabrication du zinc. — Les minerais de zinc les plus importants sont la blende, les calamines, et la franklinite (sulfures et carbonates).

La métallurgie a pour but de transformer par grillage les minerais en oxydes et de réduire ceux-ci par le charbon.

Le grillage s'opère dans des fours, la réduction dans des cornues et l'affinage a lieu soit par liquéfaction ou soit par redistillation.

Les usines qui s'occupent du zinc en France sont : Viviez (Aveyron), Auby, Mortagne et Saint-Amand (Nord), Noyelles-Godault (Pas-de-Calais) et Creil (Oise).

La production du zinc, qui était de 475.000 tonnes en 1900, est passée à 745.000 tonnes en 1908 et elle a continué de progresser. En Europe, la fabrication du zinc met en œuvre un capital de 150 millions de francs répartis entre 36 usines, qui produisent 500.000 tonnes d'une valeur de 225 millions de francs.

La métallurgie du zinc repose sur les principes suivants : 1° quand on soumet à l'action de la chaleur la calamine, elle se décompose en oxyde de zinc, qui reste, et en acide carbonique, qui se dégage ; 2° la blende soumise à l'action de la chaleur au contact de l'air se dédouble en oxyde de zinc, qui reste, et en anhydride sulfureux, qui se dégage ; 3° l'oxyde de zinc, mélangé à du charbon et soumis à une haute température, se réduit, avec dégagement d'oxyde de carbone.

Quand le minerai est de la calamine, il est suffisant de le chauffer dans un four à flamme, à cuve ou à réverbère, pour le décomposer.

Lorsqu'on traite la blende, on grille celle-ci dans des fours spéciaux (four à pyrites, four Gerstenhœfer, four à réverbère ordinaire, fours à moufle partiels ou totaux).

Finalement, on possède un minerai de zinc à l'état d'oxyde. Celui-ci, mélangé avec du charbon, est soumis à l'action de la chaleur à une haute température ; l'oxyde de zinc se réduit, avec formation d'oxyde de carbone qui agit lui-même comme réducteur et se transforme en anhydride carbonique. Le zinc se volatilise et se dégage avec les autres gaz. Quand ce mélange est refroidi, le zinc se condense à l'état liquide ou solide.

Les fours employés sont avec ou sans récupérateurs ; ceux chauffés au gaz sans récupérateurs sont les plus utilisés.

Les procédés électrométallurgiques permettent de traiter des minerais pauvres et délaissés (ne contenant pas plus de 20 0/0 de zinc) avec des rendements supérieurs à 90 0/0. De plus, on peut réduire la blende sans grillage préalable. Quand les minerais contiennent du plomb et de l'argent, ils passent avec le zinc.

On fond au four les minerais oxydés et sulfurés de zinc, additionnés des fondants appropriés, et l'on recueille le métal qui coule ou se volatilise en vapeurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On arrive à ne laisser que 1 0/0 de zinc avec les scories.

Le traitement d'une tonne de minerai cru exige 1.200 HPH, ce qui correspond à 900 kilogrammes de charbon, et le grillage ne nécessite que 150 kilogrammes, soit un total de 1.050 kilogrammes.

Le four électrique permet ainsi une économie de combustible de 1 tonne de charbon par tonne de minerai cru, sur le traitement par la métallurgie ordinaire.

En résumé, l'emploi du four électrique permet une économie totale de 50 francs par tonne de minerai cru.

Procédé Aurelio Rodriguez Bruna. — Ce procédé électrolytique pour l'extraction directe du zinc de ses minerais consiste à mélanger ceux-ci avec du charbon et à exposer le mélange, dans le four électrique, à une pression et à une température élevées ; le zinc, au lieu de se dégager avec l'anhydride ou l'oxyde carbonique, reste à l'état liquide, et l'on peut ainsi tirer parti des gaz de la combustion. Quand on opère avec de la blende, on supprime le grillage et on obtient comme produit secondaire le sulfure de carbone qu'on peut employer comme combustible. On évite aussi, sur le procédé ordinaire, les pertes par oxydation du zinc à la mise en marche, la perte par combustion du zinc, qui, à l'état de vapeurs, remplit les retortes ou les cornues, et enfin la perte qui résulte de la porosité des moufles.

Procédé Côle et Pierron. — Dans le four de ces inventeurs on extrait le zinc de la blende par déplacement du métal au moyen du fer. Le four comporte deux creusets distincts, recevant, l'un la blende, l'autre le fer, et dans chacun de ceux-ci l'arc jaillit entre une électrode verticale mobile et une électrode enclavée dans le fond du creuset ; après leur fusion, les métaux, à la sortie du creuset, se réunissent dans une capacité faisant suite aux creusets et sur la sole de laquelle les deux métaux réagissent l'un sur l'autre, le courant étant maintenu entre les électrodes par effet Joule.

La réaction est définie par la formule :

$$ZnS + Fe = Zn + FeS.$$

La (*fig.* 1955) représente la forme du four arrêtée par les inventeurs. Le creuset A, dont le fond se relève au centre en une protubérance *b* sous l'électrode mobile C, est en graphite posé dans une armature métallique en communication avec les barres d'amenée du courant de polarité opposée à celle des câbles aboutissant à l'électrode mobile. Une voûte D, en briques réfractaires, recouvre le creuset. Les charges, formées de minerai, de fondant, sont introduites par les orifices *e* percés dans cette voûte et fermés en marche par des bouchons réfractaires.

Les lits de fusion épuisés sont évacués par le trou de coulée *f*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les vapeurs de zinc, franchissant l'orifice g, se rendent par le large canal h au condenseur I formé d'une chambre verticale à épaisses parois réfractaires, remplie de charbons maintenus au rouge. Des orifices d'appel d'air j à réglage et une cheminée k (à rabattement) permettent de porter

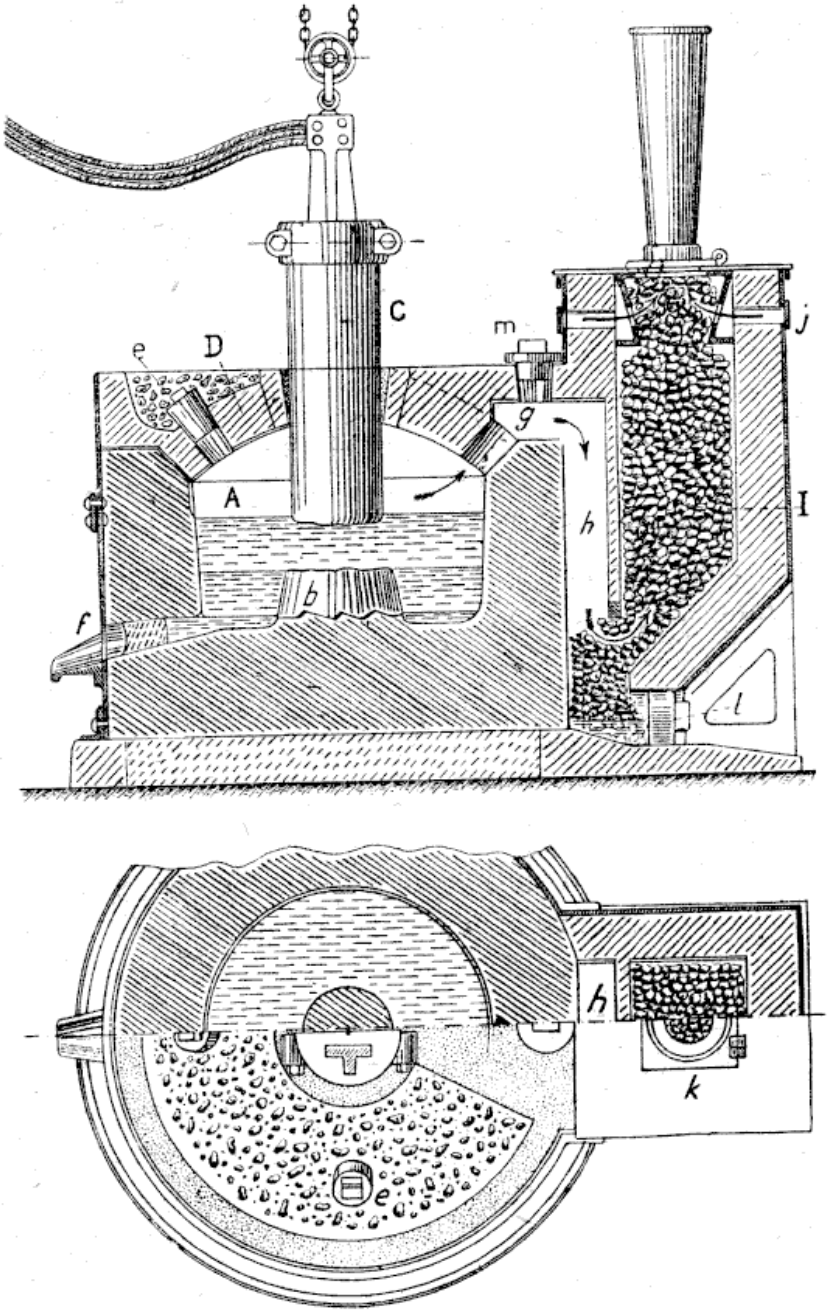


FIG. 1955.

au rouge vif par leur propre combustion les charbons dans le haut du condenseur. Au bas de cet appareil, une petite porte l sert, en même temps qu'à évacuer le zinc condensé, à faire couler les charbons de haut en bas. En réglant convenablement leur descente, on maintient ces charbons dans la plus grande hauteur de la chambre I, à la température qui est à la fois celle de la réduction du brouillard de zinc et celle de la conden-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sation du métal. Une ouverture, fermée par le bouchon m, sert à dégager les canaux g et h en cas d'engorgement.

La Société exploitante des brevets Pierron et Côte a installé plusieurs fours dans l'usine d'Arudy (Basses-Pyrénées), située dans une région de mines de blende importantes. Le but poursuivi est la production de blanc de zinc commercial à 98,6 à 99 0/0 d'oxyde de zinc.

Dans les comptes rendus d'une série d'essais au cours desquels on a fondu 76 tonnes de minerai, on a relevé notamment les chiffres suivants : en six cents heures de marche, on a fondu 28.345 kilogrammes de blende à gangue de silice à peu près pure, contenant de 2 à 4 0/0 de fer, 1 0/0 de métaux étrangers et titrant en moyenne 37,28 0/0 de zinc.

Le courant débité pendant ce temps était de 3.800 ampères sous 42 volts avec $\cos \varphi = 0{,}80$.

La quantité de chaux correspondante employée tant comme réactif que comme fondant a été de 12.384 kilogrammes, et la quantité de charbon réducteur de 3.146 kilogrammes. Le poids du zinc contenu dans le minerai passé au four était de 10.587 kilogrammes devant théoriquement donner 13.193 kilogrammes d'oxyde. On n'a récolté effectivement que 12.370 kilogrammes.

Actuellement le procédé définitivement adopté consiste à opérer la fusion du minerai pour dégager le métal brut et à raffiner immédiatement ce métal également au four électrique au fur et à mesure de sa production pendant qu'il est encore à une température voisine de son point de volatilisation. Les inventeurs opèrent par la fusion de blendes crues par la chaux et le charbon. La possibilité du traitement des blendes fluorées permet l'utilisation de gisements jusqu'ici improductifs.

A l'usine d'Épierre on a installé 4 fours de 500 HP pouvant traiter chacun 4 tonnes de minerai de zinc par 24 heures. Le four de 500 HP (375 sur la cuve et 125 sur le condenseur) fond de 4.000 à 5.000 kilogrammes de minerai par 24 heures, représentant 2.000 à 2.200 kilowatts-heures par tonne de minerai à 35 0/0 en moyenne. Il ne reste plus que 1,5 0/0 de zinc dans les laitiers. Le zinc sortant du condenseur titre en premier jet 99,93 0/0. Les pertes totales sont de 8 à 9 0/0 et la consommation d'électrodes est de 12 kilogrammes par tonne de minerai.

La *Société Trollhalaus Elektriska Kraftaktiebolag* exploite un four électrique inventé par G. de Laval construit de façon à présenter, pour l'introduction du minerai mélangé de charbon et de chaux, une paroi inclinée dont la surface est chauffée par radiation depuis la source électrique de chaleur, de telle sorte que les composants volatils du minerai peuvent s'échapper de ladite surface en conduits en pente hors du four à travers une sole spéciale, tandis que les résidus sont recueillis à la base de la pente d'où ils sont évacués.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le minerai est réduit directement et la poudre de zinc condensée est transformée, dans un four à résistance, en zinc métallique. Ce four est installé dans plusieurs usines en Scandinavie.

Le four *Imbert-Fitzerald*, est employé en Amérique. Le four proprement dit est accouplé à un condenseur à colonne de coke chauffée par résistance ; une chambre de condensation à cloisons chicane termine l'appareil.

Four A. Edelmann et N. Vallin. — Ce procédé, pour l'extraction continue du zinc dans le four électrique, consiste en ce que les vapeurs de zinc et les gaz d'oxyde de carbone, dégagés dans la zone de fusion, sont directement dirigés dans une électrode fermée, en forme de cloche, entourée de la cuve d'alimentation et fonctionnant comme égalisateur de chaleur et comme régulateur de pression ; ils passent ensuite, par un tuyau qui pénètre dans cette cloche, dans la chambre de condensation, le tuyau, la chambre de condensation et l'allonge étant maintenus à une température convenable.

Le four électrique (*fig.* 1956), utilisé pour ce procédé, se compose d'une électrode fermée *a* entourée de la cuve d'alimentation *b* et d'une électrode annulaire inférieure *c*. Le tuyau de sortie et de condensation pénètre dans l'électrode-cloche *a*, tandis que son autre extrémité est entourée d'une chambre de condensation *d* communiquant, d'une part, avec l'allonge *e* et, d'autre part, avec le collecteur à zinc *f* hermétiquement fermé. Le trou de coulée *g* sert à faire écouler le plomb et le laitier, et le trou de coulée *h*, à la sortie du zinc.

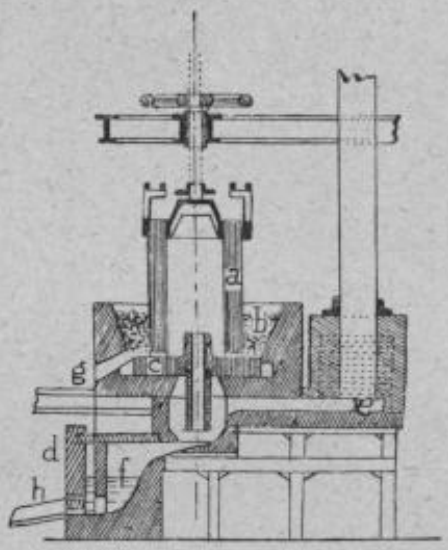


FIG. 1956.

L'emploi d'une électrode en forme de cloche permet le réglage de la pression et de la vitesse de circulation des gaz ; le four étant fermé par la chambre d'alimentation, par la couche de coke et le niveau du zinc liquide, les vapeurs de zinc se trouvent sous pression, ce qui assure une condensation facile par frottement et par contact dans le tuyau de condensation. Les gouttelettes de zinc qui se forment dans le tuyau sont entraînées par les gaz et se séparent bien du courant de gaz ; enfin la zone de fusion et l'intérieur du four restent absolument inaccessibles à l'air et à l'humidité, même pendant le chargement et pendant la sortie du zinc ou du plomb du laitier.

Le *four Snyder* (*fig.* 1957) est principalement destiné à traiter des mine-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rais qui renferment à la fois du zinc et du plomb sous forme de sulfures, par exemple. C'est un four à résistance. La charge du four se compose de minerai de plomb et zinc grillés, d'un excès de charbon et de matières qui forment une scorie à une température comprise entre la volatilisation du zinc et celle du plomb (1.000 à 1.200° C.). Cette scorie est en outre saturée d'un oxyde alcalin, tel que la chaux, de façon à dissoudre aussi peu que possible de métal, à avoir un poids spécifique élevé et une grande résistivité électrique.

Cette charge est chauffée de façon à expulser les gaz et à commencer la réduction. Elle passe ensuite sur le bain fondu de la chambre de fusion. Quand le plomb métallique et la scorie sont fondus, on fait passer le courant électrique qui continue le chauffage. Le zinc métallique est volatilisé

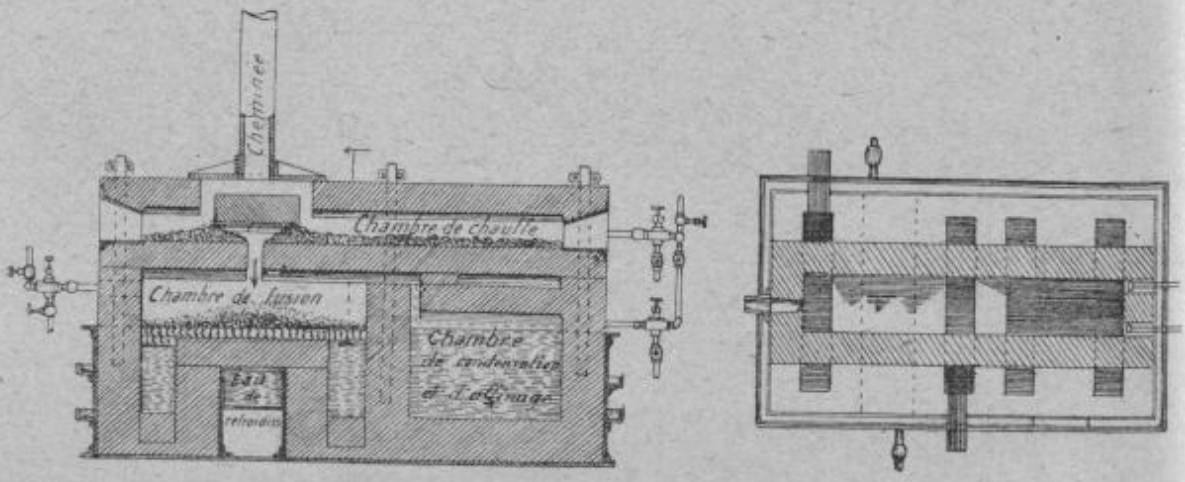


FIG. 1957.

pendant que le plomb liquide descend au travers de la scorie et se dépose dans les réceptacles d'où on le recueille. Les vapeurs de zinc arrivant dans la chambre d'affinage sont condensées pour s'échapper à travers les carneaux dans la cheminée.

Les gaz non condensés se dirigent par des carneaux dans la chambre de chauffe préalable où ils sont mélangés à l'air et consumés.

Dans le procédé de la Société *Rheinisch-Nassaniche Bergwerk und Hullen A. G.*, le sulfure de zinc, pulvérisé et non grillé préalablement, est introduit avec du fer réduit, pulvérisé dans un four électrique à marche continue, dans lequel la charge elle-même sert de résistance de chauffage.

Il se produit la réaction $ZnS + Fe = FeS + Zn$ à l'abri de l'air et à une température de 1.000 à 1.500° C. Le zinc distille et est recueilli comme ordinairement. On récupère le fer du sulfure de fer pour servir à une nouvelle opération.

Le *procédé Kaiser* consiste à traiter au four électrique les minerais de fer renfermant du zinc ou encore des pyrites grillées contenant du zinc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les minerais sont mêlés avec des fondants, mais sans addition de substances réductrices.

La (*fig.* 1958) représente un four à induction système Gin pour la métallurgie du zinc. Dans ce four le circuit primaire formé de la bobine de fils de cuivre C et le circuit secondaire d'un bain de fonte contenu dans les chambres de distillation A communiquent entre elles par un canal B rempli de fonte. La bobine est protégée contre la chaleur par des plaques à circulation d'eau E et des canaux où circule l'air froid. Un mélange de minerai de zinc et de charbon est chargé mécaniquement dans les chambres A. Le zinc se condense dans les chambres M et N, la première étant à la température de 500 à 700 degrés. Les dernières fumées sont

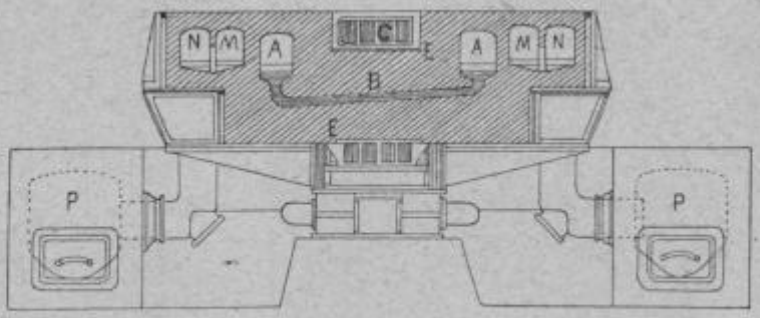


FIG. 1958.

recueillies dans les chambres P. Le revêtement du four est en briques de dolomie et de magnésie.

A l'usine de Trollhättan, on a installé onze fours de fusion de 350 HP, deux de raffinage. Les anciens fours du type à arc ont été remplacés par le nouveau type à résistance à courant triphasé, de 9.640 volts, transformé en monophasé à 110 volts.

Le procédé de fusion du minerai consiste à charger le minerai avec additions convenables de fondants et réducteurs (anthracite ou coke) dans le four où la plus grande partie du zinc et quelque peu de plomb sont volatilisés et condensés, partie en métal, partie en poudre bleue et oxyde contenant 54 0/0 Sn et 20 0/0 Pb. Cette poudre est alors mélangée avec du minerai frais et rechargée jusqu'à ce qu'une plus forte proportion du métal volatilisé soit recouvrée comme métal.

De 112 tonnes de zinc brut, on a obtenu 78 tonnes de zinc fin, 17 tonnes de plomb et 11 tonnes de poudre, la perte étant ainsi de 5,7 0/0. La consommation de courant est en moyenne de 2.078 kilowatts-heure par tonne de minerai fondu.

Aux usines de Sarpsbord (Norvège), on compte trois fours de fusion du vieux type à arc et quatre fours de raffinage. Le rendement du raffinage est comme suit : 83,9 0/0 en zinc fin, 9,8 en poudre, 2,2 en résidus (Pb, etc.),

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1,1 perte au chargement, 0,5 infiltration et 3,5 divers. Des usines sont en cours de construction sur le côté ouest de la Norvège près de Drouthein, à Odda, sur le Hardangerfjord.

683. Fabrication du nickel. — Les minerais de nickel les plus connus sont la garnierite, la nouméite (hydrosilicates de magnésium imprégnés d'oxyde de nickel) et la nickeline (arséniure de nickel).

La garnierite est transformée en oxyde de nickel et l'oxyde obtenu est ensuite réduit.

Les usines produisant le nickel par les procédés de la métallurgie ordinaire sont situées dans le département de la Seine-Inférieure. (Production environ 2.000 tonnes.) Avant la guerre la production mondiale de minerai s'élevait environ à 120.000 tonnes et celle de nickel à 20.000 tonnes.

Le four électrique permet d'éliminer totalement le soufre des minerais de nickel, qui en contiennent jusqu'à près de 50 0/0. On sépare de même complètement le nickel d'avec le cuivre et le fer.

Procédé de la Société électrométallurgique française. — Il consiste à traiter au four électrique un mélange de minerai de nickel, d'un fondant et de charbon, de façon à obtenir une fonte de nickel exempte de soufre et de silicium, et à affiner par oxydation la susdite fonte de nickel pour obtenir un produit plus riche en nickel. Celui-ci est caractérisé par l'absence de soufre et de silicium, et il peut être employé directement dans l'industrie.

Le creuset de réduction est constitué par une sole réfractaire recouverte de métal et par des parois en métal non réduit.

Le courant employé est de 1.500 ampères sous 100 volts.

Procédé Gin. — Il consiste à réduire au four électrique l'oxyde de nickel, après addition d'une proportion convenable de silice et de carbone, de manière à obtenir un siliciure exempt de carbone que l'on fait ensuite réagir sur l'oxyde mélangé de chaux, afin de brûler le silicium et de le scorifier sous forme de silicate de calcium.

La réduction pour siliciure du minerai brut ou de l'oxyde de nickel peut s'opérer dans un four électrique à résistance. Le siliciure fondu passe directement, à l'état liquide, du four de réduction dans celui d'affinage. Cette dernière opération est effectuée dans le four-canal, en présence d'une quantité calculée d'oxyde de nickel ou de fer ou d'un mélange des deux oxydes, selon que l'on veut obtenir du nickel pur ou du ferronickel.

L'affinage peut s'opérer aussi dans un four à foyers conjugués dans lequel on forme un bain d'oxyde de nickel, tandis que les électrodes sont formées de silicure de nickel.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les réactions sont :

Pour la réduction du silicium :

$$2NiO + SiO^2 + 4C = SiNi^2 + 4CO.$$

Pour l'affinage :

$$SiNi^2 + 2NiO + CaO = 4Ni + SiO^3Ca.$$

La préparation d'une tonne de nickel demande 4.250 kilowatts.

Le prix de revient du kilogramme de nickel revenant à 3 francs, son prix de vente avait pu descendre jusqu'à 4 francs ; son principal débouché réside dans la fabrication des aciers : aciers ternaires (aciers au nickel ordinaires) et aciers quaternaires (aciers chrome-nickel).

L'addition de 3 à 3,5 0 /0 de nickel dans l'acier augmente la résistance à la traction de 30 0 /0 et la limite élastique de 75 0 /0, sans changement apparent de l'allongement.

Les additions successives augmentent la dureté jusqu'à 16 ou 18 0 /0 où l'acier devient excessivement dur et difficile à travailler.

L'usine de la Praz fabrique des produits contenant environ 40 0 /0 de nickel, 2 0 /0 de carbone et moins de 2 0 /0 de silicium.

M. Héroult a fait à Sault-Sainte-Marie des essais de réduction au four électrique de minerais canadiens, pour la fabrication directe au four électrique d'un acier au nickel marchand.

La fabrication des ferros-nickels est d'une grande importance pour l'avenir de nos minerais de garnierite (hydrosilicate de nickel et de fer), le four électrique permettant de traiter des minerais à faible teneur, 5 0 /0 de nickel sur minerai sec. Pour ces minerais il faut compter dans les fours de 1.000 HP une dépense de 3,5 à 4 chevaux-an par tonne de nickel réduite.

Fabrication du plomb. — Les minerais de plomb les plus importants employés en métallurgie sont : la cérusite (carbonate) et la galène (sulfure).

Les méthodes utilisées dans la métallurgie du plomb sont : le grillage suivi de réduction et le rôtissage.

Le grillage a lieu dans des convertisseurs et la réduction dans des water-jackets. L'affinage a lieu dans un four réverbère. Les principales usines en France qui extraient le métal du minerai sont situées : à Coueron (Loire-Inférieure), à Noyelles (Pas-de-Calais), à Langeac (Haute-Loire) et à Peyrobrune (Tarn). La production du plomb s'élevait en 1910 à 1.140.000 tonnes, avec 21.000 tonnes pour la France.

La galène est jetée dans un bain de chlorures ou de fluorures alcalins ou alcalino-terreux en fusion ; le nickel alcalin ou alcalino-terreux formé à la cathode réagit sur le sulfure de plomb, et met le plomb en liberté.

Avec le chlorure de calcium fondu, la réduction cathodique exige une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

différence de potentiel de 20 volts ; mais il ne faut pas opérer au-dessus de 1.300° C.

On obtient un meilleur rendement électrolytique avec un bain formé de cryolithe et de spath fluor ; mais l'emploi des fluorures n'est pas recommandable en ce sens que le bain devient rapidement visqueux, par suite de la solubilité de la galène dans la masse fondue. D'ailleurs les chlorures ont sur les fluorures l'avantage de permettre de refaire facilement un bain neuf (quand le bain contient trop d'impuretés), en dissolvant les chlorures dans l'eau et les faisant cristalliser.

Le *procédé Salon* permet de réduire électrolytiquement la galène en la disposant comme cathode dans un électrolyte aqueux, généralement l'acide sulfurique. On obtient à la cathode une éponge de plomb, mais cette éponge n'est pas directement utilisable.

Avec son procédé *C. P. Townsend* évite cet inconvénient en effectuant la réduction de la galène dans un bain de fusion consistant, de préférence en sels haloïdes des alcalins et alcalino-terreux.

Le *procédé Bello* est basé sur l'emploi, comme électrolyte, d'une solution de fluosilicate de plomb et d'acide fluosilicique. Il obtient un plomb cohérent de structure uniforme et présentant la densité et les qualités du plomb coulé. Cette méthode est applicable aussi bien au raffinage du plomb qu'au plombage électrolytique de corps métalliques. On donne de la cohérence au plomb déposé, en ajoutant à l'électrolyte un réducteur tel que : la gélatine, le pyrogallol, le résorcinol, la saligénine, l'orthoamidophénol, l'acide formique, l'hydroquinone et l'acide sulfureux.

Fabrication de l'élain. — Le four électrique qui a servi aux essais à l'Institut de Northampton est à très peu près semblable à celui de Harmet pour le traitement des minerais de fer. Il comporte trois électrodes en charbon alimentées par du courant triphasé.

Les charges étaient composées d'un mélange de minerai et d'anthracite. En fonctionnement normal les caractéristiques du courant étaient de 40 volts et 2.500 ampères. On a obtenu directement un métal à 98 0/0 d'étain et une simple épuration a donné un métal à 99,75 0/0. La dépense de courant était de 3.000 kilowatts-heure par tonne de métal pour une teneur de scories de 0,25 0/0.

684. Fabrication du verre. — Le four électrique, produisant une quantité de chaleur considérable, était tout indiqué pour la fabrication du verre, et cependant ce n'est que récemment que l'on a réalisé des fours industriels.

Le *four Voelher* comporte des bougies Jablochkoff pour opérer la fusion des matières premières. Le *four Johann Leihne*, d'invention plus récente

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(*fig.* 1959), comprend trois parties, dont la partie supérieure est un four à arc pour fondre les matières premières. L'arc jaillit entre deux électrodes positives *b* et *c* et l'électrode négative *a*, placées à angle droit. En *d* et *e* sont disposés les conducteurs qui ont pour mission de maintenir la masse de verre liquide à une température assez élevée. La matière première, après avoir pénétré dans la chambre de fusion A, vient fondre en face des foyers électriques, l'air et l'hydrogène arrivant par l'intérieur de l'électrode *a* qui est creuse. Puis la masse liquide arrive dans C et passe en E, D et F, où elle se purifie et s'écoule ensuite.

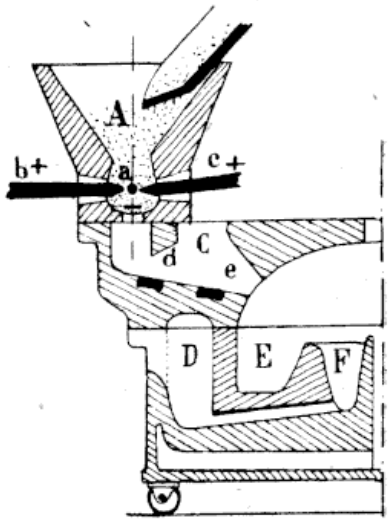


FIG. 1959.

Dans le *four Brown*, les matières premières sont mélangées, après avoir été pulvérisées, à du silicate de soude ou de la chaux hydraulique. La pâte obtenue passe sur des rouleaux qui la réduisent en feuilles et arrivent devant les électrodes. Le verre ainsi fabriqué est pur et incolore, parce qu'on arrive à supprimer tout contact entre les matières fondues et les électrodes.

Four de la Société anonyme « l'Industrie verrière et ses dérivés » (*fig.* 1960). — L'invention consiste essentiellement dans ce fait qu'une charge peut être intercalée dans un circuit électrique comme résistance de chauffage, au moyen de conducteurs d'amenée de courant encastrés à différentes hauteurs dans la paroi du four, afin de réaliser au mieux le chauffage, la réaction et la fusion des produits. Comme il n'est pas fait usage d'électrodes mobiles, les opérations peuvent être effectuées à l'abri de l'air, et les gaz sont aspirés presque à leur état naturel.

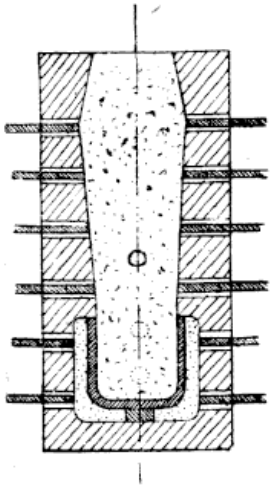


FIG. 1960.

La chaleur à produire se règle en allongeant ou en raccourcissant la résistance de chauffage, c'est à-dire la couche de la charge traversée par le courant, ou en intercalant les différentes couches de la charge dans différents circuits.

Production de la silice fondue. — MM. Ludwig, Bolle et Cº ont imaginé un four pour fondre, affiner et mouler la silice. A cet effet, celle-ci est placée dans un tube de charbon qui constitue une des électrodes du four. Ce tube est inséré dans un autre qui forme la seconde électrode et l'intervalle entre ces deux tubes est rempli de charbon en poudre constituant une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résistance électrique. Une des extrémités du tube intérieur est fermée par un bouchon mobile et le tube extérieur est clos à l'aide d'une pièce mobile qui peut être plus ou moins enfoncée dans la matière fondue contenue dans le tube intérieur. L'ensemble est placé dans un massif de briques réfractaires.

La silice fondue peut être obtenue sous forme de bloc. La pression de la vapeur ou de l'air comprimé peut être appliquée pour des travaux de moulage.

685. Fabrication de la baryte. — A l'usine de la « United baryum Company » (États-Unis), on fabrique au four électrique, par le *procédé Bradley et Jacobs* — qui consiste à chauffer au four du sulfate de baryte en présence d'une proportion définie de charbon — environ 1.200 kilogrammes de baryte par jour à l'aide de trois fours fonctionnant au moyen d'un courant de 2.400 ampères sous 120 volts pour chacun d'eux. Le blocs de baryte, au sortir du four, sont cassés et traités par l'eau chaude, et la solution ainsi obtenue est ensuite abandonnée à elle-même dans des cuves de cristallisation ; puis on lave les cristaux à l'eau froide et on les passe dans des essoreuses.

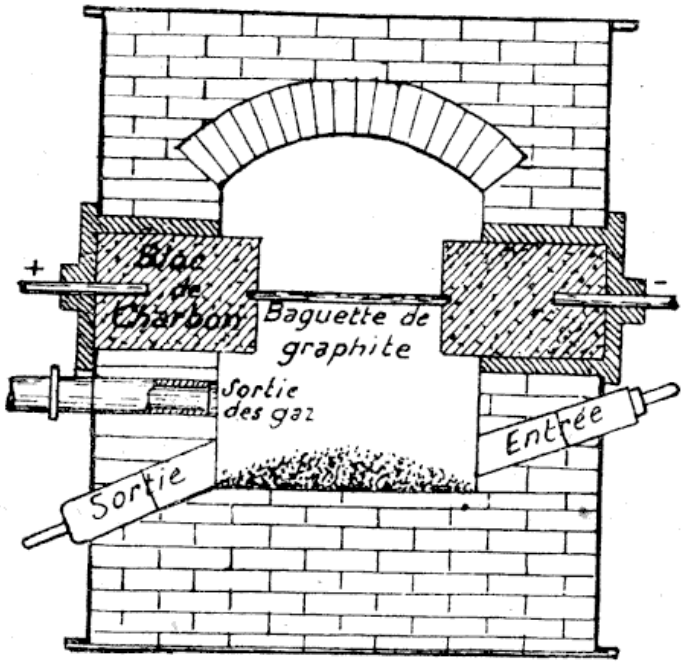


FIG. 1961. — Four de l'Électric. Réduction. Company Limited à Londres.

En Italie, à l'usine de Foligno, on tire la baryte du carbonate de baryte en produisant au four du carbure de baryum, que l'on décompose ensuite par l'eau, en baryte et en acétylène.

686. Fabrication du phosphore. — Le traitement des phosphates au four électrique a été étudié par Madman et Forker, il y a une quinzaine d'années, et appliqué successivement en Angleterre et au Niagara.

Les premiers fours électriques pour la préparation du phosphore ont été inventés par MM. *Readmann et Parker* (1888). L'opération consiste à chauffer un mélange de métaphosphate de calcium (P^2O^5CaO) avec du charbon de cornue ou des débris d'électrodes ; les gaz et vapeurs de phos-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

phore qui se dégagent du four se rendent dans une série de condenseurs en cuivre, et ils s'échappent dans l'atmosphère, après avoir abandonné tout le phosphore qu'ils renferment. La chaleur est concentrée entre les électrodes, et le four peut fonctionner longtemps. On recueille plus de 80 0/0 du phosphore renfermé dans les produits traités.

Le procédé Readmann a été modifié par la patente *Irvine* en 1901. La charge est la même que dans la méthode précédente ; toutefois, on peut se servir de phosphate d'alumine ou de chaux avec la silice ou un sel fondant basique.

Les deux électrodes de carbone sont suspendues verticalement et reliées à leur base par du charbon que traverse le courant. La fusion est continue.

Le *four Dile*, venu quelques années plus tard, a l'avantage de pouvoir fonctionner d'une façon continue. On introduit dans l'appareil de l'acide phosphorique (à 60 ou 70° B.) mélangé à du coke et du charbon de bois dans la proportion de 1 à 4 ou 5 en poids.

D'ailleurs, le four est très simple ; la partie inférieure de l'appareil, en forme de cylindre, est constituée par l'électrode positive en charbon, et la partie supérieure du four livre passage à l'électrode négative. Un courant de 80 à 150 ampères sous 120 volts est celui qui convient le mieux pour décomposer l'acide phosphorique.

La Electrical Reduction Company évite, en général, la production de l'arc voltaïque dans ses appareils et se borne à employer la radiation de la chaleur produite par une résistance électrique, à l'effet d'empêcher la production d'une ébullition tumultueuse et l'entraînement du charbon pulvérulent avec les vapeurs de phosphore. On emploie un four à parois réfractaires, sur les côtés latéraux duquel sont placés des blocs de charbon mis en communication ensemble par une tige de graphite. Le mélange à traiter est placé sur la sole du four, qui porte une ouverture latérale pour l'extraction des résidus ; les vapeurs de phosphore sortent par un tube latéral qui les conduit au condenseur.

L'Anglo-American Company exploite le procédé *F.-J. Machalske*, qui permet d'obtenir du phosphore jaune et du phosphore rouge à un prix très bas.

On emploie comme matières premières les phosphates mélangés avec des composés chlorurés. Le chlorure de phosphore obtenu se décompose immédiatement au four électrique en mettant le phosphore en liberté. Le résidu, qui est du chlorure de calcium, peut être mis tel quel dans le commerce ou employé à la préparation de l'acide chlorhydrique. On peut également obtenir à part le chlorure de phosphore et en tirer l'acide phosphorique en le mettant en présence de l'eau.

Le four Machalske est formé d'une petite chambre de réaction avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trou de coulée à la partie inférieure sur le côté ; les parois, le fond et le couvercle sont en magnésie calcinée recouverte extérieurement d'argile réfractaire et de briques. Les électrodes en charbon sont disposées verticalement. On peut traiter en un quart d'heure environ 40 kilogrammes de phosphates. Le coût de production, en comptant l'énergie à 3 centimes le cheval-heure, n'est que de 15 centimes le kilogramme. Le procédé est continu et fonctionne sans interruption nuit et jour.

Par la méthode *Landis* on extrait le phosphore de la wavellite provenant de la Caroline du Sud. Le minerai est grillé, mélangé de silice et de charbon de bois, puis réduit au four électrique. Celui-ci a une garniture intérieure de briques non absorbantes, et une fermeture hermétique de toutes les ouvertures. On ajoute une ou plusieurs électrodes verticales de carbone, soit pour un courant continu à travers la charge, soit pour la production d'un arc voltaïque.

Le phosphore obtenu par ces procédés est mélangé à des matières terreuses. On le purifie soit par filtration sous pression à travers une terre poreuse, ou bien par fusion simple en présence d'eau contenant du bichromate de potassium et de l'acide sulfurique.

La production mondiale du phosphore a été diversement évaluée de 1.000 à 3.000 tonnes par an.

687. Préparation du calcium, du magnésium, du baryum, du strontium, du sulfure de carbone. — Ces métaux, qui constituent le groupe des métaux *alcalino-terreux*, traités au four électrique, s'obtiennent facilement « en plaçant dans la cavité d'un four à chaux « une certaine quantité de magnésie, qui est absolument stable aux tem- « pératures les plus élevées de l'arc, et en disposant par-dessus un « creuset de charbon de cornue contenant le mélange de charbon et « d'oxyde à réduire » (Moissan). L'opération se traduit par la mise en liberté du métal et la présence du carbone dans le creuset, provenant de la formation, au début de l'expérience, d'un carbure du métal en traitement.

Le premier procédé exploité industriellement pour l'obtention du calcium est dû à Rathenau (1903).

Borchers emploie un four avec anode cylindrique et cathode axiale en fer, placée dans un corps servant à la réfrigération. Pour l'élimination continue du calcium de la masse fondue, à Bitterfeld, on élève la cathode en fer au fur et à mesure que le calcium se sépare.

La Société d'Électrochimie fabrique du calcium métallique dans son usine des Clavaux. La dépense d'énergie correspond à 1 kilowatt-jour pour $0^k,4$ de métal. Le prix de ce dernier varie de 4 à 5 francs le kilogramme. On n'en produit pas plus de 100 tonnes par an. On l'utilise indus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

triellement à l'état d'hydrure de calcium pour le gonflement des ballons dirigeables.

Le calcium pur est blanc d'argent, rapidement oxydé dans l'air humide, malléable, de densité 1,52, possédant une chaleur spécifique élevée et bon conducteur de l'électricité, d'une dureté analogue à celle de l'aluminium, sublimable entre 700° et 800° dans le vide, et fondant à basse température. C'est un agent réducteur énergique qui sert en métallurgie pour réduire les oxydes ou sulfures, pour éliminer les gaz dissous et pour enlever les impuretés en formant avec elles certains composés.

Le *magnésium* est obtenu par électrolyse d'un mélange fondu de chlorure de magnésium avec d'autres chlorures. On doit à Graetzel le premier essai industriel (1883). Les usines produisant actuellement ce métal sont : l'usine d'Hermelingen près de Brême et celle de Bitterfeld. La production annuelle paraît ne pas dépasser 100 tonnes.

La dépense d'énergie correspond à environ 1 kilowatt-jour pour 1 kilogramme de magnésium. Ce métal peut prétendre à un certain avenir, surtout en tant qu'allié à l'aluminium (magnalium, duralumin) que l'on utilise dans la construction des dirigeables.

Le sulfure de carbone — utilisé dans l'industrie pour retirer les corps gras contenus dans les résidus de la fonte des suifs et des huiles, pour la préparation du caoutchouc vulcanisé, pour combattre les maladies de la vigne, les incendies, etc., — s'obtient, au moyen du four électrique, en faisant agir des vapeurs de soufre sur du charbon porté à une température donnée. Le *four électrique Taylor* est combiné de telle sorte que les électrodes de charbon ne puissent être détruites par les vapeurs de soufre. Ce four, qui est du système continu, est alimenté par un courant de 4.000 ampères sous 50 volts.

688. Préparation du mercure. — Le cinabre (HgS) ou sulfure de mercure est le seul minerai de mercure que l'on trouve en grandes quantités dans la nature et qui soit l'objet d'un traitement spécial, en vue de l'extraction du mercure.

La production annuelle du mercure est évaluée à 3.500 tonnes.

Si on soumet le cinabre à une haute température, l'oxygène de l'air se combine avec le soufre du sulfure en mettant le métal en liberté ($HgS + 2O = Hg + SO^2$).

D'une autre façon, si on fait agir de la chaux sur le cinabre, le soufre de ce dernier se combine avec le calcium pour former du sulfure de calcium, tandis que le mercure devient libre :

$$4HgS + 4CaO = 3CaS + CaSO^4 + 4Hg.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le mercure se séparant sous forme de vapeur doit, par conséquent, être condensé.

Le chauffage du cinabre au contact de l'air se fait dans des fours à cuve, à réverbère, etc. Pour le chauffage du cinabre avec de la chaux, on utilise également des cornues, mais ce dernier procédé est actuellement presque complètement abandonné, M. Becker a eu l'idée d'appliquer le four électrique, qui offre l'avantage de supprimer l'emploi des cornues et peut facilement être alimenté de façon continue. En chauffant du minerai de mercure avec de la chaux dans un four électrique, on distille la totalité du mercure et la vidange du four s'opère pour ainsi dire sans danger.

Dans les fours pour le traitement du mercure, il faut éviter l'accès de l'air ; par suite, les ouvertures par lesquelles pénètrent les électrodes ne doivent pas communiquer avec l'atmosphère. On peut prendre à cet effet des dispositions telles que celles pratiquées dans les fours où il faut empêcher l'introduction de l'air (fours Cowles).

689. Fabrication des vanadates. — Ferro-vanadium. — Le vanadium est un métal blanc argentin, d'un haut point de fusion, que l'on dit être de 2.000° C., de sorte que son emploi commercial sous forme métallique est pratiquement restreint à son usage comme métal réfractaire (dans les filaments des lampes électriques, par exemple).

Un alliage de fer et vanadium dans la proportion de deux parties de fer pour une de vanadium a son point de fusion à 1.375° C., soit 100° au-dessous de celui de l'acier doux. C'est sous cette forme que ce métal est présenté sur le marché pour les fabricants d'acier.

Le vanadium incorporé à certaines doses, 5 millièmes environ dans les aciers, donne les mêmes résistance et qualité que 6,7 et même 10 0/0 de tungstène et une supériorité incontestable sur le molybdène, le titane, etc.

L'usine du Bas-Coudray (Mayenne) traite, par les procédés Herrenschmidt un vanadate de plomb provenant des mines de Santa-Maria (Espagne), au four à réverbère avec du carbonate de soude et du charbon. Il se forme du plomb métallique contenant l'argent du minerai et une scorie composée de vanadate, d'aluminate, de silicate de soude, ainsi que de l'oxyde de fer.

Puis, à la suite de nombreuses opérations, on obtient du vanadate de soude pur avec lequel on fabrique du *ferro-vanadium* au moyen du four électrique. L'opération consiste à précipiter le vanadium par du sulfate de fer et du carbonate de soude en proportions déterminées, et on obtient du ferro-vanadium au titre de 39 0/0 de vanadium.

La découverte d'un important gisement de sulfure de vanadium au Pérou a ramené l'attention sur ce métal. Ce minerai, qui renferme 39,84 0/0 de sulfure, donne une fois grillé, 58 0/0 d'acide vanadique,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lequel, ainsi que l'a démontré M. Paul Girod, peut être réduit par le four électrique.

Le *procédé Gin*, pour la fabrication du ferro-vanadium, repose sur la grande conductibilité du trioxyde de vanadium et sur la facilité avec laquelle on obtient le trifluorure de vanadium en attaquant le trioxyde par le fluor en présence du carbone.

On prépare d'abord une pâte homogène et plastique de trioxyde de vanadium, de charbon de cornue et de brai pulvérisé, puis on en fait des masses prismatiques que l'on cuit à l'abri de l'air dans des fours à haute température. Les électrodes ainsi fabriquées peuvent supporter une densité de courant égale aux 7/10 de celle que l'on adopterait pour les électrodes en charbon de même section. L'anode du four est constituée par un faisceau de ces électrodes et la cathode est formée par un bain de fer métallique. Le voltage du régime est compris entre 11 et 12 volts.

Pour obtenir des alliages de vanadium, il suffit de remplacer le bain cathodique de fer par un bain de métal qui doit intervenir dans l'alliage.

Un acier ordinaire au manganèse, auquel on ajoute 0,25 0/0 de vanadium, voit sa résistance à la fusion s'augmenter de 65 0/0 et sa limite élastique de 68 0/0, sans que sa structure et ses propriétés physiques soient modifiées.

On fabrique aussi du *nickel vanadié* en employant un mélange d'acide vanadique et d'oxyde de nickel, en proportions telles qu'il donne un alliage à 25 0/0 de vanadium.

690. Préparation du chrome. — Nous avons vu la façon d'obtenir le ferro-chrome au four électrique. On peut aussi avoir du chrome fondu renfermant des quantités plus ou moins grandes de carbone. Le chrome chargé de carbone est ensuite affiné par électrolyse.

Divers procédés ont été mis en usage, savoir ceux de Heibling, de Borchers, de Moissan et Chaplet, de Goldschmidth.

Les *procédés Heibling* sont basés sur la réduction simultanée d'oxydes de fer, de chrome et de chaux par le charbon dans un four électrique, en vue d'obtenir un ferro-chrome et, comme laitier, du carbure de calcium.

Le *procédé Gin* permet de préparer le chrome et le ferro-chrome avec une très faible teneur en carbone. Il consiste à opérer d'abord la réduction électrique de l'oxyde du métal à obtenir, en présence d'une proportion convenable de silice. On utilise ensuite le siliciure produit, comme réducteur d'une nouvelle quantité d'oxyde, ou on soumet ce siliciure à une fusion oxydante en présence de l'oxyde ou d'un composé oxygéné du métal à obtenir, auquel on ajoute de la chaux pour scorifier la silice formée. La préparation du siliciure s'effectue dans un four électrique quelconque à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrodes en carbone, et l'élimination du silicium par fusion peut aussi être faite dans un four électrique ordinaire à deux foyers en série, dans lesquels les électrodes sont coulantes.

691. Production des carbures métalliques. — La combinaison du carbone avec les métaux ne s'effectue qu'à de très hautes températures. Ces composés nouveaux, que l'on peut facilement préparer et étudier au four électrique, se divisent en carbures non décomposables par l'eau (carbures de fer, de chrome, de molybdène, de tungstène, de vanadium, de zirconium, de titane) et en carbures décomposables par l'eau froide (carbures de calcium, de lithium, de strontium, de baryum, de cérium, de lanthane, d'aluminium, de manganèse, d'uranium, etc.). Ces carbures métalliques peuvent être préparés au four électrique de trois manières différentes : 1° par la réduction de certains oxydes par un excès de charbon ; 2° par l'action directe du carbone des métaux ; 3° par la réaction du carbure de calcium sur les oxydes et autres composés métalliques.

Le *carbure de calcium*, en raison de la grande importance industrielle qu'il a prise, a été l'objet d'une description spéciale (§ 659).

Le *carbure de fer* (CFe^2 ; 93,50 fer et 6,50 carbone) s'obtient en chauffant au four électrique du fer dans un creuset de charbon, qui fournit lui-même le carbone, avec un courant de 1.200 ampères sous 60 volts.

Le *carbure de chrome* (C^2Cr^3 ; 86 chrome, 13,25 carbone) est produit par le chauffage dans un four électrique de chrome métallique, en présence d'un excès de carbone et avec un courant de 350 ampères sous 70 volts. On peut également l'obtenir en faisant agir le carbure de calcium sur le sesquioxyde de chrome au moyen d'un courant de 900 ampères, 45 volts.

Le *carbure de molybdène* (CMo^2 ; 94,22 molybdène et 5,68 carbone) s'obtient à l'aide des mêmes procédés que le carbure de chrome.

Les *carbures de tungstène* (CTu et CTu^2) se forment, pour le premier (CTu), en chauffant au four électrique un mélange d'acide tungstique, de fer et de charbon, et, pour le second (CTu^2), en réduisant l'acide tungstique par le carbure de calcium.

Le *carbure de vanadium* (CVa ; 81,26 vanadium et 18,39 carbone) exige pour son obtention un courant de 900 ampères, 50 volts.

Les *carbures de zirconium* (C^2Zr et CZr) s'obtiennent, le premier, à l'aide d'un courant de 35 ampères sous 70 volts en opérant au milieu de l'arc, et le second, avec 1.000 ampères sous 50 volts, et il est formé en dehors de l'arc.

Le *carbure de titane* (CTi ; 82,05 titane, 19,08 carbone) se prépare en chauffant au four électrique soit le métal lui-même en présence du charbon, soit en faisant réagir le carbure de calcium sur l'acide titanique avec un courant de 900 ampères, 45 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le *carbure de lithium* (C^2Li^2), qui est un réducteur des plus énergiques, s'obtient en chauffant au four un mélange de charbon et de carbonate de lithine, mais sa préparation est assez délicate.

Le *carbure de strontium* (C^2Sr) est réalisé à l'aide d'un mélange de strontiane (120 grammes) et de charbon de sucre (30 grammes) exposé à un courant de 350 ampères sous 70 volts agissant dans le four électrique.

Le *carbure de baryum* (C^2Ba) se prépare comme le carbure qui précède (50 grammes de baryte anhydre et 30 grammes de charbon de sucre).

Le *carbure de cérium* (C^2Ce) s'obtient en mélangeant directement du bioxyde de cérium pur (CeO^2) avec du charbon de sucre :

$$CeO^2 + 4C = C^2Ce + 2CO,$$

et en opérant la réduction au four à une température relativement basse.

Le *carbure de lanthane* (C^2La) provient d'un mélange de 100 parties d'oxyde de lanthane et 80 de charbon de sucre, traité au four sous un courant de 350 ampères et 50 volts.

Le *carbure d'aluminium* (C^3Al) s'obtient par l'union directe du carbone et de l'aluminium dans le four électrique et à l'aide d'un courant de 300 ampères sous 65 volts. On peut l'avoir aussi en décomposant l'alumine par le carbure de calcium au four électrique.

Le *carbure de silicium* est obtenu par un mélange de graphite et de quartz traité au four électrique. Ce produit trouve, depuis quelque temps, un accueil de plus en plus favorable dans la fabrication de l'acier et de la fonte, où on le substitue au ferro-silicium, en raison de divers inconvénients que ce dernier présente, dont le principal est qu'il abaisse la température du four juste au moment où elle est nécessaire pour la bonne fusion de l'acier.

Le *carbure de manganèse* (CMn^3) provient d'un mélange d'oxyde de manganèse (200 grammes) et de charbon de sucre (50 grammes) traité au four électrique sous un courant de 900 ampères sous 50 volts, soit par réduction, soit par l'action du carbure de calcium sur l'oxyde salin pur (Mn^3O^4).

Le *carbure d'uranium* (C^3Ur^2) se révèle en chauffant au four un mélange d'oxyde vert d'uranium (500 grammes) et de charbon de sucre (60 grammes).

Enfin les *carbures doubles* de fer et de tungstène, de fer et de chrome, de fer et de manganèse, qui présentent un certain intérêt, ont pu être préparés au moyen du four électrique.

692. Préparation de métaux divers. — Le zirconium, le thorium, le niobium, le titane, le tantale, le molybdène, le tungstène, l'uranium,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le chrome, le vanadium et ses alliages ont pu être obtenus au four électrique. La plupart de ces préparations sont dues à Moissan.

On fabrique le ferro-titane par réduction au four électrique de l'ilménite, minerai que l'on rencontre en Bosnie. On emploie également des minerais titanifères très riches, réduits au four électrique en présence d'une proportion modérée de carbone. On obtient ainsi des fontes très pures qui laissent une scorie qui peut renfermer jusqu'à 30 0/0 d'acide titanique.

Dans le *procédé Becket*, le silicium est employé comme réducteur. Dans le cas de production par l'oxyde, il est préférable d'employer concurremment le silicium et le carbone et le mieux sous forme de siliciure.

Certains corps, qui n'ont pas un intérêt primordial, en tant que produit industriel, ont été aussi fixés par le four électrique ; tels sont : les phosphorures, les séléniures, les arséniures, les azotures, les borures de nickel, de cobalt, de carbone, de fer, de silicium, de strontium, de baryum, etc., à l'obtention desquels MM. Moissan, Williams, Lebeau, Maronneau, Jaboin, Gin et Leleux ont attaché leurs noms.

693. Épilogue. — Les forces motrices hydrauliques, mères de l'électricité appliquée aux transports à grande distance, à l'électrochimie et à l'électrométallurgie, datent à peine de trente ans, périodes d'essais intéressants et instructifs ; mais aujourd'hui on peut dire que tout le monde suit avec intérêt cette transformation industrielle par l'emploi de l'inépuisable houille blanche.

Au siècle dernier, les entreprises industrielles gravitaient autour des mines de charbon ; dans le siècle présent, le transport de la force, les nombreuses et importantes fabrications rendues possibles par les progrès de l'électrochimie et de l'électrothermie, en rénovant la chimie et tant de grandes industries, ont déjà modifié d'une façon profonde la carte industrielle du monde.

Les régions riches en chutes d'eau, à mesure qu'elles se débarrasseront du tribut qu'elles doivent à la houille noire, et davantage maîtresses de leurs forces motrices, deviendront, par les transformations économiques qu'elles apporteront dans notre état social, le plus puissant facteur de l'accroissement du bien-être et des jouissances de la vie matérielle, aujourd'hui l'idée dominante de l'humanité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXXIV

LÉGISLATION ET RÉGLEMENTATION

I. — LÉGISLATION ET RÉGLEMENTATION FRANÇAISES CONCERNANT LES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

INDEX

1906. — Loi du 15 juin sur les distributions d'énergie électrique.
1907. — Arrêté réglementaire du 15 janvier concernant les permissions de grande voirie.
— Instruction ministérielle du 1er février concernantl'établissement pour la traversée des lignes de chemins de fer des conducteurs d'énergie électrique.
— Règlement d'administration publique du 11 juillet concernant la protection des travailleurs qui mettent en œuvre des courants électriques. Ce Règlement a été abrogé par celui du 1er octobre 1913 pour la métropole seulement.
— Décret du 17 octobre portant règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 (Contrôle des distributions. — Redevances pour l'occupation du domaine public).
— Décret du 17 octobre portant fixation des redevances pour l'occupation du domaine public par les entreprises de distributions d'énergie.
— Circulaire du 17 décembre concernant des demandes de gardes particuliers adressées par les entreprises de distributions d'énergie électrique.
— Arrêté du 27 décembre fixant les conditions de capacité exigées des agents désignés par les municipalités pour le contrôle des distributions d'énergie électrique.
1908. — Instruction du 15 février de la Direction générale de l'Enregistrement des domaines et du timbre.
— Arrêté du 21 mars déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique pour l'application de la loi du 15 juin 1906.
— Arrêté du 30 mars du ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes fixant les frais de contrôle dus à l'État par les entrepreneurs de distributions d'énergie électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1908. — Décret du 3 avril portant règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie électrique.

— Arrêté du 9 avril du Ministre des Travaux publics instituant au Ministère des Travaux publics une commission des distributions d'énergie électrique.

— Circulaire du Ministre du Travail et de la Prévoyance Sociale en date du 12 mai 1908.

— Circulaire ministérielle du 13 mai relative à l'application du décret du 11 juillet 1907 sur la sécurité des travailleurs.

— Décret du 17 mai établissant le cahier des charges-type pour la concession d'une distribution publique d'énergie électrique pour une commune ou un syndicat de communes.

— Circulaire du 21 juillet du ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes relative à l'arrêté du 21 mars 1908, déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique.

— Circulaire du 3 août du ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes relative au règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 et à l'envoi du décret du 3 avril 1908.

— Décret du 25 août établissant le cahier des charges-type pour la concession d'une distribution publique d'énergie électrique par l'État.

— Circulaire du 5 septembre du ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes, relative à la traversée des lignes de chemins de fer pour des canalisations d'énergie électrique et à l'emprunt des voies ferrées par ces canalisations.

— Circulaire du 15 septembre, relative au décret du 17 octobre 1907. Contrôle et redevances.

— Modèle d'arrêté préfectoral portant autorisation d'installer une distribution d'énergie électrique par permission de voirie.

— Modèle d'autorisation pour l'exécution des projets d'une distribution d'énergie électrique.

— Circulaire ministérielle du 18 novembre, relative à l'introduction des demandes pour l'établissement des ouvrages sur les terrains privés, à moins de 10 mètres de distance des lignes télégraphiques et téléphoniques préexistantes.

— État des renseignements à joindre à la demande.

1909. — Circulaire ministérielle du 13 mars relative aux frais de contrôle.

— Circulaire ministérielle du 16 mars relative aux redevances dues pour l'occupation du domaine public.

— Circulaire du 17 mars relative à l'autorisation exceptionnelle d'emprunter les voies ferrées.

— Circulaire du 5 avril donnant des instructions pour l'application du décret du 3 avril 1908.

— Arrêté du 23 avril du ministre des Travaux publics fixant les frais de contrôle dus à l'Etat en vertu de permissions ou de concessions.

— Circulaire du 27 mai recommandant la communication au service des Télégraphes de l'avant-projet des distributions d'énergie obéissant au régime des permissions de voirie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1909. — Arrêté du 25 août du ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes, portant organisation de la commission des distributions d'énergie électrique.

— Arrêté du 25 août du Ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes portant organisation de la Commission des distributions d'énergie électrique et fixant à nouveau ses attributions (Modifié par arrêtés du 3 décembre 1910 et 24 juin 1911).

— Circulaire du 24 juillet relative à l'interprétation des règlements rendus pour l'application de la loi du 15 juin 1906.

— Circulaire du 27 août relative au recouvrement des frais de contrôle.

— Circulaire du 1er septembre relative à l'étalage des arbres (arrêté préfectoral).

— Circulaire du 8 octobre relative à l'organisation du contrôle communal.

— Décret du 14 octobre relatif à l'application à l'Algérie de la loi du 15 juin 1906 et des décrets rendus en application de cette loi.

— Décret du 30 novembre approuvant le cahier des charges-type pour la concession par l'Etat d'une distribution d'énergie électrique aux services publics et le déclarant applicable à l'Algérie.

— Décret du 30 décembre modifiant le décret du 17 octobre 1907, organisant le service du contrôle des distributions d'énergie électrique.

1910. — Décret du 14 janvier portant organisation du Comité permanent d'électricité.

— Arrêté du 21 mars concernant les dispositions techniques générales applicables aux distributions d'énergie électrique (abrogé par arrêté du 21 mars 1911).

— Circulaire du 20 mai accompagnant l'envoi du décret et du cahier des charges-type du 30 novembre 1909.

— Arrêté du 13 août fixant les conditions d'approbation des types de compteurs d'énergie électrique.

— Circulaire du 4 septembre relative au point de départ des redevances pour occupation des dépendances du domaine public.

— Circulaire du 23 septembre du ministre des Travaux publics relative au régime de contrôle applicable aux installations électriques établies sur les dépendances du domaine public de façon temporaire.

— Circulaire du 10 novembre relative à l'organisation du contrôle communal.

1911. — Arrêté du 21 mars déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie électrique. — Circulaire accompagnant ledit arrêté.

— Circulaire du 24 mai du ministre des Travaux publics, des Postes et Télégraphes et Téléphones, relative aux secours à donner aux personnes victimes d'un contact accidentel avec des conducteurs électriques.

— Arrêté du 1er juin du ministre des Travaux publics, des Postes et Télégraphes et Téléphones, fixant l'époque des réunions obligatoires du Comité permanent d'électricité.

— Arrêté du 24 juin du ministre des Travaux publics, des Postes, Télégraphes et Téléphones, modifiant l'arrêté du 25 août 1909 relatif à l'organisation de la Commission des distributions d'énergie électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1911. — Circulaire du 24 septembre relative aux plantations et à l'abattage de arbres sur les routes.

— Décret du 26 septembre créant un emploi d'inspecteur général des services des contrôles des distributions d'énergie électrique.

— Décret du 29 décembre modifiant le décret du 17 octobre 1907 qui organise le service du contrôle des distributions d'énergie électrique.

1912. — Circulaire du 10 janvier du ministre des Travaux publics et des Postes, Télégraphes et Téléphones relative à la traction par courant alternatif monophasé.

— Circulaire du 15 avril du ministre des Travaux publics et des Postes, Télégraphes et Téléphones, relative aux états statistiques à fournir en vertu du décret du 3 avril 1908.

— Circulaire du 25 avril du ministre des Travaux publics concernant l'installation de canalisations sur les façades ou à l'intérieur des locaux scolaires.

— Circulaire du 1er juillet visant la rédaction des polices d'abonnement pour les concessions par l'État.

— Décret du 13 août modifiant celui du 11 juillet 1907 sur la sécurité des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.

— Décret des 6 et 7 septembre modifiant celui du 17 octobre 1907 portant organisation du contrôle des distributions d'énergie électrique et fixation des redevances pour l'occupation du domaine public.

— Circulaire du ministre des Travaux publics, des Postes, Télégraphes et Téléphones, relative à l'établissement, par permission de voirie, de canalisations et ouvrages de distribution ou de transport d'énergie électrique.

1913. — Circulaire du 20 mars du ministre des Travaux publics relative à la notification annuelle du chiffre devant servir de base pour la détermination du prix de vente du kilowatt-heure.

— Circulaire du 7 mai du ministre des Travaux publics relative aux renseignements à fournir à l'administration des Domaines (Redevances. (Décret du 17 octobre 1907).

— Circulaire du 1er juin du ministre des Travaux publics concernant la rédaction des polices d'abonnement pour les concessions communales.

— Décret du 10 juillet portant règlement d'administration publique pour l'exécution des dispositions du livre II du Code du travail et de la prévoyance sociale (loi du 26 novembre 1912), en ce qui concerne les mesures générales de protection et de salubrité applicables à tous les établissements assujettis.

— Circulaire du 26 juillet relative à la protection des paysages et de la beauté des sites.

— Décret du 1er octobre portant règlement d'administration publique pour l'exécution des dispositions du livre II du code du travail et de la prévoyance sociale (titre II, hygiène et sécurité des travailleurs), en ce qui concerne la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.

— Arrêté du 9 octobre fixant les termes de l'instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1913. — Circulaire du 10 novembre du ministre des Travaux publics, concernant l'interprétation de l'article 33 du décret du 3 avril 1908.

1914. — Circulaire du 20 janvier du ministre des Travaux publics, relative à la notification annuelle du chiffre devant servir de base pour la détermination du prix de vente du kilowatt-heure.

— Décret du 9 mars portant application à l'Algérie des décrets des 6 et 7 septembre 1912 (contrôle, redevances).

Lois et règlements intéressant indirectement les titulaires de distributions d'énergie électrique.

Loi du 21 mai 1836. — Sur les chemins vicinaux.
Loi du 10 octobre 1839. — Sur les plantations de haies, élagage.
Loi du 3 mai 1841. — Sur l'expropriation.
Règlement du 6 décembre 1870. — Sur les chemins ruraux.
Règlement du 10 août 1870. — Sur les chemins vicinaux.
Loi du 21 août 1881. — Sur les chemins ruraux et sentiers d'exploitation.
Circulaire des 27 août et 23 novembre 1881. — id id
Loi du 12 juin 1893. — Sur l'hygiène et la sécurité des travailleurs.
Loi du 9 avril 1908. — Sur les assurances industrielles.
Loi du 15 juin 1907. — Sur les permissions de voirie.

694. Résumé de la loi sur les distributions d'énergie électrique (du 15 juin 1906).

TITRE Ier. — Classification des distributions d'énergie électrique.

TITRE II. — Des ouvrages de transport et de distribution d'énergie électrique établis exclusivement sur des terrains privés sous le régime des autorisations.

TITRE III. — Des ouvrages de transport et de distribution d'énergie électrique établis sous le régime des permissions de voirie.

TITRE IV. — Régime des concessions simples sans déclaration d'utilité publique.

TITRE V. — Régime des concessions déclarées d'utilité publique.

TITRE VI. — Conditions communes à l'établissement et à l'exploitation des distributions sous le régime des permissions de voirie ou des concessions.

TITRE VII. — Dispositions diverses.

Les *articles* 1 à 3 ont trait à la classification des distributions d'énergie électrique. Toute distribution n'empruntant en aucun point de son parcours les voies publiques peut être établie et exploitée sans autorisation ni déclaration. Dans les cas où la distribution emprunte les voies publiques, le permissionnaire doit obtenir une autorisation de voirie sans durée déterminée, ou une concession avec cahier des charges et tarif maximum, avec ou sans déclaration d'utilité publique.

La concession peut concerner plusieurs communes pour la même demande.

L'*article* 4 spécifie que les autorisations pour les ouvrages établis sur les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

terrains privés sont délivrées par le préfet et que les installations ne doivent apporter aucun trouble dans les lignes télégraphiques et téléphoniques. L'*article* 5, qui vise les ouvrages à installer moyennant permission de voirie, dit que les autorisations nécessaires à cet effet sont délivrées par le préfet ou le maire, suivant que la voie empruntée rentre dans les attributions de l'un ou de l'autre. Il peut être accordé sur les mêmes voies des permissions aux concessions concurrentes.

Les *articles* 6 à 10 définissent les caractères des concessions simples, c'est-à-dire sans déclaration d'utilité publique.

Elles sont données, après enquête, soit par la commune ou par un syndicat de communes, soit par l'État, conformément à un cahier des charges.

La concession ne fait pas obstacle à l'accord d'autres concessions concurrentes, sous la réserve que celles-ci ne peuvent avoir de conditions plus avantageuses. Les communes sont autorisées à donner le monopole pour l'éclairage public et privé seulement. La concession confère à l'entrepreneur le droit d'exécuter sur les voies publiques et leurs dépendances tous travaux nécessaires à l'établissement et à l'entretien des ouvrages d'installation.

Les *articles* 11 et 12 visent le régime de la concession déclarée d'utilité publique, laquelle est prononcée, après enquête, par un décret délibéré en Conseil d'État, sur le rapport du ministre des Travaux publics et de l'Intérieur, après avis du ministre du Commerce, de l'Industrie, des Postes et Télégraphes et du ministre de l'Agriculture. Quand il y a lieu à expropriation, elle se fait conformément à la loi du 3 mai 1841, aux frais du concessionnaire. Nonobstant certaines réserves, la déclaration d'utilité publique confère le droit d'établir à demeure des supports et ancrages sur les murs, façades, toits des maisons donnant sur la voie publique, de faire passer les conducteurs au-dessus des propriétés privées, de pratiquer des tranchées pour la pose des conducteurs souterrains dans des terrains privés non bâtis, enfin d'élaguer les arbres dont les branches se trouvent à proximité des conducteurs aériens. Les indemnités dues pour servitudes d'appui, de passage et de débranchage sont réglées en premier ressort par le juge de paix.

Les *articles* 13 à 19 spécifient les conditions communes à l'établissement et à l'exploitation des distributions sous le régime des permissions de voirie ou des concessions. Elles embrassent l'examen des projets, les essais pour la mise en service des installations, le contrôle de la construction et de l'exploitation, les règlements d'administration publique concernant les articles 10,11, 12, et fixant principalement les mesures relatives à la police et à la sécurité de l'exploitation, aux tarifs des redevances dues à l'État, aux départements et aux communes, en raison de l'occupation du domaine public.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les *articles* 20 à 22 visent les dispositions diverses suivantes : art. 20 : création d'un Comité d'électricité permanent pour avis dans les cas prévus par la loi ; — art. 21 : extension du bénéfice des servitudes d'appui, de passage et de branchage à l'État, à un département, à une commune ou à une association syndicale ayant obtenu une déclaration d'utilité publique même au cas où l'énergie serait fournie aux conducteurs par une usine privée et que le transport d'énergie servirait à des usages autres que le service public ou le service de l'association syndicale ; — art. 22 : compétence du conseil de préfecture, sauf recours au Conseil d'État, pour juger les contestations et réclamations relatives à l'application des mesures prises en vue de la marche de tout service public.

Les *articles* 23, 24 et 25 fixent les pénalités pour toute contravention aux arrêtés d'autorisation, aux clauses de la permission de voirie et du cahier des charges de la concession, aux dispositions édictées dans l'intérêt de la sécurité des personnes.

L'*article* 26 maintient dans leurs forme et teneur les concessions et permissions accordées par des actes antérieurs à la présente loi. Enfin, l'*article* 27 abroge la loi du 25 juin 1895 et toutes dispositions contraires à la présente loi. (Voir p. 3301 : *Nouvelle loi sur les distributions d'énergie.*)

695. Modèle d'arrêté préfectoral portant autorisation d'installer une distribution d'énergie électrique par permission de voirie :

Le préfet du département d...

Vu la loi du 5 avril 1884 sur l'organisation municipale ;

Vu la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie ;

Vu le décret du 17 octobre 1907 sur l'organisation du contrôle des distributions d'énergie électrique ;

Vu le décret du 17 octobre 1907 portant fixation des redevances dues pour l'occupation du domaine public ;

Vu le décret du 3 avril 1908 portant règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 ;

Vu les arrêtés interministériels des 3 août 1878, 30 octobre 1895 et 22 septembre 1906 concernant les occupations temporaires du domaine public ;

Vu l'arrêté réglementaire du 15 janvier 1907 concernant les permissions de grande voirie ;

Vu l'arrêté technique du ministre des Travaux publics, des Postes et Télégraphes du... [1] ;

Vu l'arrêté réglementaire du... relatif à la voirie vicinale ;

Vu la demande présentée le... par M..., demeurant à... ;

Vu l'avant-projet joint à la demande ;

---

[1] Cet arrêté porte actuellement la date du 21 mars 1908. Mais, comme ses prescriptions sont soumises à une revision annuelle, il y aura lieu, dans chaque cas, d'inscrire la date du dernier arrêté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Vu l'avis des ingénieurs et agents voyers préposés à l'administration du domaine public à occuper (1) ;

Vu l... avis d... conseil... municipa... de... commune de ...(2) :

Vu l.. avis d... maire... ;

Vu les observations présentées par M..., concessionnaire d... distribution publique d'énergie dans l... commune d...(3);

Sur le rapport de l'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique ;

Arrête :

ARTICLE PREMIER. — M... autorisé... à établir dans l... commune d... des canalisations et ouvrages de distribution d'énergie électrique sur (5)... sous... en vue de (4) ... et à procéder aux travaux nécessités par l'entretien de ces canalisations et ouvrages, à charge par... de se conformer aux conditions de la présente permission, aux règlements de voirie et aux règlements ou arrêtés édictés en exécution de la loi du 15 juin 1906 (6).

ART. 2. — Les canalisations souterraines seront placées directement dans le sol. Toutefois, elles pourront, sur la demande du permissionnaire, être placées dans des galeries accessibles et elles devront l'être lorsque les services de voirie l'exigeront. Sauf aux traversées des chaussées, elles seront toujours sous les trottoirs, à moins d'une autorisation donnée par l'ingénieur en chef du contrôle.

A la traversée des chaussées fondées sur béton et des voies de tramways, les dispositions nécessaires seront prises pour que le remplacement des canalisations soit possible sans ouverture de tranchée.

Les canalisations aériennes (7)...

ART. 3. — Aucune extension ou modification des canalisations et ouvrages mentionnés dans la demande ne pourra être entreprise sans avoir fait l'objet d'une permission nouvelle.

---

(1) A insérer seulement lorsque le domaine public à occuper n'est pas placé dans les distributions de l'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique.

(2) A insérer lorsque la distribution a pour objet l'éclairage.

(3) A insérer lorsqu'il y a déjà un ou plusieurs concessionnaires de distribution d'énergie électrique dans la ou les communes où doivent être installés les ouvrages de la distribution projetée.

(4) Indiquer les voies publiques ou autres dépendances du domaine public à occuper.

(5) Indiquer la destination de la distribution.

(6) Par une circulaire en date du 3 mai 1910, le ministre des Travaux publics apporte la modification suivante à l'art. 1er, qui devra être libellé comme suit :

« M. autorisé à établir dans l commune d des canali-
« sations et ouvrages de distribution d'énergie électrique { sur / sous
« en vue de et à présider aux travaux nécessités par l'entretien de ces
« canalisations et ouvrages, à charge par de se conformer aux conditions
« de la présente autorisation, aux règlements de voirie et aux règlements ou arrêtés
« édictés en exécution de la loi du 15 juin 1906, notamment aux deux décrets du
« 17 octobre 1907, relatifs au payement des redevances pour occupation du domaine
« public et à des frais de contrôle. »

Il y aura lieu, en conséquence, d'ajouter aux indications inscrites à la suite du modèle d'arrêté un extrait du décret relatif aux frais de contrôle (art. 9 à 13, ce dernier art. 13 modifié conformément au décret du 30 décembre 1909).

(7) Le préfet peut interdire les canalisations aériennes. Lorsqu'il les autorise, il doit indiquer si les canalisations peuvent être aériennes dans toute l'étendue de la distribution ou sinon dans quelles parties elles ne peuvent l'être.

L'ingénieur en chef, en autorisant l'exécution des projets de canalisation, détermine les conditions auxquelles est soumis leur établissement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Toutefois les branchements nouveaux ayant pour unique objet de relier un immeuble aux canalisations autorisées par la présente permission pourront être exécutés sans permission spéciale et sans autorisation préalable dans les conditions fixées par l'article 35 du décret du 3 avril 1908 (1).

ART. 4. — Les travaux nécessaires pour remettre en état la chaussée et les trottoirs à l'emplacement des tranchées ou des autres ouvrages qui auraient été démolis, ainsi que les travaux d'entretien pendant un an des parties rétablies, seront effectués par les soins et aux frais d... permissionnaire... Il... se conformer... pour l'exécution à toutes les règles de l'art et suppléer... aux déchets des vieux matériaux par des matériaux neufs de bonne qualité.

Toute négligence apportée à l'entretien pourra donner lieu à un procès-verbal qui sera déféré au Conseil de préfecture.

S'il y a urgence, il sera procédé d'office et aux frais d... permissionnaire..., après mise en demeure, à l'exécution des travaux propres à faire cesser le dommage. Le remboursement des dépenses ainsi effectuées sera poursuivi dans la forme prescrite par le décret du 12 juillet 1893 au titre des avances pour travaux d'intérêt public à la charge des tiers (2).

ART. 4 *bis* (variante). — Les travaux nécessaires pour remettre en état la chaussée et les trottoirs sur l'emplacement des tranchées, les autres ouvrages qui auraient été démolis et les travaux d'entretien pendant un an des parties rétablies seront effectués par l'Administration aux frais d... permissionnaire... dans les conditions ci-après :

Immédiatement après l'achèvement du travail de pose ou de réparation des conduites, un métré des parties à réparer sera notifié par les agents du service intéressé au... permissionnaire... ou à... ayant-charge pour... présenter... observation... dans un délai de 5 jours à partir de la notification. Passé ce délai, le métré sera considéré comme accepté et servira de base au règlement de compte.

Les dépenses seront calculées, en appliquant aux quantités portées sur le métré les prix forfaitaires suivants, qui comprennent les frais de surveillance :

1° Repose de 1 mètre courant de bordure de trottoir...

2° Réfection de 1 mètre carré d'empierrement...

3° Réfection de 1 mètre carré de pavage sur sable (la surface mesurée avec une demi-largeur de pavé en plus de chaque côté pour le raccordement)...

4° Réfection de 1 mètre carré de pavage sur fondation de béton (la surface mesurée comme ci-dessus)...

5° Réfection de 1 mètre carré de pavage en bois (la surface mesurée comme ci-dessus)...

6° Réfection de 1 mètre carré de surface sablée...

7° Réfection de 1 mètre carré de bitume...

8° Réfection de 1 mètre carré de trottoir pavé hourdé de mortier...

Le remboursement sera poursuivi dans la forme prescrite par le décret du 12 juillet 1893 au titre des avances pour travaux d'intérêt public à la charge des tiers.

---

(1) Cet alinéa est facultatif ; sauf exceptions justifiées par les circonstances locales, il convient de l'insérer dans les permissions autorisant l'établissement d'ouvrages de transport ou d'ouvrages particuliers et de les supprimer dans les permissions autorisant des ouvrages de distribution proprement dite, de manière à ne pas entraver l'établissement ultérieur des concessions municipales ou d'État.

(2) *Voir* le renvoi au n° 1 de la page suivante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les frais de recouvrement qui sont fixés à 3 pour 100 des dépenses à titre de remise au comptable chargé de la perception, plus une somme de 0 fr. 05 pour frais d'avertissement, seront ajoutés à chaque article du rôle et seront à la charge d... permissionnaire.

Le tarif inséré au présent article pourra être revisé tous les cinq ans (1).

ART. 4 *ter* (variante). — Les travaux nécessaires pour remettre en état la chaussée, les trottoirs et autres ouvrages qui auraient été démolis ou endommagés pendant l'établissement ou l'exploitation de la distribution, ainsi que les travaux d'entretien pendant un an des parties rétablies, seront effectués par l'Administration aux frais d... permissionnaire... dans les conditions déterminées par l'arrêté préfectoral du... (1)

ART. 5. — L'autorisation à laquelle s'applique le présent arrêté est accordée à titre précaire: elle est révocable à la première réquisition de l'Administration dans les conditions prévues par le décret du 3 avril 1908 et par l'arrêté interministériel du 3 août 1878.

L'autorisation sera considérée comme périmée s'il n'en a pas été fait usage dans le délai d'un an à dater de sa délivrance.

ART. 6. — En cas de révocation de l'autorisation ou en cas de cessation de l'occupation du domaine public, l... permissionnaire... ser... tenu... d'enlever, à... frais et sans indemnité, toutes celles de... installations qui se trouvent sur ou sous la voie publique, et de rétablir les lieux dans leur état primitif. Toutefois, il... pourr... abandonner les canalisations souterraines, à condition qu'elles n'apportent aucune gêne pour les services publics.

Faute par le... permissionnaire... de satisfaire aux obligations du présent article, il sera procédé d'office et à... frais, à l'enlèvement des installations dans les conditions prévues par l'article 4 ci-dessus.

ART. 7. — L'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique et le directeur des Domaines sont chargés, chacun en ce qui le concerne, d'assurer l'exécution du présent arrêté, dont ampliation leur sera adressée ainsi qu'à...

Fait à , le 19 .

Le Préfet.

Extrait de l'arrêté réglementaire du 15 janvier 1907 concernant les permissions de grande voirie. — ART. 37. — *Réparation des dommages causés à la route.* — Aussitôt après l'achèvement de leurs travaux, les permissionnaires sont tenus d'enlever tous les décombres, terres, dépôts de matériaux, gravois et immondices, de réparer immédiatement tous les dommages qui auraient pu être causés à la route ou à ses dépendances, et de rétablir dans leur premier état les fossés, talus, accotements, chaussées ou trottoirs qui auraient été endommagés.

ART. 38. — *Entretien en bon état des ouvrages situés sur le sol de la route et de ses dépendances.* — Les ouvrages établis sur le sol de la voie publique et qui intéressent la viabilité, notamment ceux mentionnés dans les articles 6, 24

(1) L'Administration peut soit laisser au permissionnaire le soin de remettre en état le domaine public, soit se réserver la faculté d'exécuter les travaux nécessaires à cet effet. L'article 4 *ter* ne peut être appliqué que s'il existe dans le département un arrêté réglementaire fixant les conditions dans lesquelles doit s'effectuer la remise en état des voies publiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et 26 (1) du présent règlement, seront toujours entretenus en bon état et maintenus conformes aux conditions de l'autorisation, faute de quoi cette autorisation serait révoquée, indépendamment des mesures qui pourraient être prises contre le permissionnaire, pour répression de délit de grande voirie et pour la suppression de ces ouvrages.

ART. 39. — *Suppression des ouvrages sans indemnité.* — Les permissions de pure tolérance concernant les ouvrages mentionnés à l'article précédent peuvent toujours être modifiées ou révoquées, en tout ou en partie, lorsque l'Administration le juge utile à l'intérêt public, et le permissionnaire est tenu de se conformer à ce qui lui est prescrit à ce sujet, sans qu'il puisse s'en prévaloir pour réclamer aucune indemnité.

ART. 40. — *Réserve des droits des tiers.* — Les autorisations de grande voirie ne sont données que sous toutes réserves des droits des tiers, des règlements faits par l'autorité municipale dans les limites de ses attributions, des servitudes militaires et de celles résultant du Code forestier.

696. Décret du 17 octobre 1907 portant règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 15 juin 1906. — Contrôle et redevances (1).

I. *Distributions établies en vertu de concessions accordées par l'Etat et distributions empruntant en tout ou en partie la grande voirie en vertu de permissions.* — Les articles 1 à 4 visent le contrôle des distributions énumérées ci-dessus, qui est exercé dans chaque département par un ingénieur en chef, assisté d'agents dont le nombre et la répartition sont arrêtés par le ministre des Travaux publics. L'inspection des services de contrôle est assurée par des inspecteurs généraux. Tous ces fonctionnaires sont pris dans le corps des ponts et chausseés, des mines et télégraphes, sous réserve des dispositions de l'article 7.

II. *Distributions établies en vertu de concessions données par les communes et les syndicats de communes et distributions empruntant exclusive-*

---

(1) ART. 6. — *Aqueducs sur les fossés de la route.* — L'écoulement des eaux ne peut être intercepté dans les fossés de la route. Les dispositions et dimensions des aqueducs destinés à rétablir la communication entre la route et les propriétés riveraines sont fixées par l'arrêté qui autorise ces ouvrages ; ils doivent toujours être établis de manière à ne pas déformer le profil normal de la route.

ART. 24. — *Conditions d'établissement des trottoirs.* — La nature et les dimensions des matériaux à employer dans la construction des trottoirs seront fixées par l'arrêté spécial qui autorisera ces ouvrages. Les bordures ainsi que le dessus du trottoir seront établis suivant les points de hauteur et les alignements fixés au pétitionnaire.

Les extrémités du trottoir devront se raccorder avec les trottoirs voisins ou avec le revers, de manière à ne former aucune saillie.

ART. 26. — *Ecoulement des eaux. Etablissement d'aqueducs et de tuyaux.* — Nul ne peut, sans autorisation, rejeter sur la voie publique des eaux insalubres provenant des propriétés riveraines.

Les eaux pluviales, lorsqu'elles auront été recueillies dans une gouttière, ainsi que celles provenant de l'intérieur des maisons, seront conduites jusqu'au sol par des tuyaux de descente, puis jusqu'au caniveau de la route, soit par une gargouille, s'il existe un trottoir ou dès qu'il en existera un, soit par un ruisseau pavé, s'il n'existe qu'un revers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment les voies vicinales ou urbaines en vertu de permissions. — Le contrôle de ces distributions est exercé par des agents désignés par les municipalités, remplissant les conditions de capacité fixées par le ministre des Travaux publics. Ces agents sont soumis à la surveillance de l'ingénieur en chef du contrôle (art. 5 à 7) (1).

III. *Distributions desservant les chemins de fer, tramways et autres entreprises soumises à un contrôle technique de l'Administration.* — Ces distributions ont leur contrôle assuré par le service chargé de ce contrôle pour les canalisations et installations électriques intérieures de ces voies de transport ou établissements, et par le service de contrôle des distributions d'énergie électrique pour les canalisations extérieures alimentant ces installations (art. 8).

Frais de contrôle. — Le ministre des Travaux publics arrête chaque année les bases d'après lesquelles sont fixés à forfait les frais de contrôle dus à l'État par les entrepreneurs de distributions établies en vertu de permissions ou de concessions.

Ces frais, proportionnels à la longueur des lignes, ne peuvent dépasser 10 francs par kilomètre de ligne et par an pour les distributions soumises au contrôle exclusif de l'État, et 5 francs pour celles soumises au contrôle des municipalités sous l'autorité du ministre des Travaux publics (art. 9).

Les branchements desservant les immeubles ainsi que les canalisations établies sur des terrains particuliers n'entrent pas dans le calcul des frais de contrôle. Les canalisations aériennes installées sur le domaine public et empruntant les mêmes supports ou poteaux, et les canalisations souterraines dont les conducteurs sont juxtaposés, sont considérées comme formant une seule ligne, dont la longueur est égale à celle de la voie canalisée. Pour les canalisations établies en partie sur des voies publiques et en partie sur des terrains particuliers, chaque section de canalisation établie sur la voie publique est considérée comme ayant 1 kilomètre au moins (2), sans toutefois que la longueur totale servant ainsi de base à la fixation des frais de contrôle puisse être supérieure à la longueur réelle des canalisations (3). — Les frais de contrôle sont calculés par trimestre, et chaque permission ou concession donne lieu à

---

(1) Le décret du 6 septembre 1912 expose que les agents des municipalités peuvent être chargés d'assister l'ingénieur en chef pour le contrôle des distributions. Le ministre des Travaux publics peut faire exercer ce contrôle par les agents de l'État. Et si une commune ou un syndicat de communes n'assure pas le contrôle des distributions d'énergie électrique dans les cas où il lui appartient d'y pourvoir, le ministre des Travaux publics arrête les conditions dans lesquelles ce contrôle sera exercé par les agents de l'État.

(2) Le même décret dit : lorsque celle-ci excède un demi-kilomètre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

perception de frais de contrôle distincts pour les lignes qu'elle autorise (art 10) (1).

Les frais de contrôle dus aux municipalités sont déterminés par le Conseil municipal ; ils ne peuvent dépasser 5 francs par kilomètre de ligne et par an (art. 11) (2).

Les frais de contrôle dus à l'État sont versés annuellement au Trésor ; ceux dus aux communes sont versés à la Caisse municipale. A défaut de paiement, par l'entrepreneur, le recouvrement est poursuivi en conformité des règles générales de la comptabilité publique de l'État ou de la comptabilité municipale (art. 12) (3).

Le tarif maximum des frais de contrôle fixés au présent décret sera revisé au plus tard le 1er janvier 1910 (4). Après la première revision, le tarif pourra être revisé tous les dix ans (art. 13).

Redevances. — Les redevances pour l'occupation des voies faisant partie du domaine public national, départemental ou communal par les ouvrages de transports d'énergie électrique *alimentant les services publics* assurés ou concédés par l'État, les départements et les communes, sont perçues conformément au tableau ci-après.

SITUATION DES EMPLACEMENTS du DOMAINE PUBLIC	Taux de la redevance annuelle par mètre de la ligne aérienne ou souterraine.	Redevance annuelle fixe par chaque support (poteau ou pylône).	Taux de la Redevance annuelle par mètre carré pour les postes de transformateurs et autres établissements analogues avec minimum d'un franc par poste.
	fr. c.	fr. c.	fr. c.
Paris	0,10	10 »	25 »
Communes de 100.000 habitants et au-dessus	0,02	2 »	5 »
Communes de 20.000 à 100.000 habitants	0,01	0,50	2,50
Communes ayant moins de 20.000 habitants	0,005	0,25	1 »

(1) Le même décret dit : indépendamment des frais de contrôle de l'exploitation, il est dû, pour le contrôle de la construction une somme fixée à forfait et égale au montant des frais de contrôle de l'exploitation pour une année entière.

(2) Le même décret ajoute : Lorsque le contrôle municipal est exercé par les agents du contrôle de l'État, il est perçu au profit de l'État, tant pour ce contrôle que pour la surveillance exercée par l'administration des travaux publics sur les distributions visées au chapitre II, des frais de contrôle calculés sur les mêmes bases que pour les distributions faisant l'objet du chapitre premier.

(3) Le décret ci-précité ajoute : pour les lignes nouvelles le premier état comprend les frais de contrôle de la construction et mentionne la date à partir de laquelle sont dus les frais de contrôle de l'exploitation.

(4) Au lieu de 1er janvier 1910, le même décret dit : 1er janvier 1913.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les redevances pour l'occupation du domaine public par les ouvrages *particuliers* de transport et par les ouvrages de distribution, quel qu'en soit l'objet, sont fixés au double des taux prévus ci-dessus.

Les redevances fixées ci-avant pour l'occupation du domaine public communal peuvent, en cas de distribution concédée, et en vertu d'une stipulation spéciale du cahier des charges, soit être réduites par l'autorité concédante pour tenir compte des avantages particuliers réservés à la commune, soit être remplacées par des redevances proportionnelles aux recettes brutes totales réalisées dans la commune, sans toutefois pouvoir dépasser les maxima fixés par le tarif ci-après.

DÉSIGNATION DES COMMUNES	Distribution de l'énergie pour l'éclairage	Distribution de l'énergie pour tous autres usages
	0/0 des recettes	0/0 des recettes
Paris	10 »	5 »
Communes de plus de 100.000 habitants.	4 »	1,5
Communes de 20.000 à 100.000 habitants.	3 »	1 »
Communes ayant 20.000 habitants	2 »	0,5

Les entreprises de distributions établies en vertu de permissions de voirie peuvent demander l'application de ce dernier tarif, à condition de soumettre leurs recettes à la vérification du service de contrôle.

Les redevances indiquées dans le premier tableau sont calculées par trimestre et perçues annuellement. Chaque permission ou concession donne ouverture à une redevance distincte.

Les canalisations aériennes juxtaposées à des canalisations souterraines ne comptent que pour une seule ligne, et les branchements desservant les immeubles, ainsi que les supports et appuis établis sur des immeubles particuliers n'entrent pas en compte dans le calcul des redevances. Au commencement de chaque trimestre, l'ingénieur en chef du contrôle adresse au directeur des Domaines de chaque département, un relevé soumis préalablement à l'acceptation des entrepreneurs de la distribution.

Les redevances fixées par le présent décret ne seront applicables aux distributions établies en vertu de concessions accordées avant la promulgation de la loi du 15 juin 1906 qu'à l'expiration de ces concessions ; elles seront applicables aux distributions établies en vertu de permissions de voiries antérieures à la loi, dès l'époque où les conditions fiscales de ces permissions seront susceptibles d'être revisées.

Les tarifs inscrits dans les deux tableaux ci-dessus seront revisés au plus tard le 1er janvier 1913. Après la première revision, ils ne pourront

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus l'être que tous les trente ans (1). Ils seront applicables de plein droit à tous les ouvrages existants, sauf stipulations contraires du cahier des charges des distributions concédées en ce qui concerne les redevances dues à l'autorité concédante.

696 *bis*. Arrêté du 30 mars 1908 du ministre des Travaux publics, des Postes et Télégraphes, *fixant les frais de contrôle dus à l'Etat par les entrepreneurs de distributions d'énergie électrique.* — Les frais de contrôle dus à l'État par les entrepreneurs de distributions d'énergie électrique établies en vertu de permissions ou de concessions sont fixés, pour l'année 1908, à 10 francs par kilomètre de ligne pour les distributions soumises au contrôle exclusif de l'État, et à 5 francs par kilomètre de ligne pour les distributions soumises au contrôle des municipalités sous l'autorité du ministre des Travaux publics, des Postes et Télégraphes.

697. Décret du 3 avril 1908 portant règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie électrique.

CHAPITRE PREMIER

Autorisations pour les distributions d'énergie électrique établies exclusivement sur des terrains privés.

FORME ET PRÉSENTATION DE LA DEMANDE EN AUTORISATION.

ARTICLE PREMIER.— Toute demande en autorisation pour les ouvrages de distribution d'énergie électrique à établir exclusivement sur des terrains privés, mais à moins de dix mètres de distance horizontale d'une ligne télégraphique ou téléphonique préexistante, est adressée en double expédition au préfet qui la transmet immédiatement à l'ingénieur en chef du contrôle.

Elle est accompagnée d'un plan indiquant le tracé de la ligne et d'un état de renseignements, conforme au modèle arrêté par le ministre des postes et des télégraphes, après avis du Comité d'électricité.

INSTRUCTION DE LA DEMANDE ET DÉLIVRANCE DE L'AUTORISATION.

ART. 2. — L'ingénieur en chef du contrôle, après avoir constaté que les ouvrages projetés rentrent dans la catégorie prévue par le titre II de la loi du 15 juin 1906, transmet le dossier à l'ingénieur en chef des télégraphes ou à son délégué ; celui-ci formule son avis sur les conditions techniques auxquelles doit satisfaire l'installation en vue d'éviter les troubles dans le fonctionnement des lignes télégraphiques ou téléphoniques préexistantes ; il indique, s'il y a lieu, les travaux à

(1) Le décret du 20 décembre 1911 porte que les tarifs devront être revisés tous les dix ans. Le décret abroge celui du 30 décembre 1909.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exécuter à cet effet, fait signer au demandeur les engagements nécessaires et adresse le dossier au préfet.

Le préfet, en conformité de l'avis de l'Administration des télégraphes, accorde l'autorisation demandée.

CHAPITRE II

Permissions de voirie.

FORME ET PRÉSENTATION DE LA DEMANDE.

ART. 3. — Toute demande de permission de voirie pour une distribution d'énergie électrique ne s'étendant que sur un département est adressée au préfet, qui en donne récépissé et la transmet immédiatement à l'ingénieur en chef du contrôle.

Si la distribution doit s'étendre sur plus d'un département, la demande est adressée au ministre des travaux publics, qui désigne le service chargé de l'instruction, transmet le dossier à ce service et en avise les préfets des départements intéressés et le demandeur.

ART. 4. — La demande indique le lieu où le pétitionnaire élit domicile et où lui seront valablement faites par l'Administration toutes notifications utiles. Elle est accompagnée d'un avant-projet comprenant :

1° Un extrait de carte à l'échelle de 1/80.000e ;

2° Un plan général et une nomenclature des voies publiques à emprunter ;

3° Un mémoire indiquant la destination et l'importance de la distribution, l'emplacement et la nature des ouvrages projetés ;

4° Des dessins donnant les types des installations à établir sur le domaine public.

Le pétitionnaire fournit, sur la demande du service du contrôle, des exemplaires du dossier en nombre suffisant pour l'instruction.

INSTRUCTION DE LA DEMANDE ET DÉLIVRANCE DES PERMISSIONS POUR LES DISTRIBUTIONS QUI EMPRUNTENT DES VOIES DÉPENDANT DE LA GRANDE VOIRIE, DES CHEMINS DE GRANDE COMMUNICATION OU DES CHEMINS D'INTÉRÊT COMMUN.

ART. 5. — Lorsque la distribution doit emprunter en tout ou en partie des voies dépendant de la grande voirie, des chemins vicinaux de grande communication ou des chemins d'intérêt commun, l'ingénieur en chef consulte les ingénieurs et agents voyers préposés à l'administration de ces voies.

Il communique à chacun des maires des communes traversées l'extrait du dossier concernant sa commune. Dans le délai de quinze jours, les maires renvoient à l'ingénieur en chef les pièces communiquées en formulant leurs observations sur les permissions qui sont de la compétence du préfet et en joignant à leur envoi les arrêtés portant délivrance des permissions de voirie pour les voies qui sont de leur compétence ou, à défaut, en indiquant les motifs qui s'opposent à la délivrance de ces permissions.

Si la demande prévoit une distribution d'éclairage, le délai imparti aux maires est porté à un mois pour les communes où doit être distribuée la lumière ; les maires de ces communes provoquent l'avis du conseil municipal et le joignent au dossier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si la demande vise une ou plusieurs communes où existent déjà des concessions de distribution d'énergie, l'ingénieur en chef invite les concessionnaires antérieurs à fournir leurs observations dans le délai de quinze jours.

L'instruction terminée, l'ingénieur en chef transmet, avec son rapport, un exemplaire du dossier au préfet de chaque département.

ART. 6. — Dans le cas où il y a accord entre les services intéressés et où, en cas de distribution d'éclairage, aucun conseil municipal n'a fait d'opposition, le préfet délivre les permissions qui sont de sa compétence en raison de la nature des voies publiques à emprunter et remet au demandeur les permissions délivrées par les maires pour les chemins vicinaux ordinaires, les chemins ruraux et les voies urbaines, ou les délivre lui-même en vertu des pouvoirs qui lui sont conférés par l'article 98 de la loi municipale du 5 avril 1884 et en avise les maires.

ART. 7. — En cas de désaccord entre les services intéressés ou d'opposition d'un conseil municipal à une distribution d'éclairage, le dossier est transmis au ministre des travaux publics qui, après avis du ministre de l'intérieur, renvoie ce dossier au préfet avec ses instructions.

ART. 8. — Dans tous les cas où la distribution projetée doit emprunter, autrement que par une simple traversée, des voies dépendant de la grande voirie et non affectées à la circulation publique, le préfet, avant de statuer, transmet le dossier au ministre des travaux publics qui, après examen, lui renvoie ce dossier avec ses instructions.

ART. 9. — Lorsque la demande vise plusieurs départements, chaque préfet transmet le dossier, avec son avis, au ministre des travaux publics, qui, après examen, lui renvoie ce dossier, en lui faisant connaître dans quelles conditions les permissions de voirie doivent être accordées. S'il y a désaccord entre les services intéressés ou s'il y a opposition d'une commune en cas de distribution d'éclairage, le ministre des travaux publics prend, au préalable, l'avis du ministre de l'intérieur.

INSTRUCTION DE LA DEMANDE DE DÉLIVRANCE DES PERMISSIONS POUR LES DISTRIBUTIONS QUI EMPRUNTENT EXCLUSIVEMENT DES CHEMINS VICINAUX ORDINAIRES, DES CHEMINS RURAUX OU DES VOIES URBAINES.

ART. 10. — Pour les distributions qui empruntent exclusivement des chemins vicinaux ordinaires, des voies rurales ou des voies urbaines, l'ingénieur en chef adresse le dossier au maire de chaque commune avec son avis sommaire.

Les maires des communes où existent déjà une distribution publique concédée invitent le concessionnaire antérieur à fournir ses observations dans un délai maximum de dix jours à l'expiration duquel il est passé outre.

Aussitôt après avoir statué, les maires en avisent l'ingénieur en chef et lui envoient un duplicata des permissions délivrées.

BRANCHEMENTS NOUVEAUX.

ART. 11. — Sauf disposition contraire de la permission initiale, tout branchement nouveau doit faire l'objet d'une permission spéciale.

REVISION ET RÉVOCATION DES PERMISSIONS DE VOIRIE.

ART. 12. — Les permissions de voirie autorisant des distributions d'énergie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrique peuvent être revisées sous les conditions ordinaires des arrêtés réglementaires relatifs à ces permissions.

Elles peuvent être révoquées sous les mêmes conditions et, notamment, si le permissionnaire ne se conforme pas, après mise en demeure, aux obligations qui lui sont imposées soit par sa permission, soit par les lois et règlements. Les permissions sont également révocables si la distribution cesse d'être affectée à la destination qui avait motivé l'autorisation.

CHAPITRE III

Concessions simples, sans déclaration d'utilité publique.

SECTION I

Présentation de la demande et mise à l'enquête.

FORME ET PRÉSENTATION DE LA DEMANDE.

ART. 13. — Toute demande en concession d'une distribution d'énergie électrique est adressée :

Au ministre des Travaux publics si, conformément à l'article 6 de la loi du 15 juin 1906, la concession est de la compétence de l'État et s'étend sur plusieurs départements ;

Au préfet si la concession est de la compétence de l'État et ne s'étend que sur un département ;

Aux maires si la concession est de la compétence d'une commune ou d'un syndicat de communes.

ART. 14. — La demande est accompagnée d'un dossier comprenant :

1° Un extrait de carte à l'échelle de 1/80000e ;

2° Un mémoire descriptif indiquant la destination et l'importance de l'entreprise, les conditions générales et les dispositions principales de la distribution ;

3° Un projet de tarif maximum pour la vente de l'énergie électrique.

MISE A L'ENQUÊTE.

ART. 15. — Si la concession est de la compétence de l'État, le ministre ou le préfet statue sur la mise à l'enquête après instruction faite par le service du contrôle.

Si la concession est de la compétence d'une commune ou d'un syndicat de communes, le maire ou le président du syndicat, après avis sommaire de l'ingénieur en chef du contrôle, soumet le dossier au conseil municipal ou aux conseils municipaux intéressés, qui décident s'il y a lieu de procéder à l'enquête.

Quand l'enquête a été décidée par l'autorité compétente, il y est procédé dans les conditions ci-après.

SECTION II

Enquête, instruction et décision dans le cas de concession à accorder par l'État.

ARRÊTÉ D'ENQUÊTE.

ART. 16. — Un arrêté du préfet de chacun des départements où s'étend la distribution fixe la date de l'ouverture de l'enquête, indique les localités où elle est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ouverte, nomme les membres de la commission d'enquête, en désigne le président et fixe le lieu de ses réunions.

Cet arrêté est affiché dans toutes les communes qui doivent être desservies ou traversées par la distribution d'énergie électrique dont la concession est demandée. Il est justifié de cette formalité par un certificat du maire,

COMPOSITION DE LA COMMISSION D'ENQUÊTE.

ART. 17. — Chaque commission d'enquête se compose de trois membres au moins et de sept au plus, choisis parmi les principaux propriétaires d'immeubles, négociants et industriels de la région.

DURÉE DE L'ENQUÊTE.

ART. 18. — Le projet de la concession, ainsi que les registres destinés à recevoir les observations auxquelles peut donner lieu l'entreprise projetée, reste déposé pendant quinze jours à la mairie de chaque commune desservie ou traversée.

Les pièces et extraits de dossiers sont fournis par le demandeur en concessions et à ses frais, en autant d'exemplaires qu'il y a de communes desservies ou traversées.

RÉUNION DE LA COMMISSION D'ENQUÊTE.

ART. 19. — A l'expiration du délai de quinze jours ci-dessus fixé, la commission d'enquête se réunit sur la convocation du préfet. Elle examine les déclarations consignées aux registres de l'enquête, entend toutes personnes qu'elle juge à propos de consulter et donne son avis motivé, tant sur l'utilité de l'entreprise que sur les diverses questions qui ont été posées par l'Administration ou soulevées au cours de l'enquête.

Ces diverses opérations, dont il est dressé procès-verbal, doivent être terminées dans un délai de huit jours.

Aussitôt que le procès-verbal de la commission d'enquête est clos, et, au plus tard, à l'expiration du délai ci-dessus fixé, le président de la commission adresse ce procès-verbal, avec les registres et les autres pièces de l'enquête, au préfet, qui transmet immédiatement le dossier à l'ingénieur en chef du contrôle.

REMPLACEMENT DE LA COMMISSION D'ENQUÊTE PAR UN COMMISSAIRE ENQUÊTEUR.

ART. 20. — Pour les affaires de moindre importance, le préfet peut désigner, au lieu de la commission d'enquête, un commissaire enquêteur chargé de procéder à l'enquête dans les mêmes formes que la commission.

AVIS DES CONSEILS MUNICIPAUX.

ART. 21. — En même temps qu'il est procédé à l'enquête, le préfet invite les conseillers municipaux des communes intéressées à délibérer sur l'utilité et la convenance de l'entreprise.

Les procès-verbaux de leurs délibérations doivent être adressés à l'ingénieur en chef du contrôle dans le délai d'un mois à dater de la communication du dossier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INSTRUCTION DE LA DEMANDE.

ART. 22. — L'ingénieur en chef du contrôle, sur le vu du dossier de l'enquête, entend les concessionnaires antérieurs, provoque, s'il y a lieu, une conférence entre les services intéressés, invite le demandeur à faire connaître ses obsevations et propositions, dans le cas où des objections ou conditions auraient été formulées, soit au cours de l'enquête, soit pendant l'instruction, et transmet le dossier au préfet de chaque département, avec son rapport, en y joignant l'adhésion du demandeur, ou ses observations en cas de refus, ainsi que les adhésions des divers services intéressés, ou leurs observations en cas de désaccord.

DÉLIVRANCE DE LA CONCESSION.

ART. 23. — Lorsque la concession projetée ne doit s'étendre que dans un département et s'il y a accord entre les divers services et communes interessés, le préfet signe l'acte de concession au nom de l'État.

S'il y a désaccord entre les services ou communes intéressés, le préfet transmet le dossier avec son avis au ministre des Travaux publics. Le ministre, après avoir consulté le Comité d'électricité, renvoie le dossier au préfet avec ses instructions. Le préfet notifie la décision au demandeur et signe l'acte de concession.

Lorsque la concession doit s'étendre sur plusieurs départements, chaque préfet transmet le dossier au ministre des Travaux publics avec son avis. Le ministre consulte le Comité d'électricité, en cas de désaccord entre les services ou les communes intéressés. Il prend l'avis du ministre de l'Intérieur, statue sur les conditions auxquelles la concession peut être accordée, les notifie au demandeur et passe l'acte de concession au nom de l'État.

MODIFICATIONS AU CAHIER DES CHARGES-TYPE.

ART. 24. — Dans tous les cas où l'acte de concession comporte des modifications ou dérogations au cahier des charges-type arrêté en exécution de l'article 6 de la loi du 15 juin 1906, le dossier est transmis par les soins du ministre des travaux publics au Conseil d'État, avec les avis du ministre de l'intérieur, du ministre de l'agriculture et de l'Administration des postes et télégraphes. L'approbation de la concession est prononcée par décret, conformément aux dispositions de l'article 7 de la loi.

SECTION III

Enquête, instruction et décision dans le cas de concession à accorder par une commune ou par un syndicat de communes.

ENQUÊTE.

ART. 25. — Lorsque la concession doit être donnée par une commune ou un syndicat de communes, il est procédé à l'enquête comme il est indiqué au chapitre précédent, sauf les modifications ci-après.

Le préfet nomme toujours un commissaire enquêteur, au lieu de la commission d'enquête prévue à l'article 17, et désigne la commune à la mairie de laquelle le commissaire enquêteur entendra les dépositions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le délai pendant lequel l'enquête reste ouverte dans les conditions prévues à l'article 18 est réduit à huit jours.

Le délai imparti au commissaire enquêteur pour effectuer les opérations prévues à l'article 19 est réduit à trois jours.

Aussitôt que le procès-verbal de l'enquête est clos, et au plus tard à l'expiration du délai de trois jours ci-dessus fixé, le commissaire enquêteur adresse le dossier au préfet, qui le transmet immédiatement à l'ingénieur en chef du contrôle.

INSTRUCTION.

ART. 26. — L'ingénieur en chef provoque, s'il y a lieu, une conférence entre les services intéressés, entend les concessionnaires antérieurs, puis transmet le dossier, avec ses observations ou propositions, au maire ou au président du syndicat.

DÉLIVRANCE DE LA CONCESSION.

ART. 27. — Si une entente s'établit entre la commune ou le syndicat de communes et le demandeur, et si les conditions de l'entente sont conformes à l'avis des services intéressés, le maire ou le président du syndicat passe l'acte de concession et l'adresse à l'ingénieur en chef du contrôle qui, après vérification, le soumet à l'approbation du préfet. Pour les syndicats comprenant des communes situées dans des départements différents, l'acte de concession est soumis à l'approbation du préfet du département auquel appartient la commune, siège de l'association.

S'il y a désaccord entre les services intéressés ou si une entente s'établit entre la commune ou le syndicat de communes et le demandeur, contrairement à l'avis desdits services, le maire ou le président du syndicat transmet le dossier au préfet, qui l'adresse au ministre des travaux publics. Le ministre consulte le Comité d'électricité, prend l'avis du ministre de l'intérieur et renvoie le dossier au préfet avec ses instructions. Le préfet notifie la décision du ministre au maire ou au président du syndicat, qui passe l'acte de concession et l'envoie à l'ingénieur en chef du contrôle pour être soumis, après vérification, à l'approbation du préfet.

MODIFICATIONS AU CAHIER DES CHARGES-TYPE.

ART. 28. — Dans tous les cas où l'acte de concession passé par le maire ou le président du syndicat comporte des modifications ou dérogations au cahier des charges-type, la concession ne devient définitive qu'après avoir été approuvée dans les conditions prévues par l'article 24 ci-dessus.

CHAPITRE IV

Concessions avec déclaration d'utilité publique.

Formalités de l'instruction.

PRÉSENTATION DE LA DEMANDE, ENQUÊTE ET INSTRUCTION.

ART. 29. — Les demandes en concession d'une distribution d'énergie électrique avec déclaration d'utilité publique sont présentées, soumise à l'enquête,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

instruites, et l'acte de concession est passé conformément aux prescriptions du chapitre III du présent règlement. Dans tous les cas, le dossier est adressé au ministre des travaux publics avec l'acte de concession passé par l'autorité locale compétente ou avec le projet d'acte à passer par le ministre.

DÉCLARATION D'UTILITÉ PUBLIQUE. — APPROBATION DE L'ACTE DE CONCESSION EN CONSEIL D'ÉTAT.

ART. 30. — Le ministre des Travaux publics, après avoir complété le dossier, s'il y a lieu, par l'acte de concession revêtu de sa signature, le transmet au Conseil d'État de concert avec le ministre de l'Intérieur, et avec les avis du ministre de l'Agriculture et de l'Administration des postes es des télégraphes.

La déclaration d'utilité publique est prononcée, et la concession approuvée par décret, conformément aux dispositions de l'article 11 de la loi du 15 juin 1906.

CHAPITRE V

Instruction et approbation des projets définitifs. — Enquêtes pour l'établissement des servitudes prévues par l'article 12 de la loi du 15 juin 1906.

SECTION I

Instruction et examen des projets.

INSTRUCTION DES PROJETS DÉFINITIFS.

ART. 31. — Aucune installation de distribution ne peut être exécutée sur la voie publique sans que le projet définitif en ait été préalablement soumis à l'examen des services intéressés. Il n'est dérogé à cette règle que dans le cas prévu à l'article 35 ci-après.

ART. 32. — Les projets sont adressés à l'ingénieur en chef du contrôle en cinq exemplaires au moins pour chaque département traversé et en plus grand nombre si l'ingénieur en chef le requiert pour accélérer l'instruction.

ART. 33. — L'ingénieur en chef transmet des exemplaires du dossier aux divers services intéressés, en vue des conférences prévues à l'article 14 de la loi du 15 juin 1906.

Dans le cas de distributions dont le contrôle est de la compétence des communes, les services de contrôle organisés par les municipalités et leurs services de voirie sont appelés à participer aux conférences et à présenter leurs propositions.

L'ingénieur en chef notifie les propositions des services intéressés à l'entrepreneur de la distribution et provoque ses observations sur les objections et conditions formulées au cours de l'instruction.

APPROBATION DES PROJETS.

ART. 34. — S'il y a accord entre les services intéressés et si l'entrepreneur de la distribution a pris par écrit les engagements auxquels serait subordonnée l'exécution des travaux, l'ingénieur en chef autorise cette exécution.

S'il n'y a pas accord entre les services intéressés et le demandeur, l'ingénieur en chef adresse le dossier au ministre des Travaux publics, qui le soumet au Comité d'électricité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si les ministres intéressés adhèrent à l'avis du Comité, le ministre des travaux publics renvoie le dossier à l'ingénieur en chef avec ses instructions. Si les ministres intéressés n'adhèrent pas tous à l'avis du Comité, il est statué en conseil des ministres.

EXÉCUTION DE LIGNES SECONDAIRES ET DE BRANCHEMENTS.

ART. 35. — Les travaux qui se bornent à la création d'une ligne secondaire ou d'un branchement ayant pour unique objet de relier un immeuble à une canalisation existant sur ou sous la voie publique peuvent être exécutés par les concessionnaires, sans autorisation préalable, à charge par ceux-ci de prévenir huit jours à l'avance le service de contrôle, le service de la voirie et les autres services intéressés, et sous la condition expresse qu'aucune opposition ne soit formulée dans le délai ci-dessus fixé.

Pareille faculté peut être, sous les mêmes conditions, requise par les permissions de voirie, en ce qui concerne les branchements particuliers.

S'il y a opposition motivée, le projet de l'ouvrage doit être soumis à l'examen de l'ingénieur en chef du contrôle et instruit dans les formes prévues ci-dessus.

SECTION II

Enquête pour l'établissement des servitudes prévues par l'article 12 de la loi du 15 juin 1906.

ENQUÊTE RELATIVE AUX SERVITUDES.

ART. 36. — L'enquête pour l'établissement des servitudes d'appui, de passage ou d'ébranchage prévues à l'article 12 de la loi du 15 juin 1906 a lieu sur un plan parcellaire indiquant toutes les propriétés atteintes par les servitudes, avec les renseignements nécessaires pour faire connaître la nature et l'étendue des sujétions en résultant.

Le plan des propriétés frappées de servitudes, mentionnant les noms des propriétaires tels qu'ils sont inscrits sur les matrices des rôles, reste déposé pendant huit jours à la mairie de la commune où les propriétés sont situées. Avertissement de l'ouverture de l'enquête est donné collectivement aux intéressés, par voie d'affichage à la mairie. Notification directe des travaux projetés est, en outre, donnée par le maire aux intéressés. Le maire certifie les notifications et affiches ; il mentionne, sur un procès-verbal qu'il ouvre à cet effet, les réclamations et déclarations qui lui ont été faites verbalement et y annexe celles qui lui sont adressées par écrit.

A l'expiration du délai de huitaine, un commissaire enquêteur nommé par le préfet reçoit les observations et appelle, s'il le juge convenable, les propriétaires intéressés. Le commissaire signe le procès-verbal d'enquête, y joint son avis motivé et remet immédiatement, avec toutes les pièces de l'instruction, le dossier au maire, qui le transmet sans délai à l'ingénieur en chef du contrôle.

Si l'exécution des travaux projetés comporte des expropriations, il est procédé à l'enquête pour l'établissement des servitudes en même temps qu'à l'enquête prévue par le titre II de la loi du 3 mai 1841.

MODIFICATION ÉVENTUELLE DES PROJETS. APPROBATION DU TRACÉ.

ART. 37. — L'ingénieur en chef du contrôle communique au concessionnaire le dossier de l'enquête.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le concessionnaire peut, s'il le juge utile, modifier le projet, en vue de tenir compte des observations faites à l'enquête.

Si les modifications ainsi apportées au projet frappent de servitude des propriétés nouvelles ou aggravent des servitudes antérieurement prévues, notification directe en est donnée par le maire aux intéressés, qui ont un délai de huit jours pour présenter leurs observations.

Le projet, modifié ou non par le concessionnaire, est adressé par l'ingénieur en chef du contrôle au préfet, qui approuve le tracé et notifie son approbation au concessionnaire.

CHAPITRE VI

Conditions générales et d'intérêt public auxquelles doivent satisfaire les ouvrages.

BONNE EXÉCUTION DES OUVRAGES.

ART. 38. — Tous les ouvrages établis sur le domaine public sont exécutés en matériaux de bonne qualité, mis en œuvre suivant les règles de l'art.

Les dispositions techniques adoptées pour les ouvrages, ainsi que les conditions de leur exécution, doivent satisfaire aux prescriptions des arrêtés pris par le ministre des Travaux publics, en exécution de l'article 19 de la loi du 15 juin 1906.

En cas de désaccord entre le permissionnaire ou concessionnaire et les services intéressés sur l'application de ces arrêtés à des ouvrages antérieurement exécutés, il est statué par le ministre des Travaux publics après avis du Comité d'électricité.

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES OU TÉLÉPHONIQUES ET LIGNES DE SIGNAUX, ÉTABLIES POUR LA SÉCURITÉ DE L'EXPLOITATION.

ART. 39. — Les entrepreneurs de distribution d'énergie électrique sont tenus d'établir et d'entretenir à leurs frais les lignes télégraphiques ou téléphoniques ou les lignes de signaux reconnues nécessaires par le service du contrôle pour assurer la sécurité de l'exploitation.

Nul entrepreneur de distribution ne peut faire ou laisser faire usage de ces lignes, ni pour les besoins du service commercial de la distribution, ni pour tous autres motifs étrangers à la sécurité de l'exploitation, s'il n'a obtenu l'autorisation de l'Administration des postes et des télégraphes, conformément aux lois et règlements relatifs à l'exercice du monopole des correspondances télégraphiques.

Les projets des lignes télégraphiques ou téléphoniques et des lignes de signaux établies en vertu du premier paragraphe du présent article sont soumis à l'approbation de l'Administration locale des postes et des télégraphes, qui prescrit toutes les dispositions nécessaires pour empêcher qu'aucune atteinte soit portée au monopole de l'État. En cas de désaccord, il est statué par le ministre des travaux publics, après avis du Comité d'électricité.

EMPRUNT DE SUPPORTS EXISTANTS PAR DE NOUVEAUX PERMISSIONNAIRES OU CONCESSIONNAIRES.

ART. 40. — Tout permissionnaire ou concessionnaire est tenu, si l'Administration le requiert, de laisser utiliser ses poteaux par d'autres titulaires de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

permissions ou concessions empruntant la même voie, mais sans qu'il puisse en résulter pour lui aucune gêne dans l'exploitation, ni aucune augmentation de charges.

Le nouvel occupant verse, à titre de droit d'usage, au premier occupant, une indemnité proportionnée aux avantages que lui procure la communauté.

En cas de désaccord sur le principe ou sur les conditions techniques de la communauté, il est statué par le ministre des travaux publics, après avis du Comité d'électricité.

CHAPITRE VII

Exécution et réception des travaux, mise en service.

AVIS A DONNER AVANT LE COMMENCEMENT DES TRAVAUX.

ART. 41. — Avant de commencer les travaux d'une distribution, le permissionnaire ou concessionnaire doit en donner avis quatre jours au moins à l'avance au service du contrôle.

Il doit en outre, avant l'ouverture de tout chantier sur la voie publique, en aviser dans le même délai :

1° Les services de voirie intéressés ;

2° Le service des postes et télégraphes, si des lignes télégraphiques et téléphoniques sont intéressées ;

3° Les propriétaires de toutes canalisations touchées par les travaux.

Le permissionnaire ou concessionnaire est dispensé de se conformer au délai de quatre jours ci-dessus indiqué pour l'ouverture des chantiers sur la voie publique en cas d'accident exigeant une réparation immédiate. Dans ce cas, il peut exécuter sans délai tous travaux nécessaires, à charge d'en aviser en même temps les services intéressés et de justifier l'urgence dans un délai maximum de vingt-quatre heures.

RÉCEPTION DES TRAVAUX ET MISE EN EXPLOITATION.

ART. 42. — Avant la mise en service des ouvrages terminés, il est procédé à leur réception. L'ingénieur en chef du contrôle fixe la date des essais et convoque les représentants des services intéressés.

Si les essais sont satisfaisants, tant au point de vue du fonctionnement de la distribution elle-même, qu'à celui de la sécurité et du maintien de la circulation publique et des communications télégraphiques ou téléphoniques, la réception des ouvrages est prononcée.

Sur le vu du procès-verbal de réception, le préfet, ou l'ingénieur en chef du contrôle délégué à cet effet, délivre l'autorisation de circulation du courant prévue par l'article 15 de la loi du 15 juin 1906.

Les lignes et branchements établis conformément aux dispositions de l'article 35 ci-dessus peuvent être mis en service sans essais de réception.

DESSINS DES OUVRAGES DE LA DISTRIBUTION.

ART. 43. — Dans le délai de six mois après la mise en service de chaque distribution, le permissionnaire ou concessionnaire est tenu d'en remettre le plan au service du contrôle. Au plan doivent être joints les dessins complets

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des ouvrages principaux, en plan, coupe et élévation, dressés à l'échelle prescrite par l'Administration et donnant tous les détails et renseignements utiles.

Des coupes détaillées à l'échelle prescrite font connaître les dispositions spéciales adoptées dans les traversées de chaussée et sur tous les points pour lesquels la production de ces documents a été requise par l'ingénieur en chef du contrôle.

Le nombre d'expéditions des plans et dessins à fournir est fixé par l'ingénieur en chef du contrôle; un exemplaire en est remis, dans tous les cas, à l'ingénieur des télégraphes.

REVISION ANNUELLE DES PLANS ET DESSINS.

ART. 44. — Une fois par an au moins, les plans et les dessins des distributions sont revisés et mis au courant par le permissionnaire ou concessionnaire.

ÉTABLISSEMENT D'OFFICE DES PLANS ET DESSINS.

ART. 45. — Faute par le permissionnaire ou concessionnaire de fournir les plans et dessins ou de les tenir à jour, il y est pourvu d'office et à ses frais par les soins du service du contrôle.

Il est procédé de la même façon, si les dessins fournis sont reconnus inexacts ou incomplets.

CHAPITRE VIII

Police et sécurité de l'exploitation.

ENTRETIEN ET EXPLOITATION.

ART. 46. — Les distributions d'énergie électrique et toutes les installations qui en dépendent doivent être constamment entretenues en bon état.

Les permissionnaires ou concessionnaires sont tenus de prendre toutes les mesures nécessaires pour que l'exécution des travaux et l'exploitation de la distribution n'apportent ni gêne ni trouble aux services publics.

FORME DES RÉQUISITIONS PRÉVUES PAR L'ARTICLE 17 DE LA LOI.

ART. 47. — En cas de troubles apportés aux services publics, les réquisitions visées à l'article 17 de la loi du 15 juin 1906 sont adressées à l'ingénieur en chef du contrôle, sous forme de lettres recommandées, soit par les ingénieurs des télégraphes, en ce qui concerne l'Administration des postes et télégraphes, soit par les représentants des services intéressés.

Elles spécifient notamment :

1° La nature des perturbations qu'il s'agit de faire cesser ou de prévenir;

2° Les conditions dans lesquelles les perturbations ont été constatées, avec indication spéciale de procès-verbaux qui auraient été dressés en exécution du décret-loi du 27 décembre 1851 ou de tout autre acte législatif;

3° Les mesures qu'il paraît nécessaire de prévoir dans l'intérêt de la sécurité publique ou de la sûreté et de la régularité des communications télégraphiques ou téléphoniques;

4° S'il y a lieu, l'injonction à adresser au permissionnaire ou concessionnaire d'avoir à couper le courant par application de l'article 48 du présent règlement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INTERRUPTION DU COURANT SUR RÉQUISITION DU SERVICE DU CONTROLE ET DES AUTRES SERVICES INTÉRESSÉS.

ART. 48. — Le permissionnaire ou concessionnaire est tenu de couper le courant sur l'injonction de l'ingénieur en chef du contrôle, lorsque le mauvais fonctionnement de la distribution est de nature à compromettre la sécurité publique, ou lorsque la coupure est nécessaire pour permettre aux services publics d'effectuer, dans l'intérêt de la sécurité, la visite, la réparation ou la modification de quelques ouvrages dépendant de ces services.

En cas d'accident de personne ou de danger grave, les agents du contrôle assistant l'ingénieur en chef et les fonctionnaires autorisés par l'article 17 de la loi du 15 juin 1906 à adresser des réquisitions au service du contrôle peuvent enjoindre, par les voies les plus rapides, au permissionnaire ou concessionnaire de couper le courant. Avis de l'injonction est, dans tous les cas, donné immédiatement à l'ingénieur en chef du contrôle, qui prend d'urgence les mesures nécessaires pour sauvegarder la sécurité et peut requérir à cet effet le concours des autorités locales.

POSTES DE SECOURS EN CAS D'ACCIDENTS.

ART. 49. — Aux endroits désignés par le préfet, le permissionnaire ou concessionnaire entretient les médicaments et moyens de secours nécessaires en cas d'accident et affiche les instructions relatives aux mesures à prendre dans ce cas, conformément aux prescriptions du ministre des travaux publics.

MESURES CONCERNANT LA PROTECTION DES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ET LA LIBERTÉ DE LA CIRCULATION.

ART. 50. — Il est défendu à toute personne étrangère au service des distributions d'énergie et aux services publics intéressés :

1° De déranger, altérer, modifier ou manœuvrer, sous quelque prétexte que ce soit, les appareils et ouvrages qui dépendent de la distribution ;

2° De rien placer sur les supports, conducteurs et tous organes de la distribution, de les toucher ou de rien lancer qui puisse les atteindre ;

3° De pénétrer, sans y être autorisé régulièrement, dans les immeubles dépendant de la distribution et d'y introduire ou laisser introduire les animaux.

VÉRIFICATIONS ET INSTRUMENTS DE MESURE.

ART. 51. — Le permissionnaire ou concessionnaire est tenu, toutes les fois qu'il en est requis, d'effectuer devant les agents du contrôle toutes les mesures nécessaires à la vérification des conditions électriques de la distribution ou de mettre à la disposition de ces agents les instruments de mesure nécessaires pour leur permettre d'effectuer eux-mêmes les vérifications qu'ils jugeraient utiles dans l'intérêt de la police ou de la sécurité de l'exploitation.

Dans le cas où des troubles seraient constatés sur des lignes télégraphiques ou téléphoniques, les ingénieurs des télégraphes peuvent exiger que les vérifications soient faites par eux-mêmes ou en leur présence.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DÉCLARATION D'ACCIDENTS.

ART. 52. — Toutes les fois qu'il arrive un accident entraînant mort d'homme ou blessure grave, le permissionnaire ou concessionnaire en fait immédiatement la déclaration, par la voie la plus rapide, à l'agent local du contrôle technique; cette déclaration est faite soit verbalement, soit par exprès, soit par dépêche télégraphique ou téléphonique, et confirmée par lettre. Avis en est envoyé à l'ingénieur en chef du contrôle et au procureur de la République par la voie la plus rapide.

Avis doit également être donné à l'ingénieur en chef du contrôle et à l'agent local du contrôle technique des incendies graves ou troubles importants survenus dans le service de la distribution.

CHAPITRE IX

Relations des entreprises de distribution avec la voirie, les concessions de travaux publics et les distributions voisines.

MODIFICATIONS APPORTÉES AUX DISTRIBUTIONS DANS L'INTÉRÊT DE LA VOIRIE ET DES RIVERAINS.

ART. 53. — Le permissionnaire ou concessionnaire doit, toutes les fois qu'il en est requis par l'autorité compétente pour un motif de sécurité publique ou dans l'intérêt de la voirie, opérer à ses frais le déplacement des parties de canalisation qui lui sont désignées. Il ne résulte pour lui, de ce fait, aucun droit à indemnité.

Si des modifications sont faites par les riverains aux entrées et accès des immeubles et propriétés en bordure des routes et chemins empruntés, le permissionnaire ou concessionnaire est tenu d'apporter à ses installations les modifications requises par l'Administration.

TRAVERSÉE DE CONCESSIONS PRÉEXISTANTES PAR DES DISTRIBUTIONS.

ART. 54. — Lorsqu'une distribution d'énergie électrique traverse les ouvrages d'une concession préexistante (chemin de fer, distribution d'énergie, etc.), les mesures nécessaires sont prises pour qu'aucune des deux entreprises n'entrave le bon fonctionnement de l'autre.

Les travaux de modification de toute nature qui seraient à faire dans la concession préexistante, et tous dommages résultant de la traversée sont à la charge du permissionnaire ou concessionnaire de la distribution nouvelle.

En cas d'accord entre les divers services intéressés, les mesures à prendre sont fixées par arrêté préfectoral; en cas de désaccord, elles le sont par décision du ministre des Travaux publics, après avis du Comité d'électricité.

MODIFICATIONS AUX DISTRIBUTIONS NÉCESSITÉES PAR DES TRAVAUX PUBLICS.

ART. 55. — Dans le cas où l'État, les départements ou les communes ordonnent ou concèdent soit la construction de routes nationales, de routes départementales, de chemins vicinaux, de voies ferrées, de canaux, soit l'ins-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tallation de communications télégraphiques ou téléphoniques ou de distributions d'énergie et, d'une manière générale, l'exécution de travaux publics qui traversent une distribution et obligent à la modifier, le permissionnaire ou concessionnaire ne peut s'opposer à ces travaux.

Le permissionnaire ou le concessionnaire doit apporter à ses propres installations toutes les modifications prescrites par le ministre des travaux publics.

Toutes les dispositions nécessaires sont prises pour que les modifications ainsi imposées par l'Administration n'apportent aucun obstacle au service de la distribution d'énergie préexistante.

RECOURS EN CAS DE DOMMAGES AUX DISTRIBUTIONS.

ART. 56. — Aucun recours ne peut être exercé contre l'État, les départements ou les communes par le permissionnaire ou le concessionnaire d'une distribution :

Soit à raison des dommages que le roulage ordinaire pourrait occasionner aux ouvrages de la distribution placés sur ou sous le sol des voies publiques;

Soit à raison de l'état de la chaussée, des accotements, des trottoirs ou des ouvrages, et des conséquences de toute nature qui pourraient en résulter;

Soit à raison des travaux exécutés sur la voie publique dans l'intérêt de la sécurité publique ou de la voirie;

Soit à raison des travaux exécutés pour l'entretien des lignes télégraphiques ou téléphoniques.

Le permissionnaire ou concessionnaire conserve son droit de recours contre les tiers.

DOMMAGES OCCASIONNÉS PAR LES DISTRIBUTIONS.

ART. 57. — Les indemnités pour dommages résultant de l'Établissement ou de l'exploitation d'une distribution sont entièrement à la charge du permissionnaire ou concessionnaire, qui reste responsable de toutes les conséquences dommageables de son entreprise, tant envers l'État, les départements et les communes qu'envers les tiers.

CHAPITRE X

Dispositions diverses.

COMPTES RENDUS STATISTIQUES ANNUELS.

ART. 58. — Tout permissionnaire ou concessionnaire doit adresser à l'ingénieur en chef du contrôle chaque année, le 15 avril au plus tard, des états statistiques, conformes aux modèles qui seront arrêtés par le ministre des travaux publics, après avis du Comité d'électricité et comprenant les renseignements techniques relatifs à l'année entière, du 1er janvier au 31 décembre. Ces renseignements peuvent être publiés en tout ou en partie.

FORME DES CONFÉRENCES ENTRE LES SERVICES INTÉRESSÉS.

ART. 59. — Les conférences prévues par l'article 14 de la loi de 15 juin 1906 ont lieu à un seul degré. Elles sont ouvertes par l'ingénieur en chef du con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trôle, qui établit un exposé de l'objet de la conférence et adresse un exemplaire du dossier au chef de chaque service intéressé pour chaque département et, dans tous les cas, au représentant de l'Administration des postes et télégraphes. L'ingénieur en chef provoque en même temps les observations de toute personne dont il juge l'intervention utile pour l'instruction de l'affaire.

Les chefs de services intéressés, après examen, renvoient le dossier à l'ingénieur en chef du contrôle et formulent leurs avis ou observations en ce qui concerne leurs services respectifs.

Sur le vu de ces avis ou observations, l'ingénieur en chef du contrôle formule ses conclusions et clôt le procès-verbal de la conférence.

En cas de désaccord des services intéressés, l'ingénieur en chef du contrôle provoque une conférence effective entre les chefs de service ou leurs délégués. Si l'accord n'intervient pas au cours de cette conférence, le procès-verbal relatant les avis de tous les services intéressés est adressé sans délai au ministre des Travaux publics pour être statué ainsi qu'il appartiendra.

DISPOSITIONS TRANSITOIRES.

ART. 60. — Pour toutes les distributions au sujet desquelles une instruction est actuellement ouverte, les enquêtes et autres formalités régulièrement accomplies, conformément aux règles antérieurement en vigueur, seront considérées comme valables. En cas de contestation, il sera statué par le ministre des Travaux publics.

698. Circulaire ministérielle du 13 mai 1908, *relative à l'application du décret du* 11 *juillet* 1907 *sur la sécurité des travailleurs dans les établissements qui emploient des courants électriques.* — Le décret précité a pour effet de remplacer les dispositions de l'article 17 du décret du 29 novembre 1904.

Les quatre premières sections du nouveau décret contiennent les dispositions d'ordre technique concernant les installations électriques : il est expliqué que la plupart des dispositions du décret s'appliquent aux installations de la deuxième catégorie, et que les exploitants ont à leur choix de relier électriquement à la terre les bâtis des machines ou de les isoler électriquement, mais en prenant les précautions spéciales édictées dans le décret. L'installation des tableaux de distribution et la protection du personnel font l'objet de prescriptions détaillées (section III). En ce qui concerne l'installation des canalisations, le danger résultant des manœuvres intempestives sur des lignes en charge, le ministre croit qu'il sera considérablement atténué par les prescriptions très complètes de l'article 10 (section IV), qui sont également applicables aux lignes téléphoniques, télégraphiques ou de signaux, spéciales aux établissements industriels et montées sur les mêmes supports que les lignes principales.

Aux termes de l'article 13, les textes dont l'affichage semble s'imposer le plus généralement sont les articles 6 (§§ 3, 7, 10, 11 et 12). Le texte de l'article 4 doit être affiché dans les locaux de deuxième catégorie destinés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aux accumulateurs, dans les ateliers contenant des corps explosifs ou dans lesquels il peut se produire soit des gaz détonants, soit des poussières inflammables.

Pour les établissements créés avant la promulgation du présent décret, l'industriel a à indiquer dans une note technique les mesures de sécurité par lesquelles il s'engage à satisfaire au dernier paragraphe de l'article 15, mesures sur lesquelles le Comité consultatif des Arts et Manufactures sera consulté. La même procédure s'applique au numéro 2 de l'article 15 au cas où l'application des prescriptions des articles 5 (§ 3) et 6 (§ 1er) serait pratiquement impossible.

L'article 17 stipule que le décret ne s'applique pas, en dehors de l'enceinte des usines de production, aux distributions d'énergie électrique réglementées en vertu de la loi du 15 juin 1906. Lorsque les installations comportent à la fois des ouvrages de distribution et des ouvrages de production (telles qu'une sous-station de transformation de courant alternatif en courant continu qui comprend des moteurs à vapeur ou hydrauliques produisant normalement du courant) ; dans ce cas, le caractère d'usine de production est prédominant et l'installation tout entière est placée dans les attributions d'un seul ministère, celui du Travail.

La loi du 15 juin 1906 a soustrait les installations à celle des prescriptions de la loi du 12 juin 1903 en ce qui concerne la sécurité du personnel ; mais la loi de 1906 est muette en ce qui touche l'hygiène et les conditions proprement dites du travail. Il appartient donc aux inspecteurs du travail d'en assurer la surveillance pour les distributions d'énergie électrique comme pour les autres industries.

Les lois des 12 juin 1893 et 11 juillet 1903 ne sont pas applicables aux mines, carrières, ni aux chemins de fer et tramways, ni par conséquent aux installations électriques qui desservent ces entreprises ; leur contrôle appartient à l'Administration des Travaux publics. Mais les usines génératrices qui, tout en fournissant l'énergie électrique aux établissements ci-dessus, produisent du courant pour d'autres usages industriels, sont placées dans les attributions du ministère du Travail, c'est-à-dire soumises à l'application du décret du 11 juillet 1907.

699. Circulaire ministérielle du 21 juillet 1908, *relative à l'arrêté du* 21 *mars* 1908 *déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique.* — Cette circulaire explique que l'arrêté du 21 mars 1908 s'applique à tous les ouvrages des distributions empruntant en un point quelconque de leur parcours le domaine public, ainsi qu'aux ouvrages de distribution établis exclusivement sur des terrains privés et s'approchant à moins de 10 mètres de distance horizontale d'une ligne télégraphique ou téléphonique préexistante ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mais il ne s'applique ni aux usines de production d'énergie, ni aux ouvrages d'utilisation situés dans les usines ou autres immeubles. Il ne contient aucune prescription relative à la protection des sites que mentionne l'article 19 de la loi du 15 juin 1906 ; mais le ministre rappelle aux ingénieurs le souci qu'ils doivent avoir de veiller à ce que l'établissement des ouvrages d'une distribution ne compromette pas le caractère artistique ou pittoresque des monuments, des paysages ou des rues des villes.

La circulaire précise les points suivants : les essais des isolateurs ne pouvant être pratiquement faits sur une ligne établie, ils doivent être envoyés à l'usine avant livraison, et le service du contrôle pourra exiger la production du procès-verbal des essais.

Le calcul des dimensions de tous les ouvrages des distributions doit se faire dans les deux hypothèses ; temps froids et violence du vent, pour retenir le résultat trouvé dans le cas le plus défavorable. — La liaison entre les agglomérations importantes et l'usine génératrice, imposée par l'article 7 peut être réalisée à l'aide d'une ligne téléphonique, par un service de transport rapide (automobiles, bicyclettes, etc.), ou autres moyens que le service du contrôle aura à apprécier. Le cas où la distribution d'énergie est munie d'appareils de coupure à l'entrée de chaque agglomération peut être considéré comme répondant à la prescription de l'article 7.

Le ministre observe que le paragraphe 1er de l'article 24 ne classe plus les passages à niveau parmi les points qui doivent être choisis de préférence pour la traversée des chemins de fer, en raison du risque que ces passages offrent pour la circulation. Mais il peut être avantageux de placer la traversée à proximité d'un passage à niveau pour qu'elle puisse être surveillée par le garde-barrière.

Les appareils de coupure ne doivent pas nécessairement être établis dans le voisinage immédiat de la traversée, il suffit que l'installation soit faite de manière qu'il soit possible de couper facilement le courant dans la traversée. En ce qui concerne le paragraphe 3 du présent article, la circulaire explique que les services du contrôle doivent être consultés pour toutes les traversées, car ils ont à apprécier, dans chaque cas, si la prescription du paragraphe 3 est satisfaite.

Relativement aux articles 25 et 26, le ministre mentionne qu'il ne lui a pas paru nécessaire de fixer une limite pour la densité maxima du courant dans les canalisations aériennes et souterraines, et que les prescriptions relatives à l'établissement des ouvrages servant à la traction remplacent et complètent les instructions antérieures de l'Administration des Télégraphes. Il importe, pour ces ouvrages, que le service du contrôle assure strictement toutes les mesures jugées nécessaires, dans chaque cas, pour protéger, contre l'action nuisible des courants dérivés, les masses

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

métalliques, voisines de la ligne de distribution, et notamment les lignes télégraphiques ou téléphoniques, et les lignes de signaux.

Enfin la circulaire appelle l'attention des préfets sur les diverses dispositions nécessaires pour assurer l'application de l'arrêté, lesquelles ne sont pas limitatives, et par conséquent, permettent au service du contrôle d'imposer toute mesure qu'il croira nécessaire pour assurer la sécurité.

En particulier, l'établissement des distributions à haute tension nécessite une étude particulièrement attentive des projets d'exécution, en raison des dangers qu'elles présentent. Avant de statuer sur ces ouvrages, les préfets doivent communiquer au ministre, avec leurs propositions, les projets de toutes les distributions dont la tension de régime dépasse 30.000 volts, de même que les distributions de tension inférieure ou égale à 30.000 volts qui soulèveraient des questions délicates sur lesquelles les préfets ne croiraient pas devoir statuer sous leur propre responsabilité.

700. Circulaire ministérielle du 3 août 1908. — Cette circulaire explique que la législation nouvelle, instituée par la loi du 15 juin 1906, et par le décret du 3 avril 1908, abroge et remplace tous actes, législatifs ou administratifs antérieurs, relatifs aux distributions d'énergie électrique.

Le ministre précise cette particularité que la loi ne concerne que les distributions, c'est-à-dire les lignes, canalisations, sous-stations, postes de transformation et autres ouvrages servant au transport du courant, et non les usines et appareils servant soit à la production du courant, soit à son utilisation.

L'Administration n'est pas obligée à autoriser toute distribution, l'obtention d'une permission ou d'une concession ne constituant pas un droit pour le demandeur. Quand un particulier demande à établir sur une voie publique, quelle qu'elle soit, des ouvrages permanents de distribution proprement dite, destinés à un usage collectif pour faire commerce de leur exploitation, l'autorité est compétente à apprécier si l'installation projetée ne risque pas de créer un obstacle à l'organisation et au fonctionnement des services publics. La décision finale appartient à l'Administration supérieure, mais il convient qu'elle consulte les administrations communales.

En ce qui concerne les monopoles pour l'éclairage par voie de concession accordés aux communes, l'État ne doit user des pouvoirs qui lui sont conférés qu'après avoir provoqué l'avis des corps municipaux intéressés. Pour les distributions de force, aucun privilège n'est réservé aux communes. Si l'accord ne s'établit pas entre les représentants de l'État

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et les communes, il appartient au préfet de statuer en matière de permissions de voirie par application de l'article 98 du 5 avril 1884, et au ministre des Travaux publics de se prononcer en matière de concessions, après avis du Comité d'Électricité.

Lorsque la distribution a pour objet non de faire le commerce du courant, mais de desservir les services publics, il est du devoir de l'État, aussi bien que des communes, d'accorder toutes facilités pour l'établissement des ouvrages, qu'il y ait ou non des concessions antérieures. L'État peut intervenir, malgré l'opposition des communes, et quelle que soit la catégorie des voies à emprunter.

Les distributions particulières, entraînant l'occupation publique pour un usage autre que l'usage commun, doivent rester précaires et révocables, et, par conséquent, être autorisées par permission de voirie. Pour les distributions publiques, le règlement de la concession paraît, en général, préférable.

Les lignes de transport, desservant des services publics, peuvent être autorisées indifféremment soit par concession, soit par permission de voirie, suivant que l'un ou l'autre régime est plus favorable à leur établissement.

Relativement au chapitre Ier du décret du 3 avril 1908, la circulaire explique que, pour les distributions d'énergie électrique établies exclusivement sur des terrains privés, dans cette catégorie, ne doivent pas être compris les canalisations et ouvrages dont l'établissement est régi par les titres III, IV et V de la loi.

Parmi les renseignements que le demandeur est tenu de fournir à l'appui d'une demande de permission de voirie, la destination de la distribution doit être explicitement mentionnée. Toute permission autorisant une distribution, qui cesserait d'être affectée à une destination différente, pourra être frappée de révocation. Dans tous les cas, l'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique, même lorsque la distribution emprunte exclusivement des voies placées dans les attributions du maire, doit être consulté. Lorsque l'instruction donne lieu à un désaccord entre les services ou communes intéressés, le dossier doit être transmis au ministre des Travaux publics, qui statue après avis du ministre de l'Intérieur. Si les concessionnaires antérieurs s'opposent à la délivrance de la permission demandée, le préfet peut apprécier et décider sous sa propre responsabilité sans recourir à la voie ministérielle.

La concession confère au concessionnaire le droit d'exécuter sur les voies publiques, quelle qu'en soit la nature, tous travaux nécessaires à l'établissement, à l'entretien des ouvrages, en se conformant aux conditions des cahiers des charges, des règlements de voirie et des règlements d'administration publique édictés pour l'application de la loi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'entrepreneur qui bénéficie d'une concession municipale ou de l'État n'a pas à se pourvoir d'une permission de voirie portant autorisation d'établir des ouvrages de distribution d'énergie pour occuper le sol des routes nationales ou départementales ainsi que les voies urbaines ou vicinales comprises dans le périmètre de la concession.

Les concessions avec déclaration d'utilité publique ne deviennent définitives qu'après avoir été approuvées par le décret qui prononce l'utilité publique.

Les projets d'engagements à prendre par les demandeurs en vue du paiement des travaux qui sont reconnus nécessaires par l'administration des Télégraphes pour assurer la sécurité de ses lignes et des postes, sont adressés par l'ingénieur en chef des Télégraphes, en même temps que son avis sur les projets, à l'ingénieur en chef du contrôle, qui est chargé de les faire signer par les demandeurs avant toute autorisation d'exécution des travaux et de les renvoyer ensuite à l'ingénieur en chef des Télégraphes. S'il n'y a pas accord entre les services intéressés, l'ingénieur en chef adresse directement le dossier au ministre des Travaux publics. Au moment de la délivrance d'une permission de voirie ou de l'octroi d'une concession, le maire ou le préfet peut opposer au demandeur une fin de non-recevoir sans que nécessairement l'affaire soit soumise au ministre.

En principe, le demandeur n'a aucun droit à l'occupation du domaine public, tandis que l'entrepreneur à qui l'autorisation d'occupation a été accordée doit être mis à même d'user de cette autorisation dans la mesure où l'intérêt de la voirie le permet. Si l'usage du domaine public lui est interdit par les exigences des services intéressés, le différend doit être tranché par l'autorité supérieure.

L'approbation des projets ne doit être exigée que pour les grandes artères et pour les ouvrages principaux des distributions. Les travaux visés par l'article 35 du décret peuvent être exécutés sans autorisation préalable, à charge par l'entrepreneur de prévenir huit jours au moins à l'avance les services intéressés, et sous la condition expresse qu'aucne opposition ne soit formulée, dans le but de ne pas retarder l'établissement des ouvrages secondaires nécessaires pour assurer le développement de l'exploitation.

Pour les canalisations faisant partie des installations de chemins de fer et tramways, l'ingénieur en chef ne peut en autoriser l'exécution sous sa propre responsabilité ; il adresse, dans ce cas, le dossier des conférences à l'autorité compétente. Toujours dans ce cas, s'il y a désaccord, le dossier est transmis au ministre des Travaux publics, qui statue dans les conditions prévues par l'article 14 de la loi.

En ce qui concerne la forme des enquêtes précisée par le décret du 3 avril 1908, il convient de remarquer que si le concessionnaire modifie le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

projet en vue de tenir compte des observations faites à l'enquête, l'instruction ne doit pas être recommencée en entier ; il suffit qu'une notification directe des modifications projetées soit donnée aux intéressés, qui ont huit jours pour présenter leurs observations.

Relativement au chapitre VI, qui traite des conditions générales et d'intérêt public auxquelles doivent satisfaire les ouvrages de distribution, le ministre signale qu'il ne convient de n'exiger la transformation des ouvrages existants que si la nécessité en est absolument démontrée. Pour les lignes téléphoniques à usage industriel, l'Administration des Postes et Télégraphes a à prendre toutes les mesures utiles pour que les lignes ne soient pas détournées de leur destination. A cet effet, le dossier doit indiquer l'objet de la ligne, sa constitution technique et les moyens proposés pour permettre à l'Administration des Postes et Télégraphes d'exercer son contrôle.

Pour hâter la mise en service des travaux reçus de la distribution d'énergie, la circulaire explique qu'il est désirable que l'autorisation soit délivrée directement par l'ingénieur en chef délégué à cet effet, par application de l'article 42 du décret.

Quant à la police et à la sécurité de l'exploitation, c'est l'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique qui est désigné pour recevoir les réquisitions des services intéressés visés par l'article 17 de la loi.

701. Décret du 25 août 1908 établissant le cahier des charges type pour la concession d'une distribution publique d'énergie électrique par l'État [1].

Objet de la concession.

ART. 2. — *Droit d'utiliser les voies publiques.* — Les ouvrages ou canalisations établis dans le périmètre de la concession, tant au-dessus qu'au-dessous des voies publiques et de leurs dépendances, en se conformant aux conditions du présent cahier des charges, aux règlements de voirie et aux décrets ou arrêtés intervenus en exécution de la loi du 15 juin 1906, le concessionnaire ne peut

---

[1] Ce décret a été quelque peu modifié par un nouveau cahier des charges en date du 30 novembre 1909. Les dispositions spéciales qu'il renferme donne lieu aux observations suivantes :

Le service concédé (art. 1er) a pour objet de fournir de l'énergie aux services publics ; les réseaux destinés à alimenter ces services peuvent traverser des communes sans les desservir et sans que les municipalités aient à intervenir pour autoriser leur établissement ; le concessionnaire a le droit, sur tout le parcours de son réseau, d'établir sur le domaine public, qu'il soit national, départemental ou communal, tous ouvrages et canalisations nécessaires à l'objet de la concession, sous réserve de l'approbation des projets d'exécution dans les formes prévues au décret du 3 avril 1908.

L'article 3 permet au concessionnaire, lorsque toutes les obligations des cahiers des charges sont remplies, de faire usage de ses installations pour vendre de l'énergie à des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

réclamer aucune indemnité pour le déplacement ou la modification des ouvrages établis pour lui sur les voies publiques, lorsque ces changements sont requis par l'autorité compétente pour un motif de sécurité publique.

ART. 3. — *Utilisation accessoire des ouvrages et canalisations.* — Le concessionnaire peut faire usage des ouvrages et canalisations pour desservir toutes entreprises situées hors de la concession à la condition qu'il n'en résulte aucune entrave au bon fonctionnement de la distribution et que toutes les conditions du cahier des charges soient remplies.

Travaux.

ART. 4. — Les projets de tous les ouvrages dépendant de la concession devront être approuvés dans les formes prescrites par la loi du 15 juin 1906 et par le décret du 3 avril 1906.

ART. 5. — *Ouvrages à établir pour la distribution.* — Le réseau sera alimenté au moyen de postes centraux qui feront partie intégrante de la concession et seront situés à l'intérieur de son périmètre. Les ouvrages destinés à la production de l'énergie et à son transport jusqu'à chacun des postes centraux, ne seront plus soumis aux dispositions du présent cahier des charges et devront être établis, s'il y a lieu, en vertu de permissions ou de concessions distinctes données en conformité de la loi du 15 juin 1906.

Si l'Etat dispose, au moment de l'institution de la concession, d'un réseau de distribution déjà existant, il peut mettre ce réseau à la disposition du concessionnaire, à des conditions déterminées d'un commun accord. La redevance, s'il en est imposé une, peut être soit fixe, soit proportionnelle aux recettes brutes ou aux bénéfices réalisés par le concessionnaire.

ART. 7. — *Propriété des installations.* — Le concessionnaire est tenu d'acquérir les machines et l'outillage nécessaires à l'exploitation ou à la distribution d'énergie (ce dernier cas s'appliquant au concessionnaire ne produisant pas lui-même l'énergie). Le concessionnaire peut, à son choix, soit acquérir les terrains et établir à ses frais les constructions affectées au service de la distribution, soit à les prendre en location. Toutefois, l'Etat peut imposer au concessionnaire l'acquisition en toute propriété des immeubles destinés à l'établissement des usines de production et des sous-stations où le courant alternatif est transformé en courant continu. Pour l'établissement des ouvrages, l'Etat peut autoriser, par le cahier des charges, le concessionnaire à occuper, dans des conditions déterminées, les parties du domaine dont il a la disposition. Les baux ou contrats relatifs à toutes les locations d'immeubles sont communiqués au préfet; ils doivent comporter une clause réservant expressément à l'Etat la faculté de se substituer au concessionnaire en cas de rachat ou de déchéance

---

services publics autres que ceux situés dans la zone prévue à l'article 14 et à des particuliers.

L'article 5 prévoit à titre facultatif que le concessionnaire sera tenu de construire et de maintenir en bon état de service une ou plusieurs usines génératrices qui feront partie de la concession. Cette disposition n'est appliquée qu'à titre exceptionnel, et sauf le cas où il en sera fait application, les usines de production ne feront pas retour à l'État en fin de concession, ainsi qu'il est prévu à l'article 22.

La durée maxima des concessions est fixée à cinquante ans. Toutefois, s'il est reconnu que les conditions d'établissement et d'exploitation du réseau l'exigent, la durée de la concession pourra être augmentée. Mais alors ce sera une dérogation au cahier des charges-type qui devra être approuvée par un décret délibéré en Conseil d'État.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il en est de même pour tous les contrats de fournitures d'énergie, si le concessionnaire achète le courant.

ART. 8. — *Usines génératrices.* — Lorsque l'acte de concession prévoit la construction d'usines génératrices faisant partie intégrante de la concession, il détermine les conditions d'établissement de ces usines et, s'il y a lieu, des sous-stations et postes de transformateurs.

ART. 9. — *Tension et fréquence de la distribution.* — La tension de distribution fixée par cet article peut être différente suivant l'usage qui est fait de l'énergie ou suivant les communes ou parties de communes où elle est utilisée. La tolérance admise habituellement pour la tension de l'éclairage, ainsi que pour la fréquence du courant ne dépasse pas 5 0/0.

ART. 10. — *Canalisations.* — Les canalisations souterraines sont placées dans le sol ou dans des galeries accessibles. Aux traversées des chaussées, elles sont toujours sous trottoir, à moins d'une autorisation spéciale. A la traversée des chaussées fondées sur béton et des voies de tramways, des dispositions doivent être prises pour que le remplacement des canalisations soit possible sans ouverture de tranchée.

L'Etat peut interdire les canalisations aériennes; lorsqu'elles sont autorisées il convient d'indiquer si les canalisations peuvent êtres aériennes dans toute l'étendue de la concession ou sinon dans quelles parties elles ne peuvent pas l'être. L'Etat peut, en autorisant les canalisations aériennes, déterminer les conditions auxquelles sera soumis leur établissement. Le même article détermine, s'il y a lieu, les conditions auxquelles doivent satisfaire les branchements particuliers.

Tarifs et conditions du service.

ART. 11. — Le cahier des charges fixe les maxima de vente de l'énergie tant au compteur qu'à forfait pour l'éclairage et tous autres usages. Il peut stipuler des maxima différents suivant les conditions de puissance, d'horaire, d'utilisation de consommation; il peut notamment formuler des réductions pour les abonnés utilisant le courant à des heures ou pendant des saisons déterminées, et, d'une manière générale, pour les abonnés acceptant des sujétions spéciales. Pour la vente à forfait, la période peut être d'un an ou de durée différente. Enfin les tarifs et les conditions du service peuvent être différents suivant les communes desservies.

Si le concessionnaire abaisse pour certains abonnés les prix de vente de l'énergie pour l'éclairage électrique, avec ou sans conditions, au-dessous des limites fixées par le tarif maximum prévu ci-dessus, il sera tenu de faire bénéficier des mêmes réductions tous les abonnés placés dans les mêmes conditions de jouissance, d'horaire, d'utilisation, de consommation, de durée d'abonnement et de tarif maximum. A cet effet, il devra établir et tenir constamment à jour un relevé de tous les abaissements consentis, avec mention des conditions auxquelles ils sont subordonnés. Un exemplaire de ce relevé sera déposé dans chacun des bureaux où peuvent être contractés des abonnements, et tenu constamment à la disposition du public et des agents du contrôle.

ART. 12. — *Tarifs applicables aux services publics.* — La réduction sur le tarif maximum stipulé au profit des services publics de l'Etat, des départements et des communes ne peut être inférieure à 20 0/0.

Les établissements publics et les associations agricoles organisés par l'administration, en vertu des lois du 16 septembre 1807, du 14 floréal an XI et du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8 avril 1898 ou autorisés en conformité des lois des 21 juin 1865, 22 décembre 1888 bénéficient aussi d'une réduction.

ART. 13. — *Obligation de consentir des abonnements sur tout le parcours de la distribution.* — Le concessionnaire est tenu, sur tout le parcours de la distribution dans le délai d'un mois à partir de la demande qui lui en aura été faite, de fournir l'énergie électrique dans les conditions prévues au présent cahier des charges à toute personne qui demandera à contracter un abonnement pour un quantum stipulé. Lorsque la jouissance demandée excédera un certain nombre de kilowatts fixé, le concessionnaire peut exiger que le demandeur lui garantisse pendant un nombre n d'années une recette brute annuelle de n francs par kilowatt demandé.

Si le service du nouvel abonné exige des travaux complémentaires sur le réseau, le délai d'un mois prévu pour la fourniture du courant sera prolongé du temps nécessaire à l'exécution de ces travaux. En aucun cas le concessionnaire ne pourra être astreint à dépasser la puissance maxima de n kilowatts pour l'ensemble de la distribution. Si les demandes viennent à dépasser la puissance disponible, elles seront desservies dans l'ordre de leur inscription sur un registre spécial tenu à cet effet.

ART. 14. — *Obligation d'étendre le réseau.* — Le concessionnaire est tenu d'installer toute ligne pour laquelle un ou plusieurs des propriétaires des immeubles à desservir lui garantiront, pendant cinq ans, une recette brute annuelle fixée par mètre courant de canalisation aérienne ou une recette brute annuelle déterminée par mètre courant de canalisation souterraine, la longueur à établir étant comptée à partir du réseau déjà existant, sans y comprendre la longueur des branchements qui desserviront chaque immeuble.

Les projets de la ligne réclamée devront être présentés par le concessionnaire dans le délai d'un moins à partir de la demande qui lui en aura été faite. La ligne devra être achevée et mise en service dans un délai fixé sans qu'il puisse excéder six mois à dater de l'approbation des projets si sa longueur est inférieure à une certaine quantité de mètres, et dans un délai stipulé, si sa longueur est supérieure.

Le concessionnaire est dispensé de l'obligation d'étendre le réseau si les demandes d'abonnement dépassent la puissance disponible sur le maximum prévu à l'article 13 ci-dessus, lorsque la puissance à fournir par le concessionnaire est limitée par le cahier des charges.

ART. 15. — *Branchements et colonnes montantes.* — Les branchements sur les canalisations établies sur ou sous les voies publiques, ayant pour objet d'amener le courant du réseau à l'intérieur des immeubles desservis jusques et y compris soit la boîte du coupe-circuit principal, soit le poste de transformateur, sont installés et entretenus par le concessionnaire et font partie intégrante de la distribution. Les frais d'installation des branchements sont remboursés au concessionnaire par les propriétaires ou abonnés, conformément à un tarif annexé au cahier des charges.

Les propriétaires ou abonnés qui garantissent une certaine consommation par an pendant un nombre d'années sont dispensés du remboursement des frais d'installation des branchements, à condition d'y substituer le payement d'un loyer mensuel conformément à un tarif stipulé dans le cahier des charges.

Lorsque le loyer aura été payé pendant la période mentionnée ci-dessus, les frais d'installation de branchements seront considérés comme amortis et les abonnés desservis au moyen de ce branchement en jouiront gratuitement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les frais d'installation du branchement resteront entièrement à la charge du concessionnaire, si les propriétaires ou abonnés garantissent une consommation avec minima fixée de kilowatts-heures par an, pendant un nombre d'années déterminé.

Les branchements intérieurs, les colonnes montantes et toutes dérivations sont établis et entretenus par les soins et aux frais des propriétaires des immeubles.

Toutefois, si les propriétaires le requièrent, le concessionnaire est tenu d'exécuter et d'entretenir lui-même ces installations, moyennant une rémunération calculée conformément à un tarif annexé.

Les tarifs prévus au présent article sont revisables à toute époque par un accord entre l'autorité concédante et le concessionnaire.

ART. 16. — *Compteurs.* — Les compteurs servant à mesurer les quantités d'énergie livrées aux abonnés par le concessionnaire seront d'un des types approuvés par le ministre des Travaux publics, après avis du Comité d'électricité institué conformément à la loi du 15 juin 1906. Pour chaque type, le ministre déterminera la valeur des écarts dans la limite desquels les compteurs seront considérés comme exacts.

Les compteurs sont posés, plombés et entretenus par le concessionnaire.

L'abonné a la faculté de les fournir lui-même ou de demander au concessionnaire de les fournir en location.

L'Etat peut spécifier que la fourniture du compteur sera toujours faite par le concessionnaire. Dans ce cas, les quatre derniers alinéas de l'article 16 seront remplacés par un paragraphe unique ainsi conçu : « Les compteurs seront fournis, posés, plombés et entretenus par le concessionnaire, qui percevra, à titre de rémunération pour ce service, une somme mensuelle de ... »

Si le compteur appartient à l'abonné, le concessionnaire percevra, à titre de frais de pose, une somme fixée et, à titre de frais d'entretien, une somme mensuelle aussi fixée.

Si le compteur est fourni par le concessionnaire, celui-ci percevra, à titre de frais de pose, une somme déterminée, et à titre de frais de location et d'entretien, une somme mensuelle aussi déterminée d'après la puissance et la nature des appareils.

ART. 17. — *Vérification des compteurs.* — Le concessionnaire peut procéder à la vérification des compteurs aussi souvent qu'il le juge utile, sans que cette vérification donne lieu à son profit à aucune allocation en sus des frais d'entretien mentionnés à l'article précédent.

L'abonné aura toujours le droit de demander la vérification du compteur, soit par le concessionnaire, soit par un expert désigné d'un commun accord, ou, à défaut d'accord, désigné par l'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique. Les frais de la vérification seront à la charge de l'abonné, si le compteur est reconnu exact ou si le défaut d'exactitude est à son profit; ils seront à la charge du concessionnaire si le défaut d'exactitude est au détriment de l'abonné.

ART. 18. — *Police d'abonnement.* — Les contrats pour la fourniture de l'énergie électrique sont établis sous la forme de polices d'abonnement, conformes aux modèles arrêtés d'accord entre le représentant de l'autorité concédante désigné par le ministre et le concessionnaire. Il ne pourra être dérogé aux dispositions contenues dans ces modèles que par une convention spéciale entre le concessionnaire et l'abonné, soumises aux conditions stipulées dans l'article 11 ci-dessus.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le cas où il y aurait lieu, au cours de la concession, d'apporter des modifications aux modèles de police, à défaut d'accord entre le représentant de l'autorité concédante désigné comme il est dit ci-dessus et le concessionnaire, il serait statué par le ministre des Travaux publics après avis du Comité d'Electricité.

L'abonné est tenu, sur la demande du concessionnaire, de lui verser, à titre d'avance sur consommation, une somme qui ne peut être supérieure à celle fixée dans le cahier des charges par hectowatt de puissance du compteur.

Cette avance n'est pas productive d'intérêt et est remboursable à l'expiration de l'abonnement.

ART. 19. — *Surveillance des installations intérieures.* — Le courant ne sera livré aux abonnés que s'ils se conforment, pour leurs installations intérieures, aux mesures qui leur seront imposées par le concessionnaire, avec l'approbation de l'ingénieur en chef du contrôle, en vue soit d'empêcher les troubles dans l'exploitation, notamment les défauts d'isolement et la mise en marche ou l'arrêt brusque des moteurs électriques, soit d'empêcher l'usage illicite du courant, soit d'éviter une déperdition exagérée d'énergie dans les branchements et colonnes montantes avant les compteurs.

Le concessionnaire sera autorisé, à cet effet, à vérifier, à toute époque, l'installation intérieure de chaque abonné.

Si l'installation est reconnue défectueuse, le concessionnaire pourra se refuser à continuer la fourniture du courant. En cas de désaccord sur les mesures à prendre en vue de faire disparaître toute cause de danger ou de trouble dans le fonctionnement général de la distribution, il sera statué par l'ingénieur en chef du contrôle, sauf recours au ministre des Travaux publics, qui décidera après avis du Comité d'Electricité.

En aucun cas, le concessionnaire n'encourra de responsabilités à raison des défectuosités des installations qui ne seront pas de son fait.

ART. 20. — *Conditions particulières du service.* — Cet article indique si l'énergie doit être à la disposition des abonnés en permanence ou si le service peut être normalement suspendu à des heures déterminées qui peuvent être variables suivant les saisons.

Durée de la concession, rachat et déchéance.

ART. 21. — La durée de la concession ne peut être supérieure à 40 ans ; elle commence à courir de la date de son approbation définitive. Lorsque la concession a pour objet l'extension d'une concession déjà existante, elle doit prendre fin à la même date que la concession principale, et l'article 21 détermine la date d'expiration pour l'ensemble du réseau.

ART. 22. — *Reprise des installations en fin de concession.* — A l'époque fixée pour l'expiration de la concession, l'Etat a, moyennant un préavis de deux ans, la faculté de se subroger aux droits du concessionnaire et de prendre possession de tous les immeubles et ouvrages de la distribution et de ses dépendances.

Si l'Etat use de cette faculté, les usines, sous-stations et postes transformateurs, le matériel électrique et mécanique ainsi que les canalisations et branchements faisant partie de la concession lui seront remis gratuitement, et il ne sera attribué d'indemnité au concessionnaire que pour la portion du coût de ces installations qui sera considérée comme n'étant pas amortie. Cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indemnité sera égale aux dépenses dûment justifiées, supportées par le concessionnaire pour l'établissement de ceux des ouvrages ci-dessus énumérés subsistant en fin de concession qui auront été régulièrement exécutés pendant les n dernières années de la concession, sauf déduction pour chaque ouvrage de $1/n$ de sa valeur pour chaque année écoulée depuis son achèvement. L'indemnité sera payée au concessionnaire dans les six mois qui suivront l'expiration de la concession.

En ce qui concerne le mobilier et les approvisionnements, l'Etat se réserve le droit de les reprendre en totalité ou pour telle partie qu'il jugera convenable, mais sans pouvoir y être contraint. La valeur des objets repris sera fixée à l'amiable ou à dire d'experts, et payée au concessionnaire dans les six mois qui suivront leur remise à l'Etat.

Si l'Etat ne prend pas possession de la distribution, le concessionnaire sera tenu d'enlever à ses frais et sans indemnité toutes celles de ses installations qui se trouvent sur ou sous les voies publiques; il pourra toutefois abandonner sans indemnité les canalisations souterraines, à condition qu'elles n'apportent aucune gêne aux services publics.

Dans tous les cas, l'Etat aura la faculté, sans qu'il en résulte un droit à indemnité pour le concessionnaire, de prendre pendant les six derniers mois de la concession toutes mesures utiles pour assurer la continuité de la distribution de l'énergie en fin de concession, en réduisant au minimum la gêne qui en résultera pour le concessionnaire. Il pourra notamment, si les sous-stations et postes de transformateurs n'appartiennent pas en propre au concessionnaire ou si celui-ci ne produit pas le courant dans des usines faisant partie de la concession, desservir directement les abonnés par des sous-stations ou postes de transformateurs nouveaux, en percevant à son profit le prix de vente de l'énergie, et, d'une manière générale, prendre toutes les mesures nécessaires pour effectuer le passage progressif de la concession ancienne à une concession ou à une entreprise nouvelle.

Art. 23. — *Rachat de la concession.* — A toute époque, l'Etat a le droit de racheter la concession entière, moyennant un préavis de deux ans.

En cas de rachat, le concessionnaire recevra pour toute indemnité :

1° Pendant chacune des années restant à courir jusqu'à l'expiration de la concession, une annuité égale au produit net moyen des sept années d'exploitation précédant celle où le rachat sera effectué, déduction faite des deux plus mauvaises.

Le produit net de chaque année sera calculé en retranchant des recettes toutes les dépenses, dûment justifiées, faites pour l'exploitation de la distribution, y compris l'entretien et le renouvellement des ouvrages et du matériel, mais non compris les charges du capital ni l'amortissement des dépenses de premier établissement.

Dans aucun cas, le montant de l'annuité ne sera inférieur au produit net de la dernière des sept années prises pour terme de comparaison.

2° Une somme égale aux dépenses dûment justifiées, supportées par le concessionnaire pour l'établissement de ceux des ouvrages de la concession subsistant au moment du rachat, qui auront été régulièrement exécutés pendant les n années précédant le rachat, sauf déduction pour chaque ouvrage de $1/n$ de sa valeur pour chaque année écoulée depuis son achèvement.

L'Etat sera, en outre, tenu de se substituer au concessionnaire pour l'exécution des engagements pris par lui en vue d'assurer la marche normale de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'exploitation, et de reprendre les approvisionnements en magasin ou en cours de transport ainsi que le mobilier et la distribution ; la valeur des objets repris sera fixée à l'amiable ou à dire d'experts et sera payée au concessionnaire dans les six mois qui suivront leur remise à l'Etat.

Si le rachat a lieu avant l'expiration des vingt premières années de la concession, le concessionnaire pourra demander que l'indemnité, au lieu d'être calculée comme il est dit ci-dessus, soit égale aux dépenses réelles de premier établissement, y compris les frais de constitution de la Société dans la limite d'un maximum de *n* francs et les insuffisances qui se seraient produites depuis l'origine de la concession, si celle-ci remonte à moins de sept ans, et pendant les sept premières années de sa durée, si elle remonte à plus de sept ans. Ces insuffisances seront calculées pour chaque année en prenant la différence entre la recette brute et les charges énumérées ci-après : 1° frais d'exploitation ; 2° intérêt et amortissement des emprunts contractés pour l'établissement de la distribution ; 3° intérêt à 5 0/0 des sommes fournies par le concessionnaire au moyen de ses propres ressources ou de son capital-actions.

ART. 24. — *Remise des ouvrages.* — En cas de rachat ou en cas de reprise à l'expiration de la concession, le concessionnaire sera tenu de remettre à l'Etat tous les ouvrages et le matériel de la distribution en bon état d'entretien.

L'Etat pourra retenir, s'il y a lieu, sur les indemnités dues au concessionnaire, les sommes nécessaires pour mettre en bon état toutes les installations.

Lorsque l'Etat usera de la faculté, à lui réservée, de reprendre les installations en fin de concession, il pourra se faire remettre les revenus de la distribution dans les deux dernières années qui précéderont le terme de la concession et les employer à rétablir en bon état les installations, si le concessionnaire ne se met pas en mesure de satisfaire pleinement et entièrement à cette obligation et si le montant de l'indemnité à prévoir en raison de la reprise de la distribution par l'Etat, joint au cautionnement, n'est pas jugé suffisant pour couvrir les dépenses des travaux reconnus nécessaires.

ART. 25. — *Déchéance et mise en régie provisoire.* — Si le concessionnaire n'a pas présenté les projets d'exécution, ou s'il n'a pas achevé et mis en service les lignes de distribution dans les délais et conditions fixés par le cahier des charges, il encourra la déchéance, qui sera prononcée, après mise en demeure, par décret, sauf recours au Conseil d'Etat par la voie contentieuse.

Si la sécurité publique vient à être compromise, le préfet, après avis de l'ingénieur en chef du contrôle, prendra aux frais et risques du concessionnaire les mesures provisoires nécessaires pour prévenir tout danger. Il soumettra au ministre des Travaux publics les mesures qu'il aura prises à cet effet. Le ministre prescrira, s'il y a lieu, les modifications à apporter à ces mesures et adressera au concessionnaire une mise en demeure fixant le délai à lui imparti pour assurer à l'avenir la sécurité de l'exploitation.

Si l'exploitation vient à être interrompue en partie ou en totalité, il y sera également pourvu aux frais et risques du concessionnaire. Le préfet soumettra immédiatement au ministre des Travaux publics les mesures qu'il compte prendre pour assurer provisoirement le service de la distribution. Le ministre statuera sur ces propositions et adressera une mise en demeure fixant un délai au concessionnaire pour reprendre le service.

Si, à l'expiration du délai imparti, dans les cas prévus aux deux alinéas qui précèdent, il n'a pas été satisfait à la mise en demeure, la déchéance pourra être prononcée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La déchéance pourra également être prononcée si le concessionnaire, après mise en demeure, ne reconstitue pas le cautionnement prévu à l'article 31 ci-après, dans le cas où des prélèvements auraient été effectués sur ce cautionnement en conformité des dispositions du cahier des charges.

La déchéance ne serait pas encourue dans le cas où le concessionnaire n'aurait pu remplir ses obligations par suite de circonstances de force majeure dûment constatées.

ART. 26. — *Procédure en cas de déchéance.* — Dans le cas de déchéance, il sera pourvu tant à la continuation et à l'achèvement des travaux qu'à l'exécution des autres engagements du concessionnaire au moyen d'une adjudication qui sera ouverte sur une mise à prix des projets, des terrains acquis, des ouvrages exécutés, du matériel et des approvisionnements.

Cette mise à prix sera fixée par le ministre des Travaux publics sur la proposition du préfet, après avis du Conseil municipal, le concessionnaire entendu.

Nul ne sera admis à concourir à l'adjudication s'il n'a, au préalable, été agréé par le ministre des Travaux publics, et s'il n'a fait, soit à la Caisse des dépôts et consignations, soit à la Trésorerie générale du département, un dépôt de garantie égal au montant du cautionnement prévu par le présent cahier des charges.

L'adjudication aura lieu suivant les formes indiquées aux articles, 11, 12, 13, 15 et 16 de l'ordonnance royale du 10 mai 1829.

L'adjudicataire sera tenu aux clauses du présent cahier des charges et substitué aux droits et charges du concessionnaire évincé, qui recevra le prix de l'adjudication.

Si l'adjudication ouverte n'amène aucun résultat, une seconde adjudication sera tentée sans mise à prix après un délai de trois mois. Si cette seconde tentative reste également sans résultat, le concessionnaire sera définitivement déchu de tous droits ; les ouvrages et le matériel de la distribution ainsi que les approvisionnements deviendront sans indemnité la propriété de l'Etat.

Clauses diverses.

ART. 27. — *Redevances.* — Les redevances pour l'occupation du domaine public national et départemental sont fixées conformément aux articles 1 et 2 du décret du 17 octobre 1907.

Il en est de même des redevances pour l'occupation du domaine public communal, à moins que des accords spéciaux ne soient intervenus entre certaines communes et le concessionnaire, conformément à l'article 3 du dit décret.

ART. 28. — *Etats statistiques et contrôle des recettes.* — Le concessionnaire est tenu de remettre chaque année à l'ingénieur en chef du contrôle un compte rendu statistique de son exploitation.

Ce compte rendu est établi conformément au modèle arrêté par le ministre des Travaux publics après avis du Comité d'électricité et pourra être publié en tout ou en partie.

Pour les communes avec lesquelles des accords auront été passés conformément à l'article 27 ci-dessus, le concessionnaire devra, en outre, adresser à l'ingénieur en chef du contrôle, dans le courant du premier trimestre de chaque année, l'état des recettes réalisées pendant l'année précédente.

L'ingénieur en chef aura le droit de contrôler ces états ; à cet effet, les agents du contrôle dûment accrédités pourront se faire présenter toutes pièces de comptabilité nécessaires pour leur vérification.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ART. 29 — *Impôts et droits d'octroi.* — Tous les impôts établis ou à établir par l'Etat, les départements ou les communes, y compris les impôts relatifs aux immeubles de la distribution, sont à la charge du concessionnaire.

ART. 30. — *Pénalités.* — Faute par le concessionnaire de remplir les obligations qui lui sont imposées par le présent cahier des charges, des amendes pourront lui être infligées, sans préjudice, s'il y a lieu, de dommages et intérêts envers les tiers intéressés. Les amendes seront prononcées au profit de l'Etat par le préfet, après avis de l'ingénieur en chef du contrôle.

Les amendes seront appliquées dans les conditions suivantes :

En cas d'interruption générale non justifiée du courant, amende de *n* francs par heure d'interruption ;

En cas de manquement aux obligations imposées par les articles 6, 9, 13, 14 et 28 du présent cahier des charges, et par chaque infraction, amende de *n* francs par jour, jusqu'à ce que l'infraction ait cessé.

ART. 31. — *Cautionnement.* — Avant la signature de l'acte de concession, le concessionnaire doit déposer, soit à la Caisse des dépôts et consignations, soit à la Trésorerie générale du département, une somme déterminée en numéraire ou en rentes sur l'Etat, en obligations garanties par l'Etat ou en bons du Trésor, dans les conditions prévues par les lois et règlements pour les cautionnements en matière de travaux publics.

La somme ainsi versée formera le cautionnement de l'entreprise.

Sur le cautionnement seront prélevés le montant des amendes stipulées à l'article 30, ainsi que les dépenses faites en raison des mesures prises aux frais du concessionnaire pour assurer la sécurité publique ou la reprise de l'exploitation en cas de suspension, conformément aux prescriptions du présent cahier des charges.

Toutes les fois qu'une somme quelconque aura été prélevée sur le cautionnement, le concessionnaire devra le compléter à nouveau dans un délai de quinze jours, à dater de la mise en demeure qui lui sera adressée à cet effet.

La moitié du cautionnement sera restituée au concessionnaire après achèvement du réseau principal de distribution prévu à l'article 6 ci-dessus ; l'autre moitié lui sera restituée en fin de concession. Toutefois, en cas de déchéance, la partie non restituée du cautionnement restera définitivement acquise à l'Etat.

ART. 32. — *Agents du concessionnaire.* — Les agents et gardes que le concessionnaire aura fait assermenter pour la surveillance et la police de la distribution et de ses dépendances seront porteurs d'un signe distinctif et seront munis d'un titre constatant leurs fonctions.

ART. 33. — *Cession et modification de la concession.* — Toute cession partielle ou totale de la concession, tout changement de concessionnaire ne pourront avoir lieu, à peine de déchéance, qu'en vertu d'une autorisation donnée par le préfet ou par le ministre des Travaux publics, suivant les distinctions établies par l'article 7 de la loi du 15 juin 1906, paragraphe 1er.

ART. 34. — *Jugement des contestations.* — Les contestations entre le concessionnaire et l'Administration, au sujet de l'exécution et de l'interprétation des clauses du présent cahier des charges, sont du ressort des Conseils de préfecture, sauf recours au Conseil d'État.

702. Circulaire ministérielle du 5 septembre 1908. — Cette circulaire a pour objet d'abroger l'instruction ministérielle du 1er février 1907

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de rendre réglementaires deux nouveaux modèles, un modèle d'arrêté préfectoral autorisant la traversée des voies ferrées, et un modèle de l'état de renseignements à fournir par le pétitionnaire.

Le ministre rappelle que la traversée des voies ferrées par les canalisations électriques est réglementée : 1° au point de vue administratif, par l'article 54 du décret du 3 avril 1908 ; et 2° au point de vue technique par l'arrêté du 21 mars 1908.

La pétition signalée ci-dessus peut être présentée dans des conditions différentes, suivant la nature et l'importance de la distribution d'énergie à la traversée des lignes de chemins de fer. La distribution d'énergie peut être déjà autorisée par des actes antérieurs ou faire l'objet d'une demande d'autorisation en même temps que la pétition concernant la traversée d'un chemin de fer, ou enfin appartenir à la catégorie des distributions qui n'empruntent aucune voie publique proprement dite, ne s'approchent à moins de 10 mètres d'aucune ligne télégraphique ou téléphonique.

Le projet d'arrêté établi par le service du contrôle des chemins de fer doit, avant d'être transmis au préfet, être soumis au service du contrôle des distributions d'énergie électrique du département et au service des télégraphes.

Les règles indiquées dans le modèle d'état joint à la circulaire s'appliquent seulement au cas où les canalisations électriques traversent les voies ferrées et non au cas où elles empruntent ces voies ferrées sur une certaine longueur ; dans ce dernier cas, on doit appliquer l'article 8 du décret du 3 avril 1908. Au point de vue de l'expression « avant de statuer » qui entre dans la rédaction de cet article 8, ces mots font allusion non à la décision qui doit être prise pour l'emprunt du chemin de fer, mais à la décision que l'autorité préfectorale doit prendre pouvant autoriser l'ensemble de la distribution projetée. Le ministre explique que l'emprunt d'une emprise de voie ferrée par une distribution d'énergie ne peut être autorisée qu'exceptionnellement, et ensuite d'une décision ministérielle.

703. Circulaire ministérielle du 15 septembre 1908, *relative au décret du 17 octobre 1907. — Contrôles et redevances. — Délimitation des contrôles.* — Ladite circulaire précise que le contrôle de l'Administration des Travaux publics ne s'exerce que sur les distributions proprement dites (canalisations, transformations, sous-stations et ouvrages de toute nature qui servent à transporter ou à transformer le courant depuis les usines de production jusqu'aux usines d'utilisation ou jusqu'aux immeubles particuliers), et que tous les autres ouvrages, et notamment les usines de production relèvent du Ministère du Travail. Dans les installa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions comportant à la fois des ouvrages de distribution et des ouvrages de production où le caractère d'usine prédomine (telle qu'une sous-station de transformation de courant alternatif en courant continu qui comprend des moteurs à vapeur ou hydrauliques produisant normalement du courant) l'installation tout entière est placée dans les attributions du Ministère du Travail.

Toute distribution qui emprunte, ne fût-ce qu'en un point, le domaine public est placée, en toutes ses parties, sous le contrôle du Ministère des Travaux publics.

Les distributions établies exclusivement sur des terrains privés, affectées à un usage industriel, rentrent dans les attributions du Ministère du Travail.

Les usines de production d'énergie affectées au service des chemins de fer et tramways tombent sous le contrôle de l'Administration des Travaux publics en ce qui concerne l'hygiène et la sécurité des travailleurs. Les usines génératrices qui sont destinées à produire du courant pour d'autres usages industriels ou commerciaux sont placés dans les attributions du Ministère du Travail.

Toutes les distributions, sans distinction (aussi bien les ouvrages de transport que les ouvrages proprement dits, et même les ouvrages particuliers), sont soumises aux dispositions de la loi du 15 juin 1906. Au point de vue de la délimitation des distributions, tout ensemble de canalisations et d'ouvrages reliés entre eux et parcourus par un même courant électrique doit être considéré comme une seule et même distribution, à la condition que ces canalisations et ouvrages soient autorisés par une décision unique de l'autorité compétente, ou par des décisions connexes. Ainsi une ligne de transport à haute tension et toutes les lignes secondaires qu'elle alimente forment une seule distribution, à condition que ces lignes ne soient établies que par une permission de voirie. Si, au contraire, les lignes secondaires sont établies en vertu de concessions municipales ou d'État, l'ensemble des canalisations et ouvrages forme des distributions distinctes, à savoir la ligne de transformation et ses annexes, et les distributions concédées. Ces considérations permettent de déterminer dans chaque cas la compétence des divers services de contrôle, et la limite des attributions de ces services est formée par la limite même des concessions envisagées.

Frais de contrôle. — Les frais de contrôle spécifiés aux articles 9 et 17 du décret du 17 octobre 1907 ne s'excluent pas l'un l'autre ; leur perception, au contraire, s'ajoute l'une à l'autre.

Les installations électriques intérieures des tramways, notamment des fils de trolley, sont placées, par le décret du 17 octobre 1907, dans les attributions du service du contrôle des tramways, et ne donnent lieu à aucune

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

perception. Quant aux canalisations amenant le courant à la ligne de tramway, si ces canalisations sont utilisées en même temps pour la distribution d'énergie aux particuliers, ou si elles constituent par leur étendue et leur emplacement, de véritables distributions *extérieures* au tramway, elles donnent lieu à la perception des frais de contrôle, et ceux-ci sont calculés d'après la longueur des canalisations, à l'exclusion des branchements et des sections situés sur des terrains particuliers.

Lorsque les contraventions et infractions tombant sous le coup des articles 24 et 25 de la loi du 15 juin 1906 consistent dans les actes ou omissions dus à une faute consciente, il y a lieu de dresser immédiatement procès-verbal. S'il n'y a pas faute consciente, les fonctionnaires doivent d'abord adresser aux intéressés un avertissement pour leur signaler la contravention ou l'infraction qu'ils ont commise et leur enjoindre de la faire cesser.

Redevances pour occupation du domaine public. — Doivent être taxées au tarif simple (art. 1er du décret du 17 octobre 1907) les parties non productives des lignes alimentant des services publics, c'est-à-dire les parties qui servent au transport de l'énergie. Sont, au contraire, soumises au tarif double (art. 2) : d'une part, les lignes productives (ouvrages de distribution) des lignes alimentant les services publics ; d'autre part, l'ensemble (ouvrages de transport et de distribution) des lignes qui n'ont pour objet aucun service public. [redacted]

704. Circulaire du ministre des Travaux publics, en date du 18 novembre 1908, *relative à l'état des renseignements à joindre à une demande en autorisation pour les ouvrages de distribution d'énergie électrique à établir exclusivement sur les terrains privés, mais à moins de* 10 *mètres de distance horizontale d'une ligne télégraphique ou téléphonique préexistante.*

Je soussigné (1) , demeurant à et faisant élection de domicile à , rue , n° , voulant établir des ouvrages de distribution d'énergie électrique exclusivement sur des terrains privés, mais à moins de 10 mètres de distance horizontale d'une ligne télégraphique ou téléphonique préexistante.

Lesdits ouvrages de distribution d'énergie électrique étant destinés à. . .

Déclare fournir les renseignements suivants, en conformité de l'article 1er du décret du 3 avril 1908, et à l'appui de ma demande en date du. . . . .

(1) Nom et prénoms.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LIGNE OU RÉSEAU DE A .

DEMANDES	RÉPONSES
I. — *Système de distribution.*	
Définition du système, et en particulier le nombre de fils.....	

II. — *Voisinage des lignes télégraphiques ou téléphoniques*

1. Indiquer les sections où les conducteurs d'énergie électrique aériens seront établis dans la zone de 10 mètres en projection horizontale située de chaque côté d'une ligne télégraphique ou téléphonique et donner pour chacune de ces sections : 1° l'intensité et la tension du courant circulant ; 2° la distance minima auxdites lignes télégraphiques et téléphoniques.

2. Indiquer les points de croisement des conducteurs d'énergie électrique aériens avec des lignes télégraphiques ou téléphoniques et faire connaître, pour chacun de ces points, les précautions prises pour éviter tout contact éventuel entre les conducteurs d'énergie électrique et les fils télégraphiques ou téléphoniques dans les deux cas suivants :

SECTIONS (1)	INTENSITÉ maxima du courant circulant dans la section	TENSION maxima du courant circulant dans la section (2)	DISTANCE minima

POINTS DE CROISEMENT	PRÉCAUTIONS PRISES

A. Cas de courants alternatifs de tension supérieure à 150 volts ou de courants continus de tension supérieure à 600 volts.

B. Cas de courants alternatifs de tension égale ou inférieure à 150 volts ou de courants continus de tension égale ou inférieure à 600 volts.

3. Indiquer les sections où la canalisation souterraine d'énergie électrique est établie dans la zone de 10 mètres en projection horizontale d'une conduite télégraphique ou téléphonique et faire connaître pour chacune de ces sections : 1° l'intensité et la tension du courant circulant ; 2° la distance minima auxdites lignes télégraphiques ou téléphoniques.

Définir le mode de cloisonnement dans le cas où les conducteurs souterrains d'énergie électrique, suivant une direction commune avec une ligne télégraphique ou téléphonique souterraine, sont établis en tranchée à une distance de moins de 1 mètre de cette ligne.

SECTIONS (1)	INTENSITÉ maxima du courant circulant dans la section	TENSION maxima du courant circulant dans la section (2)	DISTANCE minima	NATURE de la cloison dans le cas de canalisations souterraines distantes de moins de 1m

(1) Les extrémités de chaque section devront être désignées par des lettres correspondantes sur le plan joint à la demande.

(2) Indiquer s'il s'agit de courants alternatifs ou continus. Dans le cas de courants alternatifs, la tension à déclarer est la plus grande valeur que pourra atteindre la différence de potentiel efficace entre les conducteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DEMANDES	RÉPONSES	
	POINTS	DISTANCE MINIMA
II. — *Voisinage des lignes télégraphiques ou téléphoniques* (suite)		
4. Indiquer les points de croisement de la canalisation souterraine d'énergie électrique avec les conduites souterraines télégraphiques ou téléphoniques et faire connaître, pour chacun de ces points, la distance minima auxdites conduites télégraphiques ou téléphoniques.		
	POINTS	PRÉCAUTIONS PRISES
5. Indiquer les précautions spéciales prises pour éviter les dérivations à ceux de ces points pour lesquels la distance est inférieure à 0m,50.		
6. Indiquer les précautions prises pour éviter l'induction.		
7. Indiquer les parties du réseau qui ne sont pas constituées par des conducteurs voisins parcourus par des courants égaux et de sens contraire.		
III. — *Contrôle*		
Moyens mis par le déclarant à la disposition du Service des Postes et des Télégraphes, soit dans l'usine, soit sur les sections établies dans une zone de 10 mètres en projection horizontale de chaque côté d'une ligne télégraphique ou téléphonique, pour mettre ce service en mesure de se rendre compte des données électriques du courant circulant sur ces sections.		

J'indique ci-dessous, sur le croquis explicatif du système de distribution, les sections des conducteurs et les intensités des courants dans les diverses branches du circuit, quand le réseau fonctionnera à pleine puissance.

J'indique également sur ce croquis les sections de lignes télégraphiques ou téléphoniques, aériennes ou souterraines, qui seront placées dans la zone de 10 mètres et leurs distances aux conducteurs d'énergie électrique dont je demande l'établissement.

(Croquis) A , le (1).

(1) Lieu, date et signature.

Modèles d'états annexés à la circulaire de M. le Ministre des Travaux Publics, des Postes et des Télégraphes du 30 mars 1908

(1)

MINISTÈRE des TRAVAUX PUBLICS des POSTES et TÉLÉGRAPHES

1re SECTION TRAVAUX PUBLICS

PERSONNEL

3e Bureau

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE — ANNÉE 19

DÉPARTEMENT D

Remboursement des frais de contrôle des distributions d'énergie électrique

TITRE DE PERCEPTION N°

ÉTAT DES SOMMES DUES

en vertu de l'article 12 (§ 1er) *du décret du* 17 *octobre* 1907
à recouvrer par M. le Trésorier-Payeur général du département d

NOMS et domicile du débiteur	DATE et nature de l'autorisation	DÉSIGNATION des lignes de distribution (pour chaque permission ou concession)	LONGUEUR DES LIGNES			SOMMES A RECOUVRER		OBSERVATIONS
			en construction	en exploitation	totale	par kilomètre	totales	

Dressé par l'Ingénieur en chef soussigné,
A , *le* 190 ,

Arrêté le présent état à la somme (en lettres)
A , *le* 190 ,
Le préfet du département d

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(2)

MINISTÈRE
des
TRAVAUX PUBLICS
des
POSTES et TÉLÉGRAPHES

1re SECTION
TRAVAUX PUBLICS

PERSONNEL

3e Bureau

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE — ANNÉE 19

DÉPARTEMENT D

Remboursement des frais de contrôle des distributions d'énergie électrique

ÉTAT DE RÉDUCTION DE TITRE DE PERCEPTION

DÉSIGNATION de la partie intéressée	TITRE DE PERCEPTION			RÉDUCTION à opérer	MONTANT définitif du titre	MOTIF de la réduction
	Numéro	Date	Montant			

Dressé par l'Ingénieur en chef, soussigné,
A , *le* 190 ,

Approuvé,
A , *le* 19 ,
Le Préfet du département,

(3)

MINISTÈRE
des
TRAVAUX PUBLICS
des
POSTES et TÉLÉGRAPHES

1re SECTION
TRAVAUX PUBLICS

PERSONNEL

3e Bureau

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE — ANNÉE 19

DÉPARTEMENT D

Contrôle des distributions d'énergie électrique

RELEVÉ SOMMAIRE

des états de frais de contrôle délivrés du 1er janvier au 31 décembre 19 ,
en exécution de l'article 12 (§ Ier) du décret du 17 octobre 1907

NUMÉROS d'ordre	DATE des états de frais	DÉSIGNATION des parties versantes	MONTANT des états de frais	RÉDUCTION	RESTE	SOMMES recouvrées au 31 décembre 190	OBSERVATIONS
		Total....					

Dressé par l'Ingénieur en chef soussigné,
A , *le* 190 .

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

705. Circulaire du ministre des Travaux publics du 13 mars 1909, *relative aux frais de contrôle.*

A Monsieur l'Ingénieur en chef du Contrôle des distributions d'énergie électrique.

En signalant à l'Administration les difficultés auxquelles donne lieu, dans leur service, la préparation de l'état de remboursement des frais de contrôle dus à l'Etat, en vertu du décret du 17 octobre 1907, par les permissionnaires ou concessionnaires des distributions d'énergie électrique, plusieurs ingénieurs en chef ont demandé à être fixés sur les points suivants :

1° Nonobstant les résistances des entrepreneurs de distributions d'énergie, les distributions établies antérieurement au décret du 17 octobre 1907 sont-elles soumises au versement des frais de contrôle ?

2° Quel est le point de départ desdits frais pour ces distributions ?

Il me paraît utile de porter à votre connaissance la décision que j'ai prise à ce sujet, sur l'avis de la Commission des distributions d'énergie électrique.

En ce qui concerne la première question posée, il y a lieu de distinguer les distributions établies par permissions de voirie ou en vertu de concessions, et les frais de contrôle dus à l'Etat de ceux qui reviennent aux communes.

Les frais de contrôle constituent une taxe nouvelle créée par la loi du 15 juin 1906 et immédiatement applicable à l'industrie électrique comme le contrôle lui-même qu'elle a pour objet de rémunérer. Ils sont, par suite, exigibles pour toutes les entreprises concédées ou munies de permissions de voirie, qu'elles soient antérieures ou non à la loi du 15 juin 1906, et ce, dans les conditions suivantes :

a) Si les distributions sont établies par permissions de voirie, les frais sont dus à l'Etat et aux communes.

b) Si les distributions sont installées en vertu de concessions, la part des frais dus à l'Etat doit toujours être perçue.

En ce qui concerne les communes, deux cas se présentent :

Ou bien l'acte de concession n'a rien spécifié à l'égard des frais de contrôle. Dans ce cas, les communes sont en droit d'en poursuivre le recouvrement dans les conditions fixées à l'article 11 du décret du 17 octobre 1907.

Ou bien le cahier des charges a déterminé les frais de contrôle. Dans ce cas le contrat intervenu doit recevoir son plein effet, et les frais qui y sont inscrits doivent être maintenus purement et simplement, quand bien même la perception stipulée au profit des communes serait supérieure à la perception autorisée par l'article 11 du décret susvisé.

En ce qui regarde la seconde question, il y a lieu de considérer que, à la date du 28 novembre 1907, un arrêté de principe a chargé les ingénieurs en chef du service ordinaire de chaque département d'exercer le contrôle des distributions d'énergie électrique, et qu'ainsi les services de contrôle ont été organisés avant le 1er janvier 1908. On peut donc adopter uniformément cette date comme point de départ de la taxation des frais de contrôle.

Le taux à appliquer pour chaque ligne doit être fixé :

a) En ce qui concerne les distributions postérieures à la loi, par le régime d'autorisation de chaque ligne, en conformité des prescriptions de la circulaire du 15 septembre 1908.

b) En ce qui concerne les distributions antérieures à la loi, par le régime d'autorisation que la ligne aurait si on lui faisait application des principes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

posés par la loi du 15 juin 1906 et par le décret du 17 octobre 1907 sur les frais de contrôle.

706. Circulaire du ministre des Travaux publics du 16 mars 1909, *relative aux redevances dues pour l'occupation du domaine public.*

A. — Distributions établies avant la promulgation de la loi du 15 juin 1906

1° *Distributions établies en vertu de permissions de voirie.*

I. *Sur la grande voie nationale ou départementale.* — Les redevances fixées par le décret du 17 octobre 1907 sont applicables dès l'époque où les conditions fiscales de ces permissions sont susceptibles d'être revisées, c'est-à-dire :

a) Aux dates fixées par les arrêtés d'autorisation sur la grande voirie nationale ou départementale, lorsque ces arrêtés ont prévu cette revision ;

b) Ou, lorsqu'ils n'ont fixé aucune date, à l'expiration du délai de 5 ans résultant de l'application de l'article 4 de l'arrêté interministériel du 3 août 1878, pour la grande voirie nationale, ou du délai qui peut être fixé par l'article 26 de l'arrêté réglementaire du 15 septembre 1893, pour les routes départementales.

II. *Sur des voies faisant partie du domaine public communal.* — 1° Si les permissions de voirie comportent des redevances, il y a lieu de les appliquer jusqu'à l'époque où les conditions fiscales de ces permissions sont susceptibles d'être revisées, c'est-à-dire aux dates fixées par les arrêtés d'autorisation, lorsque ces arrêtés ont prévu cette revision ;

2° Si les permissions de voirie ne comportent ni conditions ni délais pour la revision des redevances, la loi du 15 juin 1906 et ses annexes, notamment le décret du 17 octobre 1907 (Redevances), n'apportent aucune modification aux permissions de voirie accordées antérieurement.

2° *Distributions établies en vertu de concessions.*

III. *Concessions communales accordées avant la promulgation de la loi du 15 juin* 1906. — *a*) Lorsqu'elles ne comportent pas de canalisations autorisées par permissions de voirie sur les dépendances de la grande voirie nationale ou départementale, aucune redevance n'est due à l'Etat : le régime fixé par le cahier des charges de la concession pour les redevances dues à l'autorité concédante est maintenu jusqu'à l'expiration de ladite concession.

b) Lorsqu'elles comportent des canalisations autorisées par permissions de voirie sur les dépendances de la grande voirie nationale ou départementale, ainsi que des canalisations établies, avec ou sans permissions de voirie, sur des voies faisant partie du domaine public communal :

1° Les canalisations établies sur la grande voirie nationale ou départementale, sont soumises aux conditions de revision ci-dessus fixées au paragraphe *a*), I ;

2° Les canalisations établies, avec ou sans permissions de voirie, sur les voies faisant partie du domaine public communal, restent soumises jusqu'à l'expiration de la concession au régime fixé pour les redevances dues à l'autorité concédante par le cahier des charges de la dite concession.

B. — Distributions établies après la promulgation de la loi du 15 juin 1906.

IV. *En ce qui concerne les distributions établies par permissions de voirie ou en*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vertu de concessions des communes ou de l'Etat, postérieures à la promulgation de la loi du 15 juin 1906 :

Il y a lieu de leur appliquer sans délai les redevances fixées par le décret du 17 octobre 1907.

707. Circulaire ministérielle du 1er septembre 1909, *relative à l'élagage des arbres (arrêté préfectoral).*

Article premier. — Sur les voies publiques empruntées par les distributions d'énergie électrique dans le département d....., il sera procédé par l'entrepreneur de chaque distribution à l'élagage des arbres plantés en bordure de ces voies publiques, soit sur le sol de ces voies, soit sur les propriétés particulières, aussi souvent que la nécessité en sera reconnue par cet entrepreneur dans l'intérêt de la sécurité de la distribution, ou toutes les fois qu'il en sera requis par l'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique.

Art. 2. — Dans tous les cas, avant de commencer les travaux, l'entrepreneur doit en donner avis, huit jours au moins à l'avance :

Au service du contrôle ;

Aux services de voirie intéressés ;

Aux propriétaires de toutes plantations devant être touchées par les travaux.

Art. 3. — Les intéressés sont tenus de permettre et de faciliter l'exécution des travaux.

Art. 4. — En cas d'opposition formulée par le service de voirie ou par un propriétaire dans un délai de huit jours à partir de l'avertissement prévu à l'article 2 ci-dessus, et sur la demande de l'entrepreneur, l'exécution de l'élagage peut être ordonnée par l'ingénieur en chef du contrôle, étant entendu que, par application de l'article 57 du décret du 3 avril 1908, l'entrepreneur de la distribution reste entièrement responsable de tous les dommages qui pourraient être causés par l'exécution de l'élagage.

Art. 5. — En cas d'urgence, l'entrepreneur peut procéder à l'exécution immédiate des travaux, à charge d'en aviser en même temps les intéressés.

Art. 6. — Les travaux d'élagage seront exécutés par l'entrepreneur de la distribution en se conformant aux instructions des services de voirie et sans pénétrer dans les propriétés privées.

Art. 7. — Les produits de l'élagage des arbres plantés sur les propriétés particulières seront mis à la disposition des propriétaires, qui doivent les enlever dans un délai de quarante-huit heures.

Les produits de l'élagage des arbres plantés sur les voies publiques seront mis à la disposition des services de voirie et rangés en se conformant à leurs indications.

Art. 8. — Les conditions des travaux d'élagage des plantations, en dehors de ceux qu'exige la sécurité des distributions d'énergie électrique, continuent d'être déterminées par les arrêtés spéciaux prévus par l'article 33 de l'arrêté réglementaire du 15 janvier 1907 sur les permissions de grande voirie.

Art. 9. — Expédition du présent arrêté sera adressée à M. l'ingénieur en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique, chargé d'en assurer l'exécution, à M. l'ingénieur en chef du service ordinaire des ponts et chaussées, à M. l'agent voyer en chef et à M. le commandant de gendarmerie.

Il sera publié et affiché dans l'étendue du département.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

708. Décret du 30 novembre 1909 approuvant le cahier des charges-type pour la concession par l'État d'une distribution d'énergie électrique aux services publics et le déclarant applicable à l'Algérie.

Service concédé. — ART. 1,2 et 3. — La concession confère le droit d'établir et d'entretenir, soit au-dessus, soit au-dessous des voies publiques et de leurs dépendances, tous ouvrages ou canalisations, en se conformant au présent cahier des charges, aux règlements de voirie et aux décrets ou arrêtés intervenus en exécution de la loi du 15 juin 1906.

Le concessionnaire peut être autorisé par le ministre des Travaux publics à faire usage des ouvrages et canalisations pour fournir l'énergie à d'autres services publics ou à des particuliers.

Les projets de tous les ouvrages doivent être approuvés dans les formes prévues par la loi du 15 juin 1906 et par le décret du 3 avril 1908. (ART. 4).

Les canalisations nécessaires au transport de l'énergie, depuis l'usine productrice jusqu'à la distribution sont à la charge du concessionnaire. Les ouvrages destinés à la production de l'énergie ne seront pas soumis aux dispositions du présent cahier des charges.

Toutefois, le concessionnaire sera tenu de construire et de maintenir en bon état de service une ou plusieurs usines génératrices d'une puissance totale d'au moins... kilowatts — Cette ou ces usines ainsi que les ouvrages la ou les reliant au réseau de distribution feront partie de la concession.

L'Etat met à la disposition du concessionnaire, qui accepte, l'ensemble des immeubles, canalisations, ouvrages, matériel et appareil constituant les installations de la distribution préexistante, suivant inventaire annexé au présent cahier des charges.

Cette mesure est consentie pour la durée de la concession, mais elle cesserait de plein droit d'avoir son effet au cas de rachat ou de déchéance.

Le concessionnaire payera, pour l'usage des ouvrages de la distribution qui sont mis à sa disposition par l'Etat une redevance annuelle de... (ART. 5).

ART. 6. — Délais pour la présentation des projets et l'exécution des ouvrages.

Le concessionnaire est tenu d'acquérir les machines et l'outillage nécessaire à l'exploitation (quand le concessionnaire est autorisé à ne pas produire lui-même l'énergie le mot « exploitation » est remplacé par les mots « distribution de l'énergie).

Il pourra, à son choix, soit acquérir les terrains et établir à ses frais les constructions affectées au service de la distribution, soit les prendre en location.

Toutefois il sera tenu d'acquérir en toute propriété et de construire les... (L'Etat peut imposer au concessionnaire l'acquisition en toute propriété de tout ou partie des immeubles destinés à l'établissement des usines de production et des postes de transformation.)

Pour l'établissement des ouvrages, l'Etat s'engage à mettre à la disposition du concessionnaire moyennant... (L'Etat peut autoriser, par le cahier des charges, le concessionnaire à occuper, dans des conditions déterminées, les parties du domaine public dont il a la disposition).

Les baux ou contrats relatifs à toutes les locations d'immeubles seront communiqués au préfet ; ils devront comporter une clause réservant expressément à l'Etat la faculté de se substituer au concessionnaire en cas de rachat ou de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déchéance. Il en sera de même pour tous les contrats de fourniture d'énergie, si le concessionnaire achète le courant (ART. 7).

ART. 8-9 et 10. — Ils ont trait à la nature et au mode de production du courant, aux usines génératrices à établir, sous-stations et postes de transformateurs, à la tension du courant, à la fréquence et aux canalisations. — Celles-ci, quand elles sont souterraines, sont placées directement dans le sol ou dans des galeries accessibles — sauf aux traversées des chaussées où elles sont toujours sous trottoirs.

Les canalisations aériennes, lorsqu'elles sont autorisées, peuvent être aériennes dans toute l'étendue de la concession ou dans certaines parties seulement.

Lorsque l'acte de concession prévoit la construction d'usines génératrices faisant partie intégrante de la concession, l'article 8 détermine les conditions d'établissement de ces usines.

Tarif maximum. — ART. 11. — Le cahier des charges peut fixer des maxima différents suivant les conditions de puissance d'horaire, d'utilisation et de consommation ; il peut stipuler des réductions pour les abonnés dépassant ou garantissant un minimum de consommation, pour les abonnés utilisant le courant à des heures ou pendant des saisons déterminées, et, d'une manière générale, pour les abonnés acceptant des sujétions spéciales. Les tarifs et conditions du service peuvent être différents suivant la distance de l'usine génératrice au point de livraison du courant.

ART. 12. — Les établissements publics et associations agricoles sont assimilés aux services publics tant en ce qui concerne les tarifs qu'en ce qui concerne l'obligation imposée au concessionnaire par l'article 13, ci-après, de fournir l'énergie demandée et donner les conditions de la fourniture.

ART. 13. — Le concessionnaire est tenu de fournir l'énergie électrique à tout service public dont l'administration demandera à contracter un abonnement. Le concessionnaire peut exiger que le demandeur garantisse pendant n années une recette annuelle de n francs par kilowatt demandé.

En aucun cas, le concessionnaire ne pourra être astreint à dépasser la puissance maxima de n kilowatts pour l'énergie fournie aux services publics dont l'alimentation est obligatoire.

ART. 14. — Sont considérés comme situés sur le parcours de la distribution pour l'application de l'article précédent, tous les services publics qui fonctionnent en totalité ou en partie dans une zone de n kilomètres de chaque côté de la ligne principale de transport et qui sont susceptibles d'être desservis au moyen d'un poste principal situé dans cette zone.

ART. 15. — Les postes de transformation et les lignes secondaires et les branchements sont installés et entretenus par le concessionnaire ; les frais d'installation des branchements sont remboursés au concessionnaire par les abonnés.

ART. 16 et 17. — Les compteurs pour les abonnés sont posés et entretenus par le concessionnaire. Les conditions de location, de pose, de plombage et entretien sont déterminés par le traité d'abonnement.

L'abonné a toujours le droit de demander la vérification du compteur. Les frais de vérification sont à la charge de l'abonné, si le compteur est reconnu exact.

ART. 18. — Les contrats pour la fourniture de l'énergie électrique sont établis dans la forme de traités d'abonnement qui sont communiqués à l'ingénieur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en chef du contrôle des distributions d'énergie électrique. Ces traités peuvent être soumis à l'examen du ministre des Travaux publics.

ART. 19. — Le courant n'est livré aux abonnés que s'ils se conforment aux conditions imposées par le concessionnaire, avec l'approbation de l'ingénieur en chef du contrôle. Le concessionnaire est autorisé à cet effet à vérifier, à toute époque, les installations et à refuser le courant si l'installation est reconnue défectueuse.

L'article 20 indique si l'énergie doit être à la disposition des abonnés en permanence ou si le service peut être normalement suspendu à des heures déterminées qui peuvent être variables suivant les saisons. Il peut contenir, en outre, des conditions spéciales qui seraient stipulées pour la fourniture de l'énergie à certaines catégories d'abonnés.

ART. 21. — La durée de la concession ne peut être supérieure à 50 années.

Lorsque la concession a pour objet l'extension d'une concession déjà existante elle doit prendre fin à la même date que la concession principale.

ART. 22. — A la date fixée pour l'expiration de la concession, l'Etat aura, moyennant un préavis de deux ans, la faculté de se subroger aux droits du concessionnaire et de prendre possession de tous les immeubles et ouvrages de la distribution et de ses dépendances.

Alors l'Etat reprend gratuitement les usines, sous-stations, et postes de transformation, le matériel électrique et mécanique ainsi que les canalisations et branchements et il ne sera attribué d'indemnité au concessionnaire que pour la portion du coût de ces installations qui sera considérée comme n'étant pas amortie. L'indemnité sera payée au concessionnaire dans les six mois qui suivront l'expiration de la concession.

Le mobilier et les approvisionnements peuvent être repris par l'Etat s'il le juge nécessaire, dont estimation peut être faite à titre amiable ou à dire d'experts.

Si l'Etat ne prend pas possession de la distribution, le concessionnaire sera tenu d'enlever à ses frais et sans indemnité toutes celles de ses installations qui se trouvent sur ou sous la voie publique. Dans tous les cas, l'Etat a la faculté, sans qu'il en résulte un droit à indemnité pour le concessionnaire, de prendre, pendant les six derniers mois de la concession, toutes mesures nécessaires pour effectuer le passage progressif de la concession ancienne à une concession ou entreprise nouvelle.

Rachat de la concession (art. 23). L'Etat peut faire le rachat entier moyennant un préavis de deux ans.

En cas de rachat le concessionnaire recevra pour indemnité : 1° Pendant chacune des années restant à courir jusqu'à l'expiration de la concession, une annuité égale au produit net moyen des sept années d'exploitation précédant celle où le rachat sera effectué, déduction faite des deux plus mauvaises ; dans l'établissement du produit net ne sont pas comprises les charges du capital ni l'amortissement des dépenses du premier établissement. Dans aucun cas, le montant de l'annuité ne sera inférieur au produit net de la dernière des sept années prises pour terme de comparaison.

2° Une somme égale aux dépenses dûment justifiées, supportées par le concessionnaire pour ceux des ouvrages de la concession, subsistant au moment du rachat, qui auront été régulièrement exécutés pendant les n années précédant le rachat sauf déduction pour chaque ouvrage de n de sa valeur pour chaque année écoulée depuis son achèvement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'État est tenu de reprendre les approvisionnements en magasin ou en cours de transport ainsi que le mobilier de la distribution, la valeur étant fixée à l'amiable ou à dire d'experts.

Si le rachat a lieu avant l'expiration des vingt premières années de la concession, le concessionnaire pourra demander que l'indemnité, au lieu d'être calculée comme il est dit ci-dessus, soit égale aux dépenses réelles de premier établissement, y compris les frais de constitution de la société dans la limite d'un maximum de ... francs et les insuffisances qui se seraient produites depuis l'origine de la concession, si celle-ci remonte à moins de sept ans, et pendant les sept premières années de sa durée, si elle remonte à plus de sept ans. Ces insuffisances seront calculées pour chaque année en prenant la différence entre la recette brute et les charges énumérées ci-après : 1° frais d'exploitation ; 2° intérêt et amortissement des emprunts contractés pour l'établissement de la distribution ; 3° intérêt à 5 0/0 des sommes fournies par le concessionnaire au moyen de ses propres ressources ou de son capital-actions.

Art. 24. — La remise des ouvrages et du matériel de distribution, en cas de rachat ou en cas de reprise à l'expiration de la concession, s'entend d'un bon état d'entretien. L'Etat se réserve d'y pourvoir en faisant toutes retenues nécessaires sur les indemnités dues au concessionnaire et même en retenant le cautionnement si cela est nécessaire pour couvrir les dépenses des travaux reconnus nécessaires.

Art. 25. — La déchéance est prononcée : 1° Si le concessionnaire n'a pas présenté les projets d'exécution ou s'il n'a pas achevé et mis en service les lignes de distribution dans les délais et conditions fixés par les conditions du cahier des charges. La déchéance sera décidée, après mise en demeure, par décret, sauf recours au Conseil d'Etat par la voie contentieuse.

Lorsque la sécurité publique vient à être compromise, le préfet prend les mesures provisoires nécessaires pour prévenir tout danger et le ministre des Travaux publics adresse au concessionnaire, s'il y a lieu, une mise en demeure fixant le délai à lui imparti pour assurer à l'avenir la sécurité de l'exploitation.

Si l'exploitation vient à être interrompue en partie ou en totalité, il y sera également pourvu aux frais et risques du concessionnaire.

Si à l'expiration du délai imparti par la mise en demeure du ministre des Travaux publics, il n'y a pas été satisfait, la déchéance peut être prononcée.

La déchéance peut également être prononcée si le concessionnaire, après mise en demeure, ne reconstitue pas le cautionnement prévu à l'article 31 ci-après, dans le cas où des prélèvements auraient été effectués sur ce cautionnement en conformité des dispositions du cahier des charges.

Art. 26. — Dans le cas de déchéance, il est pourvu tant à la continuation et à l'achèvement des travaux qu'à l'exécution des autres engagements du concessionnaire par le système d'adjudication. La mise à prix est fixée par le ministre des Travaux publics, sur la proposition du préfet, le concessionnaire entendu.

L'adjudication a lieu suivant les formes indiquées aux articles 11, 12, 13, 15 et 16 de l'ordonnance royale du 10 mai 1829. Si une seconde adjudication sans mise à prix ne donne pas de résultat, le concessionnaire est définitivement déchu de tous droits et les ouvrages ainsi que le matériel de distribution et les approvisionnements deviendront sans indemnité la propriété de l'Etat.

Redevances. — Les redevances sont fixées conformément aux articles 1 et 2 du décret du 17 octobre 1907 (art. 27).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Contrôle de recettes. — Le concessionnaire doit fournir chaque année à l'ingénieur en chef du contrôle un compte rendu statistique de son exploitation. Pour les communes avec lesquelles des accords auront été passés, le concessionnaire devra, en outre, adresser à l'ingénieur en chef du contrôle, dans le courant du premier trimestre de chaque année, l'état des recettes réalisées pendant l'année précédente. Ces états sont contrôlés par les agents de l'Etat.

Impôts et pénalités. — Le concessionnaire doit supporter tous les impôts établis ou à établir par l'Etat, les départements ou leurs communes, y compris les impôts relatifs aux immeubles de la distribution.

Des amendes pourront être infligées au concessionnaire, sans préjudice, s'il y a lieu, des dommages et intérêts envers les tiers intéressés, s'il ne remplit pas les obligations imposées par le cahier des charges; telles que interruption générale non justifiée du courant, et manquement aux obligations imposées par les articles 6, 9, 13, 14 et 28 du présent cahier des charges.

Cautionnement. — Le cautionnement fixé par le cahier des charges doit être versé en numéraire, ou en rentes sur l'Etat, en obligations garanties par l'Etat ou en bons du Trésor, dans les conditions prévues par les lois et règlements pour les cautionnements en matière de travaux publics. La moitié du cautionnement est restituée au concessionnaire après achèvement de la ligne principale; l'autre moitié est restituée en fin de concession. Mais, en cas de déchéance, la partie non restituée du cautionnement est acquise à l'Etat (art. 31).

Contestations. — Les contestations entre le concessionnaire et l'Administration sont portées devant le conseil de préfecture du... sauf recours au Conseil d'Etat (art. 34).

709. Circulaire ministérielle du 20 mai 1910.

Cette circulaire est un commentaire du cahier des charges type du 30 novembre 1909. Elle a pour but d'appeler l'attention des ingénieurs du contrôle sur la difficulté au point de vue de l'encombrement du sol par les canalisations de toutes sortes, de délivrer des permissions de voirie en raison de la gêne que celles-ci peuvent donner dans l'avenir à la création de nouvelles entreprises même sous le régime de la concession.

La durée de ces dernières est fixée à cinquante ans, mais s'il est reconnu que les conditions d'établissement et d'exploitation du réseau à établir l'exigent la durée de la concession pourra être augmentée, mais sur l'approbation d'un décret délibéré en Conseil d'Etat.

710. Arrêté du 13 août 1910 fixant les conditions d'approbation des types de compteurs d'énergie électrique.

Les compteurs électriques, en vertu des clauses et conditions des cahiers des charges-types, en date des 17 mai et 20 août 1908, devront satisfaire par application de l'article 16 des dits aux conditions ci-après énumérées.

DÉFINITION DU TYPE.

ARTICLE PREMIER. — Le type de compteur est défini par ses dessins de constructions.

Sont considérés comme de même type les compteurs de calibres différents

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

construits sur les mêmes dessins et dont les différences ne portent que sur les bobinages qui restent, d'ailleurs, semblablement placés.

Le type peut comporter l'emploi d'appareils accessoires, tels que transformateurs, etc.; ces accessoires forment partie intégrante du compteur.

Chaque type de compteur porte un nom; si le même nom s'applique à plusieurs calibres du même type, chaque type porte, en outre, un numéro de série caractéristique. Le nom et le numéro de série figurent sur les plaques des appareils mises en service.

CONSTITUTION DU DOSSIER DE DEMANDE D'APPROBATION.

ART. 2. — Le dossier de demande d'approbation contient les pièces suivantes :

1° Les dessins d'exécution à des échelles suffisantes pour en permettre la lecture facile;

2° Une notice descriptive exposant le principe du compteur, décrivant son mécanisme et son fonctionnement, donnant le détail des causes d'erreur et indiquant la manière dont elles sont corrigées dans la mesure du possible, particulièrement en ce qui concerne la variation de température due au fonctionnement.

Cette note doit, en outre :

a) Indiquer le détail des bobinages que peut recevoir le type et les calibres correspondants;

b) Donner la durée de révolution du mobile le plus rapide qui soit nettement visible sur le mécanisme ou sur la minuterie, et la valeur de l'énergie correspondant à un tour exact de ce mobile pour chaque calibre;

c) Un certificat d'essai délivré par le laboratoire central d'électricité de Paris ou par les laboratoires agréés par le ministre, après avis du Comité d'électricité, donnant les résultats des essais faits sur un compteur du type et portant sur les points énumérés à l'article 3 ci-après :

Le dossier est fourni en trois exemplaires, un en original, pour lequel les dessins sont un calque sur toile, les autres exemplaires pouvant être de simples copies. Les dessins originaux portent une estampille de l'établissement qui a fait l'essai, pour certifier la conformité de ces dessins à l'appareil soumis aux essais.

Les appareils accessoires sont toujours essayés avec le compteur proprement dit correspondant; toutefois, si ce dernier a été approuvé antérieurement, les essais qui n'intéressent pas l'appareil accessoire n'ont pas à être recommencés; mais la note descriptive doit mentionner le type de ce compteur et la date de son approbation. Une expédition en copie du compteur proprement dit est simplement ajoutée au dossier, mais elle doit porter le certificat de conformité de l'appareil essayé. Le dessin de l'appareil accessoire est produit en original.

Les pièces sont du format 21 sur 31 cent.; les plans sont ramenés à ce même format par pliage d'abord en paravent, puis en travers. Le titre est inscrit sur la face apparente du plan replié.

DÉTAIL DES ESSAIS.

ART. 3. — Les essais portent au moins sur les points suivants :

1° Essais aux trois régimes : de pleine charge nominale; de demi-charge; du vingtième de charge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces essais sont faits sur l'appareil fermé et mis sous tension depuis une heure au moins, et, dans tous les cas, jusqu'à ce que le régime de température dû au fil de dérivation soit atteint.

Les autres conditions sont les suivantes :

a) Température arbitraire entre les limites 10° et 25° C. ;

b) Tension arbitraire, entre 0,9 et 1,10 fois la tension nominale;

c) Facteurs de puissance arbitraire entre 1,0 et 0,5 pour l'essai en plein débit ; et à demi-charge, un essai pour chacune des valeurs, 1,0 et 0,5 approximativement.

Sur les compteurs de 5 hectowatts et au-dessous, un essai au régime de 20 watts est substitué à l'essai au vingtième de charge.

L'essai au vingtième de charge ou à 20 watts est répété, sur les compteurs watt-heure-mètres à courant continu, en plaçant l'instrument dans deux orientations opposées à 180° et telles que l'axe du champ dû au fil principal soit dans le plan du méridien magnétique.

2° Essais au régime de demi-charge avec des écarts en plus et en moins d'un vingtième sur la valeur nominale de la fréquence.

3° Essais en surcharge d'un cinquième de la puissance maximum normale.

4° Epreuve de marche à vide.

Sur les compteurs pourvus d'un mécanisme à rouleaux, on fait l'épreuve portant sur le fonctionnement simultané de tous ces rouleaux, au régime du dixième de charge.

5° Essai donnant le régime minimum qui assure un démarrage certain.

6° Valeur des consommations internes dans chaque circuit.

7° Essai de court-circuit d'une intensité égale à dix fois le courant maximum normal, limité dans sa durée d'application par le jeu d'un fusible fondant sous un courant double du maximum normal ; essai répété cinq fois.

8° Les compteurs moteurs à collecteur qui ne sont pas munis d'un fil à plomb ou d'un organe de nivellement équivalent sont essayés à demi-charge, en donnant à l'appareil une inclinaison de 5° par rapport à la verticale. Le résultat de l'essai est consigné au certificat comparativement à celui de l'essai correspondant à la verticalité de l'axe.

RÉSULTATS A OBTENIR.

ART. 4. — Les résultats à obtenir et les tolérances sont fixés comme il suit :

1° Essai à pleine charge nominale : erreur relative..... ± 3 0/0

2° Essai à demi-charge : erreur relative..... ± 3 0/0

3° Essai au vingtième de charge : erreur relative..... ± 5 0/0

4° Dans le cas où le compteur comporte un appareil accessoire, cette dernière limite seule est portée à..... ± 7 0/0

5° Essai au régime de 20 watts : erreur absolue..... ± 2 watts

6° Compteur à courants alternatifs essayés en demi-charge aux fréquences de 0,95 et 1,05 fois la normale : l'erreur relative ne doit pas différer d'une unité en plus ou en moins de celle obtenue à la fréquence normale.

7° Essai en surcharge d'un cinquième : le compteur ne doit subir aucune détérioration par l'application de cette surcharge pendant une demi-heure.

8° Essai de démarrage : les limites supérieures de démarrage franc sont :

a) Pour compteur de 5 hectowatts et au-dessous : 2 0/0 de pleine charge ;

b) Pour compteurs supérieurs à 5 hectowatts : 1 0/0 de pleine charge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

9° Consommations internes : les limites supérieures sont :

a) Dans le fil de dérivation : sur un courant alternatif :

1,5 watt pour 100 volts.

Et sur courant continu :

4,0 watts pour 100 volts de tension nominale.

b) Dans les fils principaux :

Pour les compteurs ampère-heure-mètres de tous calibres et pour les compteurs watt-heure-mètres de 5 hectowatts et au-dessous : 1,5 volt à pleine charge;

Pour compteurs watt-heure-mètres supérieurs à 5 hectowatts : 1 volt à pleine charge.

10° Essai de court-circuit : après l'application des courts-circuits, la valeur de l'erreur relative à demi-charge ne doit pas avoir varié de plus d'une unité.

NOTA IMPORTANT. — L'inobservation de l'une quelconque des conditions ci-dessus indiquées entraîne le rejet de la demande d'approbation sans autre examen.

INSTRUCTION DE LA DEMANDE.

ART. 5. — Le dossier est déposé soit au ministère des Travaux publics (secrétariat du Comité d'électricité), soit entre les mains de l'ingénieur en chef du contrôle des distributions électriques du département. Après avoir vérifié que le dossier présenté satisfait aux conditions prescrites par l'article 2 ci-dessus, le secrétariat ou l'ingénieur en chef en donne reçu et le transmet pour examen au Comité d'électricité. L'examen du Comité porte, en outre, des conditions stipulées à l'article précédent, sur tous les points qu'il juge utile, et notamment sur les suivants :

Nature de l'isolation;

Étanchéité de la fermeture;

Facilité d'entretien;

Possibilité de vérifier rapidement l'étalonnage sans ouvrir l'appareil;

Nature des rouages enregistreurs, etc.

FORME DE L'APPROBATION.

ART. 6. — L'approbation est donnée, s'il y a lieu, après avis du Comité d'électricité, par un arrêté ministériel qui est inséré au *Journal officiel*.

REMPLACEMENT DE L'ARRÊTÉ DU 2 JUIN 1909.

ART. 7. — Le présent arrêté annule et remplace l'arrêté du 2 juin 1909.

711. Arrêté du 21 mars 1911 déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie électrique.

CHAPITRE PREMIER

Dispositions techniques générales applicables aux ouvrages des distributions d'énergie électrique.

SECTION I

Classement des distributions et prescriptions générales relatives à la sécurité.

ART. PREMIER. — *Classement des distributions en deux catégories.* — Les distribu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions d'énergie électrique doivent comporter des dispositifs de sécurité en rapport avec la plus grande tension de régime existant entre les conducteurs et la terre (1).

Suivant cette tension, les distributions d'énergie électrique sont divisées en deux catégories.

PREMIÈRE CATÉGORIE.

A. *Courant continu.* — Distributions dans lesquelles la plus grande tension de régime entre les conducteurs et la terre ne dépasse pas 600 volts.

B. *Courant alternatif.* — Distributions dans lesquelles la plus grande tension efficace entre les conducteurs et la terre ne dépasse pas 150 volts.

DEUXIÈME CATÉGORIE

Distributions comportant des tensions respectivement supérieures aux tensions ci-dessus.

ART. 2. — *Prescriptions générales relatives à la sécurité.* — Les dispositions techniques adoptées pour les ouvrages de distribution, ainsi que les conditions de leur exécution, doivent assurer d'une façon générale le maintien de l'écoulement des eaux, de l'accès des maisons et des propriétés, des communications télégraphiques et téléphoniques, de la liberté et de la sûreté de la circulation sur les voies publiques empruntées, la protection des paysages, ainsi que la sécurité des services publics, celle du personnel de la distribution et celle des habitants des communes traversées.

SECTION II

Canalisations aériennes.

ART. 3. — *Supports.* — § 1. Les supports en bois doivent être prémunis contre les actions de l'humidité et du sol.

§ 2. Dans le cas où les supports sont munis d'un fil de terre, ce fil est pourvu sur une hauteur minimum de trois mètres, à partir du sol, d'un dispositif le plaçant hors d'atteinte.

§ 3. Tous les supports sont numérotés.

§ 4. Dans les distributions de deuxième catégorie, les pylônes et poteaux métalliques sont pourvus d'une bonne communication avec le sol.

§ 5. Dans la traversée des voies publiques, les supports doivent être aussi rapprochés que possible.

ART. 4. — *Isolateurs.* — Les isolateurs employés pour les distributions de la deuxième catégorie doivent être essayés dans les conditions ci-après :

Lorsque la tension à laquelle est soumis l'isolateur en service normal est inférieure ou égale à 10.000 volts, la tension d'essai est le triple de la tension en service.

Lorsque la tension de service normal est supérieure à 10.000 volts, la tension d'essai est égale à 30.000 volts, plus deux fois l'excès de la tension de service sur 10.000 volts.

---

(1) Dans les distributions triphasées, cette tension est évaluée par rapport au point neutre supposé à la terre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ART. 5. — *Conducteurs.* — § 1. Les conducteurs doivent être placés hors de la portée du public.

§ 2. Le point le plus bas des conducteurs et fils de toute nature doit être :

a) Pour les distributions de la première catégorie, à six mètres, au moins, le long et à la traversée des voies publiques;

b) Pour les distributions de la deuxième catégorie, à six mètres au moins, le long des voies publiques, et à huit mètres, au moins, dans les traversées de ces voies.

Néanmoins des canalisations aériennes pourront être établies à moins de six mètres de hauteur à la traversée des ouvrages construits au-dessus des voies publiques, à la condition de comporter dans toute la partie à moins de six mètres de hauteur un dispositif de protection spécial en vue de sauvegarder la sécurité.

§ 3. Le diamètre de l'âme métallique des conducteurs d'énergie ne peut être inférieur à trois millimètres. Toutefois ce diamètre peut être abaissé à deux millimètres pour les branchements particuliers ou de canalisations d'éclairage public de la première catégorie qui ne croisent pas des lignes télégraphiques ou téléphoniques placées au-dessous.

§ 4. Dans la traversée d'une voie publique, l'angle de la direction des conducteurs et de l'axe de la voie est égal au moins à 30°.

§ 5. Dans la traversée et dans les portées contiguës, il ne doit y avoir sur les conducteurs ni épissures ni soudures; les conducteurs sont arrêtés sur les isolateurs des supports de la traversée et sur les isolateurs des supports des portées contiguës.

§ 6. Dans les distributions de deuxième catégorie, les dispositions suivantes doivent être appliquées :

a) Les poteaux et pylônes sont munis, à une hauteur d'au moins deux mètres au-dessus du sol, d'un dispositif spécial, pour empêcher, autant que possible, le public d'atteindre les conducteurs;

b) Les mesures nécessaires sont prises pour que, dans les traversées et sur les appuis d'angle, les conducteurs d'énergie électrique, au cas où ils viendraient à abandonner l'isolateur, soient encore retenus et ne risquent pas de traîner sur le sol ou de créer des contacts dangereux;

c) Chaque support porte l'inscription « *Danger de mort* » en gros caractères, suivie des mots « *Défense absolue de toucher aux fils, même tombés à terre* ».

§ 7. Dans la traversée des agglomérations, les conducteurs sont placés à 1 mètre au moins des façades et en tout cas hors de la portée des habitants.

Si les conducteurs longent un toit en pente ou s'ils passent au-dessus, ils doivent en être distants de 1m,50 au moins, s'ils sont de la première catégorie, et de 2 mètres au moins, s'ils sont de la deuxième catégorie.

Si le toit est en terrasse, les conducteurs doivent en être distants de 3 mètres au moins, qu'ils appartiennent à la première ou à la deuxième catégorie.

ART. 6. — *Résistance mécanique des ouvrages.* — § 1. Pour les conducteurs, fils, supports, ferrures, etc., la résistance mécanique des ouvrages est calculée en tenant compte à la fois des charges permanentes que les organes ont à supporter et de la plus défavorable en l'espèce des deux combinaisons de charges accidentelles, résultant des circonstances ci-après :

a) Température moyenne de la région avec vent horizontal de 120 kilogrammes de pression par mètre carré de surface plane ou 72 kilogrammes par mètre carré de section longitudinale des pièces à section circulaire;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b) Température minimum de la région avec vent horizontal de 30 kilogrammes par mètre carré de surface plane ou de 18 kilogrammes par mètre carré de section longitudinale des pièces à section circulaire.

Les calculs justificatifs font ressortir le coefficient de sécurité de tous les éléments, c'est-à-dire le rapport entre l'effort correspondant à la charge de rupture et l'effort le plus grand auquel chaque élément peut être soumis.

§ 2. Dans les distributions de la deuxième catégorie, le coefficient de sécurité des ouvrages, dans les parties de la distribution établies longitudinalement sur le sol des voies publiques, doit être au moins égal à trois.

Dans les parties des mêmes distributions établies dans les agglomérations ou traversant les voies publiques, la valeur du coefficient de sécurité est portée au moins à cinq.

ART. 7. — *Distributions de deuxième catégorie desservant plusieurs agglomérations.* — Dans les distributions de deuxième catégorie desservant un certain nombre d'agglomérations distantes les unes des autres, l'entrepreneur de la distribution est tenu d'établir, entre chaque agglomération importante desservie et l'usine de production de l'énergie ou le poste le plus voisin, un moyen de communication directe.

L'entrepreneur de la distribution est dispensé de la prescription énoncée ci-dessus s'il a établi, à l'entrée de chaque agglomération importante, un appareil permettant de couper le courant toutes les fois qu'il est nécessaire.

SECTION III

Canalisations souterraines.

ART. 8. — *Conditions générales d'établissement des conducteurs souterrains.* — § 1. Protection mécanique.

Les conducteurs d'énergie électrique souterrains doivent être protégés mécaniquement contre les avaries que pourraient leur occasionner le tassement des terres, le contact des corps durs ou le choc des outils en cas de fouille.

§ 2. Conducteurs électriques placés dans une conduite métallique.

Dans tous les cas où les conducteurs d'énergie électrique sont placés dans une enveloppe ou conduite métallique, ils sont isolés avec le même soin que s'ils étaient placés directement dans le sol.

§ 3. Précautions contre l'introduction des eaux.

Les conduites contenant des câbles sont établies de manière à éviter autant que possible l'introduction des eaux. Des précautions sont prises pour assurer la prompte évacuation des eaux au cas où elles viendraient à s'y introduire accidentellement.

ART. 9. — *Voisinage des conduites de gaz.* — Lorsque, dans le voisinage de conducteurs d'énergie électrique placés dans une conduite, il existe des canalisations de gaz, les mesures nécessaires doivent être prises pour assurer la ventilation régulière de la conduite renfermant les câbles électriques et éviter l'accumulation des gaz.

ART. 10. — *Regards.* — Les regards affectés aux canalisations électriques ne doivent pas renfermer de tuyaux d'eau, de gaz ou d'air comprimé.

Dans le cas de canalisations en conducteurs nus, les regards sont disposés de manière à pouvoir être ventilés.

Les conducteurs d'énergie électrique sont convenablement isolés par rapport aux plaques de fermeture des regards.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

SECTION IV

Sous-stations, postes de transformateurs et installations diverses.

ART. 11. — *Prescriptions générales pour l'installation des moteurs et appareils divers.* — § 1. Toutes les pièces saillantes mobiles et autres parties dangereuses des machines et notamment les bielles, roues, volants, les courroies et câbles, les engrenages, les cylindres et cônes de friction ou tous autres organes de transmission qui seraient reconnus dangereux sont munis de dispositifs protecteurs, tels que gaines et chéneaux de bois ou de fer, tambours pour les courroies et les bielles, ou de couvre-engrenages, gardes-mains, grillages.

Sauf le cas d'arrêt du moteur, le maniement des courroies est toujours fait par le moyen de systèmes tels que monte-courroie, porte-courroie, évitant l'emploi direct de la main.

On doit prendre, autant que possible, des dispositions telles qu'aucun ouvrier ne soit habituellement occupé à un travail quelconque, dans le plan de rotation ou aux abords immédiats d'un volant, ou de tout autre engin pesant et tournant à grande vitesse.

§ 2. La mise en train et l'arrêt des machines sont toujours précédés d'un signal convenu.

§ 3. Des dispositifs de sûreté sont installés dans la mesure du possible pour le nettoyage et le graissage des transmissions et mécanismes en marche.

§ 4. Les monte-charges, ascenseurs, élévateurs sont guidés et disposés de manière que la voie de la cage du monte-charges et des contrepoids soit fermée ; que la fermeture du puits à l'entrée des divers étages ou galeries s'effectue automatiquement; que rien ne puisse tomber du monte-charges dans le puits.

Pour les monte-charges destinés à transporter le personnel, la charge est calculée au tiers de la charge admise pour le transport des marchandises, et les monte-charges sont pourvus de freins, chapeaux, parachutes ou autres appareils préservateurs.

Les appareils de levage portent l'indication du maximum de poids qu'ils peuvent soulever.

§ 5. Les puits, trappes et ouvertures sont pourvus de solides barrières ou garde-corps.

§ 6. Dans les locaux où le sol et les parois sont très conducteurs, soit par construction, soit par suite de dépôts salins ou par suite de l'humidité, on ne doit jamais établir, à la portée de la main, des conducteurs ou des appareils placés à découvert.

ART. 12. — *Prescriptions relatives aux moteurs, transformateurs et appareils de la deuxième catégorie.* — § 1er. Les locaux non gardés dans lesquels sont installés des transformateurs de deuxième catégorie doivent être fermés à clé.

Des écriteaux très apparents sont apposés partout où il est nécessaire pour prévenir le public du danger d'y pénétrer.

§ 2. Si une machine ou un appareil électrique de la deuxième catégorie se trouve dans un local ayant en même temps une autre destination, la partie du local affectée à cette machine ou à cet appareil est rendue inaccessible, par un garde-corps ou un dispositif équivalent, à toute personne autre que celle qui en a la charge. Une mention indiquant le danger doit être affichée en évidence.

§ 3. Les bâtis et pièces conductrices non parcourus par le courant qui appartiennent à des moteurs et transformateurs de la deuxième catégorie sont reliés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électriquement à la terre ou isolés électriquement du sol. Dans ce dernier cas, les machines sont entourées par un plancher de service non glissant, isolé du sol et assez développé pour qu'il ne soit pas possible de toucher à la fois à la machine et à un corps conducteur quelconque relié au sol.

La mise à la terre où l'isolement électrique est constamment maintenu en bon état.

§ 4. Les passages ménagés pour l'accès aux machines et appareils de la deuxième catégorie placés à découvert ne peuvent avoir moins de 2 mètres de hauteur ; leur largeur mesurée entre les machines, conducteurs ou appareils eux-mêmes, aussi bien qu'entre ceux-ci et les parties métalliques de la construction, ne doit pas être inférieure à 1 mètre.

ART. 13. — *Installation des canalisations à l'intérieur des sous-stations et postes de transformateurs.* — § 1. A l'intérieur des sous-stations et postes de transformateurs, les canalisations nues de la deuxième catégorie doivent être établies hors de la portée de la main sur des isolateurs convenablement espacés et être écartées des masses métalliques, telles que piliers ou colonnes, gouttières, tuyaux de descente, etc.

Les canalisations nues de la première catégorie qui sont à portée de la main doivent être signalées à l'attention par une marque bien apparente.

Les enveloppes des autres canalisations doivent être convenablement isolantes.

§ 2. Des dispositions doivent être prises pour éviter l'échauffement anormal des conducteurs à l'aide de coupe-circuits, fusibles ou autres distributifs équivalents.

§ 3. Toute installation reliée à un réseau comportant des lignes aériennes de plus de 500 mètres doit être suffisamment protégée contre les décharges atmosphériques.

ART. 14. — *Tableaux de distribution.* — A. *Distributions de la première catégorie.*

Sur les tableaux de distribution de courants appartenant à la première catégorie, les conducteurs doivent présenter les isolements et les écartements propres à éviter tout danger.

B. *Distributions de la deuxième catégorie :*

§ 1. Sur les tableaux de distribution portant sur leur face avant (où se trouvent les poignées de manœuvre et les instruments de lecture, des appareils et pièces métalliques de la deuxième catégorie), le plancher de service doit être isolé électriquement et établi dans les conditions indiquées à l'article 12.

§ 2. Quand des pièces métalliques ou appareils de la deuxième catégorie sont établis à découvert sur la face arrière du tableau, un passage entièrement libre de 1 mètre de largeur et de 2 mètres de hauteur au moins est réservé derrière lesdits appareils et pièces métalliques ; l'accès de ce passage est défendu par une porte fermant à clef, laquelle ne peut être ouverte que par ordre du chef de service ou par les préposés à ce désignés ; l'entrée en sera interdite à toute autre personne.

§ 3. Tous les conducteurs et appareils de deuxième catégorie doivent, notamment sur les tableaux de distribution, être nettement différenciés des autres par une marque très apparente (une couche de peinture par exemple).

ART. 15. — *Locaux des accumulateurs.* — Dans les locaux où se trouvent des batteries d'accumulateurs, toutes les précautions seront prises pour éviter l'accumulation de gaz détonants ; la ventilation de ces locaux doit assurer l'évacuation continue des gaz dégagés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les lampes à incandescence employées dans ces locaux sont à double enveloppe.

ART. 16. — *Éclairage de secours.* — Les salles de sous-stations doivent posséder un éclairage de secours en état de fonctionner en cas d'arrêt du courant.

ART. 17. — *Mise à la terre des colonnes et autres pièces métalliques des sous-stations et postes de transformateurs.* — Les colonnes, les supports et, en général, toutes les pièces métalliques des sous-stations et postes de transformateurs qui risqueraient d'être soumis à une tension de la deuxième catégorie doivent être convenablement reliés à la terre.

SECTION V

Branchements particuliers.

ART. 18. — *Prescriptions générales.* — Les branchements particuliers doivent être munis de dispositifs d'interruption auxquels l'entrepreneur de la distribution doit avoir accès en tous temps.

ART. 19. — *Canalisations aériennes.* — Les conducteurs aériens formant branchements particuliers doivent être protégés dans toutes les parties où ils sont à la portée des personnes.

ART. 20. — *Canalisations souterraines.* — Les conducteurs souterrains d'énergie électrique formant branchements particuliers doivent être recouverts d'un isolant protégé mécaniquement d'une façon suffisante, soit par l'armature du câble conducteur, soit par des conduites en matière résistante et durable.

CHAPITRE II

Dispositions spéciales applicables aux ouvrages de distributions dans la traversée des cours d'eau, des canaux de navigation et des lignes de chemins de fer, ainsi qu'aux ouvrages servant à la traction par l'électricité.

ART. 21. — *Prescriptions générales.* — Les prescriptions du chapitre 1er sont applicables aux parties des distributions d'énergie électrique traversant les fleuves, les rivières navigables ou flottables, les canaux de navigation ou les chemins de fer, ainsi qu'aux ouvrages servant à la traction par l'électricité, sous réserve des dispositions spéciales énoncées au présent chapitre.

SECTION I

Traversée des cours d'eau et des canaux de navigation par des canalisations aériennes.

ART. 22. — *Hauteur des conducteurs.* — § 1er. A la traversée des cours d'eau navigables et des canaux de navigation, la hauteur minimum des conducteurs au-dessus du plan d'eau est fixée, dans chaque cas, suivant la nature des bateaux fréquentant ces rivières et le mode de navigation.

Cette hauteur ne peut être inférieure à 8 mètres au-dessus des plus hautes eaux navigables. Toutefois, dans les bras où la navigation est impraticable, elle peut être réduite à 3 mètres au-dessus des plus grandes eaux.

§ 2. La même hauteur minimum de 8 mètres est applicable à la traversée des autres rivières du domaine public, mais elle peut être réduite à la traversée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des cours d'eau classés comme flottables, lorsque le flottage n'est pas effectivement pratiqué, sous réserve que cette hauteur ne sera pas inférieure à 3 mètres au-dessus des plus hautes eaux.

ART. 23. — *Coefficient de sécurité de l'installation dans la traversée des cours d'eau et des canaux de navigation.* — Le coefficient de sécurité de l'installation, dans la traversée des cours d'eau navigables et des canaux de navigation, est au moins égal à 5 et, pour la traversée des autres rivières du domaine public, au moins égal à 3.

Le même coefficient 3 est applicable aux installations faites sur les dépendances des cours d'eau et des canaux qui ne sont pas ouverts à la circulation publique et en particulier sur les emplacements réservés au halage.

SECTION II

Traversée des lignes de chemins de fer.

ART. 24. — *Dispositions générales.* — § 1er. Pour traverser un chemin de fer, toute canalisation électrique doit, de préférence, emprunter un ouvrage d'art (passage supérieur ou passage inférieur) et, autant que possible, ne pas franchir cet ouvrage en diagonale.

A défaut de pouvoir, en raison de circonstances locales, emprunter un ouvrage d'art, la canalisation doit, autant que possible, effectuer la traversée en un point de moindre largeur de l'emprise du chemin de fer.

§ 2. La ligne dont fait partie la canalisation traversant le chemin de fer doit pouvoir être coupée du reste de la distribution et isolée de tout générateur possible de courant.

§ 3. Des dispositions spéciales devront être prises, quand il y aura lieu, pour la protection des ouvrages traversés, notamment lorsqu'ils comporteront des parties métalliques.

ART. 25. — *Canalisations aériennes.* — § 1er. Toute canalisation aérienne qui n'emprunte pas un ouvrage d'art doit franchir les voies ferrées autant que possible d'une seule portée et suivant une direction aussi voisine que possible de la normale à ces voies et, en tout cas, sous un angle d'au moins 60°, à moins qu'elle ne soit établie le long d'une voie publique traversant la voie ferrée sous un angle moindre. Son point le plus bas doit être situé à 7 mètres au moins de hauteur au-dessus du rail le plus haut; elle doit être établie à 2 mètres au moins de distance dans le sens vertical du conducteur électrique préexistant le plus voisin.

§ 2. Les supports de la traversée doivent être distants chacun d'au moins 3 mètres du bord extérieur du rail le plus voisin, et placés autant que possible en dehors des lignes de conducteurs électriques existant le long des voies.

§ 3. Les supports de la traversée sont encastrés dans un massif de maçonnerie et constitués de façon assez solide pour pouvoir, en cas de rupture de tous les fils les sollicitant d'un côté, résister à la traction qu'exerceraient sur eux les fils subsistant de l'autre côté, à moins que l'entrepreneur n'ait fait agréer une disposition équivalente au point de vue de la sécurité.

§ 4. En outre des prescriptions indiquées au chapitre Ier, notamment en ce qui concerne les traversées, chaque conducteur est relié, sur chacun de ses supports, à deux isolateurs.

§ 5. A chacun des supports et à 50 centimètres au moins des isolateurs dans la portée de la traversée est fixé un cadre métallique relié à la terre que tra-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

verse tout le faisceau des conducteurs, afin que, en cas de rupture d'un ou plusieurs isolateurs ou conducteurs, ce ou ces conducteurs soient mis à la terre.

§ 6. Les supports métalliques sont pourvus d'une bonne communication avec le sol.

§ 7. Le coefficient de sécurité de l'installation constituant la traversée, calculé conformément aux indications de l'article 6 ci-dessus, est au moins égal à 5 pour les maçonneries de fondations et pour les organes des supports et à 10 pour les conducteurs. Dans l'hypothèse de la rupture de tous les conducteurs placés d'un même côté, le coefficient de sécurité de l'installation doit être au moins égal à 1,25.

§ 8. Dans les distributions de deuxième catégorie :

a) Il n'est pas fait usage de poteaux ou pylônes en bois dans la traversée et les portées immédiatement contiguës;

b) Le diamètre de l'âme métallique des conducteurs d'énergie ne peut être inférieur à 4 millimètres quand la portée de ces conducteurs dans la traversée est au plus de 40 mètres et à 5 millimètres quand cette portée est supérieure à 40 mètres.

Le diamètre pourra, toutefois, être inférieur aux minima ci-dessus indiqués si la traversée est constituée par des conducteurs doublés, pourvu que le coefficient de sécurité de l'ensemble de ces conducteurs doublés soit au moins égal à celui qu'assurerait l'emploi de conducteurs simples ayant les diamètres minima fixés par l'alinéa précédent.

Art. 26. — *Canalisations souterraines.* — § 1er. Les canalisations souterraines doivent être en câbles armés des meilleurs modèles connus, comportant une chemise en plomb, sans soudure, et une armature métallique.

Les câbles sont noyés dans le sol, non pas seulement à la traversée des voies ferrées, mais encore de part et d'autre et jusqu'à 3 mètres au moins au delà des lignes électriques existant le long des voies.

§ 2. Les câbles sont placés dans des conduites d'au moins six centimètres de diamètre extérieur, prolongées de part et d'autre des deux rails extérieurs des voies, de telle façon que l'on puisse, sans opérer aucune fouille sous les voies et le ballast, poser et retirer lesdits câbles.

Sur le reste de leur parcours, dans l'emprise du chemin de fer, des câbles peuvent être placés à nu dans le sol, mais à une profondeur de 70 centimètres au moins en contre-bas de la plate-forme des terrassements.

§ 3. Les câbles armés employés dans la traversée ne peuvent être mis en place qu'après que les essais à l'usine démontrent que leur isolant résiste à la rupture à l'action du courant alternatif, sous une différence de potentiel au moins double de la tension prévue en service.

SECTION III

Prescriptions relatives à l'établissement des ouvrages servant à la traction par l'électricité au moyen du courant continu.

Art. 27. — *Tensions des distributions pour traction.* — Les dispositions de l'article 3, paragraphe 4, de l'article 5, paragraphe 2 *b*, 4 et 6, de l'article 25 et des deux premiers alinéas du paragraphe 3 de l'article 31 ne visent pas les conducteurs de prise de courant, ni leurs supports, ni les autres lignes placées sur ces supports ou en dehors de la voie publique ou inaccessibles au public, si la tension entre ces conducteurs et la terre ne dépasse pas 1.000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ART. 28. — *Voie.* — Quand les rails de roulement sont employés comme conducteurs, toutes les mesures nécessaires sont prises pour protéger contre l'action nuisible des courants dérivés les masses métalliques telles que les voies ferrées du chemin de fer, les conduites d'eau et de gaz, les lignes télégraphiques ou téléphoniques, toutes autres lignes électriques, etc.

A cet effet, seront notamment appliquées les prescriptions suivantes :

§ 1er. La conductance de la voie est assurée dans les meilleures conditions possibles, notamment en ce qui concerne les joints dont la résistance ne doit pas dépasser pour chacun d'eux celle de 10 mètres de rail normal.

L'exploitant est tenu de vérifier périodiquement cette conductance et de consigner les résultats obtenus sur un registre qui doit être présenté à toute réquisition de service du contrôle.

§ 2. La perte de charge dans les voies, mesurée sur une longueur de voie de 1 kilomètre prise arbitrairement sur une section quelconque du réseau, ne doit pas dépasser en moyenne 1 volt pendant la durée effective de la marche normale des voitures.

§ 3. Les artères, reliées à la voie, sont isolées.

§ 4. Aux points où la voie de roulement comporte des aiguillages ou des coupures, la conductance est assurée par des dispositions spéciales.

§ 5. Lorsque la voie passe sur un ouvrage métallique, elle est autant que possible isolée électriquement dans la traversée de l'ouvrage.

§ 6. Aussi longtemps qu'il n'existe pas de masses métalliques dans le voisinage des voies, une perte de charge supérieure aux limites fixées au paragraphe 2 peut être admise, à la condition qu'il n'en résulte aucun inconvénient et en particulier aucun trouble dans les communications télégraphiques ou téléphoniques, ni dans les lignes de signaux de chemins de fer.

§ 7. L'entrepreneur de la distribution est tenu de faire les installations nécessaires pour permettre au service du contrôle de vérifier l'application des prescriptions du présent article ; il doit notamment disposer, s'il y a nécessité, des fils pilotes entre les points désignés de la distribution.

ART. 29. — *Protection des lignes aériennes voisines* — A tous les points où les lignes assurant le service de traction croisent d'autres lignes de distribution ou des lignes télégraphiques ou téléphoniques, les dispositifs doivent être établis en vue de protéger mécaniquement ces lignes contre les contacts avec les conducteurs aériens servant à la traction.

Des dispositions sont prises pour qu'en aucun cas l'appareil de prise de courant ne puisse atteindre les lignes voisines.

ART. 30. — *Fils transversaux servant à la suspension des conducteurs de prise de courant.* — Les fils transversaux servant à la suspension des conducteurs de prise de courant sont isolés avec soin de ces conducteurs et de la terre.

Partout où il est nécessaire, ces fils sont munis de dispositifs d'arrêt destinés à retenir les fils télégraphiques, téléphoniques ou de signaux qui viendraient à tomber et à glisser jusqu'au conducteur de prise de courant.

CHAPITRE III

Protection des lignes télégraphiques, téléphoniques ou de signaux.

ART. 31. — *Voisinage des lignes télégraphiques, téléphoniques ou des signaux,*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et des canalisations aériennes (1). — § 1. En aucun cas, la distance entre les conducteurs d'énergie électrique et les fils télégraphiques, téléphoniques ou de signaux ne doit être inférieure à 1 mètre.

§ 2. Lorsque des conducteurs d'énergie électrique parcourus par des courants de la deuxième catégorie suivent parallèlement une ligne télégraphique, téléphonique ou de signaux, la distance minimum à établir entre ces lignes doit être augmentée de manière qu'en aucun cas il ne puisse y avoir de contact accidentel.

Cette distance ne peut être inférieure à 2 mètres, excepté si les conducteurs sont fixés sur toute leur longueur, auquel cas la distance peut être réduite à 1 mètre comme pour toutes les autres lignes.

§ 3. Aux points de croisement, les conducteurs d'énergie sont autant que possible placés au-dessus des fils télégraphiques, téléphoniques ou de signaux.

Si les conducteurs d'énergie sont au-dessus des fils télégraphiques, téléphoniques ou de signaux, il est fait application des dispositions de l'article 3, paragraphe 5, et de l'article 5, paragraphes 5 et 6 *b*.

Si les conducteurs d'énergie sont au-dessous des fils télégraphiques, téléphoniques ou de signaux, et s'ils sont parcourus par des courants de deuxième catégorie, un dispositif de garde efficace, pourvu d'une bonne communication avec le sol, est solidement établi entre les deux sortes de conducteurs.

Une disposition analogue peut, en cas de nécessité, être imposée pour les conducteurs de première catégorie.

Dans les deux cas qui précèdent, les lignes télégraphiques, téléphoniques ou de signaux sont dûment consolidées.

Lorsque les dispositions prévues au présent paragraphe ne peuvent être appliquées, les lignes préexistantes doivent être modifiées.

§ 4. Au voisinage des ouvrages de distribution, il pourra être établi, s'il est jugé nécessaire, des coupe-circuits spéciaux sur les fils télégraphiques, téléphoniques ou de signaux intéressés.

ART. 32. *Voisinage des lignes télégraphiques, téléphoniques ou de signaux et des canalisations souterraines.* — § 1. Lorsque des conducteurs souterrains d'énergie électrique suivent une direction commune avec une ligne télégraphique, téléphonique ou de signaux, souterraine et que les deux canalisations sont établies en tranchée, une distance minimum de 1 mètre doit exister entre ces conducteurs et la ligne télégraphique, téléphonique ou de signaux, à moins qu'ils ne soient séparés par une cloison.

§ 2. Lorsque des conducteurs souterrains croisent une ligne télégraphique, téléphonique ou de signaux, ils doivent être placés à une distance minimum de 50 centimètres des lignes télégraphiques, téléphoniques ou de signaux, à moins qu'ils ne présentent, en ces points, au point de vue de la sécurité publique, de l'induction et des dérivations, des garanties équivalentes à celle des câbles concentriques ou cordés à enveloppe de plomb ou armés.

ART. 33. — *Lignes téléphoniques, télégraphiques ou de signaux affectées à l'exploitation des distributions de deuxième catégorie.* — Les lignes téléphoniques, télégraphiques ou de signaux, qui sont montées, en tout ou en partie de leur longueur, sur les mêmes supports qu'une ligne électrique de la deuxième ca-

(1) NOTA. — Il est rappelé que les frais des modifications jugées nécessaires des lignes télégraphiques ou téléphoniques préexistantes à celles de la distribution incombent à l'entrepreneur de cette distribution.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tégorie, sont assimilées, pour les conditions de leur établissement, aux lignes électriques de cette même catégorie. En conséquence elles sont soumises aux prescriptions applicables à ces lignes.

Les lignes téléphoniques, télégraphiques ou de signaux sont toujours placées au-dessous des conducteurs d'énergie électrique.

En outre, leurs postes de communication, leurs appareils de manœuvre ou d'appel sont disposés de telle manière qu'il ne soit possible de les utiliser ou de les manœuvrer qu'en se trouvant dans les meilleures conditions d'isolement par rapport à la terre, à moins que leurs appareils ne soient disposés de manière à assurer l'isolement de l'opérateur par rapport à la ligne.

CHAPITRE IV

Entretien des ouvrages. — Exploitation des distributions.

ART. 34. — *Précautions à prendre dans les travaux d'entretien des lignes.*

LIGNES DE LA PREMIÈRE CATÉGORIE.

Aucun travail ne peut être entrepris sur des conducteurs de la première catégorie en charge ou sur des conducteurs placés sur les mêmes supports que des conducteurs de deuxième catégorie sans que des précautions suffisantes assurent la sécurité de l'opérateur.

LIGNES DE LA DEUXIÈME CATÉGORIE.

§ 1. Il est formellement interdit de faire exécuter sur les lignes de la deuxième catégorie aucun travail sans qu'elles aient été, au préalable, isolées de tout générateur possible de courant.

§ 2. La communication ne peut être rétablie que lorsqu'il y a certitude que les ouvriers ne travaillent plus sur la ligne.

A cet effet, l'ordre de rétablissement du courant ne peut être donné que par le chef de service ou son délégué, et seulement après qu'il se sera assuré que le travail est terminé et que tout le personnel de l'équipe est réuni en un point de ralliement fixé à l'avance.

Pendant toute la durée du travail, toutes dispositions utiles doivent être prises pour que le courant ne puisse être rétabli sans ordre exprès du chef de service ou de son délégué.

§ 3. Les mesures indiquées aux deux paragraphes précédents peuvent être remplacées par l'emploi de dispositifs spéciaux permettant soit au chef d'équipe, en cas de travail par équipe, de protéger lui-même l'équipe, soit aux ouvriers isolés de se protéger eux-mêmes par des appareils de coupure pendant toute la durée du travail.

§ 4. Dans les cas exceptionnels où il est nécessaire qu'un travail soit entrepris sur des lignes en charge de la deuxième catégorie, il ne doit y être procédé que sur l'ordre exprès du chef de service et avec toutes les précautions de sécurité qu'il indiquera.

ART. 35. — *Élagage des plantations.* — § 1. Sur les voies publiques empruntées par une distribution d'énergie électrique, l'élagage des arbres plantés en bordure de ces voies publiques soit sur le sol de ces voies, soit sur les propriétés particulières, doit être effectué aussi souvent que la sécurité de la distribution l'exige.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S'il en est requis par le service du contrôle, l'entrepreneur de la distribution est tenu de procéder à cet élagage en se conformant aux instructions du service de voirie.

§ 2. Il est interdit de faire exécuter les élagages, ou des travaux analogues pouvant mettre directement ou indirectement le personnel en contact avec des conducteurs électriques ou pièces métalliques de la seconde catégorie, sans avoir pris des précautions suffisantes pour assurer la sécurité du public et du personnel par des mesures efficaces d'isolement.

ART. 36. — *Affichage des prescriptions relatives à la sécurité dans les distributions de deuxième catégorie.* — Les chefs d'industrie, directeurs ou gérants, sont tenus d'afficher dans un endroit apparent des salles contenant des installations de la deuxième catégorie :

1° Un ordre de service indiquant qu'il est dangereux et formellement interdit de toucher aux pièces métalliques ou conducteurs soumis à une tension de la deuxième catégorie, même avec des gants en caoutchouc, ou de se livrer à des travaux sur ces pièces ou conducteurs, même avec des outils à manche isolant ;

2° Des extraits du présent arrêté et une instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques, rédigée conformément aux termes qui seront fixés par une circulaire ministérielle.

CHAPITRE V

Dispositions diverses.

ART. 37. — *Interdiction d'employer la terre.* — Il est interdit d'employer la terre comme partie du circuit de la distribution.

ART. 38. — *Voisinage des magasins à poudre et poudreries.* — Aucun conducteur d'énergie électrique ne peut être établi à moins de 20 mètres d'une poudrerie ou d'un magasin à poudre, à munitions ou à explosifs, si ce conducteur est aérien ; 10 mètres si ce conducteur est souterrain.

Cette distance se compte à partir de l'aplomb extérieur de la clôture qui entoure la poudrerie ou du mur d'enceinte spécial qui entoure le magasin. S'il n'existe pas de mur, on devra considérer comme limite :

1° D'un magasin enterré, le pied du talus du massif de terre recouvrant les locaux ;

2° D'un magasin souterrain, le polygone convexe circonscrit à la projection horizontale sur le sol des locaux et des gaines ou couloirs qui mettent ces locaux en communication avec l'extérieur.

ART. 39 — *Conditions d'application du présent règlement.* — § 1. Des dérogations aux prescriptions du présent arrêté peuvent être accordées par le ministre des Travaux publics, après avis du comité d'électricité.

§ 2. — Le présent règlement ne fait pas obstacle à ce que le service du contrôle, lorsque la sécurité l'exige, impose des conditions spéciales pour l'établissement des distributions, sauf recours des intéressés au ministre des Travaux publics.

§ 3. Le présent arrêté annule et remplace l'arrêté du 21 mars 1910.

712. Circulaire Ministérielle du 21 mars 1911.

Elle complète l'arrêté pris à la même date. Malgré que ledit arrêté soit muet sur les prescriptions concernant la protection des sites, le ministre engage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les ingénieurs à veiller à la conservation des sites et monuments et à en saisir le cas échéant la commission spéciale du département.

Au point de vue de la liaison à assurer entre les agglomérations importantes elles peuvent être réalisées par des moyens autres qu'une ligne téléphonique, tels que automobiles, bicyclettes, etc.

Si la distribution est munie d'appareils de coupure à l'entrée de chaque agglomération, l'installation pourra être considérée comme répondant à l'art. 7.

Une planche, jointe à la circulaire, indique six dispositions de conducteur pour les traversées de chemins de fer, à l'effet du doublement des conducteurs.

1° Deux isolateurs placés à la même hauteur et à côté de l'un de l'autre sur chaque support de la traversée.

Le fil de ligne passe sur un des isolateurs. Un fil court est fixé à l'autre isolateur et relié au fil de ligne par deux ligatures de part et d'autre de l'autre isolateur.

2° Même dispositif mais les deux isolateurs placés l'un au-dessus de l'autre. L'isolateur du dessus doit pouvoir supporter une résistance double de celle des isolateurs de ligne.

3° Trois isolateurs sur chaque support, placés à la même hauteur et à côté de l'un de l'autre dans le sens perpendiculaire au fil de ligne. L'isolateur du milieu supporte le fil de ligne. Deux fils courts servent à relier l'isolateur de droite et celui de gauche au fil de ligne.

4° Même dispositif, mais chaque fil court est fixé au fil de ligne par deux ligatures l'une du côté traversée, l'autre sur la partie contiguë.

5° Trois isolateurs en triangle horizontal, le sommet du côté opposé à la traversée. Le câble de ligne est fixé sur chaque support à deux de ces isolateurs en série. Un deuxième câble dit câble porteur le double dans la traversée et il est ligaturé au câble de ligne. A leurs extrémités les deux câbles sont réunis par un point spécial.

6° Chaque conducteur est remplacé par un système de deux câbles, fixés chacun sur un isolateur. Les deux conducteurs sont dans un même plan horizontal et ils sont reliés par des fils transversaux et diagonaux torsadés.

La suppression des filets paraît justifiée dans l'état actuel des installations.

713. Circulaire du 15 avril 1912 du Ministre des Travaux publics et des Postes, Télégraphes et Téléphones relative aux états statistiques à fournir en vertu de l'article 58 du décret du 3 avril 1908.

Aux termes de l'article 58 du décret du 3 avril 1908.

« Tout permissionnaire ou concessionnaire doit adresser à l'ingénieur en « chef du contrôle, chaque année, le 15 avril au plus tard, des états statistiques « conformes aux modèles qui sont arrêtés par le ministre des Travaux publics, « après avis du Comité d'électricité, et comprenant les renseignements tech- « niques relatifs à l'année entière, du 1er janvier au 31 décembre. Ces rensei- « gnements peuvent être publiés en tout ou en partie. »

Par application de cette disposition, le Comité permanent d'électricité a établi les modèles des états où devront être consignés, chaque année, les renseignements intéressant la statistique de l'industrie électrique de la France. Je vous en transmets ci-joint un exemplaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces états sont de deux sortes :

1° Les états des renseignements à fournir par les entrepreneurs pour chacune des distributions qu'ils exploitent ;

2° Les états récapitulatifs à établir, d'après les états précédents, par le service du contrôle dans chaque département;

Les distributions ont été réparties, d'autre part, en deux classes pour lesquelles des renseignements statistiques auront à être fournis, tant dans les états de détail que dans les états récapitulatifs :

1° Les entreprises de transport d'énergie électrique desservant des services publics ou les entreprises exploitant des distributions publiques par concession ou par permission de voirie, ainsi que les entreprises mixtes:

2° Les installations particulières de transport et de distribution d'énergie électrique. A cette dernière classe devront être rattachées les lignes au moyen desquelles le propriétaire d'une usine, sans faire de distribution publique, dessert, en sus de ses propres besoins, quelques clients en nombre limité et très restreint.

Vous remarquerez que des renseignements plus sommaires sont demandés en ce qui concerne cette deuxième classe de distribution.

Le chiffre des recettes n'est exigible que pour toutes les entreprises *concédées* en vertu de l'article 28 de leur cahier de charges, et pour les entreprises établies sous le régime de la *permission de voirie*, dans le cas où il est fait application de l'article 3 du décret du 17 octobre 1907 (redevances proportionnelles aux recettes brutes). J'appelle néanmoins toute votre attention sur l'intérêt que j'attache à recevoir, sur toutes les distributions sans exception de votre département, les renseignements indispensables à l'établissement d'une statistique complète.

En ce qui concerne la rédaction des divers états où doivent être rassemblés ces renseignements, je vous prie de tenir la main à ce qu'il soit tenu compte, aussi exactement que possible, des indications suivantes :

I. — États de détails à fournir par les entrepreneurs.

Chaque distribution devra faire l'objet de renseignements à part. La circulaire du 15 septembre 1908 a indiqué la règle à suivre pour la délimitation des distributions. Tout ensemble de canalisations et de distributions d'énergie électrique reliées entre elles et parcourues par un même courant électrique doit être considéré comme constituant une seule et même distribution, à condition que ces canalisations et ouvrages aient été autorisés par des décisions connexes. Si, au contraire, l'occupation du domaine public a été autorisée par des actes distincts, sans connexité entre eux, les canalisations et ouvrages sont considérés comme formant des distributions séparées, la nature de chaque distribution étant déterminée par l'acte qui l'autorise.

Le concessionnaire ou permissionnaire remplira l'état ou les états correspondant aux distributions qu'il exploite.

Les entrepreneurs devront, pour chaque distribution, joindre à l'état de renseignements un croquis schématique de leurs canalisations.

Lorsqu'une même entreprise s'étend dans plusieurs départements, si un seul ingénieur en chef est chargé de son contrôle, en vertu d'une décision ministérielle prise par application de l'article 1er (deuxième alinéa) du décret du 17 octobre 1907 (contrôle), les renseignements statistiques ne seront envoyés qu'à cet ingénieur en chef.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il en sera de même si l'entreprise est soumise au contrôle de plusieurs ingénieurs en chef. Dans ce cas, les renseignements seront adressés à l'ingénieur en chef dans le service duquel se trouve le siège de la Direction de l'exploitation ou, à défaut de cette direction, le siège de l'établissement principal de cette exploitation. En faisant cet envoi à cet ingénieur en chef, les entrepreneurs en aviseront les ingénieurs en chef des autres départements traversés.

Cette mesure a pour objet d'éviter les doubles emplois.

Parmi les données statistiques à fournir par les entrepreneurs, certaines ont trait à la production du courant au moyen d'usines hydro-électriques. Une colonne des tableaux ci-joints demande d'indiquer le débit maximum autorisé, le débit à l'étiage et le débit maximum aménagé au pied des conduites forcées.

Sur les cours d'eau navigables ou flottables, il y a lieu d'indiquer, dans les colonnes 23 (état A) et 18 (état B), le débit maximum autorisé, le débit à l'étiage et le débit maximum aménagé au pied des conduites forcées.

Pour les cours d'eau non navigables ni flottables, il convient de produire les mêmes renseignements, sauf en ce qui concerne le débit maximum autorisé que le règlement d'eau ne fixe pas.

Les industriels devront fournir ces renseignements que vous aurez à vérifier.

En ce qui concerne le débit à l'étiage, il doit être entendu qu'il s'agit du débit minimum aux plus basses eaux, ce minimum pouvant se produire soit en été, soit en hiver, suivant le régime et la situation de chaque cours d'eau.

II. — États récapitulatifs à établir par le service du contrôle.

Les renseignements fournis par les entrepreneurs dans les états de détail seront examinés et centralisés par l'ingénieur en chef du contrôle de chaque département. Ils seront transcrits par ses soins sur les deux tableaux récapitulatifs qui correspondent aux deux classes de distributions et reproduisent le questionnaire des deux types d'états à fournir par les industriels intéressés.

Lorsqu'une même entreprise s'étend dans plusieurs départements, par application de ce qui a été dit plus haut, il appartient à un seul ingénieur en chef de faire figurer cette entreprise sur l'état récapitulatif de son département.

Les tableaux récapitulatifs transmis à l'Administration centrale serviront à l'établissement de la statistique générale de l'industrie électrique en France.

La transmission de ces divers documents devra être faite, pour l'année précédente, avant le 15 juin de chaque année, dernier délai, et pour la première fois avant le 15 juin 1912.

714. Circulaire du 10 janvier 1912 du Ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes relative à la traction par courant alternatif monophasé.

Les projets de traction par courant alternatif monophasé prévoient souvent l'emploi de courant à la fréquence 15, plus basse que les fréquences 25 et 50 communément adoptées dans les distributions d'énergie électrique pour tous usages. Or il est du plus haut intérêt que les réseaux de traction ne soient pas condamnés à se suffire à eux-mêmes et qu'ils puissent procéder à des échanges d'énergie avec les réseaux voisins qui distribuent la lumière et la force motrice, soit par voie d'acquisition pour leur alimentation propre, soit par voie de cession pour l'utilisation de leurs excédents. Ces échanges ne pouvant se faire que par l'intermédiaire de transformateurs de fréquence, engins

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tournants qui se composent de deux parties distinctes, caractérisées par des nombres de pôles différents, proportionnels aux fréquences des courants qui y circulent, il importe, pour rendre possible la jonction désirable entre le réseau de traction et un réseau de distribution quelconque à la fréquence 25, ou à la fréquence 50, que le nombre de périodes par seconde du courant de traction soit fixé non pas à 15, mais à une valeur voisine, répondant à la condition d'être un sous-multiple commun à 25 et à 50. Le nombre 16 2/3 satisfait à cette condition, car en vertu des relations :

$$16 + \frac{2}{3} = \frac{2,5}{1,5} = \frac{50}{3}$$

il suffira que les nombres de pôles sur le primaire et sur le secondaire des transformateurs soient entre eux comme les nombres 4 et 6 dans un cas, 2 et 6 dans l'autre, pour que le problème soit résolu pratiquement.

Je vous prie donc de vouloir bien tenir la main à ce que, dans tous les projets de traction par courant alternatif monophasé à basse fréquence qui vous seront soumis, la fréquence, lorsqu'elle est inférieure à 25, soit uniformément fixée non pas au nombre 15, mais au nombre 16 2/3.

715. Circulaire ministérielle du 1er octobre 1912 relative à l'établissement des permissions de voirie, de canalisations et ouvrages de distribution ou de transport d'énergie électrique.

Le Ministre rappelle à nouveau les inconvénients créés au développement des industries d'éclairage électrique par les autorisations vivant sous le régime des permissions de voirie.

Il indique les seuls cas où ces autorisations peuvent être accordées : lignes pour particuliers pour leur usage personnel ou pour servir un nombre très restreint de personnes sauf qu'il y ait à proprement parler vente au public; lignes de transport desservant les services publics si le régime est reconnu plus favorable que le régime de la concession ; lignes établies en vue d'une distribution publique, lorsque la concession présenterait plus d'inconvénients que d'avantages.

Les permissions sont régies maintenant par l'arrêté ministériel du 3 août 1878, le décret du 7 octobre 1907, le décret du 3 avril 1908 et la circulaire ministérielle du 24 septembre 1911.

Ces règles sont aussi bien applicables aux permissions délivrées par les préfets qu'à celles délivrées par les maires.

La circulaire donne en annexes des modèles d'arrêtés préfectoraux ou municipaux, celui joint à la circulaire du 25 octobre 1908 étant abrogé.

Tout bénéficiaire actuel d'une permission de voirie, pourra, sur sa demande, demander à être régi par la disposition générale de la présente circulaire.

716. Circulaire ministérielle du 20 mars 1913 relative à la notification annuelle du chiffre devant servir de base pour la détermination du prix du kilowatt-heure.

Le Ministre explique que, dans certains départements du Nord de la France, les cahiers des charges ont prévu à l'art. 11 que les tarifs de vente seraient déterminés en prenant pour base le cours du charbon à la mine d'un charbon déterminé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'administration désirant adopter une base fixe pour répondre à la généralité des cas a fixé ce prix à 20 fr. 47 pour le charbon, pour l'année 1913, comme base de fixation du prix de vente du kilowatt-heure.

La circulaire du 20 janvier 1914 fixe ce prix à 18 fr. 99 pour l'année 1914.

716 *bis*. **Circulaire ministérielle du 26 juillet 1913 relative à la protection des paysages.** — Elle explique que l'Union des Syndicats de l'Electricité a prise l'initiative d'un concours ayant pour objet de déterminer les types de pylônes et de supports répondant à un aspect esthétique en harmonie avec la beauté des sites.

Le Ministre invite cependant dès maintenant les ingénieurs des contrôles à porter leur attention sur la forme des pylones et supports.

717. Décret du 1er octobre 1913 portant règlement d'administration pour l'hygiène et la sécurité des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.

SECTION I

Dispositions générales.

ARTICLE PREMIER. — Les installations électriques doivent comporter des dispositifs de sécurité en rapport avec la plus grande tension de régime existant entre les conducteurs et la terre.

Suivant cette tension, les installations électriques sont classées en deux catégories.

PREMIÈRE CATÉGORIE.

a) *Courant continu.* — Installations dans lesquelles la plus grande tension de régime entre les conducteurs et la terre ne dépasse 600 volts.

b) *Courant alternatif.* — Installations dans lesquelles la plus grande tension efficace entre les conducteurs et la terre ne dépasse pas 150 vols.

DEUXIÈME CATÉGORIE.

SECTION II

Installations de machines, appareils et lampes électriques.

ART. 2. — Les machines électriques sont soumises, en outre des prescriptions générales du décret du 10 juillet 1913, et notamment de celles des articles 12, 14 et 15 de ce décret, aux prescriptions spéciales suivantes :

Pour celles qui appartiennent à des installations de la deuxième catégorie, les bâtis et pièces conductrices non parcourues par le courant doivent être reliés électriquement à la terre ou isolés électriquement du sol. Dans ce dernier cas les machines sont entourées par un plancher de service non glissant, isolé du sol et assez développé pour qu'il ne soit pas possible de toucher à la fois la machine et à un corps conducteur quelconque relié au sol.

La mise à la terre ou l'isolement électrique est constamment maintenue en bon état.

Les mêmes prescriptions sont applicables aux tranformateurs dépendant d'installations de la deuxième catégorie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les transformateurs dépendant d'installations de la deuxième catégorie ne doivent être accessibles qu'au personnel qui en a la charge.

ART. 3. — Si une machine ou un appareil électrique de la deuxième catégorie se trouve dans un local ayant, en même temps, une autre destination, la partie du local affectée à cette machine ou à cet appareil est rendue inaccessible, par un garde-corps ou un dispositif équivalent, à tout autre personnel que celui qui en a la charge; une mention indiquant le danger doit être affichée en évidence.

ART. 4. — Dans les locaux destinés aux accumulateurs, dans les ateliers qui contiennent des corps explosifs et dans ceux où il peut se produire soit des gaz détonants, soit des poussières inflammables, il est interdit d'établir des machines électriques à découvert, des lampes à incandescence non munies de double enveloppe, des lampes à arc ou aucun appareil pouvant donner lieu à des étincelles sans qu'ils soient pourvus d'une enveloppe de sûreté les isolant de l'atmosphère du local.

La ventilation des locaux destinés aux accumulateurs doit être suffisante pour assurer l'évacuation continue des gaz dégagés.

SECTION III

Tableaux de distribution et locaux.

ART. 5. — Pour les tableaux de distribution de courants appartenant à la première catégorie, les conducteurs doivent présenter les isolements et les écartements propres à éviter tout danger.

Pour les tableaux de distribution portant des appareils et pièces métalliques de la deuxième catégorie, le plancher de service sur la face avant (où se trouvent les poignées de manœuvres et les instruments de lecture) doit être isolé électriquement et établi comme il est dit ci-dessus au sujet des machines.

Quand les pièces métalliques ou appareils de la deuxième catégorie sont établis à découvert sur la face arrière du tableau, un passage entièrement libre de 1 mètre de largeur et de 2 mètres de hauteur au moins est réservé derrière lesdits appareils et pièces métalliques.

L'accès de ce passage est défendu par une porte fermant à clef, laquelle ne peut être ouverte que par ordre du chef de service ou par ses préposés à ce désignés; l'entrée en sera interdite à toute autre personne.

ART. 6. — Les passages ménagés pour l'accès aux machines et appareils de la deuxième catégorie placés à découvert ne peuvent avoir moins de 2 mètres de hauteur; leur largeur mesurée entre les machines, conducteurs ou appareils eux-mêmes, aussi bien qu'entre ceux-ci et les parties métalliques de la construction ne doit pas être inférieure à 1 mètre.

Dans tous les locaux, les conducteurs et appareils de la deuxième catégorie doivent, notamment sur les tableaux de distribution, être nettement différenciés des autres par une marque très apparente (une couche de peinture par exemple).

Dans les locaux où le sol et les parois sont très conducteurs, soit par construction, soit par suite de dépôts salins résultant de l'exercice même de l'industrie ou par suite d'humidité, il est interdit d'établir, à la portée de la main, des conducteurs ou des appareils placés à découvert.

ART. 7. — Les salles des machines génératrices d'électricité et les sous-stations doivent posséder un éclairage de secours, continuant à fonctionner en cas d'arrêt du courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

SECTION IV

Installations des canalisations.

ART. 8. — Les canalisations nues appartenant à une installation de la deuxième catégorie doivent être établies hors de la portée de la main sur des isolateurs convenablement espacés et être écartées des masses métalliques telles que piliers ou colonnes, gouttières, tuyaux de descente, etc.

Les canalisations nues appartenant à une installation de la première catégorie établies à l'intérieur, et qui sont à la portée de la main, doivent être signalées à l'attention par une marque bien apparente ; l'abord en est défendu par un dispositif de garde.

Les enveloppes des autres canalisations doivent être convenablement isolantes.

Aucun travail n'est entrepris sur des conducteurs de la première catégorie en charge sans que les précautions suffisantes assurent la sécurité de l'opérateur.

Des dispositions doivent être prises pour éviter l'échauffement anormal des conducteurs, à l'aide de coupe-circuit, plombs fusibles ou autres dispositifs équivalents.

Toute installation reliée à un réseau comportant des lignes aériennes de plus de 500 mètres doit être suffisamment protégée contre les décharges atmosphériques.

ART. 9. — Les colonnes, les supports et, en général, toutes les pièces métalliques de la construction qui risqueraient, par suite d'un accident sur la canalisation, d'être accidentellement soumis à une tension de la deuxième catégorie, doivent être convenablement reliés à la terre.

ART. 10. — Il est formellement interdit de faire exécuter aucun travail sur les lignes électriques de la deuxième catégorie, sans les avoir, au préalable, coupées de part et d'autre de la section à réparer. La communication ne peut être rétablie que sur l'ordre exprès du chef de service ; ce dernier doit avoir été au préalable avisé par chacun des chefs d'équipe que le travail est terminé et que le personnel ouvrier est réuni au point de ralliement fixé à l'avance.

Pendant toute la durée du travail, la coupure de la ligne doit être maintenue par un dispositif tel que le courant ne puisse être rétabli que sur l'ordre exprès du chef de service.

Dans les cas exceptionnels où la sécurité publique exige qu'un travail soit entrepris sur des lignes en charge de la deuxième catégorie, il ne doit y être procédé que sur l'ordre exprès du chef de service et avec toutes les précautions de sécurité qu'il indiquera.

ART. 11. — Il est interdit de faire exécuter des élagages ou des travaux analogues pouvant mettre directement ou indirectement le personnel en contact avec des conducteurs ou pièces métalliques de la deuxième catégorie, sans avoir pris les précautions suffisantes pour assurer la sécurité du personnel par des mesures efficaces d'isolement.

ART. 12. — Les lignes téléphoniques, télégraphiques ou de signaux particulières aux établissements ayant des installations électriques et affectées à leur exploitation, qui sont montées, en tout ou en partie de leur longueur, sur les mêmes supports qu'une ligne électrique de la deuxième catégorie, sont soumises aux prescriptions de l'article 8 (alinéas 1 et 6) et à celles des articles 10 et 11.

Leurs postes de communication, leurs appareils de manœuvres ou d'appel

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

doivent être disposés de telle manière qu'il ne soit possible de les utiliser ou de les manœuvrer qu'en se trouvant dans les meilleures conditions d'isolement par rapport à la terre, à moins que leurs appareils ne soient disposés de manière à assurer l'isolement de l'opérateur par rapport à la ligne.

SECTION V

Affichage. — Dérogation. — Contrôle.

ART. 13. — Les chefs d'établissement, directeurs ou gérants sont tenus d'afficher, dans un endroit apparent des salles contenant des installations de la deuxième catégorie :

1° Un ordre de service indiquant qu'il est dangereux et formellement interdit de toucher aux pièces métalliques ou conducteur soumis à une tension de la deuxième catégorie, même avec des gants en caoutchouc ou de se livrer à des travaux sur ces pièces ou conducteurs, même avec des outils à manche isolant ;

2° Des extraits du présent règlement et une instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques, rédigée conformément aux termes qui seront fixés par un arrêté ministériel.

Ils sont, en outre, tenus, dans chacune des salles contenant des installations de la deuxième catégorie, de placer et de tenir prêts à servir, pour parer aux accidents électriques, des crochets à manches isolants et un tabouret de bois verni avec pieds terminés par des pièces de porcelaine ou de verre.

ART. 14. — Dans les ateliers de construction ou de réparation de matériel électrique (machines, instruments, appareils, câbles et fils), où l'emploi des tensions de la deuxième catégorie est d'un usage courant pendant les essais du matériel en cours de fabrication, il peut être dérogé, pour ces essais, aux prescriptions du présent décret, à la condition que les organes dangereux ne soient accessibles qu'à un personnel expérimenté, désigné expressément par le chef d'établissement et que la sécurité générale ne soit pas compromise.

Une consigne spéciale réglementant ces essais doit être rédigée par le chef d'établissement et portée à la connaissance du personnel.

ART. 15. — Le ministre du Travail et de la Prévoyance sociale peut, par arrêté pris sur le rapport des inspecteurs du travail et après avis du comité consultatif des arts et manufactures, accorder dispense, pour un délai déterminé, de tout ou partie des prescriptions des articles 5 (alinéas 3 et 4) et 6 (alinéa 1) :

1° Aux installations créées avant la promulgation du présent décret ;

2° Lorsque l'application de ces prescriptions est pratiquement impossible.

Dans les deux cas, la sécurité du personnel doit être assurée dans des conditions équivalentes à celles définies auxdits articles.

ART. 16. — Les chefs d'industrie, directeurs ou gérants doivent adresser à l'inspecteur du travail un schéma de leurs installations électriques de la deuxième catégorie indiquant l'emplacement des usines, sous-stations, postes de transformateur et canalisations.

Une note jointe indiquera :

a) Si, par application de l'article 2 (alinéa 2) du présent règlement concernant les machines et transformateurs de la deuxième catégorie, les bâtis et masses métalliques non parcourus par le courant sont isolés électriquement du sol ou s'ils sont reliés à la terre ;

b) Les renseignements techniques nécessaires pour assurer le contrôle de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'exécution des prescriptions du présent règlement (nature du courant, tension des différentes parties de l'installation, pièces métalliques visées à l'article 9, etc.).

Dans la première quinzaine de chaque année, le schéma et les renseignements qui l'accompagnent sont complétés, s'il y a lieu, par les chefs d'industrie, directeurs ou gérants, et les modifications transmises à l'inspecteur du travail.

En cas de modifications importantes ou d'installations nouvelles, le schéma et les renseignements complémentaires sont adressés à l'inspecteur du travail avant la mise en exploitation.

SECTION VI

Dispositions diverses.

ART. 17. — Le présent décret ne s'applique pas, en dehors de l'enceinte des usines de production, aux distributions d'énergie électrique réglementées en vertu de la loi du 15 juin 1906.

ART. 18. — Le délai minimum prévu à l'article 69 du livre II du code du travail et de la prévoyance sociale pour l'exécution des mises en demeure est fixé :

A quinze jours pour les mises en demeure fondées sur les dispositions des articles ci-après du présent décret : article 2 (alinéas 2 et 4) ; article 5 (alinéas 1 et 2) ; article 6 (alinéas 1 et 3) ; article 8 (alinéas 1, 3 et 6) ;

A quatre jours pour les mises en demeure fondées sur les dispositions des autres articles; toutefois ce minimum de délai sera porté à un mois lorsque l'exécution de la mise en demeure comportera la création d'installations nouvelles et non pas seulement l'utilisation d'installations existantes.

Sont maintenus, à titre transitoire, les délais applicables aux mises en demeure notifiées aux chefs d'établissement avant la publication du présent décret, tels que ces délais ont été antérieurement fixés.

ART. 19. — En exécution des articles 3 et 4 de la loi du 26 novembre 1912, le décret du 11 juillet 1907 et le décret du 13 août 1912 qui l'a modifié, cesseront d'être appliqués à partir de la publication du présent décret.

718. Arrêté du 9 octobre 1913 fixant les termes de l'instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques.

L'instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques, que les chefs d'industrie, directeurs ou gérants sont tenus d'afficher dans un endroit apparent des salles contenant des installations électriques de la 2e catégorie sera rédigée comme suit :

Instruction sur les premiers soins à donner aux personnes victimes d'accidents électriques.

Soustraire le plus rapidement possible la victime aux effets du courant en se conformant rigoureusement aux prescriptions ci-dessous indiquées pour ne pas s'exposer personnellement au danger.

NOTA. — L'humidité rend le sauvetage particulièrement dangereux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TENSION DE 1re CATÉGORIE (1).

Écarter immédiatement le conducteur de la victime en prenant la précaution de ne pas se mettre en contact direct ou par l'intermédiaire d'un objet métallique avec le conducteur sous tension.

TENSION DE LA 2e CATÉGORIE INFÉRIEURE A 6.000 VOLTS (ENTRE CONDUCTEURS).

Tenter de supprimer le courant, s'efforcer de délivrer la victime du contact dangereux.

A. — *Un fil est tombé sur le sol et touche la victime.*

Écartement des fils. — Sans toucher la victime écarter les fils avec les crochets à manches isolants prévus par le dernier paragraphe de l'article 13 du décret du 1er octobre 1913 (2) ; ces crochets ne doivent pas être humides.

Se placer sur le tabouret de bois verni avec pieds terminés par des pièces de porcelaine ou de verre, tabouret prévu par le dernier paragraphe de l'article 13 du décret du 1er octobre 1913 (3).

Déplacement et dégagement de la victime. — S'il est plus facile de déplacer la victime que d'écarter les fils, le faire en observant exactement les mêmes précautions.

Dans toutes ces opérations, éviter que le fil ne vienne toucher le visage ou d'autres parties nues du corps.

B. — *La victime est suspendue.*

Supprimer le courant, prévoir la chute du blessé, préparer sur le sol : matelas, bottes de paille, etc.

TENSION SUPÉRIEURE A 6.000 VOLTS (ENTRE CONDUCTEURS).

Supprimer le courant. — Si l'on ne peut supprimer le courant, le sauvetage sera toujours très dangereux.

Isoler le sauveteur à la fois du côté du courant et du côté de la terre ; employer les crochets à manches isolants prévus par le dernier paragraphe de l'article 13 du décret du 1er octobre 1913.

Se placer sur le tabouret de bois verni avec pieds terminés par des pièces de porcelaine ou de verre, tabouret prévu par le dernier paragraphe de l'article 13 du décret du 1er octobre 1913.

Dans tous les cas, prévenir un médecin.

PREMIERS SOINS A DONNER AVANT L'ARRIVÉE DU MÉDECIN.

Donner à la victime, dès qu'elle a été soustraite aux effets du courant, les soins ci-après indiqués, même dans le cas où elle présenterait les apparences de la mort.

---

(1) Tensions de 1re catégorie : courants alternatifs : moins de 150 volts ; courants continus : moins de 600 volts.

(2) A défaut de crochets, se servir de bâtons, de cannes ou d'outils à manches isolants, ces objets ne devant pas être humides.

(3) A défaut de ce tabouret, construire un tabouret isolant de fortune en disposant sur le sol des planches sur lesquelles on place des isolateurs ou, à défaut des objets solides très isolants (bouteilles vides, bols en faïence, etc.), le tout surmonté par de nouvelles planches aussi sèches que possible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Transporter d'abord la victime dans un local aéré où on ne conservera qu'un très petit nombre d'aides : trois ou quatre, toutes les autres personnes étant écartées.

Desserrer les vêtements et s'efforcer, le plus rapidement possible, de rétablir la respiration et la circulation.

Pour rétablir la respiration, on peut avoir recours principalement aux deux moyens suivants : la traction rythmée de la langue et la respiration artificielle.

Commencer toujours par la méthode de la traction de la langue, en appliquant en même temps, s'il est possible, la méthode de la respiration artificielle.

Chercher concurremment à ramener la circulation en frictionnant la surface du corps, en flagellant le tronc avec les mains ou avec des serviettes mouillées, en jetant de temps en temps de l'eau froide sur la figure, en faisant respirer de l'ammoniaque ou du vinaigre.

1° *Méthode de la traction rythmée de la langue.* — Ouvrir la bouche de la victime et, si les dents sont serrées, les écarter en forçant avec les doigts ou avec un corps résistant quelconque : morceau de bois, manche de couteau, dos de cuiller ou de fourchette, extrémité d'une canne, etc.

Saisir solidement la partie antérieure de la langue entre le pouce et l'index de la main droite, nus ou revêtus d'un linge quelconque, d'un mouchoir de poche par exemple (pour empêcher le glissement), et exercer sur elle de fortes tractions répétées, successives, cadencées ou rythmées, suivies de relâchement, en imitant les mouvements rythmés de la respiration elle-même, au nombre d'au moins vingt par minute.

Les tractions linguales doivent être pratiquées sans retard et avec persistance durant une demi-heure, une heure et plus, s'il le faut, sans se décourager.

2° *Méthode de la respiration artificielle.* — Coucher la victime sur le dos, les épaules légèrement soulevées, la bouche ouverte, la langue bien dégagée.

Saisir les bras à la hauteur des coudes, les appuyer assez fortement sur les parois de la poitrine, puis les écarter et les porter au-dessus de la tête en décrivant un arc de cercle ; les ramener ensuite à leur position primitive en pressant sur les parois de la poitrine.

Répéter ces mouvements environ vingt fois par minute en continuant jusqu'au rétablissement de la respiration naturelle, rétablissement qui peut demander quelquefois plusieurs heures.

719. Décret du 9 mars 1913 portant application à l'Algérie des décrets des 6 et 7 septembre 1912 (distribution d'énergie électrique, contrôle, redevances).

ARTICLE PREMIER. — Sont déclarés exécutoires en Algérie sous les réserves indiquées à l'article 2 du décret du 14 octobre 1909 et à l'article 2 ci-après :

1° Le décret du 6 septembre 1912, modifiant le décret du 17 octobre 1907 organisant le service du contrôle des distributions d'énergie électrique ;

2° Le décret du 7 septembre 1912, modifiant le décret du 17 octobre 1907 portant fixation des redevances pour l'occupation du domaine public par les entreprises de distribution d'énergie.

ART. 2. — Par dérogation à l'article 2 du décret du 6 septembre 1912 et à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'article 3 du décret du 7 septembre 1912, lesdits décrets recevront leur application à partir du 1er janvier 1914 en Algérie.

ART. 3. — Les ministres de l'Intérieur, des Travaux publics, des Finances et de l'Agriculture, sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret.

720. Décret du 21 mars 1914 concernant les travaux dangereux interdits aux enfants et aux femmes.

ART. 1er. — Il est interdit d'employer les enfants âgés de moins de dix-huit ans et les femmes au graissage, au nettoyage, à la visite ou à la réparation des machines ou mécanismes en marche.

ART. 2. — Il est interdit d'employer les enfants âgés de moins de dix-huit ans et les femmes dans les locaux où se trouvent des machines actionnées à la main ou par un moteur mécanique, dont les parties dangereuses ne sont point couvertes de couvre-engrenages, garde-mains et autres organes protecteurs.

ART. 14. — Dans les établissements où s'effectuent les travaux dénommés au tableau B annexé au présent décret, l'accès des locaux affectés à ces opérations est interdit aux enfants âgés de moins de dix-huit ans.

ART. 15. — Le travail des enfants âgés de moins de dix-huit ans et des femmes n'est autorisé dans les locaux dénommés au tableau C annexé au présent décret que sous les conditions spécifiées audit tableau.

ART. 16. — Pour l'application du présent décret, les chefs d'établissement doivent être en mesure de présenter à toute réquisition des inspecteurs, pour chacune des enfants de moins de dix-huit ans, qu'ils emploient, soit le livret prévu par l'article 88 du livre II du code de travail et de la prévoyance sociale soit un bulletin de naissance.

ART. 17. — En exécution des articles 3 et 4 de la loi du 26 novembre 1912, le décret du 13 mai 1893, modifié par les décrets des 21 juin 1897, 20 avril 1899, 3 mai 1900, 22 novembre 1905, 7 mars, 10 septembre et 15 décembre 1908, 7 mars 1910 et 8 octobre 1911, cessera d'être appliqué à partir de la publication du présent décret.

TABLEAU B. — *Travaux interdits aux enfants âgés de moins de dix-huit ans.*

TRAVAUX	RAISONS DE L'INTERDICTION
Accumulateurs électriques (fusion du plomb et manipulation des oxydes de plomb dans les fabriques d').	Vapeurs et poussières nuisibles.
. . . . .	. . . . .
Conduite et surveillance des lignes, appareils et machines électriques de toute nature, dont la tension de régime par rapport à la terre dépasse 600 volts pour les courants continus et 150 volts (tension efficace) pour les courants alternatifs).	Nécessité d'un travail prudent et attentif.
. . . . .	. . . . .

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU C. — *Établissements dans lesquels l'emploi des enfants âgés de moins de dix-huit ans et des femmes est autorisé sous certaines conditions.*

ÉTABLISSEMENTS	CONDITIONS	MOTIFS
. . . . .	. . . . .	. . . . .
Accumulateurs électriques (fusion du plomb et manipulation des oxydes de plomb dans les fabriques d').	Les femmes de tout âge cesseront de pouvoir être employées à ces travaux dès l'expiration des délais impartis pour l'exécution des règlements spéciaux, si les mesures édictées par les règlements n'ont pas été exécutées.	Dangers de saturnisme.
. . . . .		
. . . . .		
. . . . .	. . . . .	. . . . .

721. Comité permanent d'électricité. — Ce comité, institué par décret du 7 février 1907, se réunit obligatoirement trois fois par an, aux époques fixées par un arrêté du ministre des Travaux publics. Il peut, en outre, être convoqué à une époque quelconque par le ministre pour l'examen des questions urgentes qui lui seraient soumises.

Le comité peut entendre les personnes dont il juge l'audition utile pour ses délibérations. Ces personnes sont convoquées soit d'office, soit sur leur demande, par les soins du président. Des sous-commissions temporaires, composées par parties égales de fonctionnaires et de représentants professionnels des industries électriques, peuvent être constituées dans le sein du comité pour l'examen préalable d'affaires déterminées ; les membres en sont désignés par le président.

Le comité est autorisé à émettre des vœux tendant à l'étude des questions intéressant les distributions d'énergie électrique. Les avis et les vœux sont transmis aux ministres intéressés par le ministre des Travaux publics.

Le directeur des routes et de la navigation, le directeur des chemins de fer, le directeur des mines, le directeur des voies terrestres d'intérêts locaux, le directeur des distributions d'énergie électrique et le directeur de l'exploitation téléphonique à l'administration des postes et télégraphes ont entrée au Comité avec voie consultative pour les affaires de leur service.

722. Tramways électriques. — Les concessions de tramways font toujours l'objet d'un décret rendu par le Président de la République sur la proposition du ministre des Travaux publics ; elles sont régies par la loi du 11 juin 1880 et le règlement d'administration publique du 6 juin 1881. Les cahiers des charges sont établis sur un modèle uniforme. (MM. A Blondel et Dubois, dans leur remarquable ouvrage sur *la Traction élec-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trique, ont donné une étude complète du cahier des charges pour tramways électriques.)

La loi du 25 juin 1895 spécifie que les projets de tramways doivent être soumis à l'approbation du ministère du Commerce, de l'Industrie et des Postes et Télégraphes ; les renseignements à produire sont définis dans la circulaire ministérielle du 5 septembre 1898 de ce département. La loi du 12 juin 1903, celle du 14 juillet 1903 et le décret du 20 novembre 1904 sont applicables aux travaux concernant les lignes électriques aériennes fournissant du courant aux tramways. Nous avons à citer aussi l'Édit de décembre 1607, le décret du 18 juin 1765, le décret du 27 décembre 1851, les lois des 15 juin et 13 juillet 1906, le décret du 17 octobre 1907 (art. 8), la circulaire du 15 septembre 1908.

L'instruction ministérielle de février 1903 comporte des données techniques relativement à l'établissement des tramways.

En ce qui concerne les installations électriques de chemins de fer, les dispositions de la loi du 25 juin 1895 ne leur sont pas applicables ; il faut se reporter à cet égard au décret du 17 octobre 1907 et aux articles 2, 28, 29 et 30 de l'arrêté ministériel du 21 mars 1908.

II. — LÉGISLATIONS ÉTRANGÈRES SUR LES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Grande-Bretagne. — Cette puissance est régie par la loi du 18 août 1882, qui confie au Board of Trade des attributions lui permettant de garantir la sécurité publique et d'octroyer des licences aux sociétés d'entreprises de distribution d'énergie.

La loi de 1882 a été complétée par un arrêté du Board of Trade du 1er novembre 1893 et par un décret du 14 août 1903.

Autriche. — Règlement du ministère du Commerce en date du 25 mars 1883.

Belgique. — La loi est à peu de chose près calquée sur la loi française de 1906.

Suède. — Loi du 27 juin 1902.

Etats-Unis. — Loi du 13 juin 1885.

Indes anglaises. — Loi du 13 mars 1903, faite pour faciliter et réglementer la production et l'emploi de la force électrique pour l'éclairage et autres destinations.

Chili. — Loi du 4 août 1904.

Espagne. — Décrets des 14 mars 1890, 15 juin 1901, 30 juin 1903 et 7 octobre 1904.

Finlande. — Loi du 11 avril 1901, et ordonnance du 17 avril 1902.

Canada. — Acte du 23 juillet 1894, modifié le 23 mai 1901.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Uruguay. — Loi du 2 mars 1905.

Italie. — Loi du 7 juin 1894, qui établit, pour la transmission à distance des courants électriques, une servitude spéciale sur les fonds qu'on est obligé de traverser. En exécution de cette loi, un règlement a été rendu le 12 novembre 1895.

Suisse. — Cette puissance est certainement celle qui a, sur la question, la législation la plus complète. La loi qui la régit est celle du 24 juin 1902 sur les installations électriques à faible et fort courant.

Elle vise à la fois les installations à courant faible et celles à courant fort ; seules ces dernières nous intéressent. Cette loi (art. 43) consacre le droit d'expropriation pour les installations de transmission et de distribution d'énergie électrique.

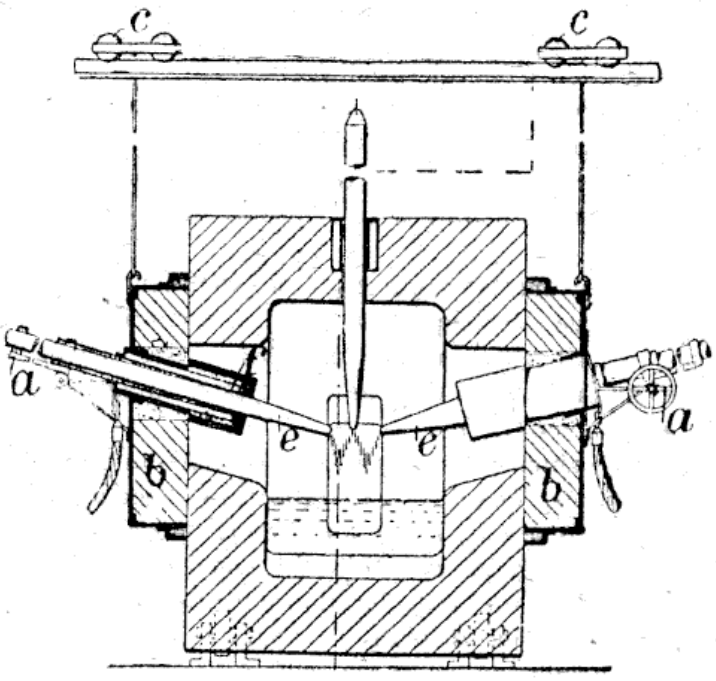


FIG. 1952 *bis*. (Voir p. 3143.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — APPENDICE

III. — RENSEIGNEMENTS JURIDIQUES ET ADMINISTRATIFS CONCERNANT LES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

1. *Permission de voirie.* — Aucune permission de voirie ne peut faire obstacle à ce qu'il soit accordé sur les mêmes voies des permissions ou concessions concurrentes. Toutefois une commune ou un syndicat de communes peut donner à un concessionnaire le droit d'utiliser seul les voies publiques dépendant de la commune ou des communes syndiquées en vue de pourvoir à l'éclairage privé par une distribution d'énergie publique.

2. *Abonnements d'énergie électrique.* — Lorsque la puissance demandée par un abonné excède un nombre de kilowatts déterminé, le concessionnaire de la distribution d'énergie électrique peut exiger que le demandeur lui garantisse pendant un certain nombre d'années une recette brute annuelle déterminée par kilowatt demandé.

Si le concessionnaire abaisse pour certains abonnés les prix de vente de l'énergie pour l'éclairage électrique, avec ou sans conditions, au-dessous des limites fixées par le tarif maximum prévu au cahier des charges de la concession, il sera tenu de faire bénéficier des mêmes avantages tous les abonnés placés dans les mêmes conditions.

Les dispositions du cahier des charges de la concession ne peuvent être invoquées par les abonnés, lorsque des dérogations spécialement prévues au contrat leur ont été apportées. Il en est ainsi de la clause de fourniture exclusive qui constitue une dérogation au cahier des charges.

3. *Accès aux propriétés.* — La déclaration d'utilité publique en faveur d'un concessionnaire investit celui-ci, pour l'exécution des travaux dépendant de l'entreprise, tous les droits que les lois et règlements confèrent à l'Administration en matière de travaux publics. S'il y a lieu à expropriation, elle est faite conformément à la loi du 3 mai 1841, aux frais du concessionnaire.

Mais, dans l'exécution des travaux, le concessionnaire doit maintenir les accès des maisons et des propriétés et, en général, il ne doit porter aucune atteinte à la liberté et à la sécurité de la circulation des gens, bêtes et choses.

Le droit pour le concessionnaire, d'établir des supports et ancrages pour conducteurs aériens en façade ou au-dessus des bâtiments, de faire passer les fils au-dessus des propriétés privées, d'établir à demeure des canalisations souterraines ou des poteaux sur des terrains privés non bâtis qui ne sont pas clôturés, de couper les branches d'arbres à proximité des conducteurs d'électricité, doit être précédé avant l'exécution des travaux d'une notification directe aux intéressés et d'une enquête spéciale dans chaque commune. Il n'entraîne aucune dépossession des droits des propriétaires et les indemnités sont réglées en premier ressort par le juge de paix. En cas d'expertise le juge de paix ne peut nommer qu'un expert.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4. *Projets pour l'établissement des lignes de transport d'énergie électrique.* — Les projets à fournir par les concessionnaires, sous le régime des permissions de voirie ou de concessions, sont examinés par les représentants des services intéressés dans une conférence à laquelle prennent part, dans tous les cas, le représentant de l'administration des Postes et Télégraphes.

En cas de non-accord le dossier est renvoyé au Comité d'électricité. Enfin, si les ministres intéressés n'adoptent pas l'avis de ce dernier il est statué par décret.

5. *Conditions administratives imposées dans l'exécution des travaux.* — L'établissement des lignes ne doit pas constituer un obstacle pour la création ultérieure pour le développement d'un réseau présentant un caractère d'intérêt général.

Le déplacement ou la modification éventuels des lignes sont réglés dans chaque cas d'espèce, par l'application de l'article 55 du décret du 3 avril 1908. Tout les supports doivent être numérotés et pourvus sur une hauteur minima de 3 mètres au-dessus du sol d'un dispositif les plaçant hors d'atteinte. Les isolateurs, pour tensions inférieures ou égales à 10.000 volts, doivent être essayés à une tension triple de celle en service et pour les voltages supérieurs à 10.000 volts, la tension d'essai sera égale à 30.000 volts, plus deux fois l'excès de la tension de service sur 10.000 volts.

Les conducteurs peuvent être établis à moins de 6 mètres de hauteur à la traversée des ouvrages construits au-dessus des voies publiques à la condition que les dits conducteurs, dans cette traversée, soient munis d'un dispositif de protection spécial en vue de sauvegarder la sécurité.

Le diamètre des conducteurs ne peut être inférieur à 3 millimètres.

Dans la traversée des voies publiques, l'angle de la direction des conducteurs et de l'axe de la voie est égal au moins à 30° ; et il ne peut être fait ni ligatures, ni soudures, ni dans la traversée, ni dans les portées contiguës et leurs conducteurs doivent être arrêtés sur les isolateurs installés sur les mêmes points.

Dans les distributions de la deuxième catégorie (lignes à haute tension) les conducteurs, dans les traversées et sur les appuis d'angle, au cas où ils viendraient à abandonner l'isolateur, ne doivent pas pouvoir traîner sur le sol ni créer des contacts dangereux. Chaque support doit porter l'inscription « danger de mort » et « Défense absolue de toucher aux fils même tombés à terre ».

Dans la traversée des agglomérations, les conducteurs, dans n'importe quelle position, doivent être éloignés de toute atteinte de la main de l'homme.

Les conducteurs, fils, supports, ferrures doivent offrir une résistance mécanique capable de résister aux charges permanentes que les organes ont à supporter, résultant de la température et du vent combinés dans les conditions les plus défavorables.

Le coefficient de sécurité, c'est-à-dire le rapport entre l'effort correspondant à la charge de rupture et l'effort le plus grand auquel chaque élément peut être soumis est fixé à 5 au moins pour les distributions de deuxième catégorie.

Toujours dans le cas de distribution de deuxième catégorie, lorsque celle-ci dessert un certain nombre d'agglomérations distantes les unes des autres, on doit établir des sectionneurs à l'entrée de chacune d'elles.

Les conducteurs d'énergie souterrains doivent être établis de manière à éviter l'introduction des eaux, ou à les évacuer rapidement en cas de venue accidentelle.

Lorsque dans le voisinage des conduteurs électriques placés dans une conduite, il existe des canalisations de gaz, il doit être pris des mesures pour assu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rer la ventilation régulière de la conduite à l'effet d'éviter l'accumulation des gaz.

Les regards affectés aux canalisations électriques ne doivent pas renfermer de tuyaux d'eau, de gaz ou d'air comprimé.

6. *Prescriptions relatives à l'hygiène et à la sécurité des travailleurs.* — Dans les usines, sous-stations et postes de transformation, toutes les pièces saillantes, mobiles et autres parties dangereuses des machines doivent être munies de dispositifs protecteurs. Il sera installé tout couvre-engrenages, garde-mains, grillage, monte-courroies, nécessaires.

Toutes les instructions et indications concernant l'hygiène et la sécurité des travailleurs se trouvent relatées dans les décrets des 11 juillet 1907, 5 janvier 1909, 3 avril 1908, 21 mars 1911, 13 août 1912, 10 juillet 1913, 1er octobre 1913, 20 janvier 1914, 21 mars 1914 et la loi du 15 juin 1906.

Pour les soins à donner aux victimes d'accidents électriques, l'arrêté du 9 octobre 1913 contient l'instruction rédigée à ce sujet et qui doit être affichée dans un endroit apparent des salles contenant des installations électriques de la deuxième catégorie.

7. *Tarifs de vente de l'énergie électrique.* — Le cahier des charges fixe les prix maxima de la façon suivante au compteur.

Pour l'éclairage, et pour tous autres usages : au kilowatt-heure, à forfait ; pour l'éclairage et pour tous autres usages, au kilowatt-an.

Il détermine aussi les prix spéciaux pour les besoins de la commune savoir : éclairage des voies publiques, des bâtiments municipaux et tous autres usages. Les maxima prévus aux cahiers des charges ont un caractère différent suivant les conditions de puissance, d'horaire et de consommation ; des réductions peuvent être stipulées pour les abonnés dépassant ou garantissant un minimum déterminé de consommation, pour ceux utilisant le courant à des heures ou pendant des saisons déterminées et, d'une manière générale, pour les abonnés acceptant des sujétions spéciales.

Les services publics de l'Etat et des départements bénéficient d'une réduction déterminée sur le tarif maximum, laquelle ne peut être inférieure à 20 0/0.

Les établissements publics et les associations agricoles organisées par l'Administration, en vertu des lois du 16 septembre 1807, du 14 floréal an XI et du 8 avril 1898, ou autorisées en conformité des lois des 2 juin 1865 et 22 décembre 1888, sont assimilées aux services publics.

8. *Caractère de l'autorisation donnée par les propriétaires concernant les appuis ou autres ouvrages.* — Les droits reconnus au propriétaire du sol, par l'article 552 du code civil, en ce qui touche au-dessus et au-dessous de sa propriété ne sont restrictifs qu'en ce qui concerne l'installation de l'entretien des canalisations électriques de l'Etat ou de la commune par l'administration et la déclaration d'utilité publique.

Un propriétaire est en droit de demander des dommages-intérêts et l'enlèvement des ouvrages établis sans son autorisation sur sa propriété privée ; il en est ainsi spécialement de l'installation de poteaux sur un terrain privé, à une distance très faible de l'habitation. Il en est aussi de l'abatage d'arbres. Il y a lieu de remarquer que l'autorisation donnée par un propriétaire d'établir des ouvrages sur son terrain ne constitue pas une servitude réelle ; le contrat est de nature aléatoire et sans durée déterminée.

9. *Sur quelques indications générales concernant l'exploitation des distributions de l'énergie électrique* (cas d'espèce divers). — La déchéance d'une concession

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne peut être prononcée ainsi que la régie que dans les cas spéciaux prévus aux cahiers des charges.

La commune concédante est fondée à obtenir des dommages intérêts dans le cas où le concessionnaire n'exécute pas ses obligations vis-à-vis d'elle.

Dans le cas d'extension de la fourniture du courant électrique à des communes en dehors de la commune du concessionnaire, celle-ci peut, en fin de concession, réclamer des réparations pécuniaires relativement à la reprise des installations.

Tous les traités de concession sont somuis au droit d'enregistrement de 1 0/0 calculé sur toute la durée de la concession.

Le droit d'exploiter une concession de service public peut faire l'objet d'un avertissement, mais les travaux et le matériel servant à l'exploitation ne peuvent servir de garantie, ni être aliénés.

Les droits d'octroi s'appliquent aux fils conducteurs, car le réseau est considéré comme un tout indivisible avec l'usine génératrice.

Ne sont pas soumis aux droits d'octroi les matériaux destinés à l'édification d'une usine dont le courant est consommé dans une autre commune concédante de la distribution d'électricité.

S'il est stipulé dans l'autorisation que le charbon doit être exempt de droit d'octroi pour l'éclairage, cette cause est sans effet pour la distribution de la force motrice et pour la part qui correspond à l'énergie fournie à d'autres communes.

C'est le juge de paix qui connaît de toutes les questions d'octroi.

C'est à tort qu'un conseil de préfecture peut se refuser à nommer un expert en lieu et place de celui nommé par un juge de paix pour la reprise du matériel et des installations en fin de concession.

Les canalisations non prévues dans l'acte de concession et établies volontairement par le concessionnaire ne peuvent entrer dans l'estimation à établir en fin de concession.

Pour la révision quinquennale des tarifs, prévue dans les cahiers des charges, l'expertise amiable prévue dans l'acte de concession n'a pour objet que de déterminer si les tarifs sont susceptibles d'abaissement en laissant à l'exploitant un bénéfice normal.

Les résultats peuvent être contestés devant le conseil de Préfecture, libre d'ordonner une nouvelle expertise. Et les exploitants sont autorisés, s'ils n'acceptent pas les nouveaux tarifs de l'autorité municipale, à agir en demande d'indemnité ou en résiliation de traité.

10. *Redevances.* — Les redevances pour l'occupation du domaine public sont définies par les lois, décrets et circulaires ministérielles suivants :

Loi du 15 juin 1905 (art. 5, 9 et 18).
Décret du 7 octobre 1907.
Instruction du 15 février 1908.
Cahier des charges type des 17 mai et 20 août 1908.
Cahier des charges type du 30 novembre 1909 (art. 27).
Circulaire du 15 septembre 1908.
Décret du 14 novembre 1909 (art. 1 et 4).
Circulaire du 4 septembre 1910.
Décret du 7 septembre 1912.
Circulaire du 7 mai 1913.
Décret du 9 mars 1914.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

11. *Impôts.* — Sont imposables à la contribution foncière des propriétés bâties les transformateurs de tension installés dans les kiosques, les conducteurs d'éclairage. C'est la valeur nominale de la chute d'eau qui entre dans l'estimation de la valeur locative, ajoutée à la valeur des bureaux, logements et entrepôts. La contribution mobilière s'établit sur les locaux servant à l'usage personnel des exploitants.

Pour les chutes d'eau, conformément à l'article 12 de la loi du 15 juillet 1880, entrent dans le calcul du droit proportionnel de patente pour l'évaluation de la valeur locative : les droits de riveraineté payés à la commune pour l'usage d'eau, la valeur locative des canalisations réunissant l'usine à cette chute.

Pour établir les valeurs locatives il faut compter sur la force nominale de la chute susceptible efficacement de transformation grâce à l'outillage de cette usine.

Les usines fournissant de la force motrice et l'éclairage par la même usine sont soumises pour la première partie au droit proportionnel sur les locaux et, pour la seconde, d'après la valeur locative des bâtiments et de l'outillage. On doit tenir compte de la valeur locative des accumulateurs et des transformateurs se trouvant dans un local chez des tiers ; il en est de même des groupes électrogènes de secours.

La patente court dès l'année qui suit celle de l'installation.

Est imposable au titre d'exploitant une usine pour la transformation de l'énergie recevant du courant d'une usine génératrice et le revendant à des tiers. Il en est de même d'une société minière faisant le même trafic qu'une compagnie de chemins de fer, etc.

Les compagnies de tramways peuvent vendre leur excédent d'énergie inemployée pour l'éclairage et la force motrice.

La loi du 19 juillet 1905 fixe comme suit le droit fixe des Usines de distribution d'énergie :

1° 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 et appareils de secours.

2° Ce droit est réduit à 60 centimes quand la puissance des appareils n'excède pas les 7/10 de la puissance totale des moteurs et appareils de toute nature installés chez les clients ; b) à 30 centimes quand la puissance comme ci-avant n'excède pas 1/10.

Par kilowatt, on doit entendre le kilovolt ampère.

Les conduites et câbles extérieurs n'entrent pas dans l'estimation de la valeur locative. Le droit proportionnel est fixé au vingtième sur la maison d'habitation et au cinquantième sur l'établissement.

Le droit proportionnel s'établit en outre sur le cheval-an, dont l'interprétation, tant de la part de l'administration que de celle des exploitants, a donné lieu à nombre de controverses ainsi que nous l'avons expliqué dans le Tome I.

La meilleure façon pour l'exploitant d'un réseau électrique de concilier ses intérêts avec les exigences de l'Administration est d'envoyer tous les ans au Fixe un tableau contenant les noms et adresses de ses clients avec les emplois d'une part de la puissance utilisée autre que l'éclairage non industriel et d'autre part l'emploi de toute l'énergie dépensée en éclairage.

12. *Compétences.* — Les permissions de voirie sont délivrées par le préfet ou par le maire suivant que la voie empruntée entre dans les attributions de l'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou de l'autre. Aucune permission de voirie ne peut faire obstacle à ce qu'il soit accordé sur les mêmes voies des permissions ou concessions concurrentes. Toutefois une commune ou un syndicat de communes peut donner à un concessionnaire le droit d'utiliser seul les voies publiques dépendant de la commune ou des communes syndiquées en vue de pourvoir à l'éclairage privé par une distribution d'énergie publique.

Les voies navigables et flottables ainsi que celles non navigables et non flottables sont sous l'autorité du préfet et administrées par le corps des Ponts et Chaussées, ainsi que les voies simplement flottables si le flottage se fait par radeaux. Si le flottage se fait par bûches, il y a la servitude de flottage à respecter.

Les canaux et plages maritimes ainsi que les marais, étangs, sont placés sous l'autorité préfectorale et l'administration des Ponts et Chaussées (service hydraulique).

L'autorité administrative (conseil de préfecture) connaît des dommages résultant de travaux publics et des dommages aux particuliers; des contraventions par permissions de voirie ou actes de concession pour ce qui concerne la navigation, les chemins de fer, la viabilité (routes nationales, départementales et communales).

L'autorité judiciaire est incompétente pour connaître de la demande en dommages intérêts formée par des usiniers contre le concessionnaire de la distribution de force, à qui la commune a rétrocédé l'autorisation à elle donnée par le préfet pour la construction d'un barrage.

Les usiniers privés, par suite de dérivation du cours d'eau, d'une partie de leur force motrice ont droit à l'indemnité de chômage et au remplacement de la force hydraulique disparue. Cette indemnité a pour base la moyenne de la dérivation annuelle comparée au rendement des moteurs et à la valeur du cheval-an. Le conseil de préfecture connaît de l'enlèvement ou déplacement des ouvrages ou des dommages à fixer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LÉGISLATION

1° Supplément au Tome I

LOI RELATIVE A L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

(16 *octobre* 1919)

TITRE PREMIER

CONDITIONS GÉNÉRALES D'EXPLOITATION ET CLASSIFICATION DES ENTREPRISES HYDRAULIQUES

ART. 1er. — Nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau, quel que soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'Etat.

Toutefois, aucune concession ou autorisation ne sera accordée sans avis préalable des conseils généraux des départements représentant des intérêts collectifs régionaux, sur le territoire desquels l'énergie est aménagée.

ART. 2. — Sont placées sous le régime de la concession :

1° Les entreprises qui ont pour objet principal la fourniture de l'énergie à des services publics de l'Etat, des départements, des communes et des établissements publics ou à des associations syndicales autorisées et dont la puissance maximum (produit de la hauteur de chute par le débit maximum de la dérivation) excède 150 kilowatts ;

2° Les entreprises dont la puissance maximum excède 500 kilowatts, quel que soit leur objet principal.

Sont placées sous le régime de l'autorisation toutes les autres entreprises.

TITRE II

ENTREPRISES CONCÉDÉES

ART. 3. — La concession est instituée par une loi lorsque les travaux d'appropriation de la force comportent le déversement des eaux d'un bassin fluvial dans un autre ou le détournement des eaux sur une longueur de plus de 20 kilomètres mesurés suivant le lit naturel ou lorsque la puissance normale (produit de la hauteur de chute par le débit moyen annuel de la dérivation) excède 50 000 kilowatts.

Dans les autres cas, la concession est instituée par décret rendu en conseil d'Etat.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ART. 4. — Pour l'exécution des travaux définis au cahier des charges et régulièrement approuvés par l'administration ainsi que pour l'exploitation de la concession, le concessionnaire aura les droits suivants :

1° Occuper dans l'intérieur du périmètre, défini par l'acte de concession, les propriétés privées nécessaires à l'établissement des ouvrages de retenue ou de prise d'eau et des canaux d'adduction ou de fuite lorsque ces canaux sont souterrains ou, s'ils sont à ciel ouvert en se conformant à la loi du 29 avril 1845 ;

2° Submerger les berges par le relèvement du plan d'eau ;

3° S'il s'agit d'une usine de plus de 10.000 kilowatts, occuper temporairement tous terrains et extraire tous matériaux nécessaires à l'exécution des travaux en se conformant aux prescriptions de la loi du 29 décembre 1892.

Sont exemptés les bâtiments, cours et jardins attenant aux habitations.

L'exercice des droits conférés au concessionnaire par le présent article est autorisé par arrêté préfectoral pris après que les propriétaires ont été mis à même de présenter leurs observations.

Lorsque l'occupation ainsi faite prive le propriétaire de la jouissance du sol pendant une durée supérieure à celle prévue par le cahier des charges pour l'exécution des travaux ou lorsque, après cette exécution, les terrains ne sont plus propres à la culture, le propriétaire peut exiger du concessionnaire l'acquisition du sol. La pièce de terre trop endommagée ou trop dépréciée doit être achetée en totalité si le propriétaire l'exige.

Les indemnités auxquelles pourra donner lieu l'application du présent article, ainsi que les contestations qu'il soulèvera seront réglées par la juridiction civile. Il sera procédé devant ces tribunaux comme en matière sommaire et, s'il y a lieu à expertise, il pourra n'être nommé qu'un seul expert.

Lorsque l'occupation ou la dépossession devra être permanente, l'indemnité sera préalable. Toutefois, si l'urgence des travaux est reconnue par arrêté préfectoral, cet arrêté et l'arrêté déclaratif des droits seront notifiés et l'indemnité sera réglée dans les formes prévues par les articles 66 à 74 de la loi du 3 mai 1841, la juridiction civile restant compétente pour la fixation définitive de cette indemnité.

ART. 5. — Lorsque l'aménagement de l'entreprise nécessite l'occupation définitive de propriétés privées dans des cas autres que ceux prévus par l'article 4, l'utilité publique de l'entreprise peut, si l'intérêt économique de la nation le justifie, être déclarée par l'acte qui approuve la concession. Toutefois, lorsque la déclaration d'utilité publique n'est reconnue nécessaire que pour certains travaux et postérieurement à l'approbation de l'acte de concession, il est statué par décret en conseil d'Etat.

Lorsque l'utilité publique a été déclarée, s'il y a lieu à expropriation, il est procédé, conformément à la loi du 3 mai 1841, sans qu'il soit en rien dérogé aux dispositions des articles 4 et 6.

Si, sur une même parcelle, il y a lieu à établissement d'une des servitudes prévues à l'article 4 et à acquisition en pleine propriété, le jury d'expropriation sera compétent pour statuer sur les deux indemnités.

ART. 6. — L'éviction des droits particuliers à l'usage de l'eau, exercés ou non, donne ouverture à une indemnité en nature ou en argent si ces droits préexistaient à la date de l'affichage de la demande en concession.

Lorsque ces droits étaient exercés à ladite date, le concessionnaire est tenu, sauf décision contraire du juge statuant ainsi qu'il est dit à l'avant-dernier paragraphe du présent article, de restituer en nature l'eau ou l'énergie utilisée,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et, le cas échéant, de supporter les frais des transformations reconnues nécessaires aux installations préexistantes à raison des modifications apportées aux conditions d'utilisation.

Pour la restitution de l'eau nécessaire aux irrigations, le concessionnaire dispose des droits donnés au propriétaire par les lois du 29 avril 1845 et du 11 juillet 1847.

Pour la restitution de l'énergie sous forme électrique, le concessionnaire dispose des servitudes d'appui, de passage et d'ébranchage prévues par l'article 12 de la loi du 15 juin 1906.

En cas de désaccord sur la nature ou le montant de l'indemnité qui est due, la contestation est portée devant la juridiction civile. Le juge devra, en prononçant, concilier le respect des droits antérieurs avec l'intérêt de l'entreprise concédée.

L'indemnité qui est due pour droits non exercés à la date de l'affichage de la demande est fixée dans l'acte de concession.

ART. 7. — Une contribution de l'Etat peut être allouée, sous forme d'avance ou de subvention, aux concessionnaires d'entreprises dont l'objet principal est la fourniture de l'énergie à des services publics ou intéressant la défense nationale, ainsi qu'à ceux qui prennent à leur charge des travaux d'aménagement susceptibles d'améliorer de façon notable les conditions d'utilisation agricole du cours d'eau ou de régularisation de son régime.

L'acte de concession détermine l'importance et les conditions de cette contribution ainsi que le mode de remboursement des avances en capital et intérêts, et, le cas échéant, les modalités d'application des dispositions prévues aux paragraphes *d*, *e*, *f*, et *g* du 8° de l'article 10.

Toutefois, cette allocation doit être autorisée par une loi, si, pour une même entreprise, l'engagement de l'Etat doit porter sur plus de cinq exercices.

ART. 8. — Le concessionnaire est assujetti au payement d'une taxe annuelle proportionnelle à la puissance normale telle qu'elle est définie par l'article 3.

Le taux en est fixé à cinq centimes (0 fr. 05) par kilowatt.

ART. 9. — Indépendamment des réserves en eau et en force mentionnées au paragraphe 6 de l'article 10 et dont il doit être tenu compte pour la fixation des charges pécuniaires prévues ci-après, le concessionnaire est assujetti par l'acte de concession au payement de redevances proportionnelles, soit au nombre de kilowatts-heure produits, soit aux dividendes ou aux bénéfices répartis, ces deux redevances pouvant éventuellement se cumuler. Toutefois, la redevance proportionnelle aux dividendes ou aux bénéfices ne peut être imposée que lorsque le concessionnaire est une société régie par la loi du 24 juillet 1867 et ayant pour objet principal l'établissement et l'exploitation de l'usine hydraulique.

Un tiers de la redevance proportionnelle est réparti par l'Etat entre les départements et les communes sur le territoire desquelles coulent les cours d'eau utilisés.

La moitié du produit de cette fraction de la redevance est atribuée aux départements; l'autre moitié est attribuée aux communes.

La répartition est faite proportionnellement à la puissance hydraulique moyenne devenue indisponible dans les limites de chaque département et de chaque commune du fait de l'usine.

ART. 10. — Le cahier des charges détermine notamment :

1° L'objet principal de l'entreprise ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Le règlement d'eau et en particulier les mesures intéressant la navigation ou le flottage, la protection contre les inondations, la salubrité publique, l'alimentation et les besoins domestiques des populations riveraines, l'irrigation, la conservation et la libre circulation du poisson, la protection des paysages, le développement du tourisme;

3° La puissance maximum et l'évaluation de la puissance normale de la chute faisant l'objet de la concession;

4° Le délai d'exécution des travaux;

5° La durée de la concession, qui ne peut dépasser soixante-quinze ans, à compter de l'expiration dudit délai;

6° Les réserves en eau et en force à prévoir, s'il y a lieu, au profit des services publics de l'Etat, ainsi qu'à celui des départements, des communes, des établissements publics, ou des associations syndicales autorisées et des groupements agricoles d'utilité générale, qui seront spécifiés dans un règlement d'administration publique; les conditions dans lesquelles ces réserves doivent être tenues à la disposition des ayants droit, notamment : la période initiale pendant laquelle aucun préavis ne sera nécessaire, les délais de préavis après l'expiration de cette période, les travaux qui peuvent être imposés au concessionnaire pour l'utilisation de ces réserves, ainsi que les tarifs spéciaux ou les réductions sur les tarifs maxima indiqués au 9° du présent article, applicables à ces réserves.

Lorsque des conventions ou accords sont déjà intervenus entre les demandeurs et les collectivités visées au paragraphe précédent, soit au point de vue financier, soit à celui des réserves en eau et en force, ou lorsque l'acte de concession, par application de l'article 6, accorde une réparation en nature pour le payement des droits exercés ou non, ces accords devront être enregistrés par le cahier des charges et exécutés par le concessionnaire sans qu'il y ait lieu à révision à moins d'entente nouvelle entre les parties contractantes;

7° La quantité d'énergie à laisser dans les départements riverains, pour être rétrocédée par les soins des conseils généraux; la période initiale, qui ne pourra excéder l'année qui suivra la date fixée pour l'achèvement des travaux par le cahier des charges, durant laquelle cette énergie doit être tenue à la disposition du conseil général sans préavis; les délais de préavis à l'expiration de cette période; le délai qui ne pourra excéder la fin de la cinquième année, qui suivra la date fixée pour l'achèvement des travaux par le cahier des charges, à partir duquel le concessionnaire reprendra sa liberté pour les quantités non utilisées, à l'exception, toutefois, d'une fraction fixée par le cahier des charges et qui restera, à toute époque, à la disposition des départements, et, enfin, les tarifs de cession aux conseils généraux, qui ne pourront être inférieurs au prix de revient.

La totalité des réserves en force prévue à l'ensemble du présent paragraphe 6°, ne pourra priver l'usine de plus du quart de l'énergie dont elle dispose aux divers états du cours d'eau;

8° Les conditions financières de la concession et notamment :

a) Le minimum au-dessous duquel la redevance proportionnelle au nombre de kilowatts-heure produits ne peut descendre et les conditions dans lesquelles elle devra être revisée, tous les cinq ans, après une période initiale de dix ans;

b) En cas de redevance proportionnelle aux dividendes ou aux bénéfices répartis et lorsque le concessionnaire est une société régie par la loi du 24 juillet 1867 et ayant pour objet principal l'établissement et l'exploitation de l'usine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

hydraulique, le capital initial auquel est constituée la société, ainsi que les conditions dans lesquelles doivent être soumises à l'approbation de l'administration les augmentations ultérieures de ce capital, les conditions financières de la participation de l'Etat aux bénéfices annuels de l'entreprise; le taux de l'intérêt moyen annuel alloué au capital investi, non remboursé, à partir duquel l'Etat entre en participation ; le mode de calcul de cette participation ; l'échelle progressive d'après laquelle est calculée la part revenant à l'Etat; les conditions dans lesquelles l'Etat viendra au partage de l'actif net et après remboursement du capital en cas de liquidation ou à l'expiration de la concession, ces conditions devant être déterminées de telle façon que la part ainsi attribuée à l'Etat soit, autant que possible, équivalente à l'ensemble des sommes qui lui eussent été annuellement versées si les bénéfices disponibles avaient été intégralement distribués ;

c) Le montant des actions d'apport, entièrement libérées, qui pourront être attribuées à l'Etat en quantités variables, notamment selon la classification du cours d'eau dont dépend la chute concédée, la puissance et la destination de l'usine ;

d) Lorsque l'Etat contribuera, sous forme d'avance, à l'aménagement de la chute d'eau dans les conditions prévues à l'article 7, le montant des obligations qui pourront lui être attribuées en proportion de sa contribution ;

e) Lorsque l'Etat contribuera, sous forme de subvention, à l'aménagement de la chute dans les conditions prévues à l'article 7, le montant des actions de second rang (dites ordinaires) qui pourront lui être attribuées en proportion de sa contribution) ;

f) Lorsque l'Etat souscrira une partie du capital social, le montant des actions de premier rang (dites privilégiées) qui lui seront remises en représentation de sa participation;

g) Dans tous les cas où l'État contribuera financièrement à l'entreprise, le nombre des réprésentants au conseil d'administation qu'il pourra exiger.

Il sera stipulé dans l'acte de concesion que, s'il était ultérieurement établi, à la charge des usines hydrauliques un impôt spécial instituant une redevance proportionnelle aux kilowatts-heure produits ou aux dividendes et bénéfices répartis, les sommes dues à l'Etat au titre des redevances contractuelles résultant des dispositions de l'article 9 et de celles qui précèdent seraient réduites du montant de cet impôt ;

9° S'il y a lieu, les tarifs maxima de l'entreprise ;

10° Les mesures nécessaires pour que, en cas de non-renouvellement de la concession, les travaux et aménagement nécessaires à la bonne marche et au développement de la future exploitation soient néanmoins entrepris et conduits, jusqu'au terme de la concession, dans l'intérêt bien entendu de l'entreprise et spécialement les règles d'imputation et d'amortissement des travaux de premier établissement qui, avec l'approbation de l'administration, seraient exécutés par le concessionnaire pendant les dix dernières années de la concession, le mode de participation de l'Etat à cet amortissement, les conditions administratives et financières dans lesquelles, pendant les cinq dernières années de la concession, le concessionnaire peut être astreint par l'Etat à exécuter des travaux jugés nécessaires à la future exploitation : le mode de payement par l'Etat de ces travaux ;

11° Les terrains, bâtiments, ouvrages, machines et engins de toute nature constituant les dépendances immobilières de la concession et qui, à ce titre,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

doivent faire gratuitement retour à l'Etat en fin de concession, francs et quittes de tous privilèges, hypothèques et autres droits réels ;

12° Les conditions dans lesqueles, en fin de concession, l'Etat peut reprendre, à dire d'experts, le surplus de l'outillage ;

13° S'il y a lieu, les conditions dans lesquelles peut s'exercer la faculté de rachat après l'expiration d'un délai qui ne doit pas être inférieur à cinq ans, ni supérieur à vingt-cinq ans à compter de la date fixée pour l'achèvement des travaux, ainsi que le règlement des sommes qui seraient dues par le concessionnaire pour la mise en bon état d'entretien des ouvrages constituant les dépendances immobilières de la concession et qui seront prélevées, le cas échéant, sur l'indemnité de rachat ;

14° Les conditions et les formes dans lesquelles la déchéance peut être prononcée pour inobservation des obligations imposées au concessionnaire ;

15° Les conditions dans lesquelles, en cas de rachat ou de déchéance, l'Etat est substitué à tous droits et obligations du concessionnaire.

16° Le cautionnement ou les garanties qui peuvent être exigées ;

17° Le montant des frais de contrôle qui sont supportés par le concessionnaire.

Le dixième du produit de ces taxes et redevances sera inscrit au budget du ministère de l'agriculture, en vue de travaux tels que barrages, travaux de restauration et de reboisement destinés à conserver et à améliorer le débit des cours d'eau.

ART. 11. — Le concessionnaire peut être tenu de se substituer, dans un délai à fixer par le cahier des charges, une société anonyme. La substitution est approuvée par un décret rendu en conseil d'État.

ART. 12. — Toute cession totale ou partielle de concession, tout changement de concessionnaire, ne peut avoir lieu qu'après approbation donnée par décret en conseil d'Etat.

ART. 13. — Dix ans au moins avant l'expiration de la concession, l'administration doit notifier au concessionnaire si elle entend ou non lui renouveler sa concession. A défaut par l'administration d'avoir, avant cette date, notifié ses intentions au concessionnaire, la concession est renouvelée de plein droit aux conditions antérieures, mais pour une période de trente années seulement.

Les dispositions contenues dans le paragraphe précédent sont applicables avec les mêmes délais aux concessions renouvelées par tacite reconduction par période de trente années. S'il n'a pas été institué de concession nouvelle, cinq ans au moins avant l'expiration de la concession, celle-ci se trouve renouvelée de plein droit aux conditions antérieures, mais pour une période de trente années seulement.

Le concessionnaire actuel aura un droit de préférence s'il accepte les conditions du nouveau cahier des charges définitif.

ART. 14. — Sont publiés au *Journal officiel*, dans le délai d'un mois à compter de la date de l'acte approbatif, tous les actes de concession et, dans la première quinzaine de chaque trimestre, un état détaillé des subventions et des avances accordées pendant le trimestre précédent.

TITRE III

ENTREPRISES AUTORISÉES

ART. 15. — Les entreprises autorisées sont régies par les lois et règlements en vigueur, sous réserve des modifications prévues par la présente loi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ART. 16. — Les autorisations sont accordées par arrêté préfectoral, quel que soit le classement du cours d'eau. Toutefois, sur les canaux de navigation ou les rivières canalisées, elles sont accordées par décret lorsque leur durée excède cinq ans.

Elles ne doivent pas avoir une durée supérieure à soixante-quinze ans. Elles ne font pas obstacle à l'octroi de concessions nouvelles, ni à l'application des articles 4 et 6. A toute époque, elles peuvent être révoquées ou modifiées sans indemnité dans les cas prévus par les lois en vigueur sur le régime des eaux.

Dans les cinq ans qui précèdent leur expiration, elles peuvent être renouvelées pour une durée de trente années. Un droit de préférence appartient au permissionnaire dont le titre vient à échéance.

Le renouvellement s'opère de plein droit pour ladite durée de trente ans si l'administration ne notifie pas de décision contraire avant le commencement de la dernière année.

Si l'autorisation n'est pas renouvelée, le permissionnaire est tenu de rétablir le libre écoulement du cours d'eau ; toutefois, l'Etat a la faculté d'exiger l'abandon, à son profit, des ouvrages de barrage et de prise d'eau édifiés dans le lit du cours d'eau et sur ses berges, le tout avec indemnité.

Le permissionnaire est assujetti au payement de la taxe dont le taux et le mode de recouvrement sont réglés par les articles 8 et 22 sans préjudice, en ce qui concerne les entreprises établies sur les cours d'eau du domaine public, des redevances domaniales qui seraient fixées par l'acte d'autorisation conformément à la réglementation actuellement existante.

Toute cession totale ou partielle d'autorisation, tout changement de permissionnaire doit, pour être valable, être notifié au préfet qui, dans les deux mois de cette notification, devra en donner acte ou signifier son refus motivé. Cette disposition ne s'applique pas aux ventes en justice.

ART. 17. — Les entreprises autorisées peuvent, à toute époque, par un accord entre l'Etat et le permissionnaire, être placées sous le régime de la concession.

Elles le seront obligatoirement lorsque, à raison d'une augmentation de puissance ou du changement de leur objet principal, elle viendront à rentrer dans la catégorie de celles classées comme concessibles aux termes de l'article 2.

TITRE IV

ENTREPRISES ANTÉRIEUREMENT AUTORISÉES OU CONCÉDÉES

ART. 18. — Les entreprises autorisées à la date de la promulgation de la présente loi demeurent, pendant soixante-quinze ans, à compter de la même date, soumises au régime qui leur était antérieurement applicable avec payement du droit de statistique mais non de la redevance, s'il est légalement établi une redevance générale sur toutes les usines hydrauliques, à moins qu'au cours de cette période, ces entreprises ne passent sous le régime de la concession par un accord entre l'Eta et le permissionnaire, et sous réserve de leur suppression qui demeure possible dans les conditions prévues par les lois en vigueur sur le régime des eaux.

Ces entreprises, suivant qu'elles sont ou non réputées concessibles aux termes de l'article 2, ont, à l'expiration du régime provisoire prévu au paragraphe précédent et au point de vue des délais de préavis, du droit de préfé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rence et de leurs conséquences, soumises respectivement aux dispositions des articles 13 et 16. Dans le cas où l'administration négligerait l'accomplissement des formalités prévues auxdits articles, le régime provisoire sous lequel elles sont placées continuerait à leur être applicable, mais pendant trente années seulement.

A l'expiration de la période de soixante-quinze ans, les entreprises visées au paragraphe précédent sont assimilées aux entreprises arrivant en fin de concession ou d'autorisation, sous réserve des dispositions ci-après :

Les terrains et tous immeubles par nature ou par destination constituant l'aménagement de la force hydraulique, y compris les machines hydrauliques et les bâtiments ou parties de bâtiments suffisants pour abriter ces machines, deviennent propriété de l'Etat. Cette transmission s'effectue moyennant une indemnité fixée par la juridiction civile, qui ne peut dépasser, en cas de concession, le quart de la valeur vénale estimée à cette époque, à dire d'experts, des terrains, immeubles, machines et bâtiments précités revenant à l'Etat. Toutefois, aucune indemnité n'est allouée pour la partie des biens établis sur le domaine public, ni lorsque l'entreprise fait l'objet, au profit du permissionnaire, dont le titre vient à échéance, d'une autorisation nouvelle ou d'une concession.

L'Etat peut également racheter, à dire d'experts, le surplus de l'outillage.

Celles des entreprises susvisées qui n'auraient pas commencé la construction de leurs ouvrages à la date du 1er août 1917 et seraient classées concessibles aux termes de l'article 2 peuvent, pendant cinq ans, à compter de cette date, être obligatoirement placées sous le régime de la concession; à défaut d'accord sur les stipulations de l'acte de concession, l'Etat aura la faculté de retirer l'autorisation et de se substituer au droit du permissionnaire, moyennant une indemnité qui sera fixée par la juridiction civile et ne pourra dépasser le montant des dépenses utilement faites et dûment justifiées.

En aucun cas, le maintien des autorisations antérieures ne peut faire obstacle à l'octroi de concessions nouvelles ni à l'application des dispositions des articles 4 et 6.

Les dispositions des paragraphes 1er, 2, 3 et 4 du présent article ne sont pas applicables aux entreprises dont la puissance maximum ne dépasse pas 150 kilowatts; ces entreprises demeurent autorisées conformément à leur titre actuel et sans autre limitation de durée que celle résultant de la possibilité de leur suppression dans les conditions prévues par les lois en vigueur sur le régime des eaux.

ART. 19. — Les exploitants, propriétaires ou locataires d'entreprises autorisées ou concédées à la date de la promulgation de la présente loi sont assujettis au payement de la taxe dont le taux et le mode de payement sont réglés par les articles 8 et 22.

Ils sont exonérés des redevances proportionnelles prévues à l'article 9, à moins qu'ultérieurement ne soit établi légalement sur toutes les usines hydrauliques un impôt spécial établissant une redevance proportionnelle aux kilowatts-heure produits ou aux dividendes et bénéfices répartis.

Dans le cas d'une entreprise réputée concessible et dont le permissionnaire ne serait pas conservé comme concessionnaire et pour que les aménagements nouveaux nécessaires à l'intérêt bien entendu de l'entreprise et à son avenir soient néanmoins exécutés, le permissionnaire pourra, dans les dix dernières années du régime provisoire, solliciter la participation de l'Etat.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un contrat spécial déterminera la nature, l'importance et le coût des travaux, le mode de participation de l'Etat à ces derniers, les règles d'imputation et d'amortissement du montant des aménagements nouveaux.

Dans les cinq années qui précèdent la fin du régime provisoire, le permissionnaire pourra être astreint par l'Etat à exécuter les travaux et aménagements que ce dernier jugera nécessaires à la bonne marche et au développement de la future exploitation.

Dans ce cas, il appartiendra à l'Etat seul d'en régler le montant.

TITRE V

DISPOSITIONS GÉNÉRALES

ART. 20. — Les propriétaires d'usines et de terrains qui auraient profité directement des améliorations de régime des cours d'eau résultant de l'exécution de travaux par l'Etat, les départements, les communes ou leurs concessionnaires, à l'exception des arrosants qui avaient des droits antérieurs à la présente loi, pourront être tenus de payer des indemnités de plus-value qui seront réglées par le conseil de préfecture sauf recours au conseil d'Etat.

Les actions ou indemnités de plus-value ne peuvent être exercées qu'en vertu d'une autorisation préalable accordée par décret rendu en conseil d'Etat.

Le décret peut décider que les indemnités seront payables par annuités en tenant compte chaque année de l'utilisation effective du supplément d'eau ou de force motrice résultant des travaux.

ART. 21. — Les droits résultant du contrat de concession ou de l'arrêté d'autorisation d'aménagement des forces hydrauliques, sont susceptibles d'hypothèques.

ART. 22. — Le recouvrement des taxes et redevances au profit de l'Etat sera opéré d'après les règles en vigueur pour le recouvrement des produits et revenus domaniaux.

Les privilèges établis pour le recouvrement des contributions directes par la loi du 12 novembre 1808 au profit du Trésor public s'étendent aux taxes et redevances susvisées.

ART. 23. — L'Etat ainsi que les départements et les communes à qui des concessions seraient accordées ou attribuées, peuvent exploiter directement l'energie des cours d'eau.

Les départements, communes ou syndicats de communes et les établissements publics qui voudront participer financièrement à l'établissement d'usines hydauliques auront les mêmes droits que l'Etat en ce qui concerne l'application de l'article 7 et des paragraphes *d*, *e*, *f* et *g* du 8° de l'article 10; mais les engagements qu'ils seront appelés à contracter de ce chef devront être préalablement approuvés par décision concertée du ministre de l'intérieur et du ministre chargé des forces hydrauliques.

ART. 24. — Les décrets approuvant des actes de concession ou accordant des autorisations, ainsi que les arrêtés d'autorisations, doivent être rendus ou le refus signifié aux pétitionnaires dans le délai maximum de six mois pour les autorisations et d'un an pour les concessions, à compter du dépôt de la demande et du dossier constitué ainsi qu'il sera spécifié par le règlement d'administration publique prévu par l'article 28, paragraphe 4.

Les ministres, dont l'avis est exigé par la loi ou par les règlements d'admi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nistration publique, doivent fournir leur réponse dans le délai de trois mois à partir de la date à laquelle cet avis leur est demandé ; passé ce délai, ils sont considérés comme acquiesçant sans observations aux propositions formulées.

ART. 25. — Les litiges dans lesquels l'Etat serait engagé par l'application de la présente loi peuvent être soumis à l'arbitrage tel qu'il est réglé par le livre III du code de procédure civile.

Le recours à cette procédure doit être autorisé par un décret délibéré en conseil des ministres et contresigné par le ministre compétent et par le ministre des Finances.

ART. 26. — Aucune concession ou autorisation ne peut être accordée, aucune cession ou transmission de concession ou d'autorisation ne peut être faite qu'aux seuls Français.

Si le concessionnaire ou le permissionnaire est une société, celle-ci doit avoir son siège social en France et être régie par des lois françaises. Le président du conseil d'administration, les administrateurs délégués, les gérants, les directeurs ayant la signature sociale, les commissaires aux comptes et les deux tiers soit des associés en nom collectif, soit des administrateurs, soit des membres du conseil de direction ou du conseil de surveillance doivent être français.

Il ne peut être exceptionnellement dérogé aux règles qui précèdent que par décret délibéré en conseil des ministres et contresigné par le président du Conseil, le ministre des Travaux publics et celui des Affaires étrangères.

ART. 27. — La dérivation à l'étranger de l'énergie électrique produite en France par des entreprises hydrauliques est interdite sous réserve des traités internationaux.

Par exception, un décret en conseil d'Etat, contresigné par le ministre des Travaux publics et celui des Affaires étrangères, peut autoriser, pour une durée de vingt ans au maximum, mais renouvelable, le transport de la force électrique à l'étranger.

ART. 28. — Des règlements d'administration publique détermineront les conditions de l'application de la présente loi et fixeront notamment :

1° Les conditions dans lesquelles les propriétaires seront tenus de laisser faire sur leur propriété tous travaux de mensuration ou de nivellement ;

2° Le modèle du règlement d'eau pour les entreprises autorisées ;

3° Le texte des cahiers des charges types des entreprises concédées ;

4° La forme des demandes ainsi que les documents justificatifs et les plans qui doivent y être annexés ;

5° La forme de l'instruction des projets et de leur approbation ;

6° La forme des différentes enquêtes relatives à l'autorisation ou à la concession des entreprises et à l'établissement des servitudes prévues par la loi. Ces enquêtes doivent obligatoirement comprendre, en cas de concession, la consultation des conseils généraux des départements sur lesquels s'étend le périmètre de la concession ou des commissions départementales à qui délégation, soit générale, soit spéciale, pourra être conférée à cet effet ;

Le délai dans lequel ces assemblées doivent formuler leur avis ;

7° L'étendue et les conditions d'exercice du contrôle technique et financier auquel les concessions sont soumises ;

8° Les conditions dans lesquelles il est pris acte, dans la loi ou le décret approuvant la concession des accords qui seraient intervenus avec les départements, les communes et les collectivités visées au paragraphe 6 de l'ar-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ticle 10 et notamment pour régler, le cas échéant, la participation du concessionnaire au réempoissonnement des rivières, à la reconstitution des massifs forestiers ou à l'amélioration du régime général des eaux ;

9° Les conditions administratives et financières auxquelles est soumise l'exploitation directe de l'énergie des cours d'eau par l'Etat, les départements et les communes ;

10° Les conditions dans lesquelles soit dans les cas d'exploitation directe par l'Etat, les départements et les communes, soit dans les entreprises privées, devra être organisée la participation du personnel aux bénéfices et à la gestion dans le cadre de la loi du 26 avril 1917 ;

11° Les mesures nécessaires pour assurer, en conformité de l'article 26, la prépondérance effective aux intérêts français dans l'administration des sociétés ;

12° La forme et le fonctionnement des ententes que l'administration pourra imposer, sous sa direction, et, le cas échéant, avec son concours financier dans les conditions fixées par les articles 7 et 10 de la présente loi, aux divers concessionnaires ou permissionnaires établis sur les cours d'eau d'une même vallée ou d'un même bassin :

a) Pour l'exécution des travaux d'intérêt collectif tels que lignes de jonction des diverses usines, lignes de transport dans les départements voisins, aménagement des réserves d'eau pour régulariser le régime de la rivière, enlèvement des graviers et des apports, etc. ;

b) Pour l'exploitation des installations ainsi faites, le tout en vue de l'échange, de la répartition, du transport et de la meilleure utilisation de l'énergie ;

c) Pour la fourniture aux agglomérations rurales de la quantité d'eau nécessaire à leur alimentation.

Les ententes devront toujours être administrées par un conseil composé d'une part de représentants de l'Etat et des collectivités riveraines désignées par l'autorité concédante et, d'autre part, d'un nombre égal de représentants nommés par les divers concessionnaires ou permissionnaires de la vallée ou du bassin.

Le président sera désigné par l'autorité concédante parmi les représentants de l'Etat ; sa voix sera prépondérante en cas de partage égal des voix.

ART. 29. — Les usines ayant une existence légale, ainsi que celles qui font partie intégrante d'entreprises déclarées d'utilitée publique et pour lesquelles un règlement spécial sera arrêté par un décret rendu en conseil d'Etat, ne sont pas soumises aux dispositions des titres I et V de la présente loi. Toutefois, elles supportent la taxe dont le taux et le mode de recouvrement sont réglés par les articles 8 et 22.

Les usines qui font partie intégrante d'entreprises déclarées d'utilité publique pourront bénéficier des dispositions des articles 4 et 6.

ART. 30. — Le ministre des Travaux publics connaît de toutes les questions relatives à l'aménagement et à l'utilisation de l'énergie hydraulique. Il prend, dans la limite de ses attributions, toutes les décisions et ordonne toutes les mesures d'exécution nécessaires à l'application de la présente loi. Il est chargé en particulier d'assurer :

La préparation des règlements d'administration publique pris par application de la loi ;

L'exécution, d'accord avec le ministre de l'Agriculture, des études utiles au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

développement de l'emploi de l'énergie hydraulique ainsi que la centralisation et, lorsqu'il y a lieu, la publication de tous les renseignements concernant l'aménagement et l'utilisation de cette énergie ;

L'établissement, d'accord avec le ministre de l'agriculture pour les cours d'eau qui ne font pas partie du domaine public, des plans généraux d'aménagement des eaux par vallées et par bassins dont il doit être tenu compte pour l'institution des concessions et des autorisations ainsi que pour le développement de l'agriculture, et pour la lutte contre les inondations ;

L'instruction des demandes en concession et en autorisation, en cession de concession ou d'autorisation, d'élaboration des conventions et des cahiers des charges, la présentation des projets de loi ou de décret approuvant un concession ou une autorisation ainsi que tous autres, pris en exécution de la présente loi ;

La gestion des usines qui seraient exploitées directement par l'Etat, l'exercice du contrôle de l'Etat sur les usines concédées ou autorisées, ainsi que sur celles ayant une existence légale, l'exacte application du cahier des charges et spécialement des règlements d'eau, la préparation et l'exécution des mesures relatives à la délivrance des concessions et au retrait des autorisations.

Pour les usines à établir par un autre département ministériel comme annexe à une entreprise reconnue d'utilité publique, la loi ou le décret de concession devra être contresigné par le ministre des Travaux publics et le ministre compétent et, sur les cours d'eau qui ne font pas partie du domaine public, par le ministre de l'Agriculture.

Les fonctionnaires et agents des services hydrauliques locaux du ministère de l'Agriculture sont placés pour toutes les questions concernant l'aménagement de l'énergie hydraulique et notamment pour l'instruction des demandes en concession ainsi que pour le contrôle de ces entreprises sous l'autorité du ministre des Travaux publics.

ART. 31. — Il est créé auprès du ministre des Travaux publics un comité consultatif comprenant 7 députés et 5 sénateurs élus respectivement par les assemblées dont ils font partie et, en nombre égal, des représentants des industries aménageant ou utilisant l'énergie hydraulique, de l'agriculture, de la navigation et du tourisme, ainsi que de la protection des sites, paysages et monuments naturels d'une part, des administrations publiques d'autre part, savoir :

1° 8 représentants professionnels des grandes industries aménageant ou utilisant les forces hydrauliques, 8 représentants professionnels de l'agriculture, 2 membres des chambres de commerce, 2 représentants de la navigation intérieure, et 2 représentants des associations de tourisme et de protection des sites, paysages et monuments naturels ;

2° 1 conseiller d'Etat, 1 jurisconsulte, 9 représentants de l'administration des Travaux publics, 6 de l'Agriculture, 2 des Finances, 2 du Commerce et de l'Industrie, 1 de la Guerre, 1 des Postes et Télégraphes, 1 de l'Intérieur et 1 des Beaux-Arts. Jusqu'à la cessation des hostilités, le représentant du ministère de la Guerre et un des représentants du ministère de l'Agriculture seront remplacés par deux représentants du ministère de la Reconstitution industrielle.

Les membres du comité consultatif sont nommés par décret rendu sur la proposition du ministre des Travaux publics après avis :

1° Pour les représentants des administrations publiques, des ministres intéressés ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Pour les représentants professionnels de l'industrie hydraulique et des chambres de commerce, du ministre du Commerce et de l'Industrie ;

3° Pour les représentants professionnels de l'agriculture, du ministre de l'Agriculture.

En ce qui concerne les représentants administratifs et professionnels de l'agriculture, l'avis du ministre de l'Agriculture doit être conforme.

Le conseiller d'Etat qui est désigné d'accord entre les ministres des Travaux publics et de l'Agriculture est de droit président du comité : un vice-président, choisi parmi les membres du comité, est nommé par le ministre des Travaux publics, après entente avec son collègue de l'agriculture.

Le comité consultatif donne son avis sur toutes les questions dont il est saisi par le ministre des travaux publics.

Les cahiers des charges types, les projets des règlements d'administration publique nécessaires à l'exécution de la présente loi, les plans généraux d'aménagement des eaux, les projets de loi ou de décret approuvant une concession ou accordant une autorisation, ainsi que tous autres actes pris en exécution de la loi sont obligatoirement soumis au comité.

L'exploitation d'une usine par l'Etat, en régie directe ou intéressée, ne peut être décidée qu'après avis conforme du comité. Il est institué auprès du comité consultatif un secrétariat comportant des rapporteurs adjoints et dans le sein du comité une section permanente pour l'expédition des affaires courantes ainsi que celles pour lesquelles délégation lui est donnée par le comité. La section permanente est présidée par le conseiller d'Etat, président du comité. La répartition des affaires entre le comité et la section permanente est fixée pur un arrêté du ministre des Travaux publics.

Un règlement d'administration publique déterminera les conditions d'application du présent article, notamment les conditions de fonctionnement du comité et de la section permanente ainsi que la composition de cette section qui devra comprendre sept membres.

Art. 32. — Les décrets portant règlement d'administration publique, les décrets approuvant une concession ou accordant une autorisation, ainsi que tous autres pris en application de la présente loi, seront rendus sur le rapport et le contre-seing du ministre des Travaux publics. Les décrets portant règlement d'administration publique et les décrets approuvant une concession sur les cours d'eau ne faisant pas partie du domaine public seront, en outre, contresignés par le ministre de l'Agriculture.

Les décrets qui approuvent une concession comportant une subvention ou une avance de l'Etat seront, de plus, contresignés par le ministre des Finances.

Sur les cours d'eau ne faisant pas partie du domaine public, les autorisations seront accordées par les préfets sous l'autorité du ministre de l'Agriculture, en se conformant au plan d'aménagement et après qu'ils auront avisé le ministre de l'Agriculture et le ministre des Travaux publics.

TITRE VII

Art. 33. — Sont abrogées toutes les dispositions contraires à la présente loi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Supplément au Tome IV

NOUVELLE LOI SUR LES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

La loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie électrique va être modifiée par un projet de loi adopté par le Parlement. Le nouveau texte, sans altérer le texte en vigueur, le complète dans certaines parties. L'essentiel est que l'Administration a la faculté de provoquer des ententes désirables pour aboutir à une meilleure répartition et à une parfaite utilisation de l'énergie.

Le projet prévoit une organisation permettant une équitable répartition de l'énergie hydroélectrique entre les diverses régions du territoire, en utilisant au mieux l'énergie hydraulique et l'énergie thermique. Les centrales thermiques devront pouvoir venir en aide aux centrales hydrauliques pour compenser les défaillances créées par la nature ou les besoins de l'industrie et pouvoir se porter mutuellement secours dans les régions éloignées de la zone d'action de la houille blanche. Lorsque, par exemple, les centrales d'une même région seront reliées entre elles pour échanger leurs disponibilités, les industries des régions voisines des centrales ne seront pas plus favorisées que celles des centres plus éloignés, car toutes trouveront sur le réseau commun la totalité de la force qui leur est nécessaire, le réservoir mis à la disposition étant très notablement augmenté.

Ainsi l'Etat ou les intéressés pourront prendre l'initiative de l'entente à réaliser et il appartiendra de toutes façons à l'administration d'approuver les accords volontairement conclus. Le projet prévoit le concours éventuel des départements, des communes ou des services publics, des consommateurs, intéressés au premier chef à la construction du réseau qui les mettra en mesure de disposer d'énergie électrique à bon marché. Enfin, au cas où les producteurs d'énergie électrique n'arriveraient pas à s'entendre, l'Etat pourra lui-même les contraindre à s'associer, sous son contrôle ; de plus, lorsque l'organisme fonctionnera, les producteurs et distributeurs de la région intéressée pourront être obligés d'emprunter le réseau commun et, par suite, se voir refuser toute concession, autorisation ou permission de voirie, pour le transport de leur énergie aux points desservis par le réseau de jonction. D'autre part les intérêts de tous les usagers du réseau de jonction, même de ceux qui ne feraient pas partie de l'organe collectif seront pleinement sauvegardés puisque les taxes maxima de péage seront fixés par le cahier des charges.

Avec ce système, l'initiative privée conserve une suffisante liberté d'action, les pouvoirs publics se bornant à orienter son effort vers l'intérêt général en le contrôlant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES MATIÈRES

TOME IV

UTILISATION DE L'ÉNERGIE DES FORCES HYDRAULIQUES

PREMIÈRE PARTIE

USINES CENTRALES

CHAPITRE XXX

Installation, fonctionnement et exploitation

I. — Données d'ordre économique et d'exploitation

Pages.

605. Conditions de fonctionnement et d'exploitation des usines centrales 2664
606. Installation des centrales. — Usines de secours à vapeur 2683
607. Rôle des accumulateurs électriques..... 2710
608. Tarification de l'énergie électrique. — Clientèle des stations centrales 2714

II. — Conditions spéciales de fonctionnement des réseaux de grande étendue

609. Régulateurs automatiques de tension 2723
610. Compoundage électrique 2739
611. Caractéristiques de marche des alternateurs asynchrones..... 2747
612. Emploi des accumulateurs électriques 2763
613. Constance de la puissance dans les distributions de force motrice 2766
614. Mise à la terre du point neutre dans un réseau triphasé..... 2770
615. Emploi de la terre comme partie d'un circuit électrique 2774
616. Instructions sur le montage des installations électriques 2777
617. Instructions en cas d'accidents dus aux conducteurs d'énergie..... 2787
618. Assurances contre l'incendie et la foudre applicables aux réseaux électriques..... 2790

III. — Les grands réseaux de France

619. Représentation cartographique des distributions d'énergie électrique 2792
620. Réseau de la Société d'Énergie du Littoral Méditerranéen 2794
621. Réseau des Pyrénées 2797
622. Réseau de la Société Lorraine d'Électricité 2801
623. Réseau de la Société de l'Énergie électrique du Centre..... 2805
624. Réseau de la Société Méridionale 2810

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.
625. Réseau de la Société Électrique du Sud-Ouest 2811
626. Ligne de transport de force de la Centrale Georgia (Amérique du Nord).... 2813

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATIONS DU COURANT ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XXXI

Traction électrique

I. — Considérations générales sur la traction électrique

627. Causes de la supériorité de la traction électrique 2817
628. Examen des divers systèmes de traction..... 2825
629. Conditions économiques et techniques de l'établissement des chemins de fer électriques..... 2837
630. Étude comparative des divers systèmes de traction 2851
631. Coûts de premier établissement des systèmes de traction 2872
632. État actuel de l'électrification des chemins de fer 2878

II. — Installations-types des différents systèmes de traction

633. Lignes à courant triphasé 2890
634. Lignes à courant continu 2900
635. Lignes à courant monophasé 2909
636. Lignes mixtes..... 2925
637. Locomotives pour la traction sur les canaux 2932

III. — Exploitation des tramways

638. Stations centrales et sous-stations..... 2933
639. Modes d'exploitation. Frais de construction et d'exploitation 2940

IV. — Moteurs de traction

640. Moteur série à courant continu 2946
641. Moteurs monophasés..... 2957
642. Moteurs triphasés 2966

TROISIÈME PARTIE

APPLICATIONS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XXXII

Électrochimie

I. — Métallurgie des métaux par voie humide

643. Tension électrique. Densité de courant. Électrodes..... 2973
644. Galvanoplastie..... 2979
645. Affinage du cuivre 2980

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.
646. Extraction et affinage du zinc 2984
647. Affinage du plomb. — Extraction de l'antimoine. — Extraction de l'étain. — Extraction du nickel 2986
648. Extraction de l'argent. Extraction et raffinage de l'or 2991
649. Dynamos pour l'électrolyse 2998
650. Fabrication du chlore 3003
651. Fabrication des hypochlorites 3007
652. Fabrication de la soude 3009
653. Fabrication du chlorate de potasse 3015

II. — ÉLECTROTHERMIE

654. Fabrication de la cyanamide et des nitrates 3018
655. Préparation de l'ozone 3024
656. Préparation de l'oxygène, de l'oxylithe et de l'hydrolithe 3026
657. Sénilisation et ignifugation des bois 3038

III. — CARBURE DE CALCIUM

658. Propriétés du carbure de calcium 3040
659. Fabrication du carbure de calcium 3041
660. Fours pour la production du carbure de calcium 3042
661. Conditions d'exploitation des usines de carbure de calcium 3047
662. Fabriques mondiales de carbure de calcium 3048

CHAPITRE XXXIII

Électrométallurgie

663. Généralités 3055
664. Classification et nature des fours électriques 3056
665. Dispositions particulières de certains fours électriques 3062
666. Propriétés et avantages du four électrique 3064
667. L'arc voltaïque dans le four électrque 3065
668. Fabrication de l'aluminium 3069

ÉLECTROSIDÉRURGIE OU FABRICATION DU FER ET DE L'ACIER AU FOUR ÉLECTRIQUE

669. Coup d'œil sur la sidérurgie ordinaire 3076
670. Caractères généraux des fours à acier 3079
671. Fours de grande puissance 3083
672. Descriptions des fours usuels employés pour la fabrication de l'acier 3089
673. Réglage et conduite des fours 3124
674. Aciéries électriques mondiales 3132
675. Alliages ferro-métalliques. — Aciers spéciaux 3150
676. Fabrication du silicium et de ses dérivés 3157
677. Ferros-alliages de fonderie 3161

MÉTAUX DIVERS

678. Fabrication du carborundum et du corindon 3162
679. Fabrication du manganèse et de ses alliages 3163
680. Fabrication des électrodes des fours électriques 3167
681. Fabrication du cuivre 3171
682. Fabrication du zinc 3173
683. Fabrication du nickel 3180
684. Fabrication du verre 3182
685. Fabrication de la baryte 3184
686. Fabrication du phosphore 3184
687. Préparation du calcium, du baryum et du strontium 3186

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.
688. Préparation du mercure 3187
689. Fabrication des vanadates 3188
690. Préparation du chrome 3189
691. Production des carbures métalliques 3190
692. Préparation de métaux divers 3191
693. Épilogue 3192

CHAPITRE XXXIV

Législation

I. — Législation et réglementation concernant les distributions d'énergie électrique

694. Loi du 15 juin 1906 sur les dispositions d'énergie électrique 3197
695. Modèle d'arrêté préfectoral autorisant d'installer une distribution électrique par permission de voirie 3199
696. Décret du 17 octobre 1907 portant règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 15 juin 1906. Contrôle et redevances 3203
696 *bis*. Arrêté et décret du 30 mars 1908 fixant les frais de contrôle dus à l'État par les entrepreneurs de distributions d'énergie électrique 3207
697. Décret du 3 avril 1908 portant règlement d'administration publique de la loi du 15 juin 1906 3207
698. Circulaire minsitérielle du 13 mai 1908 relative à l'application du décret du 11 juillet 1907 sur la sécurité des travailleurs dans les établissements qui emploient des courants électriques 3222
699. Circulaire ministérielle du 21 juillet 1908 relative à l'arrêté du 21 mars 1908 déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique 3223
700. Circulaire ministérielle du 3 août 1908 pour l'application de la loi du 15 juin 1906 et concernant l'envoi du décret du 3 avril 1908 3225
701. Décret du 25 août 1908 établissant le cahier des charges type pour la concession d'une distribution publique d'énergie électrique par l'État 3228
702. Circulaire ministérielle du 5 septembre 1908 relative à la traversée des lignes de chemins de fer par les canalisations d'énergie électrique et à l'emprunt des voies ferrées par ces canalisations 3237
703. Circulaire ministérielle du 15 septembre 1908 relative aux décrets du 17 octobre 1907 (contrôle et redevances) 3238
704. Circulaire ministérielle du 18 novembre 1908 relative à l'introduction des demandes pour l'établissement d'ouvrages sur des terrains privés à moins de 10 mètres de distance des lignes télégraphiques ou téléphoniques préexistantes 3240
705. Circulaire ministérielle du 13 mars 1909 relative aux frais de contrôle 3244
706. Circulaire ministérielle du 16 mars 1909 relative aux redevances dues pour l'occupation du domaine public 3245
707. Circulaire du 1er septembre 1909 relative à l'élagage des arbres (arrêté préfectoral) 3246
708. Décret du 30 novembre 1909 approuvant le cahier des charges type pour la concession par l'État d'une distribution d'énergie électrique aux services publics et le déclarant applicable à l'Algérie 3247
709. Circulaire ministérielle du 20 mai 1910 3251
710. Arrêté du 13 août 1910 fixant les conditions d'approbation des types de compteurs d'énergie électrique 3251
711. Arrêté du 21 mars 1911 déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique pour l'application de la loi du 15 juin 1906 3254
712. Circulaire ministérielle du 21 mars 1911 3266
713. Circulaire du 15 avril 1912 relative aux statistiques à fournir en vertu de l'article 58 du décret du 3 avril 1908 3267

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

714. Circulaire du 10 janvier 1912 relative à la traction par courant monophasé . 3269
715. Circulaire du 1er octobre 1912 relative à l'établissement des permissions de voirie de canalisations et ouvrages de distribution ou de transport d'énergie électrique 3270
716. Circulaire du 20 mars 1913 relative à la notification du chiffre devant servir de base pour la détermination du prix du kilowatt-heure 3270
717. Décret du 1er octobre 1913 portant règlement d'administration pour l'hygiène et la sécurité des travailleurs dans les établissements qui mettent en service des courants électriques 3271
718. Arrêté du 9 octobre 1913 fixant les termes de l'instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques 3275
719. Décret du 9 mars 1913 portant application à l'Algérie des décrets des 6 et 7 septembre 1912 (distribution d'énergie électrique, contrôle, redevances)..... 3277
720. Décret du 21 mars 1914 concernant les travaux dangereux interdits aux enfants et aux femmes 3278
721. Comité permanent d'électricité..... 3279
722. Tramways électriques 3279

II. — LÉGISLATION ÉTRANGÈRES SUR LES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE 3280

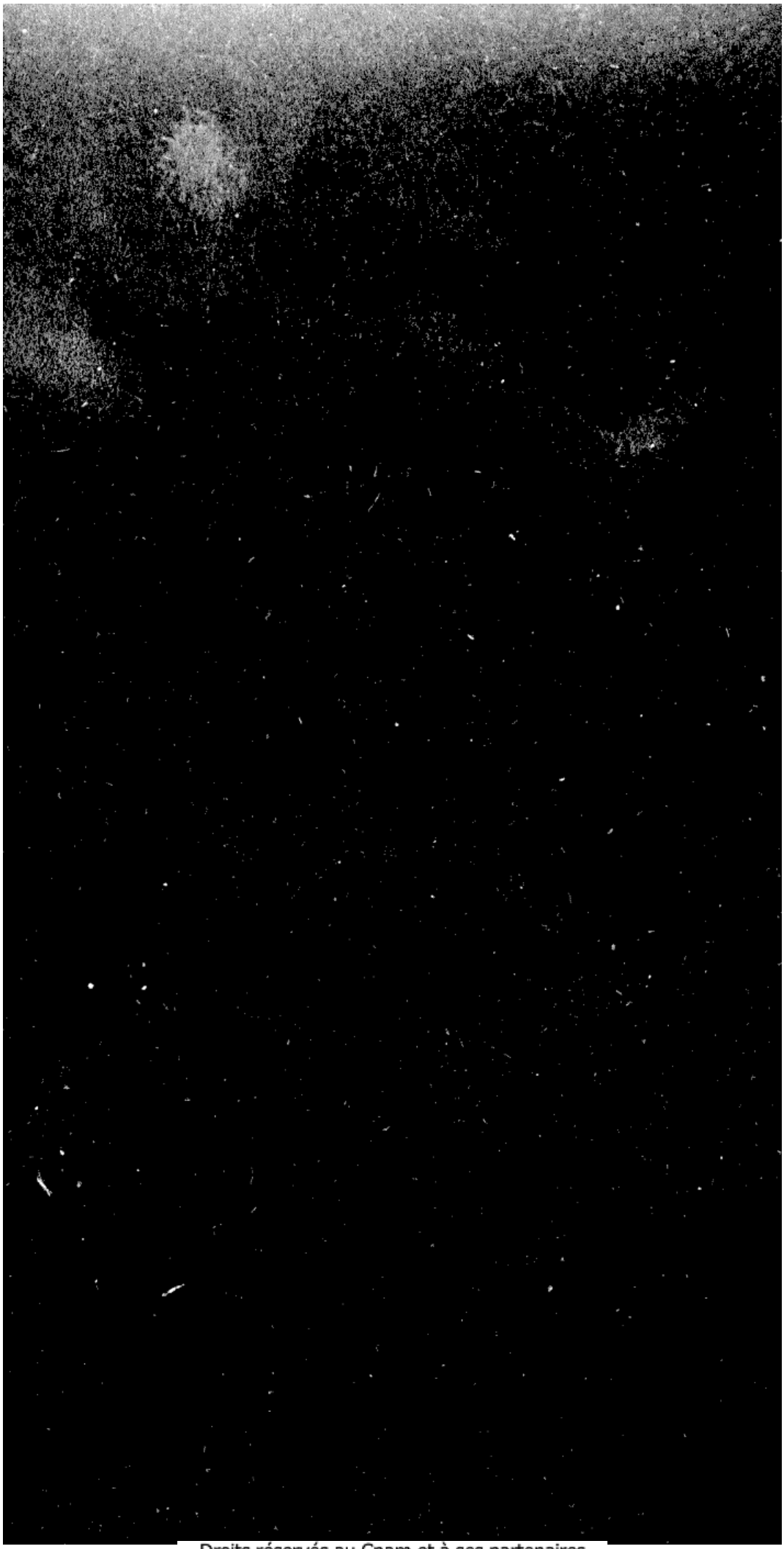
III. — APPENDICE. — RENSEIGNEMENTS JURIDIQUES ET ADMINISTRATIFS CONCERNANT LES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE 3282

LOI RELATIVE A L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE..... 3288

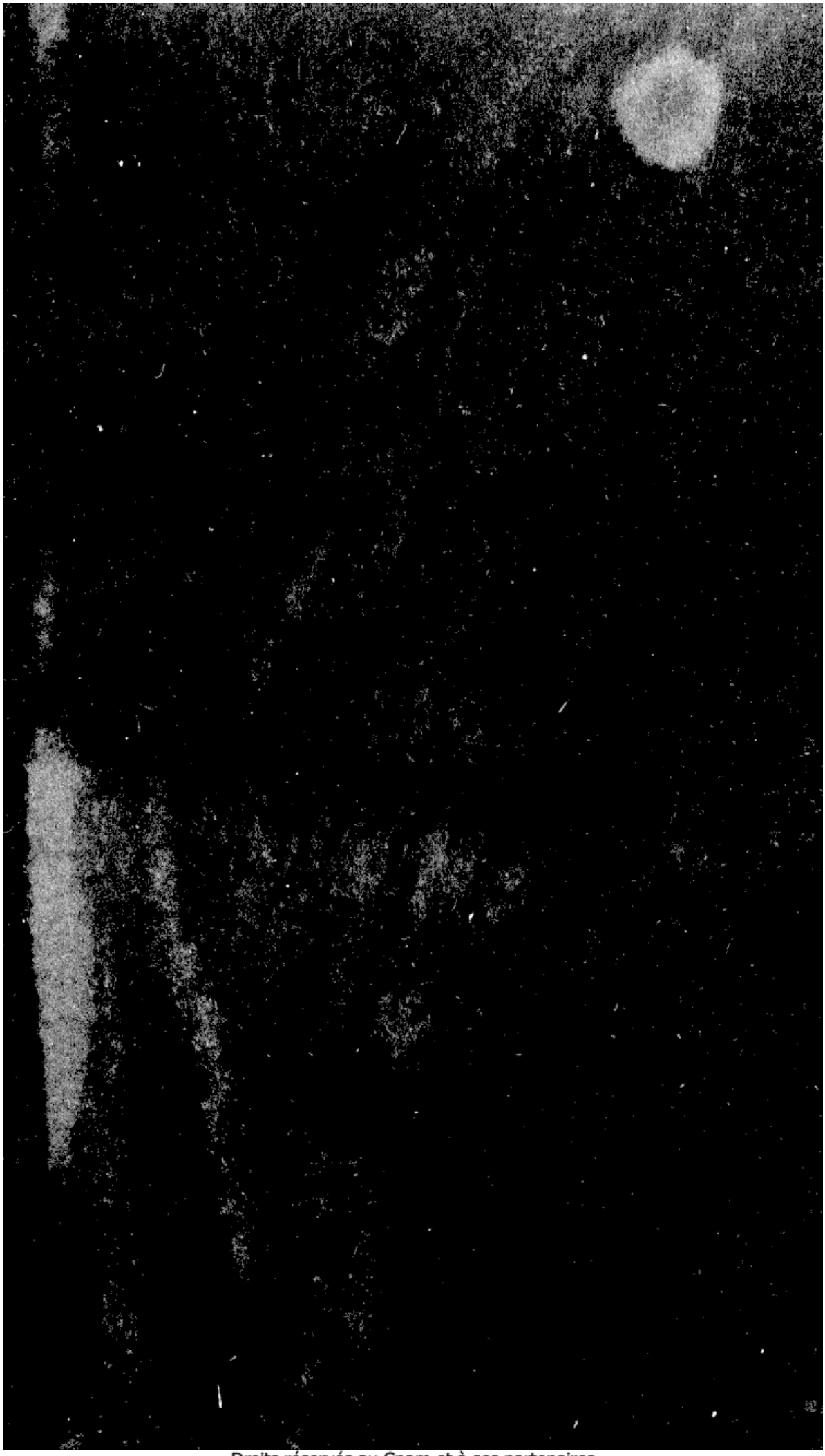
NOUVELLE LOI SUR LES DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE..... 3301

TOURS. — IMPRIMERIE DESLIS PÈRE, R. ET P. DESLIS.

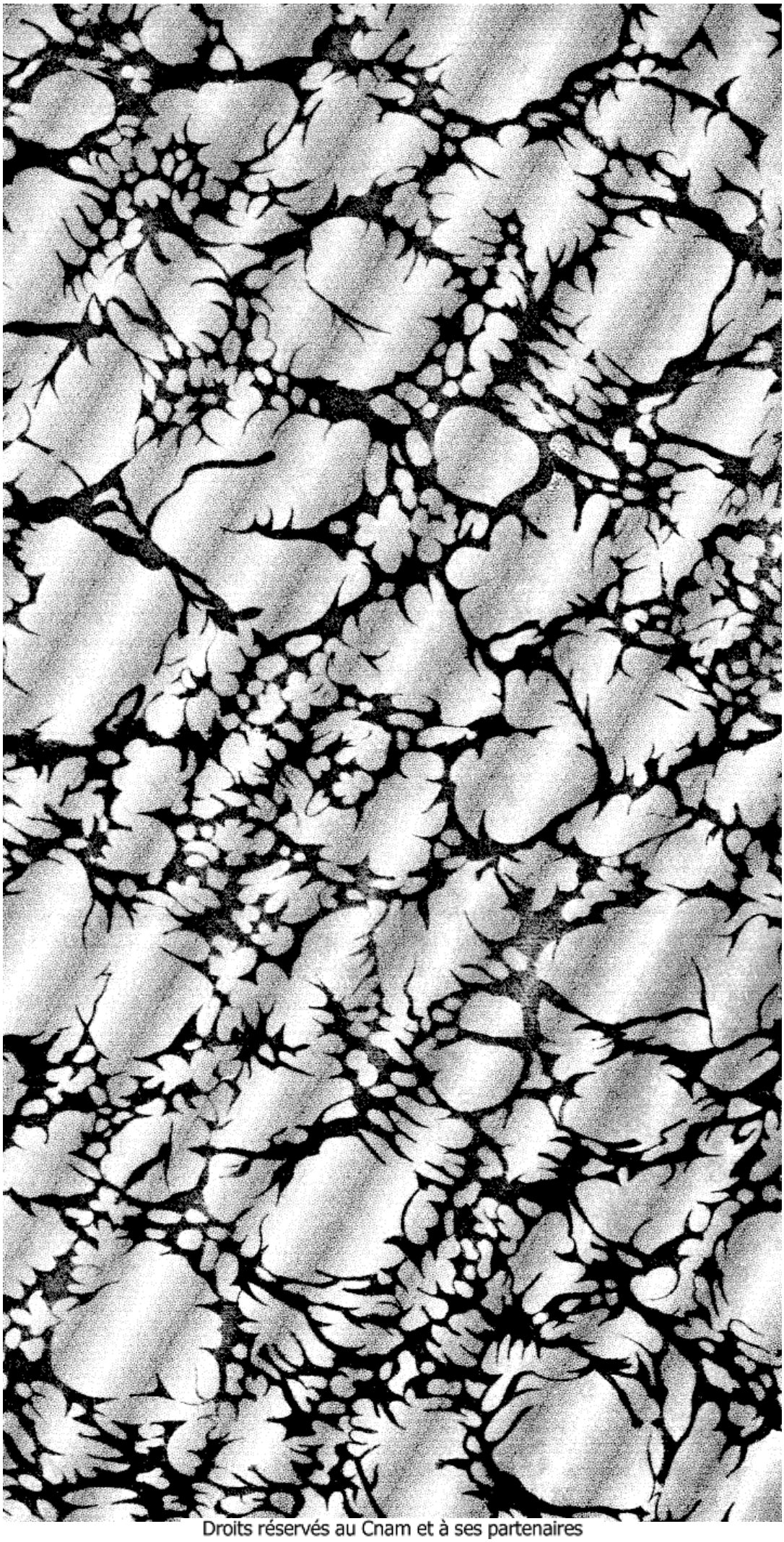
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



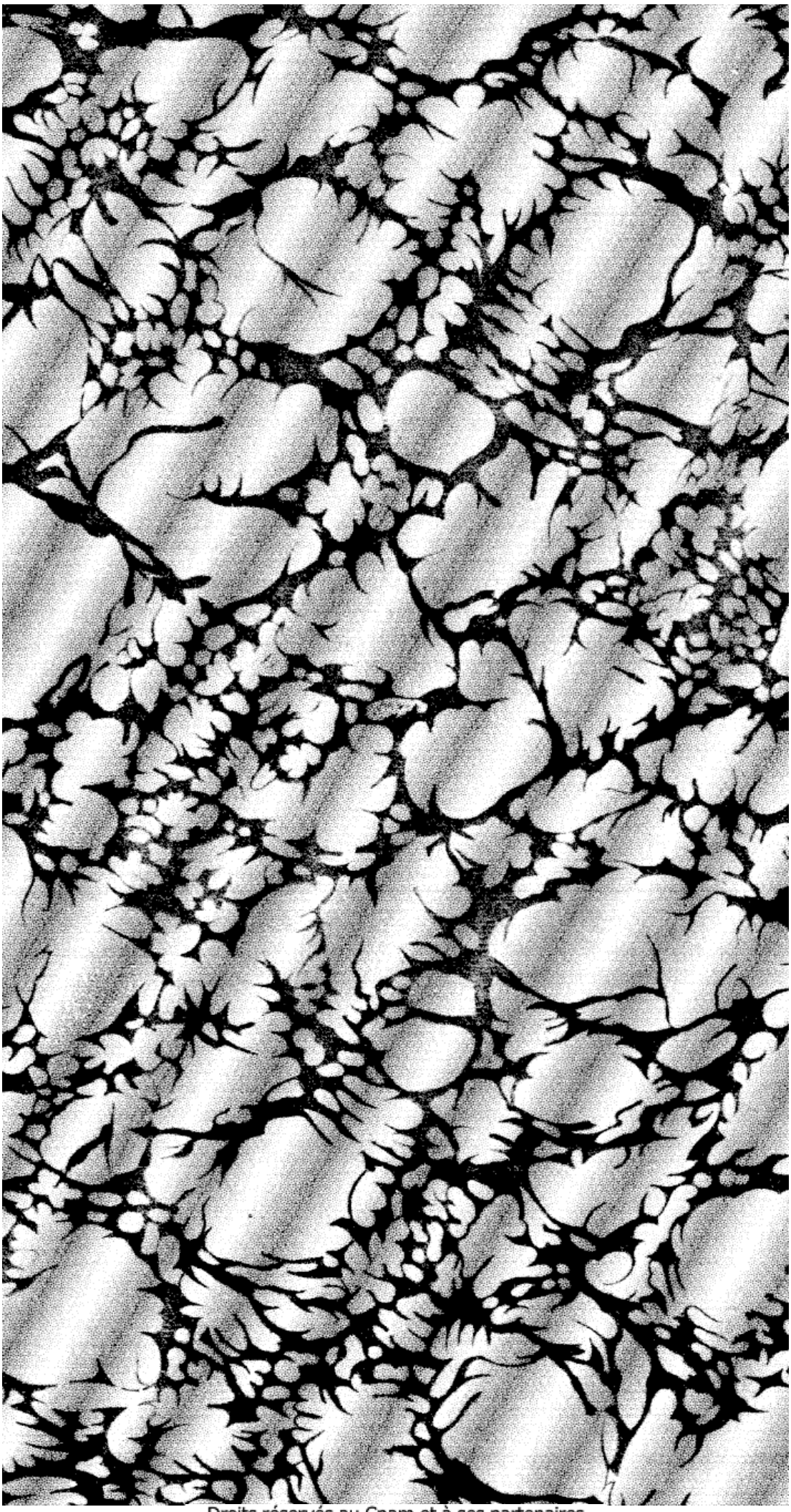
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



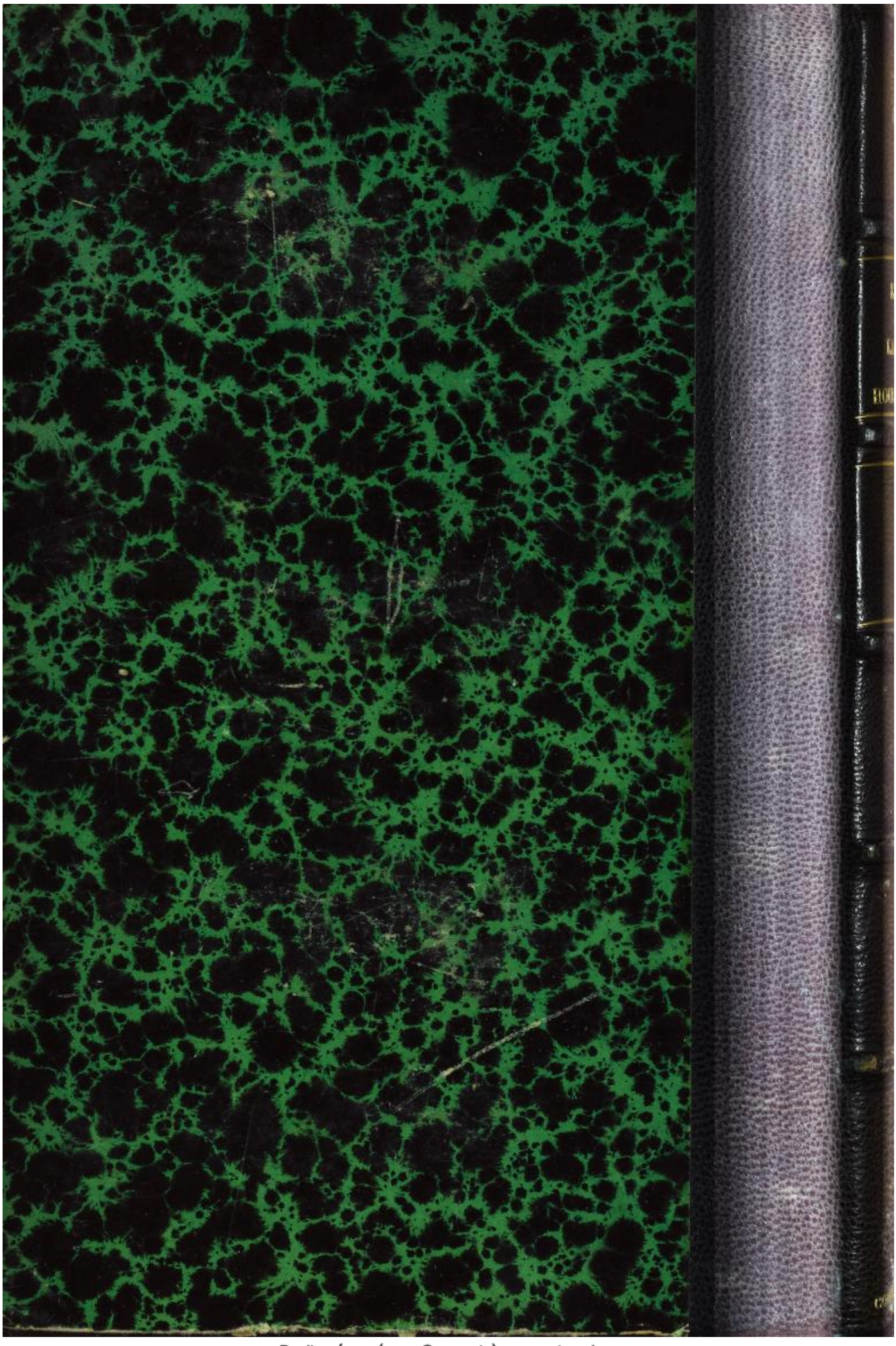
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires