

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - http://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

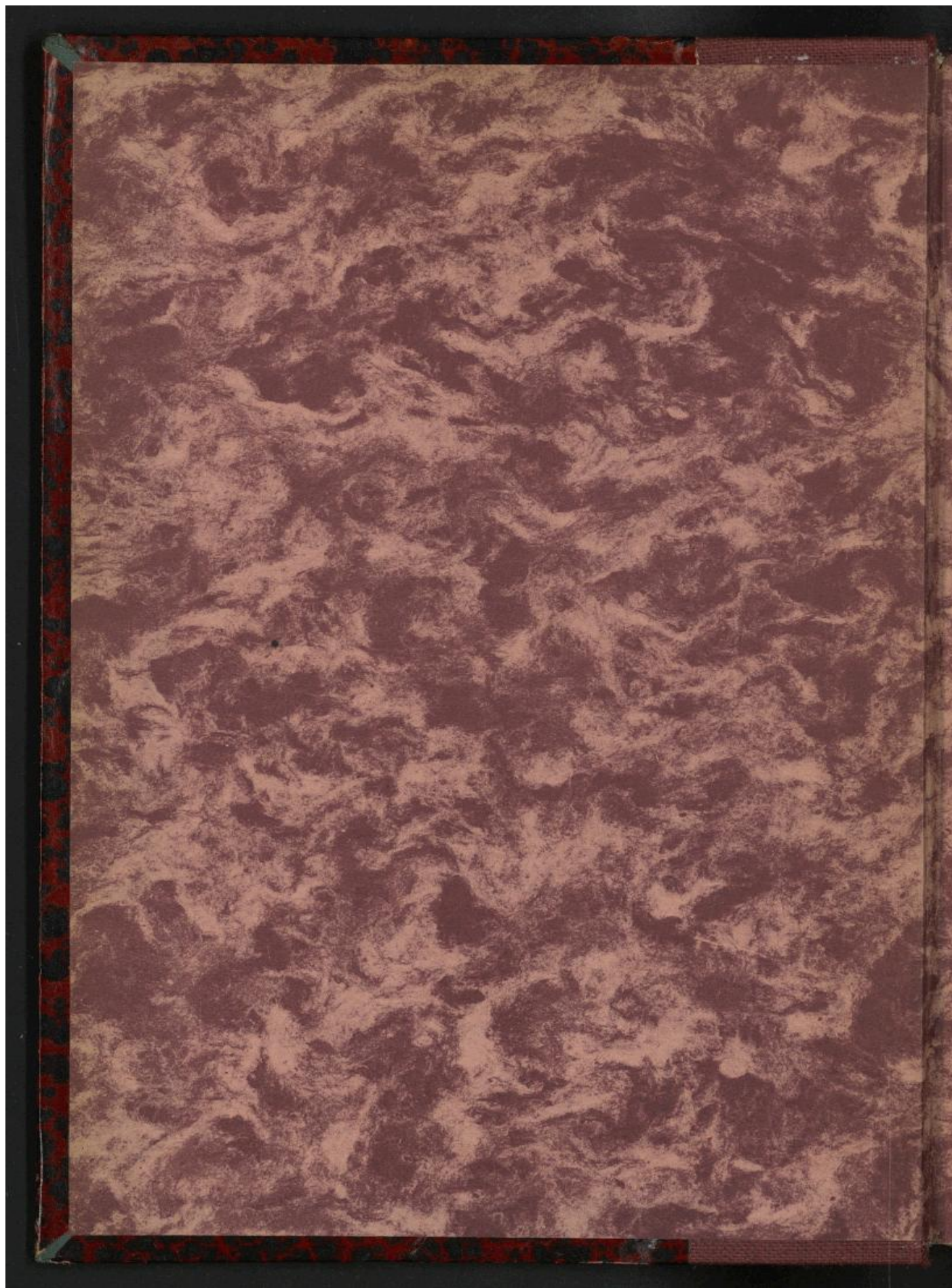
4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

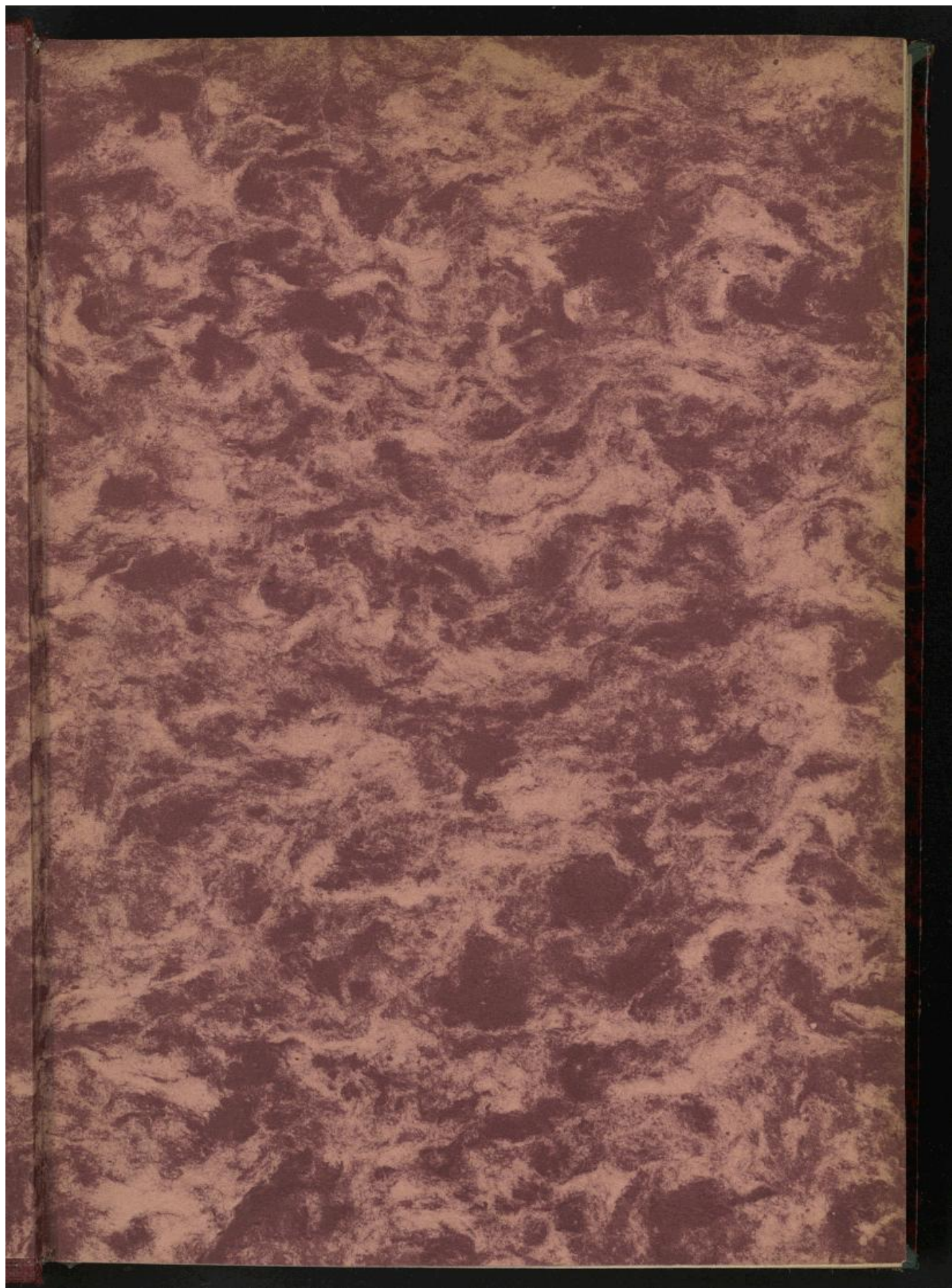
6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

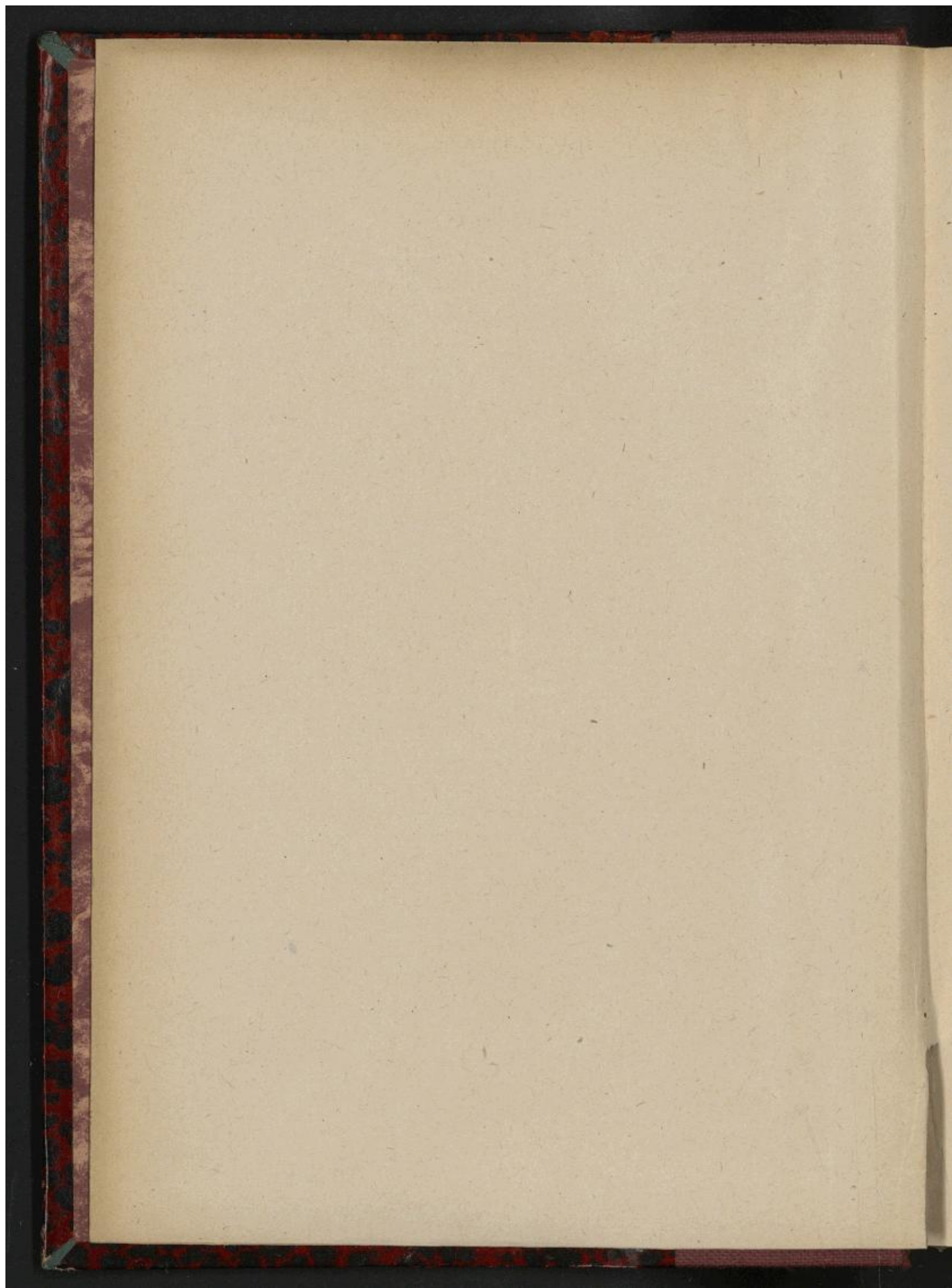
Auteur(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Titre	Production, condensation de la vapeur
Adresse	Paris : Librairie J.-B. Baillière et fils, 1923
Collection	Grandes encyclopédies industrielles J.-B. Baillière. Encyclopédie de mécanique appliquée / publ. sous la dir. de M. L. Lecornu,...
Collation	1 vol. (366 p.-[2] f. de pl. dépl.) : ill. ; 23 cm
Nombre d'images	383
Cote	CNAM-BIB 8 De 287 (10)
Sujet(s)	Chaleur Chaudières à vapeur Condensation Condenseurs de vapeur Vapeur, Technique de la
Thématique(s)	Énergie Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	20/05/2021
Date de génération du PDF	20/07/2021
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?8DE287.10

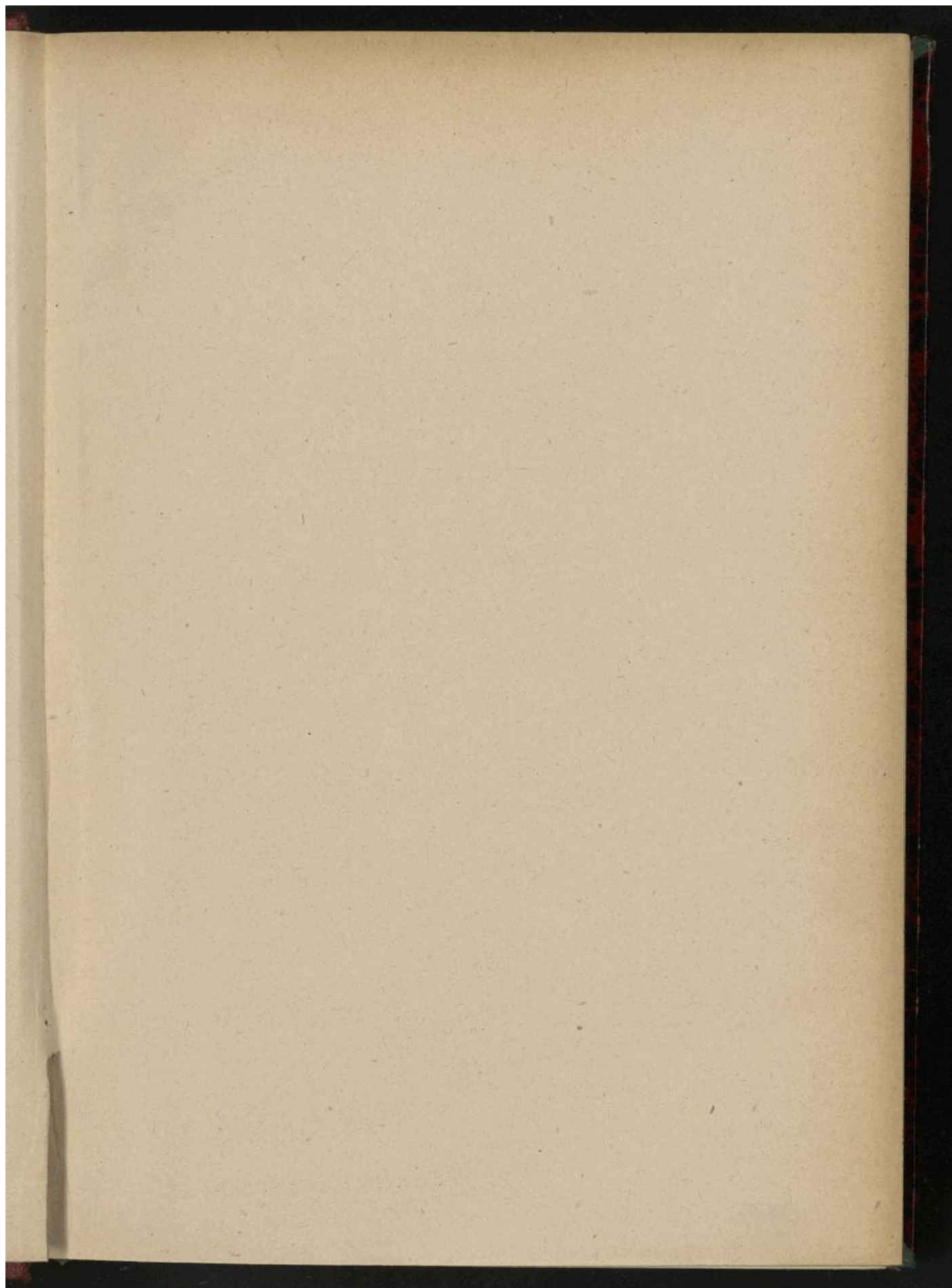


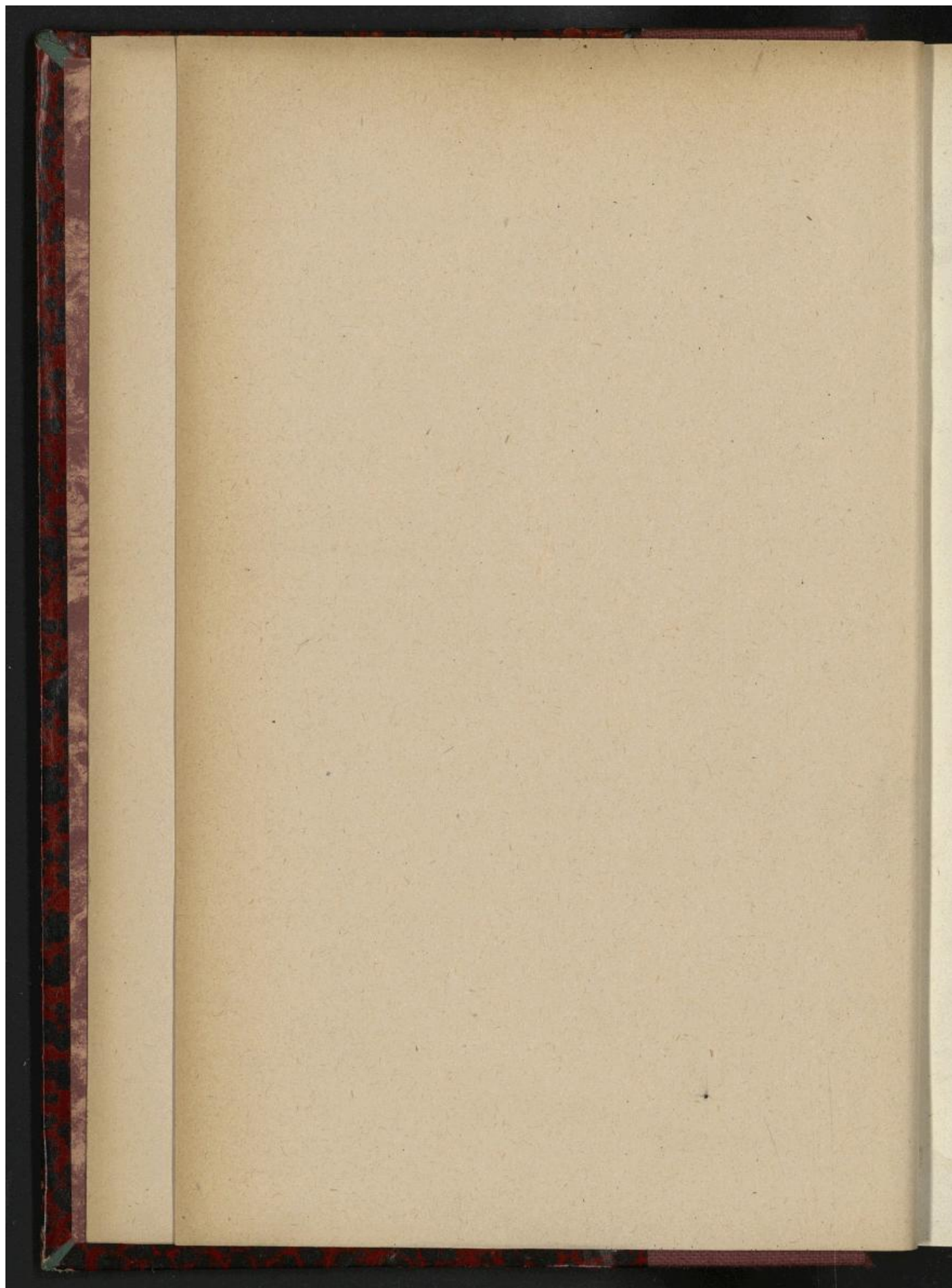
Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires







GRANDES ENCYCLOPÉDIES INDUSTRIELLES J.-B. BAILLIÈRE

Publiées sous le patronage de

LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE
ET DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

PRODUCTION ET CONDENSATION DE LA VAPEUR

A LA MÊME LIBRAIRIE

- La Machine à Vapeur**, par A. WITZ, Doyen de la Faculté libre des Sciences de Lille. 3^e édition, 1913, 1 vol. in-16 de 432 pages, avec 144 figures..... 10 fr.
- Les Gazogènes et l'économie du Combustible**, par A. WITZ. 1921, 1 vol. in-16 de 384 pages, avec 100 figures..... 15 fr.
- Traité de Métallurgie générale**, par Léon GUILLET, professeur à l'École Centrale et au Conservatoire national des Arts et Métiers (*Encyclopédie minière et métallurgique*). 1921, 1 vol. in-8 de 528 pages, avec 335 figures..... Broché, 40 fr. ; relié, 50 fr.
- Précis de Chimie industrielle**, par P. CARRÉ, professeur à l'École des Hautes Études commerciales. 1921, 2 vol. in-8 de 1.010 pages, avec 220 figures..... 30 fr.
- La Pratique des Essais commerciaux et industriels**, par G. HALPHEN, chimiste au laboratoire du Ministère du Commerce. 3^e édition, 1915-1921, 2 vol. in-18..... 20 fr.
- I. Matières minérales. 1921, 1 vol. in-18 de 412 pages, avec 57 fig. 10 fr.
- II. Matières organiques. 1915, 1 vol. in-18 de 350 p., avec 72 fig. 10 fr.
- La Métallurgie en France**, par U. LE VERRIER, professeur à l'École nationale des Mines et au Conservatoire national des Arts et Métiers. 1894, 1 vol. in-16 de 348 pages, avec 66 figures..... 4 fr. 50
- Précis de Métallurgie**, par H. PÉCHEUX, Sous-directeur de l'École nationale d'Arts et Métiers de Lille, Lauréat de l'Institut. 3^e édition, 1915, 1 vol. in-18 de 484 pages, avec 138 figures..... 10 fr.
- La Métallurgie**, par E. d'HUBERT, professeur à l'École supérieure de Commerce de Paris. 1 vol. in-16 de 400 pages avec figures... 10 fr.
- Dictionnaire de l'Industrie**. Matières premières. Machines et appareils. Méthodes de fabrication. Procédés mécaniques. Opérations chimiques. Produits manufacturés, par Julien LEFEVRE, agrégé des sciences physiques. 1899, 1 vol. gr. in-8 de 924 pages, à 2 colonnes, avec 819 figures..... Broché, 30 fr. ; relié, 40 fr.
- Les Moteurs**, par L. LETOMBE et LACON, professeurs à l'École Centrale. 2^e édition, 1920, 1 vol. in-18 de 436 pages, avec 130 figures.... 15 fr.
- La Traction mécanique et les Automobiles**, par LEROUX et REVEL, ingénieurs en chef du service de la traction mécanique à la Compagnie générale des Omnibus à Paris. 1900, 1 vol. in-18 de 396 pages, avec 108 figures..... 10 fr.
- Les Chemins de fer, les tramways, les chemins de fer électriques**. Nouvelle édition, par A. SCHOELLER. 1902, 1 vol. in-18 de 384 pages, avec 96 figures..... 10 fr.
- Les Usages industriels de l'Alcool**. Éclairage, chauffage, force motrice, automobilisme, industries chimiques, dénaturation, questions économiques, par D. SIDERSKY, ingénieur-chimiste. 1903, 1 vol. in-18 de 468 pages, avec 92 figures. 10 fr.

Ajouter 10 p. 100 pour port et emballage.

8^e De 287 10

ENCYCLOPÉDIE DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE

M. L. LECORNU

Professeur à l'École Polytechnique et à l'École Nationale Supérieure des Mines
Membre de l'Institut

10

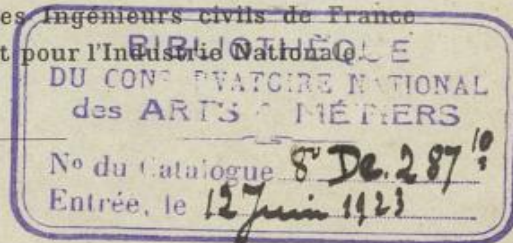
PRODUCTION, CONDENSATION DE LA VAPEUR

PAR

E. SAUVAGE

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

Avec le patronage de la Société des Ingénieurs civils de France
et de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale



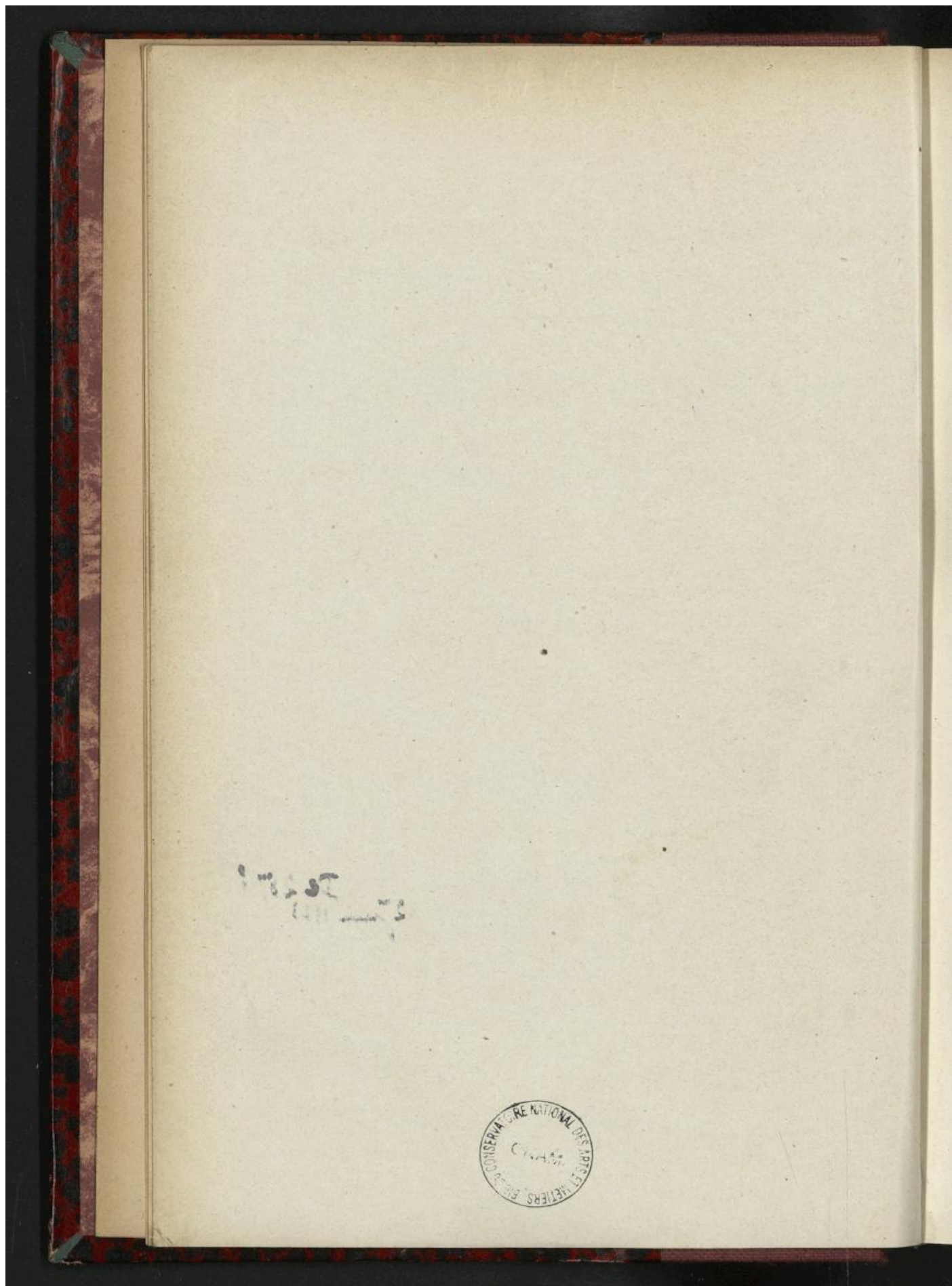
PARIS

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

19, RUE HAUTEFEUILLE

1923

Tous droits réservés



PRODUCTION ET CONDENSATION DE LA VAPEUR

PREMIÈRE PARTIE PRODUCTION DE LA VAPEUR

CHAPÎTRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

1. **Remarques préliminaires.** — De nombreux ouvrages ont pour objet spécial la production de la vapeur d'eau, étudiée, en outre, dans la plupart des traités des machines à vapeur. La présente publication traite des générateurs fixes, les chaudières de bateaux et de locomotives n'y étant examinées qu'accessoirement, et celles à très basse pression, servant pour le chauffage, étant laissées de côté. Une bibliographie du sujet, qui serait fort étendue, n'est pas comprise dans son programme ; toutefois, on y trouvera d'assez nombreuses références, données en vue de faciliter l'étude détaillée des principales questions traitées.

Une étude de ce genre, qui comporte la description de nombreux appareils, exige le concours des constructeurs de ces appareils. Sans pouvoir mentionner tous les ingénieurs et industriels qui ont fourni à l'auteur des renseignements utiles

et des dessins, et au risque de quelques omissions involontaires, il est juste de citer :

La Compagnie de Construction de fours;
La Compagnie électro-mécanique;
La Compagnie Sturtevant;
MM. Davies et Metcalfe;
M. Delaporte, ingénieur de la maison Bréguet;
M. Delaunay-Belleville;
M. Duquenne;
M. Faure-Beaulieu;
Frédéric Fouché (La maison);
MM. Fryer et Compagnie;
M. Gènevet;
M. Grille;
MM. Hamon frères;
M. Izart;
M. Joya;
M. Lavezzari;
M. Maurice Leblanc;
MM. Leroux et Gatinois;
Lethuillier-Pinel (Les successeurs de);
M. Morin;
M. Neu;
MM. J. et A. Niclausse;
M. Pérez, pour les chaudières Galloway;
M. Roser;
La Société alsacienne de Constructions mécaniques;
La Société anonyme des Foyers automatiques;
La Société de Condensations et d'Applications mécaniques;
La Société l'Economiseur Green;
La Société des Etablissements E. Prat-Daniel;
La Société des perfectionnements à la vaporisation, pour le foyer Proctor;
La Société française des constructions Babcock et Wilcox;
La Société Fama, pour grille Riley;
La Société Quigley-France, pour combustibles pulvérisés;
M. Maurice Varinois.

Que ces collaborateurs agréent les remerciements de l'auteur, pour les documents qu'ils ont bien voulu lui communiquer avec une inépuisable obligeance.

Les chaudières ou générateurs de vapeur, par ellipse *générateurs*, comprennent deux parties bien distinctes, l'appareil de combustion, qui produit la chaleur, et l'appareil de vaporisation, qui l'utilise. L'étude de la production de la chaleur comporte l'examen des combustibles, la détermination de leur pouvoir calorifique, la description des foyers, extrêmement variés; cette étude comprend également le tirage, les appareils de contrôle, l'enlèvement des résidus.

A l'utilisation de la chaleur se rattachent le fonctionnement des surfaces de chauffe, la description des chaudières, des réchauffeurs d'eau, des surchauffeurs, des réchauffeurs d'air. Viennent ensuite l'alimentation, les appareils de sûreté, les tuyauteries; enfin, l'étude de l'entretien, des essais, des corrosions, des accidents, de la surveillance et des règlements.

Cette rapide énumération montre l'étendue du sujet; aussi plusieurs des divisions indiquées ne seront traitées que sommairement.

2. Propriétés de la vapeur d'eau. — Les propriétés physiques de la vapeur d'eau ont été minutieusement étudiées par V. Regnault, dont les tables sont encore en usage. Les modifications qu'y apportent les expériences plus récentes ainsi que celles qui résultent de la nouvelle définition de la calorie (1) sont, en effet, assez minimes pour être de peu d'importance en pratique.

(1) Pour Regnault, la calorie chauffe un kilogramme d'eau de 0° à 1°, tandis que la calorie actuelle correspond à la chaleur spécifique de l'eau à la température de 15°. D'après le *Recueil de constantes physiques* (n° 101, p. 300), la chaleur spécifique de l'eau à 15° étant 1,00000, et à 0°, 1,00874, elle sera, par interpolation, 1,0083 à 0°,5. On en déduit que, pour transformer en unités actuelles les Tables de Regnault, il faut en multiplier les nombres par 1,0083. On ne semble pas s'être beaucoup servi de la nouvelle unité de quantité de chaleur. Il en sera de même dans le présent ouvrage, où sont conservés les nombres exprimés en calories anciennes.

L'état de la vapeur est caractérisé en premier lieu par la pression, fixée par le *timbre* de chaque chaudière et limitée par les soupapes de sûreté. L'unité usuelle de pression est le kilogramme par centimètre carré (1); mais l'usage est de compter, pour les chaudières, au lieu de la pression réelle ou *absolue*, la pression *effective*, égale à la pression absolue diminuée de la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'extérieur de la chaudière. Comme la pression atmosphérique est variable, la pression effective, à elle seule, ne définit pas avec une extrême rigueur la pression absolue correspondante; mais les variations sont insignifiantes pour cette mesure, et on peut admettre, sans grande erreur, que la pression atmosphérique, aux basses altitudes, est d'un kilogramme par centimètre carré.

Pour transformer en vapeur un kilogramme d'eau, sous une pression donnée, il faut d'abord la chauffer jusqu'à une température bien déterminée, qui correspond à cette pression, puis lui fournir la chaleur latente de vaporisation, qui transforme le liquide en vapeur, sans changement de température. L'eau étant prise à la température de la glace fondante, 0°, et toute l'opération étant effectuée sous la pression finale de la vapeur, le nombre total des calories à fournir est : $606,5 + 0,305 t$, t étant la température de vaporisation (formule de Regnault, avec l'ancienne valeur de la calorie; avec la nouvelle valeur, elle devient : $610,5 + 0,308 t$).

Quantité d'ouvrages donnent les tables détaillées de ces propriétés de la vapeur d'eau; on ne trouvera ci-après que quelques nombres. Toutefois, comme la plupart des tables s'arrêtent à 200°, la partie correspondant aux températures supérieures est plus détaillée (2).

(1) L'unité fixée par la loi du 2 avril 1919 est la *pièze*, égale à 0,0102 kilogramme par centimètre carré, l'ancienne unité usuelle étant conservée à titre transitoire. La *pièze* est la pression d'un *sthène* par mètre carré, le *sthène* étant la force qui, en une seconde, communique à une masse d'une tonne un accroissement de vitesse d'un mètre par seconde. Voir *Journal officiel* du 5 août 1919, p. 8198.

(2) D'après les *Leçons sur les machines à vapeur*, par HIRSCH et DEBIZE.

PRESSIION ABSOLUE en kg. par cm ² .	TEMPÉRATURE centigrade	CHALEUR du liquide en calories	CHALEUR de vaporisation en calories	POIDS DU M ³ de vapeur saturée en kg.
0,01	6,72	6,72	601,82	0,0075
0,05	32,69	32,72	583,75	0,0347
0,1	45,57	45,64	574,76	0,0671
0,5	80,89	81,18	549,99	0,3059
1	99,08	99,56	537,16	0,5864
2	119,56	120,35	522,62	1,128
3	132,79	133,84	513,16	1,651
4	142,82	144,10	505,96	2,163
5	150,99	152,47	500,08	2,667
6	157,94	159,60	495,07	3,165
7	164,03	165,89	490,64	3,657
8	169,46	171,49	486,70	4,145
9	174,38	176,57	483,12	4,630
10	178,89	181,25	479,81	5,111
11	183,05	185,56	476,77	5,590
12	186,94	189,60	473,92	6,064
13	190,57	193,38	471,24	6,538
14	194,00	196,94	468,73	7,008
15	197,25	200,33	466,33	7,475
16	200,32	203,53	464,07	7,941
16,5	201,81	205,08	462,97	8,172
17	203,26	206,61	461,88	8,402
17,5	204,68	208,08	460,85	8,633
18	206,07	209,54	459,81	8,864
18,5	207,43	210,97	458,80	9,095
19	208,76	212,36	457,81	9,326
19,5	210,06	213,72	456,85	9,556
20	211,34	215,06	455,90	9,787
20,5	212,59	216,37	454,97	10,02
21	213,83	217,67	454,05	10,25
21,5	215,04	218,94	453,15	10,48
22	216,23	220,19	452,26	10,70
22,5	217,40	221,42	451,39	10,93
23	218,55	222,63	450,53	11,16
23,5	219,68	223,82	449,68	11,39

PRESSIION ABSOLUE en kg. par cm ² .	TEMPÉRATURE centigrade	CHALEUR du liquide en calories	CHALEUR de vaporisation en calories	POIDS DU M ³ de vapeur saturée en kg.
24	220,79	224,98	448,86	11,62
24,5	221,89	226,14	448,04	11,84
25	222,96	227,27	447,24	12,07
25,5	224,03	228,39	446,44	12,29
26	225,07	229,50	445,65	12,52
26,5	226,11	230,60	444,86	12,74
27	227,12	231,66	444,11	12,97

Avec la nouvelle valeur de la calorie, les nombres des 3^e et 4^e colonne sont à multiplier par 1,0083.

La table ci-dessous donne le poids du mètre cube d'eau à diverses températures.

Température	Poids du m ³ en kg.
4°	1000,0
50°	988,1
100°	958,4
110°	951,0
120°	943,4
130°	935,2
140°	926,4
150°	917,3
160°	907,5
170°	897,3
180°	886,6
190°	875,0
200°	862,8
210°	850,0
220°	837,0
230°	823,0

Avec cette table, on calcule aisément de combien augmente le volume d'une masse d'eau froide contenue dans une chaudière, lorsqu'on la chauffe.

Une fois la vapeur saturée produite, sous une pression déter-

minée, on peut en élever la température dans un surchauffeur, sans en changer la pression. La quantité de chaleur nécessaire pour surchauffer, sous pression constante, un kilogramme de vapeur n'est pas la même pour chaque degré d'élévation de température et pour les diverses pressions, et la valeur 0,48 calorie, donnée par Regnault, n'est plus admissible. Les résultats d'expériences, qui ont été publiés (1), présentent des divergences. Dans cette incertitude, on peut admettre, pour les calculs approximatifs de la pratique, la valeur 0,5 pour la surchauffe jusqu'à 350°. Au-dessus de cette température, on peut même prendre la valeur 0,6.

(1) Notamment celles de Knoblauch et Jakob, rapportées dans MARCHIS, *La vapeur d'eau surchauffée*, et celles d'A. DUCHESNE, *Recherches sur les propriétés de la vapeur d'eau surchauffée*.

CHAPITRE II

COMBUSTIBLES

3. Combustibles servant à la production de la vapeur. — La plupart des combustibles peuvent servir à la production de la vapeur, pourvu qu'on dispose, pour les brûler, d'appareils convenables. En principe, c'est le moins coûteux, ou plutôt celui qui produit la calorie au moindre prix, qu'on doit choisir. Dans certains cas, pour obtenir des productions intenses ou très régulières, on est conduit à l'emploi de combustibles de choix, tels que les agglomérés à faible teneur de cendres, et les mazouts.

Les houilles se classent en grandes catégories d'après la proportion de matières volatiles qu'elles renferment. Une des plus commodes pour la production de vapeur est la houille demi-grasse, tenant en poids 15 à 20 p. 100 de matières volatiles : telle est la houille de Cardiff, très recherchée pour la navigation, dont la composition élémentaire, d'après l'analyse de la qualité dite *Nixon's navigation*, est :

Carbone	89
Hydrogène	4
Soufre, oxygène, azote.....	4
Cendres	3
TOTAL	100

Le mélange de diverses sortes de charbons permet souvent d'obtenir une qualité convenable et uniforme.

Outre la houille, on brûle sous les chaudières les lignites, les tourbes, le bois en bûches (1), les déchets de bois (copeaux, sciure), la paille, divers résidus végétaux.

(1) On trouvera dans les *Annales des mines*, 11^e série, t. XI, p. 357, un rapport sur l'emploi du bois pour les chaudières.

L'huile lourde de pétrole, ou mazout, est un excellent combustible, d'un emploi commode; c'est le résidu de la distillation des huiles brutes qui a donné successivement les essences, les pétroles lampants, les huiles de graissage. On emploie de même les huiles lourdes de goudrons et des mélanges divers, mazout et huile de goudron, mazout et brai. On a même effectué des mélanges de mazout et de charbon pulvérisé, assez stables pour que les particules solides ne se déposent pas dans les conduites; ce mélange a reçu le nom de combustible colloïdal.

Les gaz combustibles, notamment le gaz naturel et le gaz de haut fourneau, servent aussi à la production de la vapeur.

Les combustibles artificiels, tels que la briquette et le coke, sont d'un emploi fréquent. La briquette est composée de menue houille, qu'un lavage peut avoir débarrassée d'une partie de ses cendres, et de brai, qui les agglomère. Les menus doivent contenir une proportion suffisante de houille grasse ou demi-grasse pour devenir collants à la chaleur, sinon la briquette tombe en poussière à la combustion.

Le coke brûle sans fumée, c'est son principal avantage.

On a construit des chaudières chauffées par un courant électrique (1); un kilowatt heure, correspondant à 367.200 kilogrammètres ou 860 calories, peut produire un peu plus d'un kilogramme de vapeur.

Cet emploi de l'électricité ne peut être qu'exceptionnel, car, en principe, pour le chauffage et surtout pour la force motrice, il vaut mieux l'utiliser directement, sans passer par l'intermédiaire de la vapeur.

4. Essais des combustibles. — Pour apprécier un combustible, on mesure la quantité d'humidité qu'il contient, la proportion de matières volatiles, celle des cendres, et surtout le pouvoir calorifique.

L'humidité, qui forme souvent 2 à 3 p. 100 du poids de la houille, se mesure par des pesées, avant et après dessiccation, à

(1) *Chaleur et industrie*, octobre 1920.

la température de 100°, du combustible pulvérisé. Une distillation au rouge, à l'abri de l'air, expulse les matières volatiles. Enfin, l'incinération exige une chauffe très prolongée en présence de l'air; on en réduit la durée en envoyant dans le creuset un filet d'oxygène.

Le poids total de la houille comprend l'eau hygrométrique, la partie combustible, subdivisée en matières volatiles et carbone fixe, enfin, les cendres. Dans les comptes rendus des essais de vaporisation, on substitue parfois au poids effectivement consommé celui du combustible supposé sec et dépourvu de cendres.

Il est intéressant de déterminer, en outre, les proportions de soufre et de fer que contient la houille.

Le pouvoir calorifique d'un combustible solide ou liquide se mesure avec précision à l'aide de l'*obus* de *Mahler*, plongé dans l'eau d'un calorimètre (1). On y brûle un gramme dans l'oxygène sous forte pression. Les calories reçues par l'eau du calorimètre comprennent celles qu'abandonne, en se condensant, la vapeur d'eau, produite par la combustion de l'hydrogène; le pouvoir calorifique ainsi déterminé est ce qu'on appelle *pouvoir maximum*.

L'*obus* calorimétrique peut aussi mesurer le pouvoir calorifique d'un gaz, mais l'appareil Junkers (2) est plus commode pour cette mesure : c'est un brûleur, surmonté d'une petite chaudière avec circulation d'eau; en jaugeant le débit et en notant l'élévation de température de l'eau, on connaît les calories dégagées par la combustion d'un volume de gaz, mesuré au compteur. Les produits de la combustion sont refroidis, à très peu près, jusqu'à la température ambiante. L'appareil recueille l'eau condensée provenant de ces produits, en vue de déterminer ce qu'on appelle le *pouvoir minimum*, *pouvoir calori-*

(1) Les détails de l'opération sont donnés dans l'*Etude des combustibles*, de MAHLER. On les trouve également dans le *Traité d'analyse des substances minérales*, par A. CARNOT, et dans les *Principes théoriques et pratiques d'analyse minérale*, par CHESNEAU.

(2) Décrit dans la *Revue de mécanique*, mai 1877, p. 491.

fique maximum moins le nombre de calories dues à la condensation de la vapeur d'eau (1).

L'essai pratique consiste à brûler le charbon dans des conditions déterminées, sous une chaudière spéciale. Cette question se rattache aux essais de chaudières, objet du paragraphe 56.

5. Conservation du charbon. — La houille, exposée à l'air, subit une altération lente, qui en réduit le pouvoir calorifique. Cette altération est accompagnée d'un dégagement de chaleur, et même d'inflammation ; surtout avec les houilles à forte teneur en matières volatiles, cet accident n'est pas rare dans les dépôts et dans les cales des navires charbonniers.

Pour éviter la combustion spontanée, il convient de ne pas dépasser 3 à 4 mètres pour la hauteur des tas, suivant la nature des houilles. On a parfois ménagé des canaux de ventilation à l'intérieur des tas ; mais il semble bien qu'ils soient nuisibles, en facilitant l'incendie. L'emploi de locaux couverts, pour emmagasiner la houille, paraît avantageux. Enfin un moyen très efficace, qui permet la conservation pendant plusieurs années sans altération, consiste à placer le charbon dans des bassins pleins d'eau. Toutefois cette méthode entraîne un inconvénient sérieux : au moment de l'emploi, le charbon renferme une forte proportion d'eau, dont il est difficile de le débarrasser (2).

6. Manutention. — Dès que la consommation de combustible est grande, les procédés mécaniques de manutention deviennent utiles. Le problème est d'ailleurs complexe, et des installations coûteuses sont souvent nécessaires. Il faut prendre le combustible dans les véhicules qui l'amènent, bateaux ou wagons, et le transporter soit directement à la chaufferie, soit

(1) La *Revue universelle des mines, de la métallurgie*, etc., a donné (1914, 2^e trimestre, p. 1) une étude sur l'évaluation du pouvoir calorifique des charbons, par M. R. Lambert.

(2) Consulter sur ce sujet une note de M. E. SCHMIDT dans le *Bulletin des associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur*, avril 1921, p. 165.

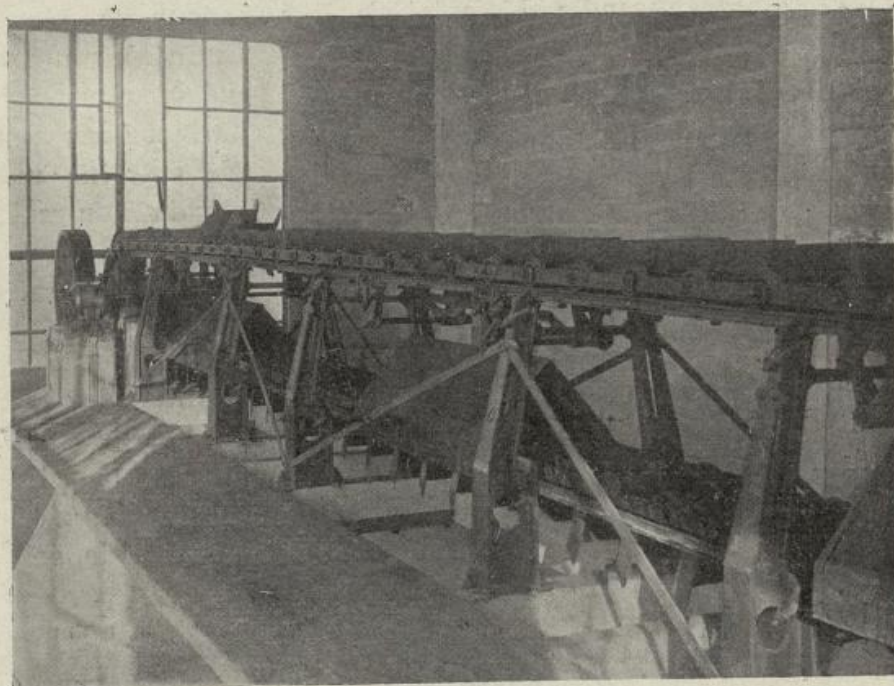
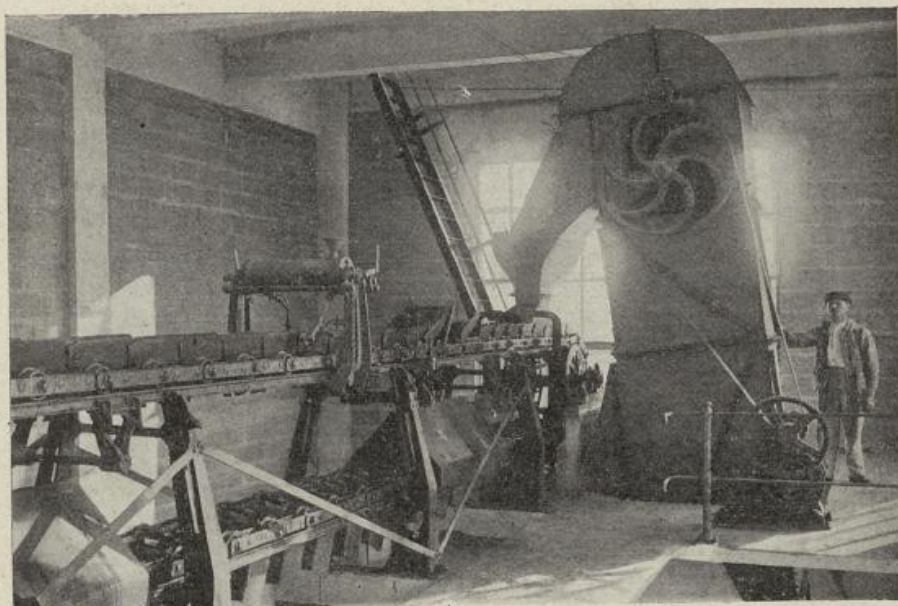


FIG. 1. — Transporteur à tablier métallique, système Babcock et Wilcox.

dans les dépôts, où il sera repris plus tard. En outre, une installation complète exige des mécanismes de pesage et des broyeurs pour concasser les trop gros morceaux.

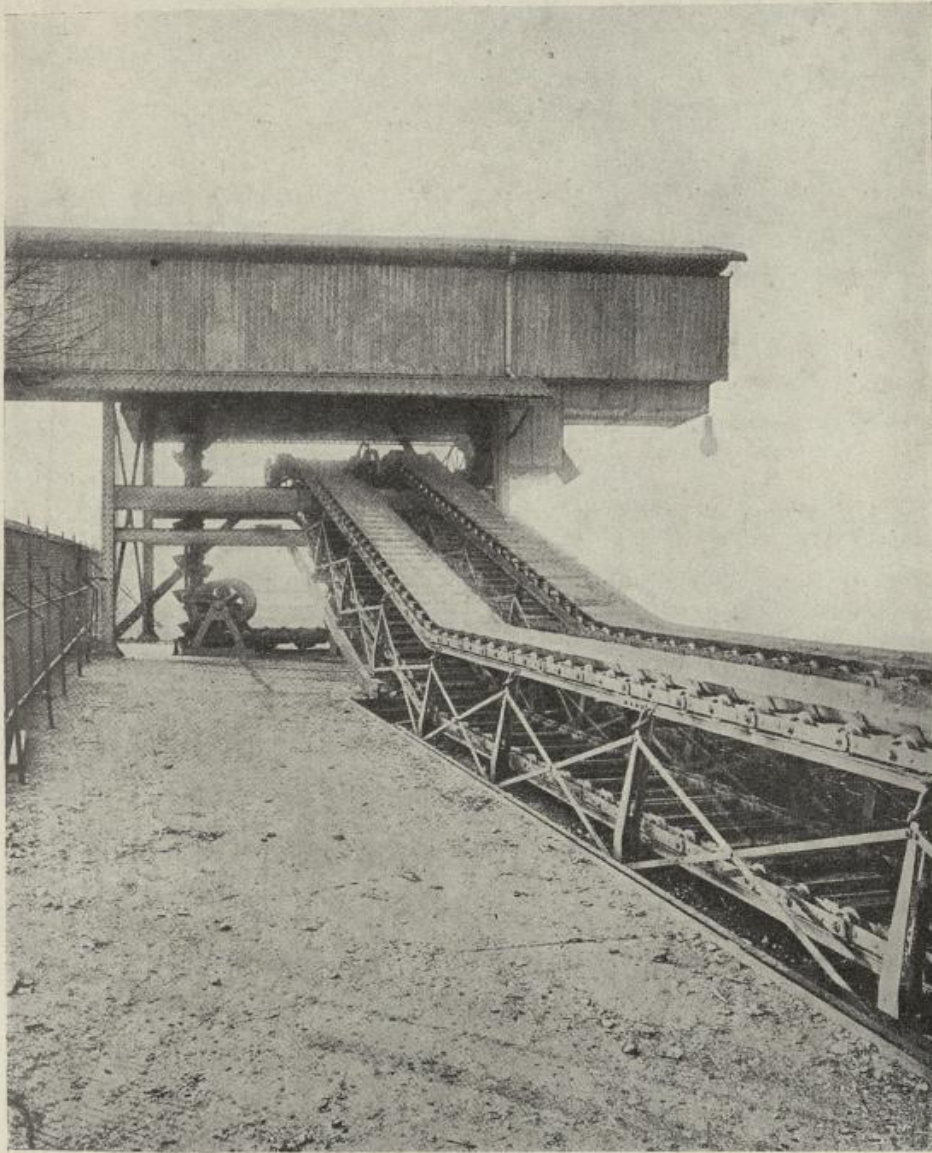


FIG. 2. — Transporteur à tablier métallique; le charbon, déversé à l'extrémité, est repris par un convoyeur à godets, qui alimente un second transporteur, perpendiculaire au premier (usine de la Société d'Electricité de Paris, à Saint-Denis).

E. SAUVAGE. — *La Vapeur*.

2

Si la chauffe se fait à la main, le combustible est amené sur le sol de la chaufferie, à proximité des chaudières; sinon il est déversé dans les trémies d'alimentation des grilles mécaniques.

Pour de petites chaufferies, le transport par wagonnets peut

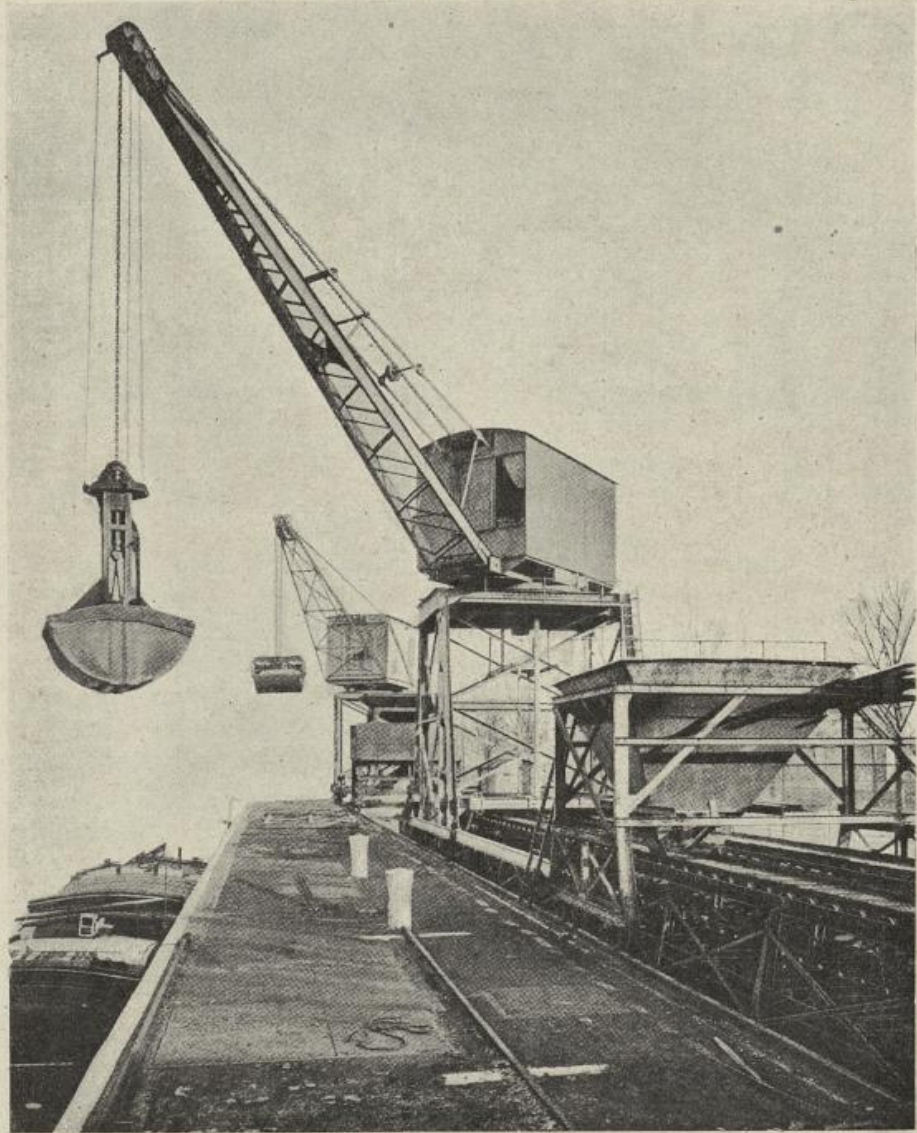


FIG. 3. — Transporteur à tablier métallique, trémie de chargement, et grues avec bennes piocheuses (usine de la Société d'Electricité de Paris, à Saint-Denis).

suffire, les différences de niveau étant rachetées par élévateurs ou plans inclinés. A l'entrée de la chaufferie, le wagonnet passe sur une bascule qui indique le poids de charbon livré.

Pour les grands tonnages, le transport se fait par vis d'Archimède, chaînes à godets, courroies, transporteurs à tablier métallique, convoyeurs à bennes.

Le transporteur à tablier métallique (fig. 1 et 2) peut être chargé en un point quelconque de son parcours, par une tré-

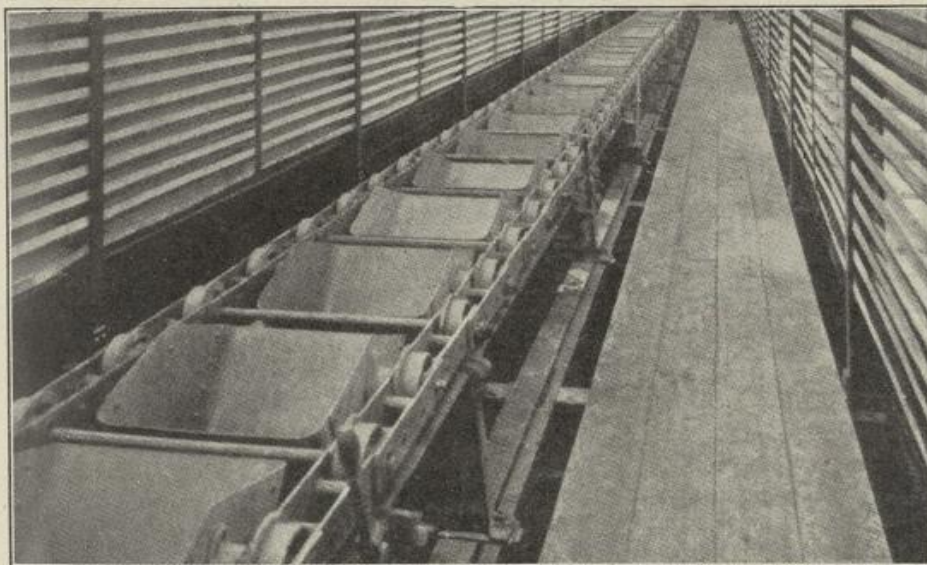
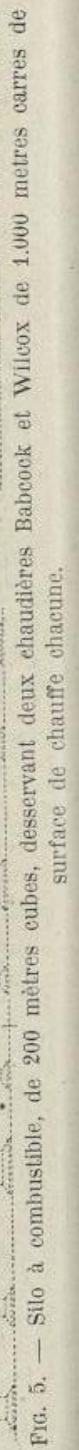


FIG. 4. — Convoyeur à bennes basculantes, système Babcock et Wilcox.

mie (fig. 3), mais ne se décharge qu'à une extrémité. Il fonctionne avec une inclinaison atteignant 20°.

Le convoyeur à bennes (fig. 4) fonctionne dans toutes les directions, de l'horizontale à la verticale. Il peut être chargé et déchargé en un point quelconque de son parcours. Les bennes sont suspendues à des chaînes latérales et basculent pour la vidange.

Directement au-dessus des chaudières, on installe souvent des silos, qui contiennent une provision pour quelques jours de marche. A titre d'exemple, le silo de la figure 5, qui dessert



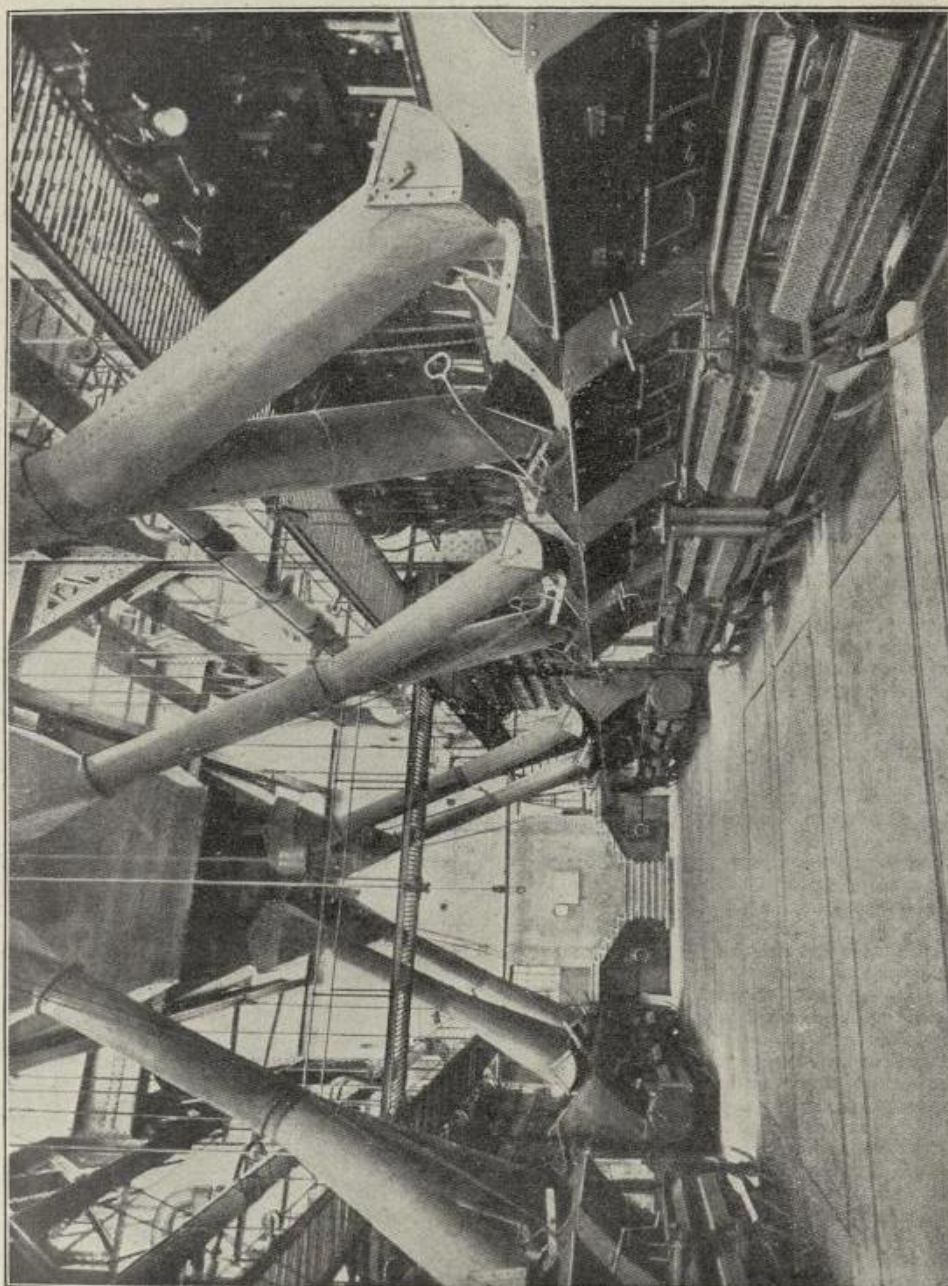


FIG. 6. — Vue d'une chaufferie avec grilles à chaîne de l'*Underfeed stoker C°*, brûlant des fines de coke.

deux chaudières Babcock et Wilcox de 1.000 mètres carrés de surface de chauffe et 31 mètres carrés de surface de grille chacune, a une capacité de 200 mètres cubes. En supposant, pour les deux chaudières, une consommation horaire de 5 tonnes, l'approvisionnement suffit pour une quarantaine d'heures. La figure 6 est un second exemple d'alimentation, par silos supérieurs, de grilles à chaîne.

CHAPITRE III

PRODUCTION DE LA CHALEUR

7. **Combustion.** — Pour chaque combustible, dont on connaît la composition, on peut calculer la quantité d'oxygène, et, par suite, d'air, nécessaire pour une combustion complète (1). Avec les houilles de composition moyenne, cette quantité est, par kilogramme de combustible, voisine de 9 mètres cubes d'air, à la température de 15° et sous la pression atmosphérique normale. Mais pour que la combustion soit complète, il est nécessaire d'admettre, dans les foyers des chaudières, un excès d'air, souvent supérieur à la moitié de la quantité théoriquement indispensable. Cet excès d'air diminue la température de combustion ; comme pour la production de la vapeur on n'a pas besoin de températures très élevées, cet effet n'est pas directement nuisible. Mais étant rejeté par la cheminée à une température encore élevée, l'air est inutilement chauffé jusqu'à cette température.

L'art de la combustion, dans les foyers des chaudières, consiste à l'obtenir complète avec le moindre excès d'air possible.

Quand le carbone est le seul élément combustible, le dosage du gaz carbonique dans les fumées permet le calcul de l'excès d'air. Le volume de gaz carbonique reste le même que celui de l'oxygène qui l'a produit. S'il n'y avait aucun excès d'air, on trouverait, après la combustion, 21 p. 100, en volume, de gaz carbonique. Une proportion de 15 p. 100 de ce gaz, par exemple, montre que, sur les 21 p. 100 d'oxygène que contenait

(1) Pour 6 grammes de carbone, 16 grammes d'oxygène; pour 1 gramme d'hydrogène (non à l'état d'eau), 8 grammes d'oxygène. 1 gramme d'oxygène est contenu dans 4,35 grammes d'air, occupant, à 0° et sous la pression de 760 millimètres de mercure, 3,37 litres.

l'air, 15 ont été combinés au carbone et 6 restent libres. Ceci suppose qu'il n'y a pas d'oxyde de carbone dans les produits de la combustion. L'excès d'air sur la quantité strictement nécessaire est donc dans le rapport de 6 à 15 ou de 40 p. 100.

Quand le combustible contient en outre de l'hydrogène, ce calcul n'est plus exact, puisqu'au gaz carbonique s'ajoute, dans les produits de la combustion, la vapeur d'eau résultant de la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène. L'hydrogène, à poids égal, exige trois fois plus d'oxygène que le carbone. Une houille tenant en poids 90 p. 100 de carbone et 5 p. 100 d'hydrogène demande, pour ces deux éléments combustibles, des proportions respectives d'oxygène de 90 à 15, ou de 6 à 1. Si les fumées contiennent en volume 12 p. 100 de gaz carbonique, ce nombre devra être majoré de $12 : 6$, ou 2 p. 100 pour le calcul de l'excès d'air.

Comme la proportion de 5 p. 100 d'hydrogène n'est atteinte que dans des houilles riches en matières volatiles, on voit que l'excès d'air se déduit approximativement du dosage du gaz carbonique majoré de 1 à 2 p. 100.

Outre l'afflux d'air en proportion suffisante, la combustion exige que le combustible et l'air soient à haute température. Le plus souvent, l'air entre froid dans le foyer et s'échauffe au contact du combustible en ignition et des parois. Ces parois, en briques, ainsi que des voûtes réfractaires, maintiennent une température élevée, malgré les causes de refroidissement, telles qu'une entrée excessive d'air froid.

Enfin, il est évident que l'air doit être convenablement réparti dans la masse de combustible, et mélangé aux gaz qui s'en dégagent : une chambre de combustion spacieuse est, en général, utile; les foyers restreints exigent des combustibles spécialement choisis (1).

8. Grilles. — Les grilles les plus simples sont composées de *barreaux* en fonte ou en fer (fig. 7), reposant sur des *sommiers*.

(1) Consulter dans *Chaleur et industrie*, mai 1920, p. 163 : *Appropriation de la chambre de combustion aux différents combustibles et influence du rayonnement*, par M. PERDRIZET.

Elles sont caractérisées par la largeur des vides et celle des pleins. Etant donné l'emploi général des charbons tout-venant et menus, les vides sont étroits, souvent inférieurs à 10 millimètres.

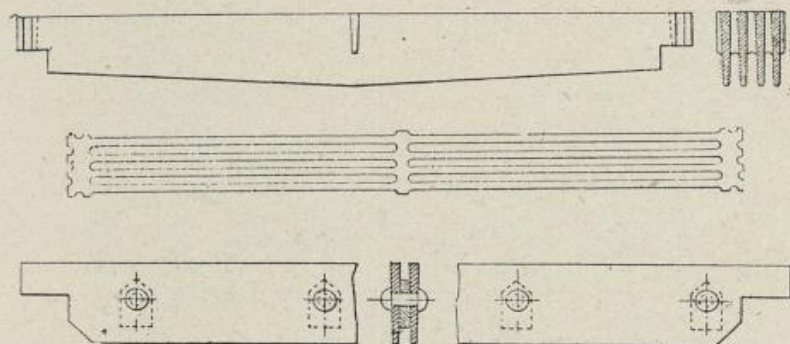


FIG. 7. — Barreaux de grille, en fonte, et en fer.

La section trapézoïdale facilite la chute des fragments engagés entre deux barreaux.

Certains barreaux présentent des découpures de formes diverses. Par exemple, les ouvertures de la grille Gènevet (fig. 8) sont en chevrons : elle convient pour le tirage soufflé.

Pour des combustibles très menus qui ne s'agglomèrent pas

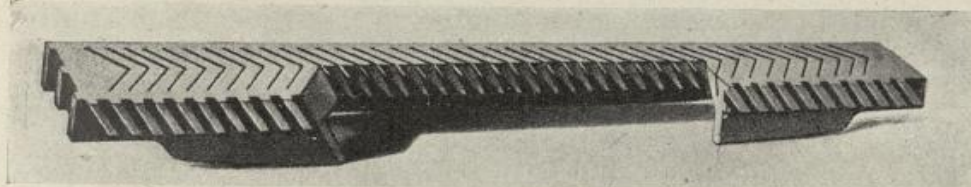


FIG. 8. — Barreau de grille Gènevet à chevrons, en fonte.

au feu, tels que les anthracites et les cokes, aux barreaux de grille on substitue des plaques percées de petits trous, avec insufflation d'air.

Lorsque la grille est inclinée, il paraît logique d'en compter la surface réelle et non la projection horizontale.

L'épaisseur de combustible doit être maintenue constante : le plus souvent elle ne s'écartera pas beaucoup du décimètre.

Il importe que l'état de la masse en ignition soit aussi uniforme que possible, ce qui exige des chargements fréquents par petites quantités. Quand les chargements sont abondants et espacés, l'allure du feu est irrégulière. Un peu avant le chargement, la grille est couverte de coke incandescent, toutes les matières volatiles de la houille étant dégagées; les fragments de coke laissent des vides, et la quantité d'air qui traverse la grille est excessive. Vient le chargement d'une couche épaisse de houille menue et humide, qui ralentit beaucoup le débit de l'air et refroidit le foyer. Les matières volatiles qui se dégagent se trouvent dans de mauvaises conditions pour brûler; par suite de l'insuffisance d'air et du refroidissement: on peut remédier à la première cause en ouvrant une entrée d'air supplémentaire au-dessus de la grille. De toute manière, on n'évite pas la production de fumée, indice d'une combustion incomplète. En outre, la longue ouverture des portes pour le chargement contribue à refroidir le foyer.

En résumé, la combustion se fait alternativement avec insuffisance et avec excès d'air.

Les *mâchefers*, résidus à moitié fondus, que donnent beaucoup de houilles, forment à la surface de la grille des galettes, qui empêchent le passage de l'air. Il est nécessaire de les enlever de temps en temps. Pour le *décrassage* d'une grille, on rejette le combustible d'une moitié de la surface sur l'autre moitié, puis on retire les mâchefers par la porte de chargement. Le combustible est ensuite ramené sur la partie nettoyée, et les mâchefers retirés de l'autre moitié. Cette opération nécessaire ne se fait pas sans perte de combustible.

Pour briser les mâchefers et faciliter le décrassage, certaines grilles sont munies de barreaux oscillants (fig. 9), qu'on manœuvre de temps en temps.

La grille ordinaire se prête facilement à des changements rapides dans l'allure de la combustion pourvu qu'on dispose d'un tirage suffisant. Desservie par un chauffeur habile et soigneux, elle peut donner une bonne utilisation du combustible; mais le gaspillage est inévitable avec un personnel maladroit ou négligent.

Les résultats obtenus dans les concours de chauffeurs donnent une idée de l'influence qu'ont ces agents sur la consommation du combustible. Dans ces concours, on réunit des hommes choisis qui exécutent leur travail avec soin; et cependant on constate souvent de grandes différences des résultats obtenus. N'est-il pas probable que ces différences peuvent s'exagérer énormément quand la chauffe est confiée, sans sur-

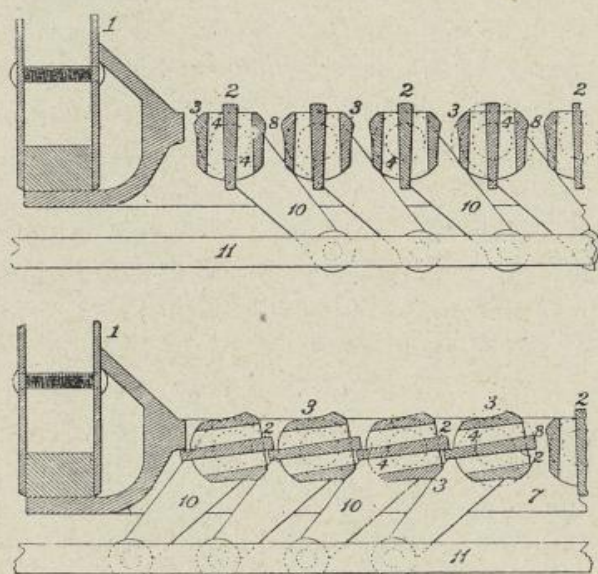


FIG. 9. — Grille Forney, à barreaux oscillants, pour locomotive.

veillance, à des hommes d'une habileté médiocre et peu soigneux ?

A titre d'exemple, le concours de 1913 de l'association de propriétaires d'appareils à vapeur du Nord de la France réunissait dix chauffeurs choisis (1). Ils chauffaient pendant deux jours la même chaudière semi-tubulaire, le concours ne portant que sur les résultats du second jour. Les écarts entre le premier et le dernier sur la liste de classement ont été beaucoup moindres que dans les concours précédents; et cependant, alors que le premier vaporisait 8,522 kilogrammes par kilo-

(1) Voir dans le rapport sur l'exercice 1913-1914 de cette association un compte-rendu de M. Bonet.

gramme de houille, le dixième n'obtenait que 7,836 kilogrammes, à peu près 92 p. 100 de la production du premier.

Ces nombres sont établis en comptant le charbon brûlé pour l'allumage et la mise en pression et en calculant ce que serait le poids d'eau si elle était prise à 0° et vaporisée sous la pression de 5 atmosphères.

Les règles pour la conduite de la chauffe se résument comme il suit :

Entretenir une couche d'épaisseur uniforme et modérée.

Charger fréquemment et par petites quantités.

Abaissér le registre pendant les chargements, pour éviter l'entrée d'air abondante.

Ne pas exagérer le tirage, afin de ne pas appeler un trop grand excès d'air ; toutefois une ouverture insuffisante du registre risque de ne pas produire une combustion complète des gaz, sans compter l'insuffisance de production de la chaudière.

Les instruments de contrôle, décrits au paragraphe 18, sont très utiles pour instruire et guider les chauffeurs.

9. Grilles inclinées. — En inclinant fortement les grilles, on obtient une descente continue du combustible. Le chargement se fait à la partie supérieure par une trémie, munie d'un distributeur qui règle le débit. Sur cette partie supérieure, le charbon se sèche, puis il dégage ses matières volatiles ; plus bas, la partie solide brûle et, à la partie inférieure, il ne doit rester que des matières stériles. La couche s'amincit de haut en bas, de sorte que l'air traverse surtout la zone inférieure. Des voûtes en brique rabattent les gaz combustibles vers le courant d'air et contribuent à élever la température du combustible frais.

La partie inférieure de la grille est munie d'un jette-feu à bascule, ou bien laisse un vide constamment obturé par un tas de résidus.

La disposition à gradins (fig. 10) évite toute perte de combustible par chute entre les barreaux, mais les gradins, mal rafraîchis, souffrent de la température élevée. Cette disposition

ne convient guère que pour des combustibles à faible pouvoir calorifique, tels que les sciures, les bagasses (résidus de canne à sucre), la balle de riz. Avec une grille Margo (fig. 10), sous des chaudières à bouilleurs et semi-tubulaires, un mélange de

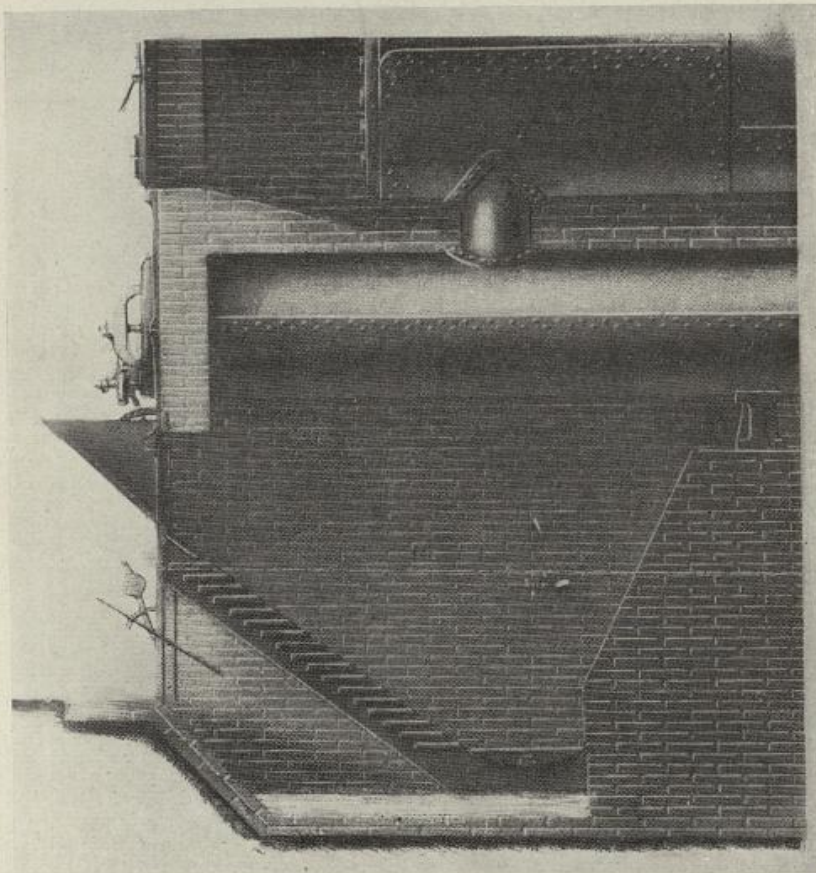


FIG. 10. — Grille à gradins, système Margo, de M. Varinois, avec trémie de chargement à volet mobile, et grille horizontale basculante.

sciure et de copeaux, ayant un pouvoir calorifique de 4.000, a produit 3,4 à 3,9 kilogrammes de vapeur par kilogramme.

Avec de vastes avant-foyers, contenant une grande masse de combustible, on arrive à brûler la bagasse (fig. 11 à 13), sans la dessécher au préalable.

Pour éviter l'échauffement excessif des gradins brûlant de

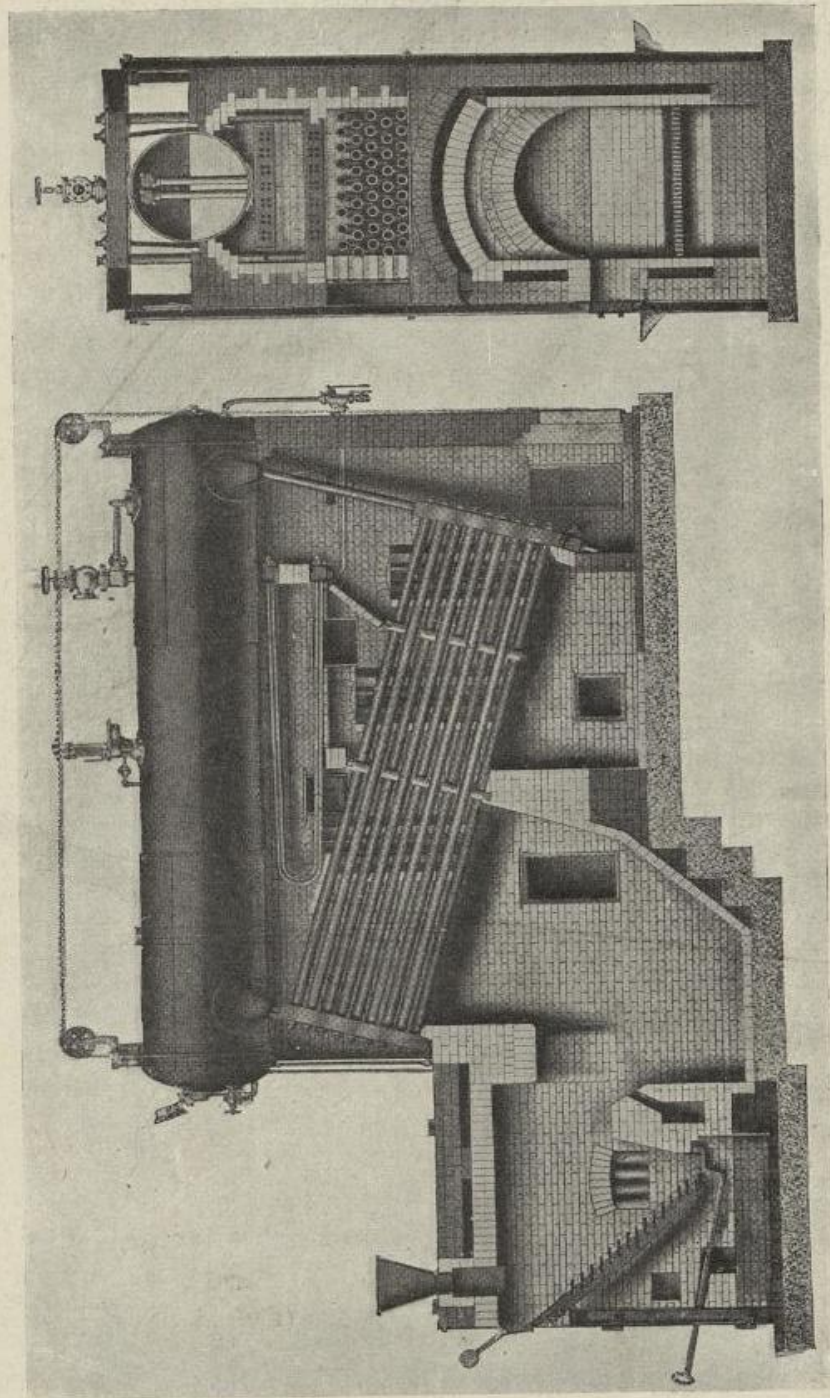


FIG. 11. — Foyer Babcock et Wilcox, avec grille à gradins et passages d'air dans les murs latéraux, pour brûler la bagasse verte au tirage naturel.

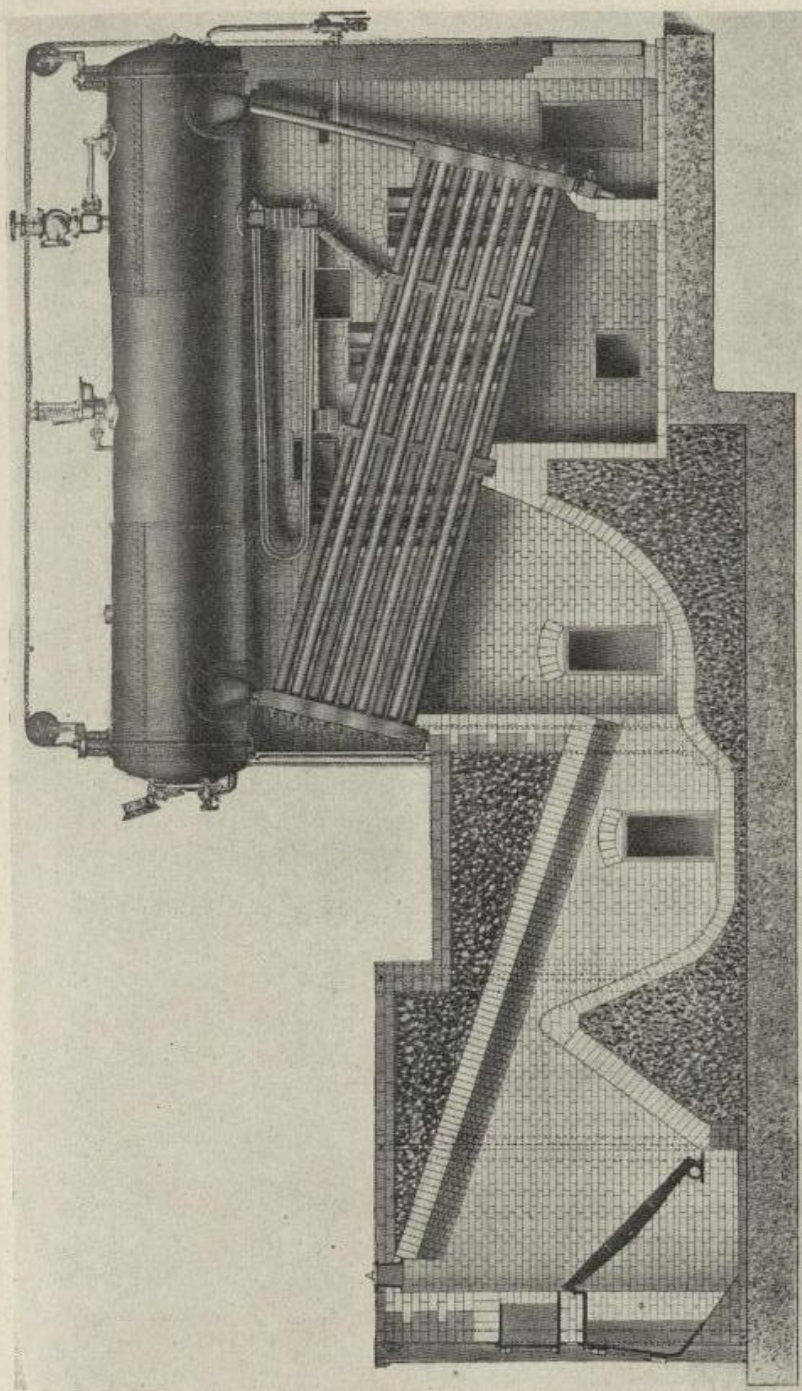


Fig. 12. — Chaudière Babcock et Wilcox, avec foyer à tirage forcé, pour brûler la bagasse verte.

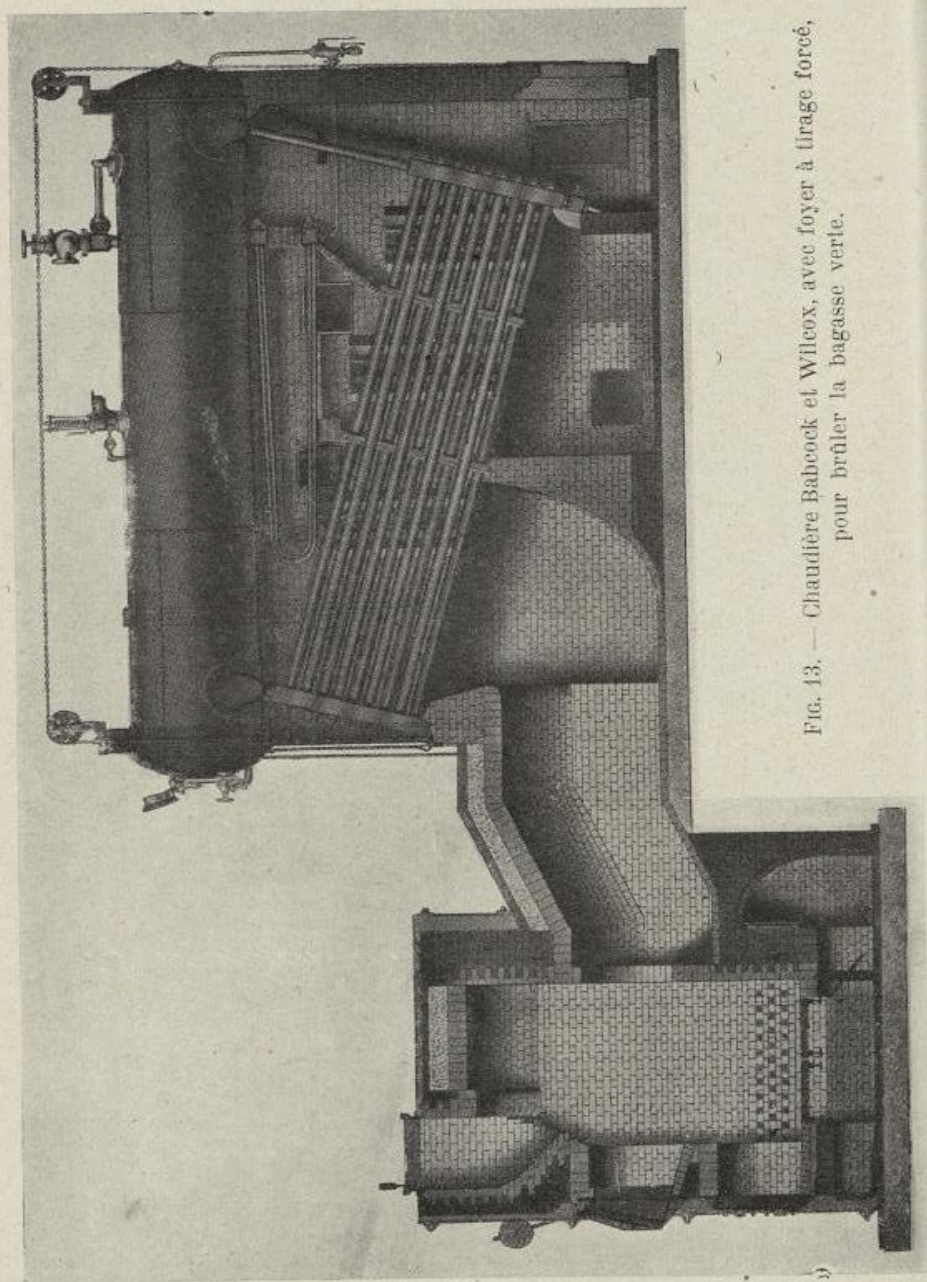


FIG. 13. — Chaudière Babcock et Wilcox, avec foyer à tirage forcé,
pour brûler la bagasse verte.

la houille, M. Dulac employait des lames creuses à circulation d'eau.

Les barreaux de la grille Donneley sont verticaux, mais un second cours de barreaux, formés de tubes d'eau, maintient une tranche verticale de combustible. Cette disposition s'est montrée bien fumivore dans des essais de la Ville de Paris (1).

10. Grilles mécaniques. — Le chargement mécanique du combustible dans les foyers se justifie par de nombreuses raisons. C'est d'abord l'économie de main-d'œuvre évidente pour les grqs tonnages; puis le réglage uniforme de la combustion; la fumivorité; le décrassage automatique. En regard de ces avantages, il faut mettre le prix élevé de ces grilles et les dépenses d'entretien.

Certains appareils de chargement mécanique sont étudiés pour se substituer aux grilles anciennes; d'autres ne conviennent que pour des installations nouvelles. Ils se rangent dans les catégories suivantes :

- Projection du combustible, avec barreaux mobiles;
- Barreaux mobiles, sans projection du combustible;
- Chargement par en-dessous;
- Grilles à chaîne.

Les appareils à projection reproduisent le mouvement de la pelle du chauffeur; en outre, le déplacement des barreaux fait avancer le combustible sur la grille et rejette les résidus à l'extrémité. Le foyer mécanique Proctor, avec distributeur à pelle (fig. 14), reçoit le charbon dans une trémie, d'où un tiroir à course variable le fait tomber dans un auget, balayé par une pelle oscillante; cette pelle est manœuvrée par des ressorts qui lui impriment successivement trois lancés avec intensités différentes, de manière à répartir le charbon sur la grille.

Les barreaux sont poussés ensemble vers le fond du foyer et rappelés séparément en deux groupes, comprenant : l'un, les barreaux d'ordre pair; l'autre, les barreaux d'ordre impair. La

(1) *Revue de mécanique*, juin 1898, p. 610.

course est de 70 millimètres environ. Pour certains combustibles, un barreau sur deux est fixe.

La grille Proctor peut s'installer sous des chaudières existantes. Avec des charbons tenant 18 à 20 p. 100 de matières

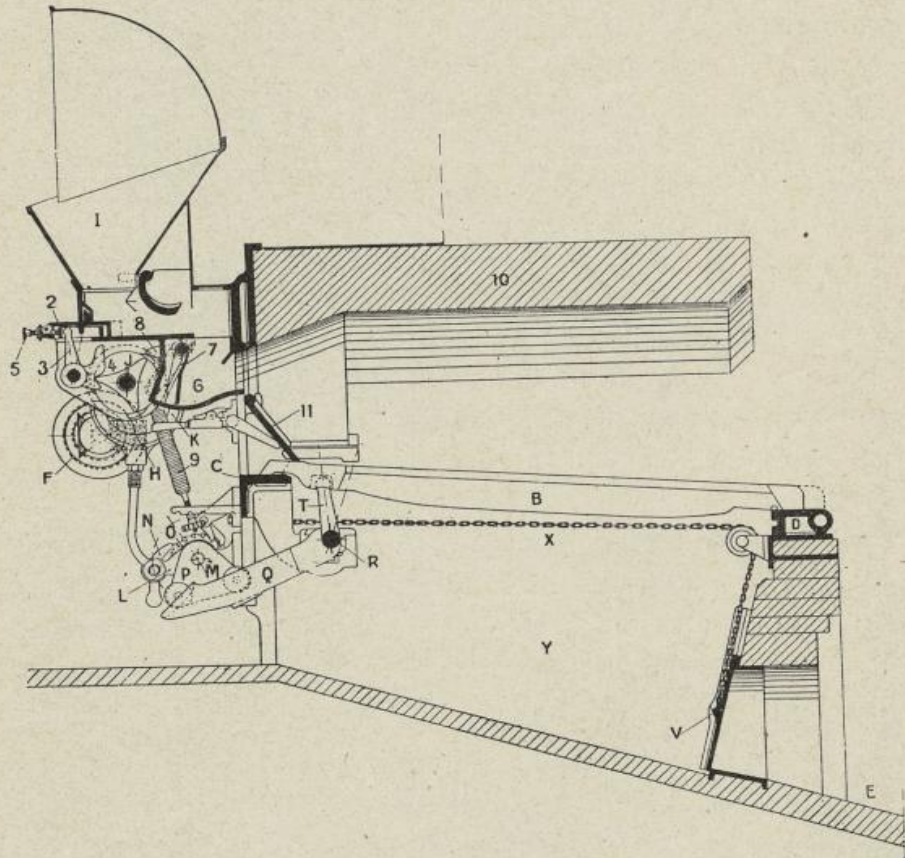


FIG. 14. — Foyer mécanique à distributeur à pelle Proctor, de la Société des perfectionnements à la vaporisation.

2, tiroir à course mobile envoyant la charge voulue dans l'ajet 6; 7, pelle à ressort; D, sommier creux rafraîchi par de la vapeur détendue, qui s'échappe sous la grille pour empêcher l'adhérence des mâchefers; 11, porte pour le chargement à la main.

volatiles, le constructeur garantit une combustion avec une teneur en gaz carbonique de 8 à 10 p. 100, et des résidus ne dépassant pas de plus de 7 à 8 p. 100 la teneur en cendres indiquée par l'analyse.

Le tableau ci-après donne les résultats d'essais d'une de ces grilles, chez MM. J. Crosfield and Sons, à Warrington;

Type de la chaudière (à 2 foyers intérieurs).	Lancashire.
Surface de grille.....	3,58 m ² .
Durée de l'essai	12 heures.
Charbon employé	Haydock menu.
Pouvoir calorifique	6.750 calories
Poids total de charbon brûlé.....	5.784 kg.
Charbon brûlé à l'heure	482 kg.
Charbon brûlé à l'heure par m ² de grille..	134,5 kg.
Cendres et mâchefers	9,3 p. 100
Volume total d'eau vaporisée	48.947 litres.
Vaporisation horaire	4.079 litres.
Vaporisation par kilogramme de charbon.	8,462 litres.
Pression de la vapeur.....	8,44 kg. par cm ² .
Température de l'eau à l'entrée de l'écon- miseur	12°.
Température de l'eau à la sortie de l'écon- miseur	67°.
Température des gaz à la cheminée.....	211°.

ANALYSE DES GAZ

Dans la chaudière	CO ² = 12,4 p. 100
A la base de la cheminée. CO ² = 11,0 »	
CO = 0,6 »	
O = 7,4 »	
A = 81,0 »	

RENDEMENTS CALORIFIQUES

De la chaudière.....	= 67,17 p. 100	} Rendement total 76,76 p. 100
Du surchauffeur	= 1,59 »	
De l'économiseur	= 8,00 »	

PERTES

Dans les mâchefers et cen- dres	= 1,56 p. 100	} Pertes totales 23,24 p. 100
Par combustion incomplète. = 3,48 »		
Par les gaz de la cheminée. = 11,56 »		
Par radiation	= 6,64 »	

Les grilles à barreaux mobiles sont disposées pour transporter progressivement le charbon de l'avant, où le chargement se fait par trémie, à l'arrière, où sont rejetés les résidus. Les barreaux mobiles peuvent être séparés par des barreaux fixes, en dessous desquels ils s'effacent pendant le retour, où ils présentent des redans verticaux de manière à n'agir que dans le mouvement d'aller, facilité par une légère inclinaison. Au lieu de barreaux fixes, on emploie deux jeux de barreaux mobiles, à mouvements alternés.

Le débit de la houille, le tirage et la vitesse de translation doivent être réglés en concordance.

A cette catégorie appartient la grille Niclausse (fig. 15). Elle comprend une trémie de chargement avec registre réglable à la main; une partie fortement inclinée, formée d'une tôle fixe et de barreaux mobiles jointifs; des barreaux légèrement inclinés et profilés en redans. Ces barreaux sont alternativement fixes et mobiles. Les derniers barreaux forment une surface horizontale. L'air, soufflé par un ventilateur, traverse surtout la partie centrale de la grille, comme le montre la figure 133. Une voûte recouvre la partie antérieure de la grille.

En changeant le sens du courant d'air, et lui faisant traverser de haut en bas la couche de combustible, on améliore le régime de la combustion. La couche supérieure qui vient d'être chargée se sèche d'abord, puis les matières volatiles se dégagent et traversent, avec l'air, les couches inférieures formées de coke incandescent; les inégalités dans la marche, qui résultent de ce que l'air et le combustible cheminent en sens inverses, disparaissent. Mais, pour éviter la combustion des barreaux, il faut les remplacer par des tubes à circulation d'eau. Le système Hawley est une application partielle de ce principe, qui ne paraît pas entièrement satisfaisante : le charbon est chargé sur une première grille, formée de tubes à eau espacés, et traversée par l'air de haut en bas. La combustion s'achève sur une grille ordinaire, placée en dessous de la première de manière à recueillir le combustible qu'elle laisse tomber (1).

(1) Voir *Revue de mécanique*, juin 1898, p. 607.

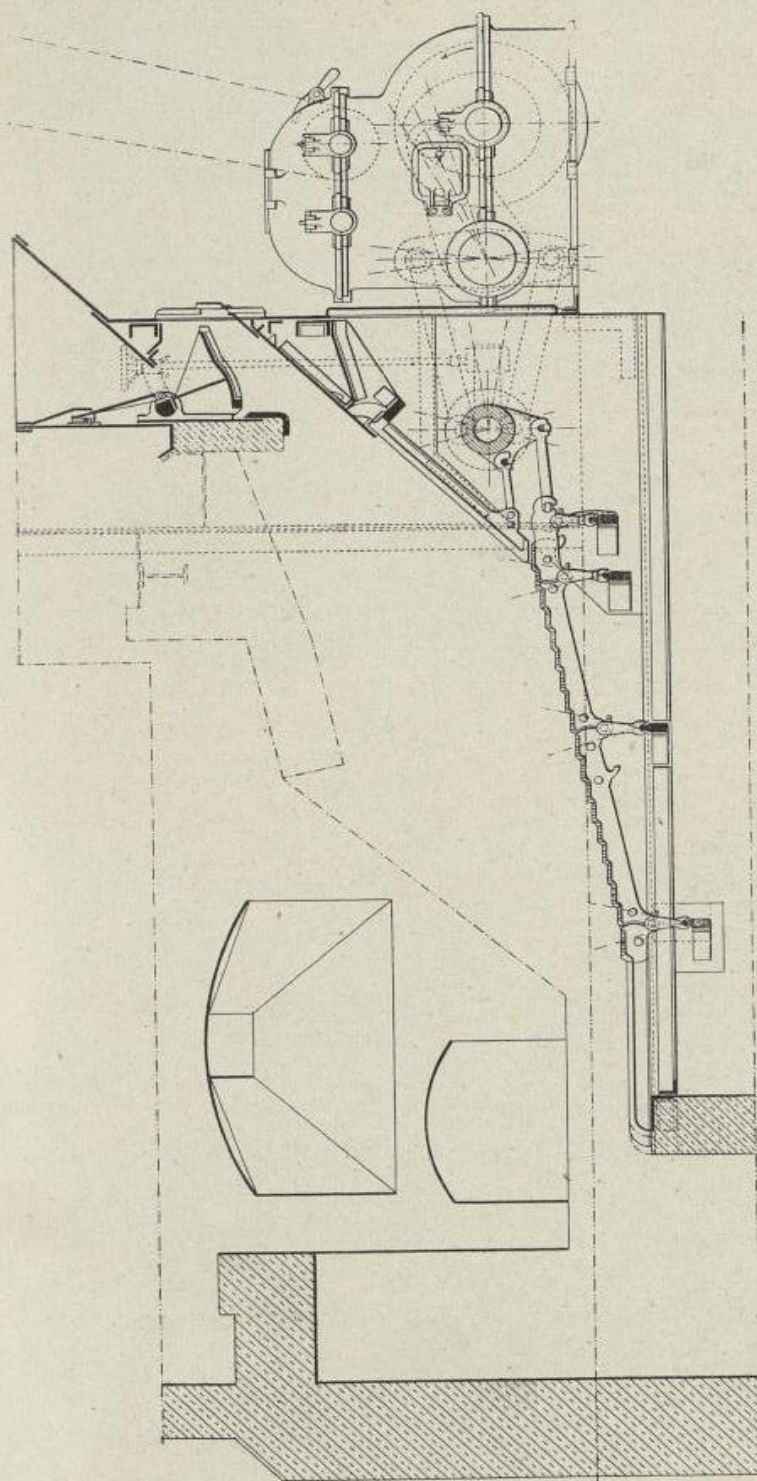


FIG. 15. — Grille Niclausse. Les pièces mobiles sont représentées dans la position moyenne de leur course.

On obtient les avantages de la combustion renversée, tout en ménageant les barreaux, en intervertissant le sens du chargement de la houille, c'est-à-dire en introduisant le charbon frais sous la couche en ignition.

Ce principe intéressant a été réalisé par Duméry et par Georges (Callon, *Cours de machines*, t. II, p. 431), mais les appareils de ces inventeurs ont depuis longtemps disparu. Aujourd'hui l'*Underfeed stoker* (fig. 16) comporte une cuve

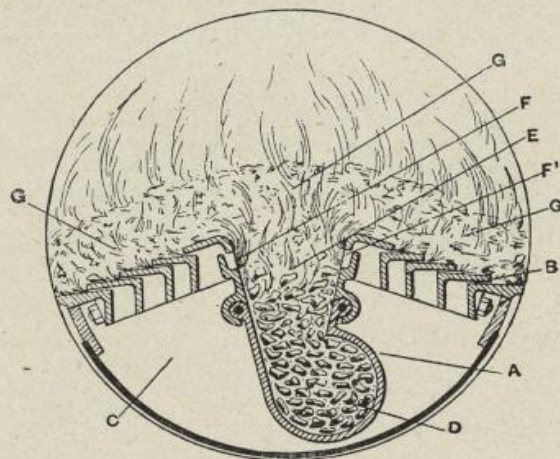


FIG. 16. — *Underfeed stoker*, dans un foyer cylindrique; coupe transversale.

A, magasin avec vis; B, barreaux à recouvrement; C, chambre à air soufflé; D, charbon frais; E, point d'allumage; F F', entrées d'air; G, charbon cokillé incandescent, à travers lequel passent les matières volatiles dégagées en E.

longitudinale assez profonde dans laquelle est poussé le charbon, qui déborde des deux côtés sur des grilles inclinées. L'air, soufflé, se divise en deux courants : un pénètre dans la cuve au point où doit commencer l'allumage du charbon, l'autre passe entre les barreaux des grilles. Les matières volatiles, dégagées par la houille au début de la combustion, traversent une couche de coke incandescent.

L'avancement du charbon dans la cuve longitudinale est produit soit par une vis, soit par un plateau à mouvement rectiligne alternatif. La vis (fig. 17, 18 et 19), reçoit un mouvement de rotation réglable, donnant cinq vitesses différentes.

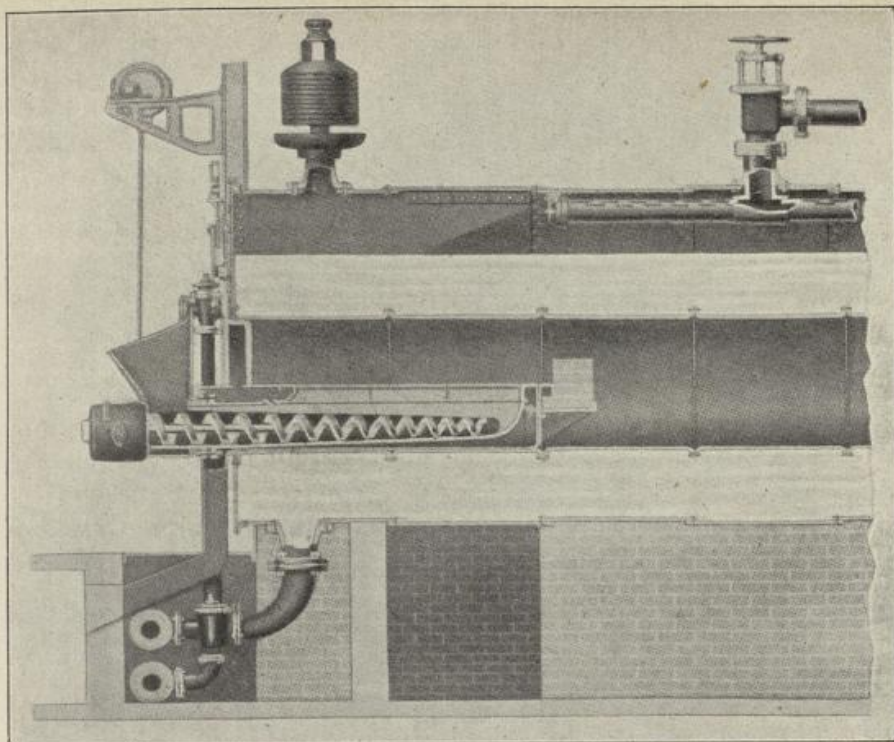


FIG. 17. — *Underfeed stoker*, dans un foyer d'une chaudière de Lancashire; coupe longitudinale.

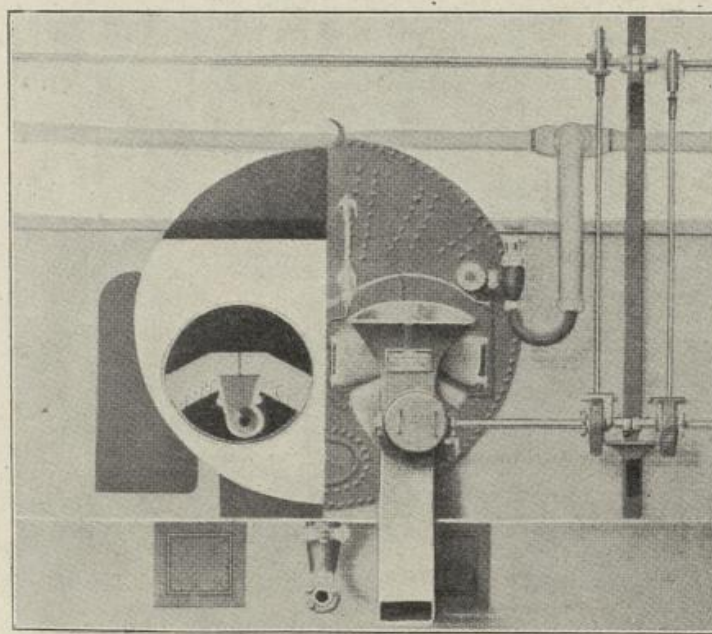


FIG. 18. — *Underfeed stoker*, dans une chaudière de Lancashire; élévation et coupe transversale.

Les résidus de la combustion s'accumulent sur les côtés de la grille; on les extrait par des portes sur la façade visibles sur la figure 18. Ces portes sont en partie masquées par la trémie de chargement : celle-ci peut basculer latéralement pour les dégager (fig. 20).

Sur les grilles plus larges, l'avancement est produit par le mouvement d'un plateau, commandé par un piston poussé par la vapeur (fig. 21 et 22), avec une vitesse variant depuis une course en deux minutes jusqu'à 8 par minute. En outre, un barreau sur deux reçoit un mouvement de va et vient; la figure 23 donne une vue de ces barreaux. Les résidus s'accumulent sur des plaques latérales. Avec les grilles de la classe D (fig. 24), de largeur modérée, ces plaques sont fixes et les résidus sont enlevés par les portes de la façade. Les plaques latérales de la classe E (fig. 25), plus large, sont à bascule et déversent les résidus dans un cendrier.

Le foyer dit à *vapeur* de la Société Fama (fig. 26), pour faibles largeurs, comporte seulement une cuve, dans laquelle un piston refoule le charbon, et des plaques latérales fixes. L'air soufflé s'échappe par des tuyères à la partie supérieure de la cuve.

Le foyer Erith-Riley (fig. 27 à 29) comprend une série de cuves dont le fond est fixe et en pente; ce sont les parois latérales et leurs rebords, disposés pour le passage de l'air, qui reçoivent le mouvement de translation, donné par le piston qui pousse le charbon. Plus bas sont des plaques horizontales étagées, également mobiles, qui laissent passer l'air et sur lesquelles s'achève la combustion; enfin, des plaques courbes oscillantes rejettent les résidus.

Ce foyer, n'ayant pas de grille à travers laquelle puisse tomber le combustible, brûle des menus très fins. Il ne comporte pas de voûte. Il n'est pas disposé pour être retiré en entier de la chaudière, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de réserver un emplacement à cet effet.

La grille à chaîne, très répandue aujourd'hui, est ancienne : elle est décrite sous le nom de grille Tailfer, dans le *Cours de machines* de Callon (t. II, p. 430). Mais il en fut de cette inven-

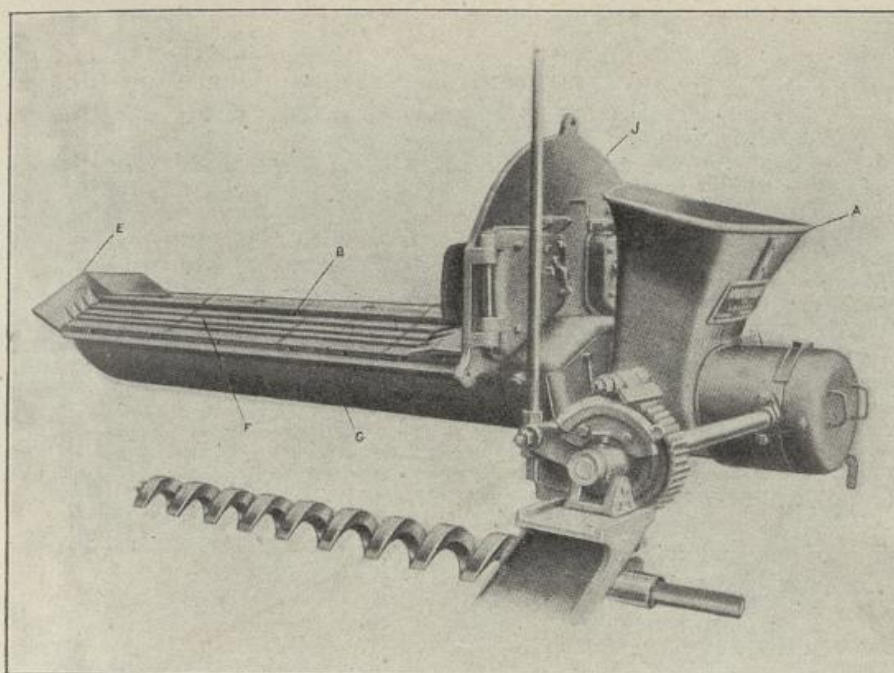


FIG. 19. — Grille de l'*Underfeed stoker* C°, avec mouvement à vis, pour chaudières à foyers intérieurs, avec vue séparée de la vis.

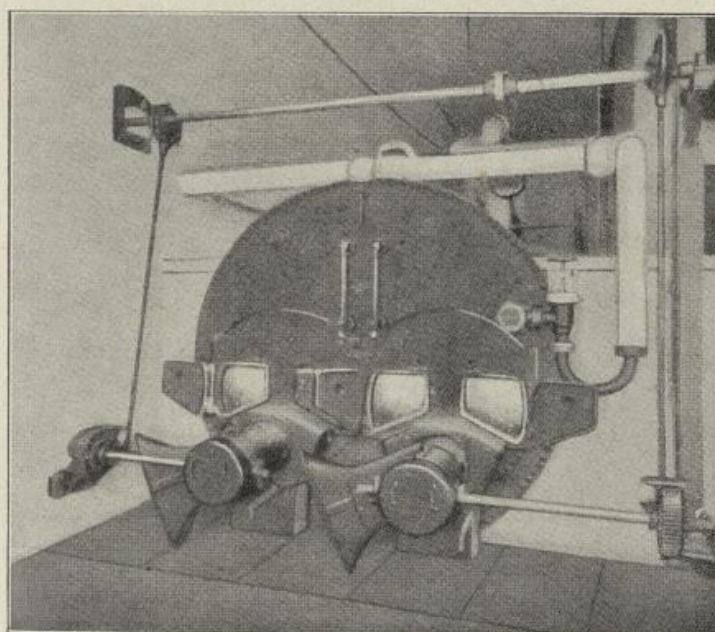


FIG. 20. — Grille de l'*Underfeed stoker* C°, avec trémies basculées, pour dégager les portes.

tion comme de plusieurs autres fort ingénieuses, qui devançaient l'époque où elles seraient utiles. Avec les anciennes chaudières de petites dimensions, le chauffage à la main suf-

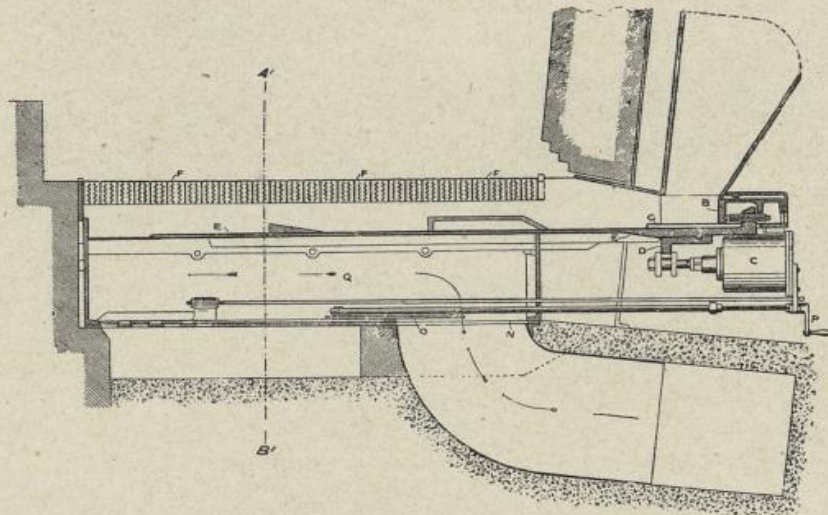


FIG. 21. — Grille de l'Underfeed stoker C°, à piston, classe E: coupe longitudinale.

Le charbon tombe de la trémie A sur le tablier E, auquel le piston du cylindre C imprime un mouvement de va et vient, qui pousse le charbon et le déverse des deux côtés du tablier sur les barreaux F.

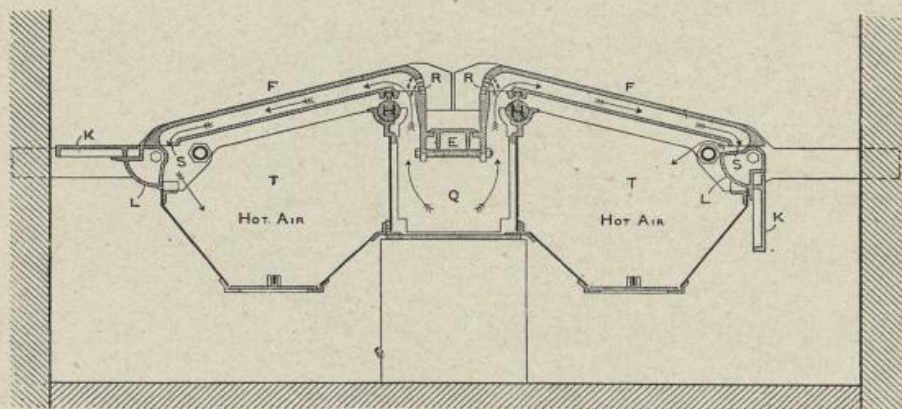


FIG. 22. — Grille de l'Underfeed stoker C°, à piston, classe E: coupe transversale.

L'air, soufflé dans le caisson Q, s'échappe par les ouvertures R, devant lesquelles commence la combustion, et, à travers les barreaux creux F, en S dans la chambre T, puis entre les barreaux F. Les barreaux F sont alternativement fixes et mobiles, les barreaux mobiles étant commandés par les arbres H.

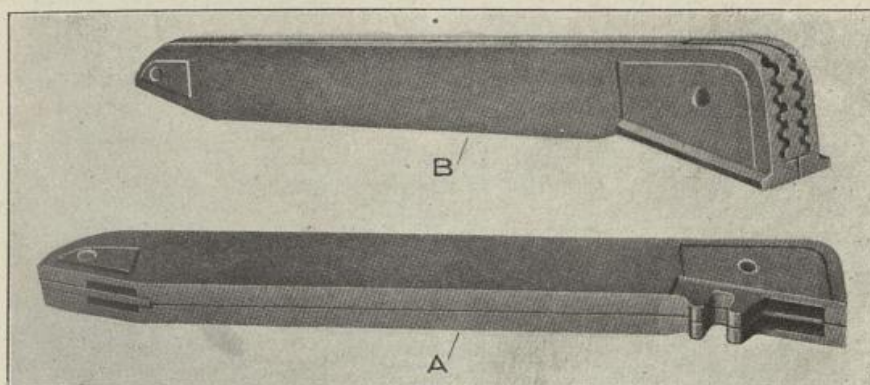


FIG. 23. — Barreaux de la grille de l'Underfeed stoker C°, classe E.
A, barreau mobile; B, barreau fixe.

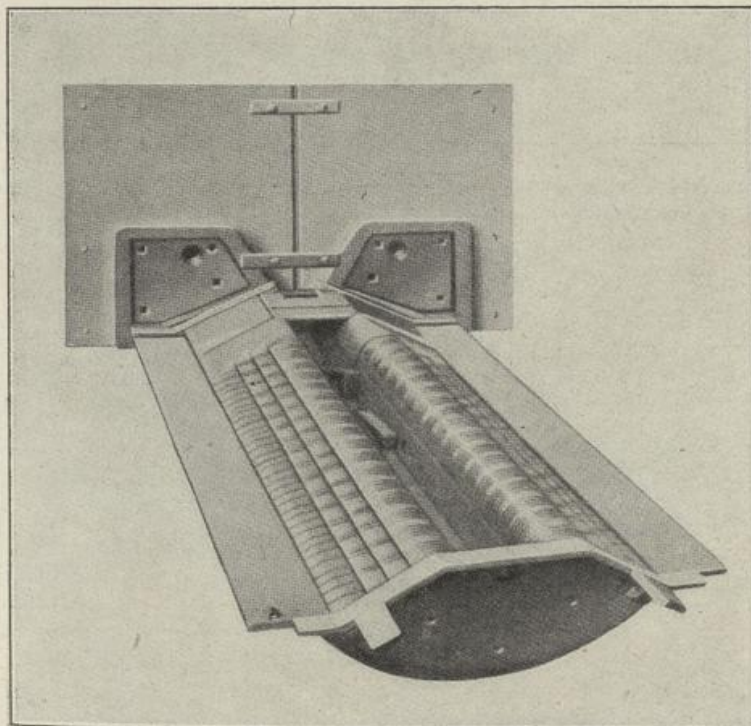


FIG. 24. — Grille de l'Underfeed stoker C°, à piston, classe D.
Le charbon, poussé dans la rainure médiane, se répand à droite et à gauche sur les barreaux à recouvrement; les résidus s'accumulent sur les plaques latérales et sont extrait par les portes de la façade.

faisait, et les appareils mécaniques entraînaient des dépenses supplémentaires peu justifiées.

La grille à chaîne est une large courroie métallique, formée

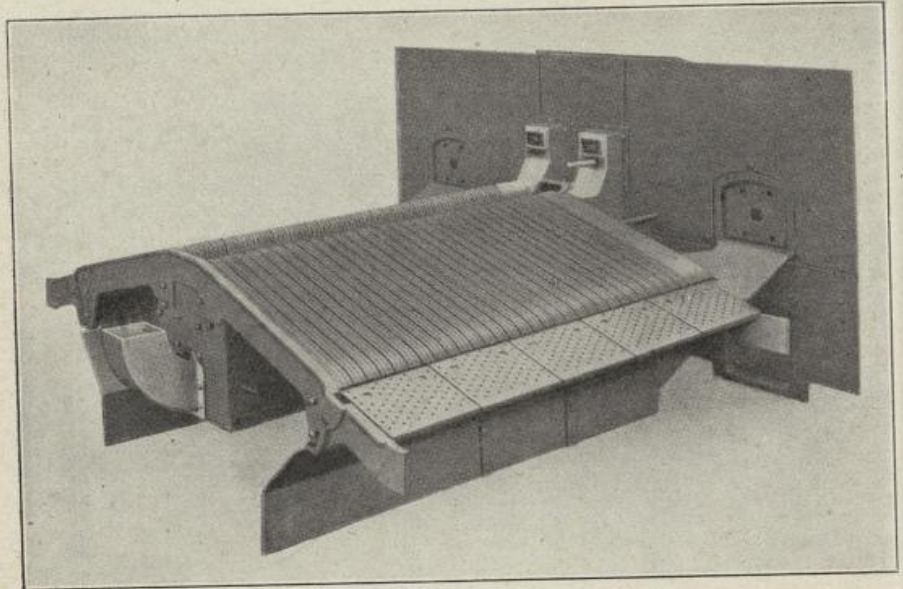


FIG. 25. — Grille de l'Underfeed stoker C°, à piston, grande largeur. Les résidus s'accumulent sur les plaques latérales basculantes.

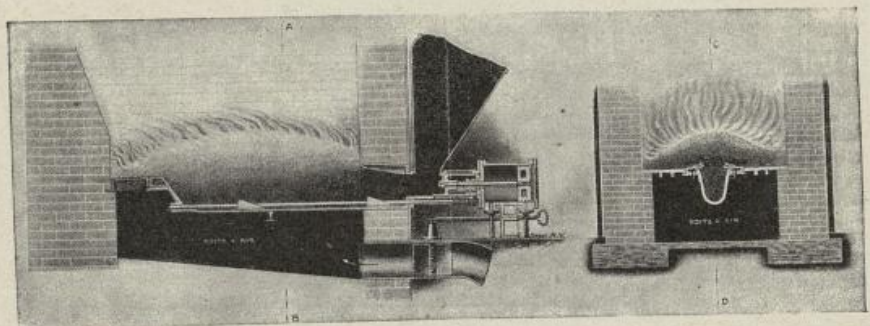


FIG. 26. — Foyer à vapeur de la Société Fama; coupe longitudinale et coupe transversale.

de petits barreaux articulés, et enroulée sur deux tourteaux, dont un reçoit un mouvement de rotation. Le charbon est déposé par une trémie à l'entrée de la grille, une vanne réglant l'épaisseur de la couche entraînée. A mesure que la grille

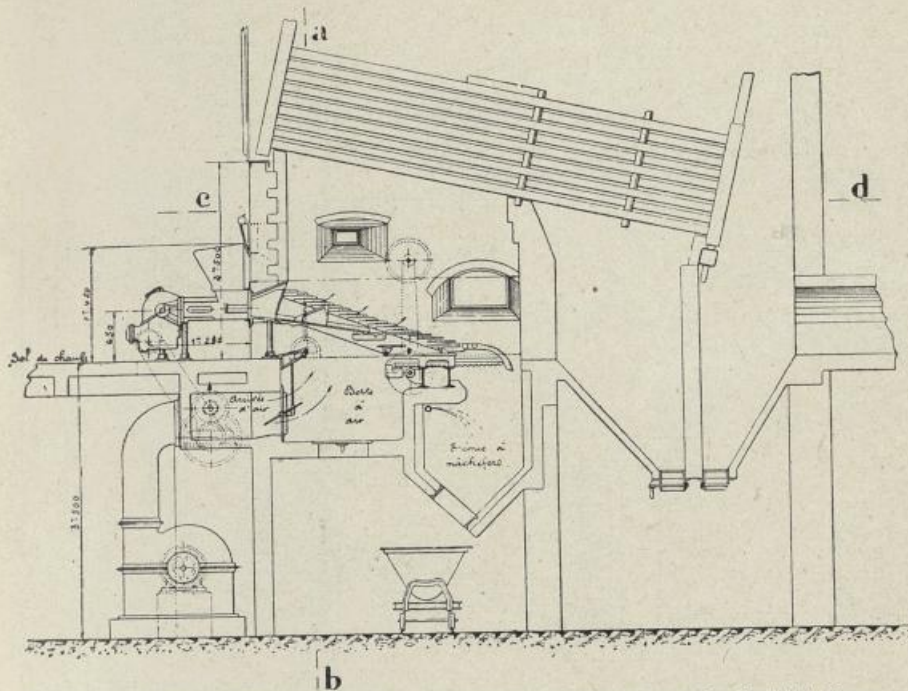


FIG. 27. — Foyer Erith-Riley, à 4 éléments, construit par la Société Fama.
Coupe longitudinale.

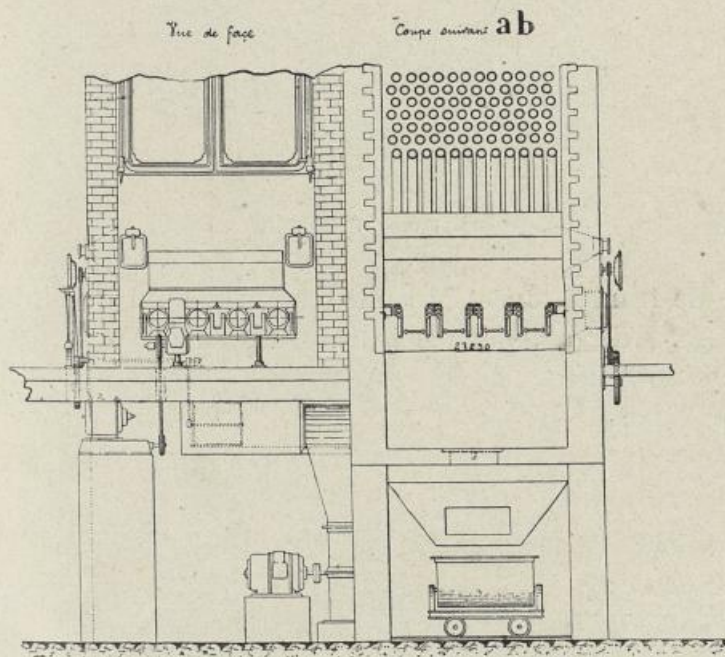


FIG. 28. — Foyer Erith-Riley; vue de face et coupe transversale.

avance, cette épaisseur est réduite par la combustion; l'extrémité de la grille, en s'enroulant sur le tourteau de retour, ne doit plus porter que des stériles, qui tombent dans le cendrier.

La partie antérieure de la grille, où commence la combustion, est recouverte d'une voûte en briques, qui contribue à échauffer la masse combustible et dirige les gaz dégagés vers la région où l'air domine.

Pour la bonne marche de l'appareil, trois éléments sont à régler simultanément, l'épaisseur de la couche de houille, la

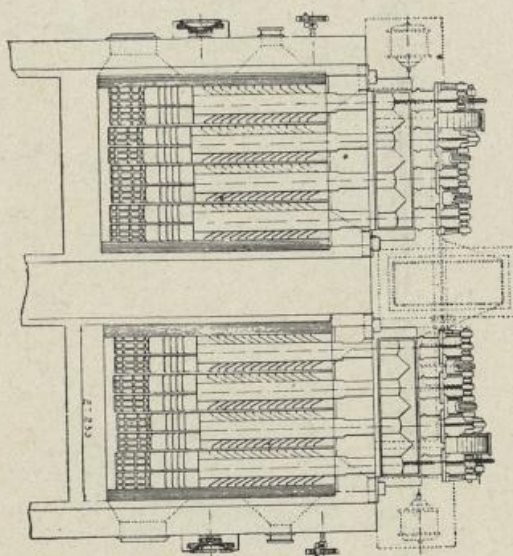


FIG. 29. — Foyer Erith-Riley; plan.

vitesse de translation et le débit d'air, fonction de l'intensité du tirage. L'air a tendance à traverser en excès la dernière partie de la grille, peu couverte; aussi a-t-on été conduit à en réduire l'arrivée dans cette région.

Bien réglée, une telle grille donne une combustion régulière, suivant un régime uniforme. Dans le cas contraire on est exposé à des pertes de combustible rejeté avec les déchets, et à un excès d'air.

La grille Eckley B. Coxe (fig. 30), qui remonte à l'année 1894, présente des dispositions intéressantes, dont certaines ont été reproduites. Elle est destinée à brûler les anthracites menus.

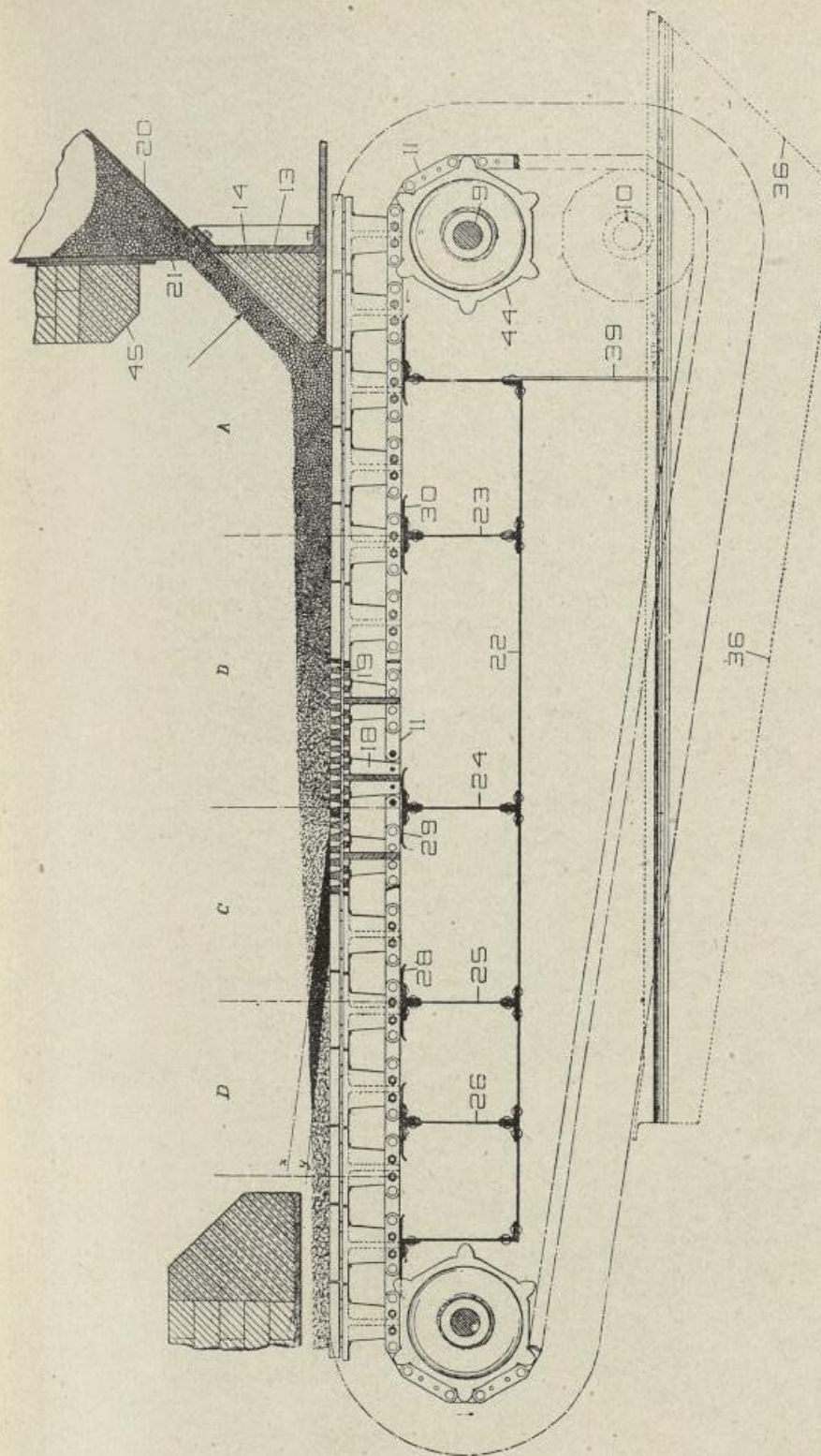


FIG. 30. — Grille à chaîne Eckley B. Cox, pour anthracites menus.

L'air est insufflé avec des pressions différentes, dans les caissons 23, 24, 25, 26, la plus forte pression correspondant au caisson 24. Les plaques 30, 29, 28, de largeur égale à la distance de deux cloisons verticales voisines de la chaîne, empêchent le passage de l'air d'un caisson dans l'autre. Le cendrier est clos par la bâche pleine d'eau 36 dans laquelle plonge la grille, et par la tôle 39.

La grille Babcock et Wilcox (fig. 31, 32 et 33) est portée par un chariot qui peut être ramené en avant de la chaudière pour la visite et la réparation de ses organes. La grille proprement dite est composée de maillons de faible longueur, articulés sur des axes tout en laissant un passage d'air suffisant. Les vides entre les maillons sont assez faibles pour la combustion des menus. Le tourteau antérieur est commandé par une transmission supérieure, comme sur la figure 32, ou par une transmission inférieure. Le tourteau postérieur repose sur des coussinets mobiles permettant la tension de la chaîne.

Les flasques latérales du chariot sont réunies par des entretoises, munies de rouleaux qui supportent la grille.

L'appareil de chargement comprend une trémie dont la face postérieure est munie de deux portes en tôle à charnières, garnies intérieurement de matières réfractaires. Ces portes s'ouvrent pour l'allumage; une fois fermées, elles se lèvent comme une vanne et servent au réglage de l'épaisseur de la couche de combustible.

Dans le type le plus récent (fig. 34), la trémie est surélevée au-dessus des portes et munie d'un registre qui permet d'y maintenir la charge de charbon quand on ouvre les portes. De plus, les barreaux, très petits, peuvent être remplacés individuellement, sans aucun démontage d'autres pièces.

Le foyer est muni d'une longue voûte sous laquelle se fait la distillation du charbon. En dessous de la grille, le cendrier est limité par deux murettes latérales portant le chemin de roulement du chariot.

Cette grille, depuis longtemps en usage, avait été étudiée pour brûler, au tirage naturel, des charbons contenant plus de 20 p. 100 de matières volatiles. Elle a été récemment adaptée

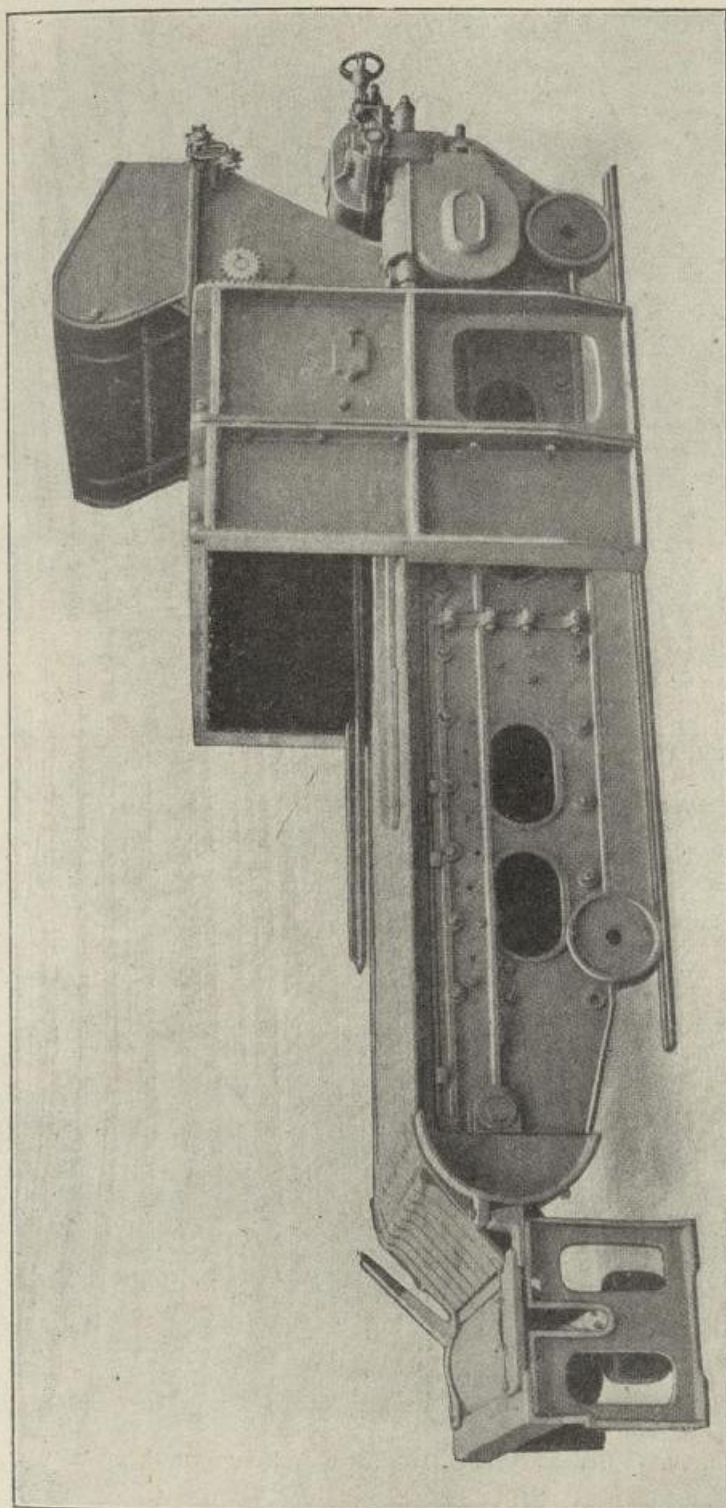


FIG. 31. — Grille à chaîne Babcock et Wilcox; vue latérale montrant le dispositif de dégrassage.

E. SAUVAGE. — *La Vapeur.*

4

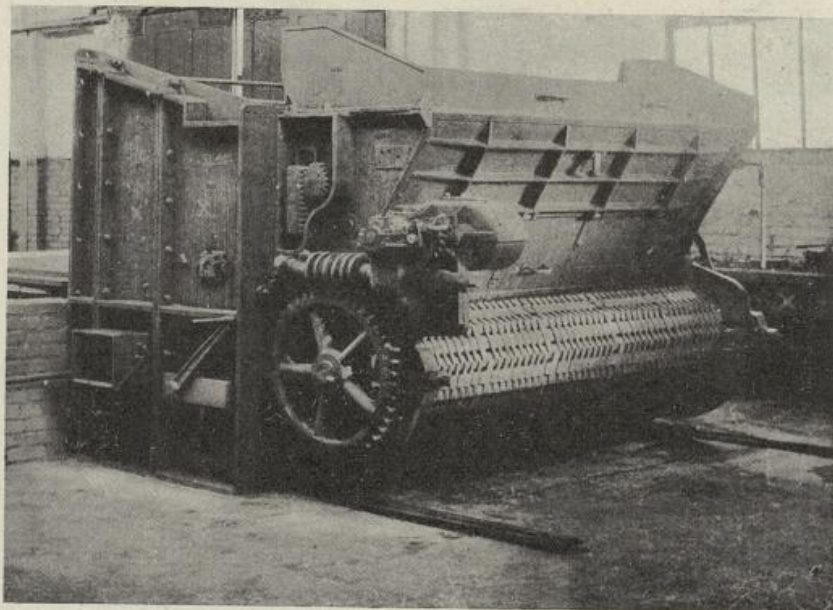


FIG. 32. — Grille à chaîne Babcock et Wilcox; vue par l'avant; commande du tourteau par transmission supérieure.

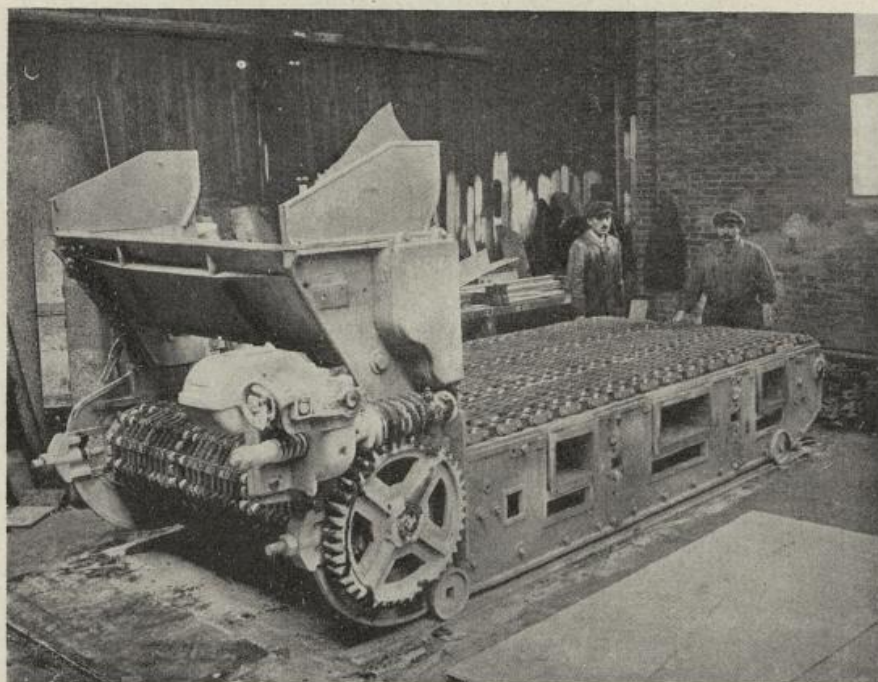


FIG. 33. — Grille à chaîne Babcock et Wilcox; vue latérale.

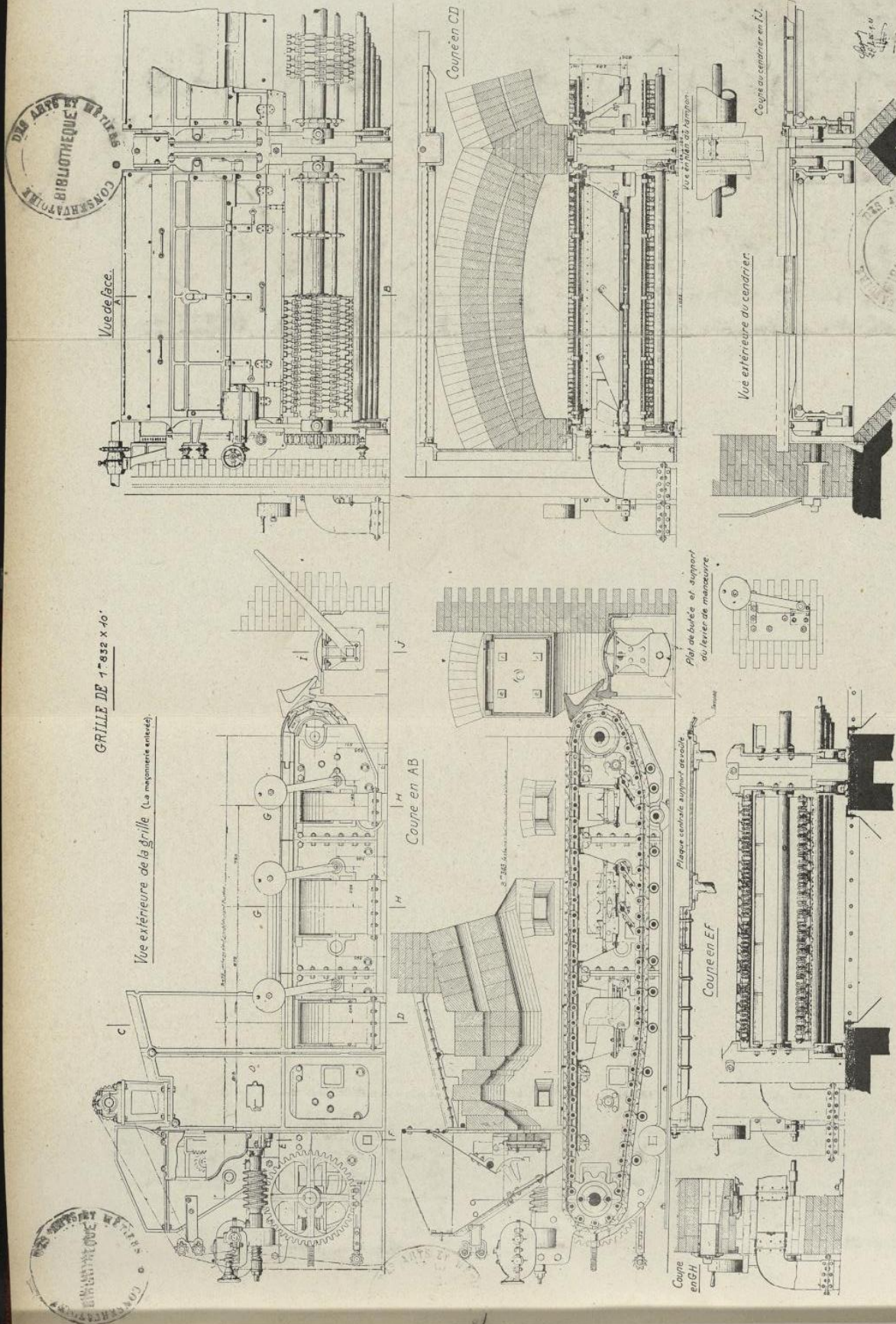
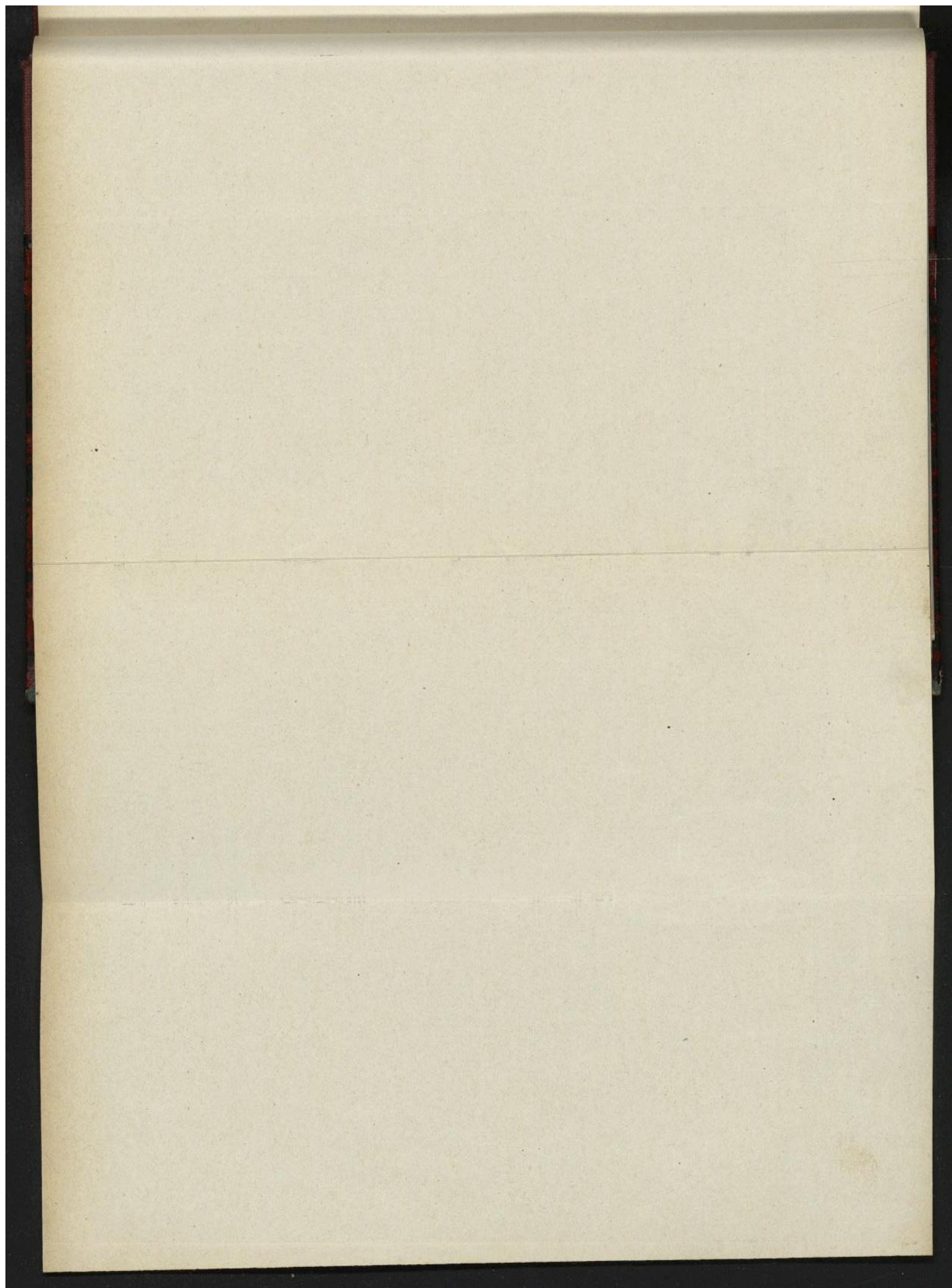


FIG. 34. — Grille à chaîne Babcock et Wilcox, avec soufflerie, à caissons et à clapets, type 1920.



au tirage forcé, en vue de brûler des charbons maigres, et même très chargés en cendres, et aussi d'augmenter la production de vapeur et d'éviter la construction de cheminées coûteuses (fig. 34, 35 et 36).

Entre les deux brins de la grille sont placés trois caissons dans lesquels l'air est insufflé, et qui correspondent à trois

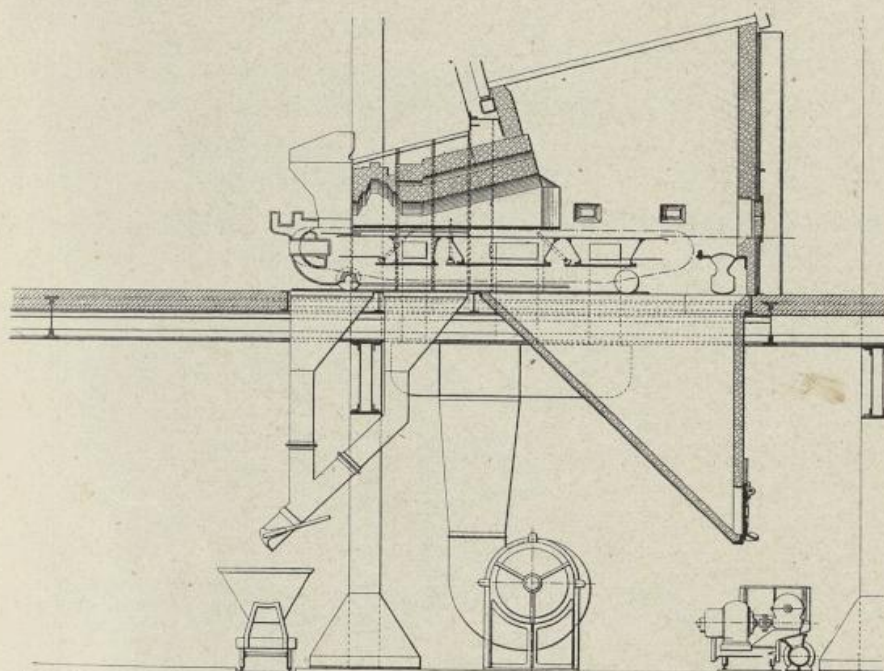


FIG. 35. — Grille à chaîne Babcock et Wilcox, type 1920, pour tirage soufflé.
Coupe longitudinale.

L'air est distribué dans les trois caissons placés sous le brin supérieur de la chaîne. En bas, à droite, concasseur de mâchefers pour transport pneumatique.

zones de la grille, allumage, pleine combustion et fin de combustion. La face supérieure des caissons est percée de lumières rectangulaires qui admettent l'air sous la grille. La face inférieure porte également des lumières, que peut fermer une contre-plaque. Ces lumières laissent passer les parties solides traversant la grille; pour la marche au tirage naturel, on les maintient ouvertes.

Des registres règlent l'arrivée de l'air dans chaque caisson.

Les barreaux de la grille à chaîne de l'*Underfeed stoker* C°

(fig. 37), en se rapprochant dans la partie où ils supportent le combustible, forment, avec la tôle fixe horizontale A, des conduits transversaux, qui reçoivent l'air soufflé par deux ouvertures triangulaires régnant sur toute la longueur des deux tôles verticales qui encadrent la grille. Il en résulte que

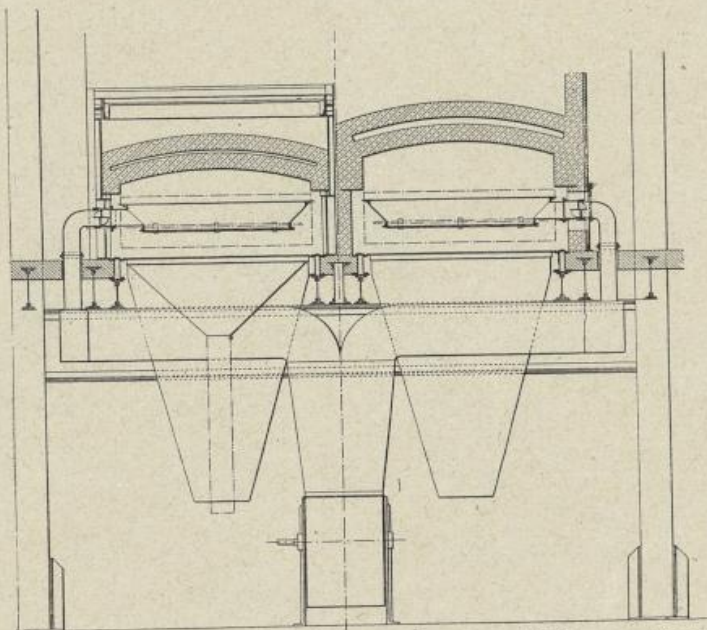


FIG. 36. — Grille à chaîne Babcock et Wilcox, type 1920, pour tirage soufflé. Coupes transversales de deux grilles contiguës.

le débit de l'air par chacun des conduits transversaux diminue à mesure qu'ils s'éloignent de la trémie de chargement.

Ces grilles sont étudiées pour brûler des fines d'anthracite et de coke, ainsi que des combustibles à très forte proportion de cendres.

Les ventilateurs soufflants peuvent être montés sur le chariot porte-grille (fig. 38).

La grille rotative Romanet (fig. 39) est circulaire et tourne autour d'un axe vertical.

Jusqu'à quel point les grilles mécaniques donnent-elles, en pratique, les avantages qu'il paraît logique de leur attribuer sur les grilles ordinaires chargées à la main ? Sous cette

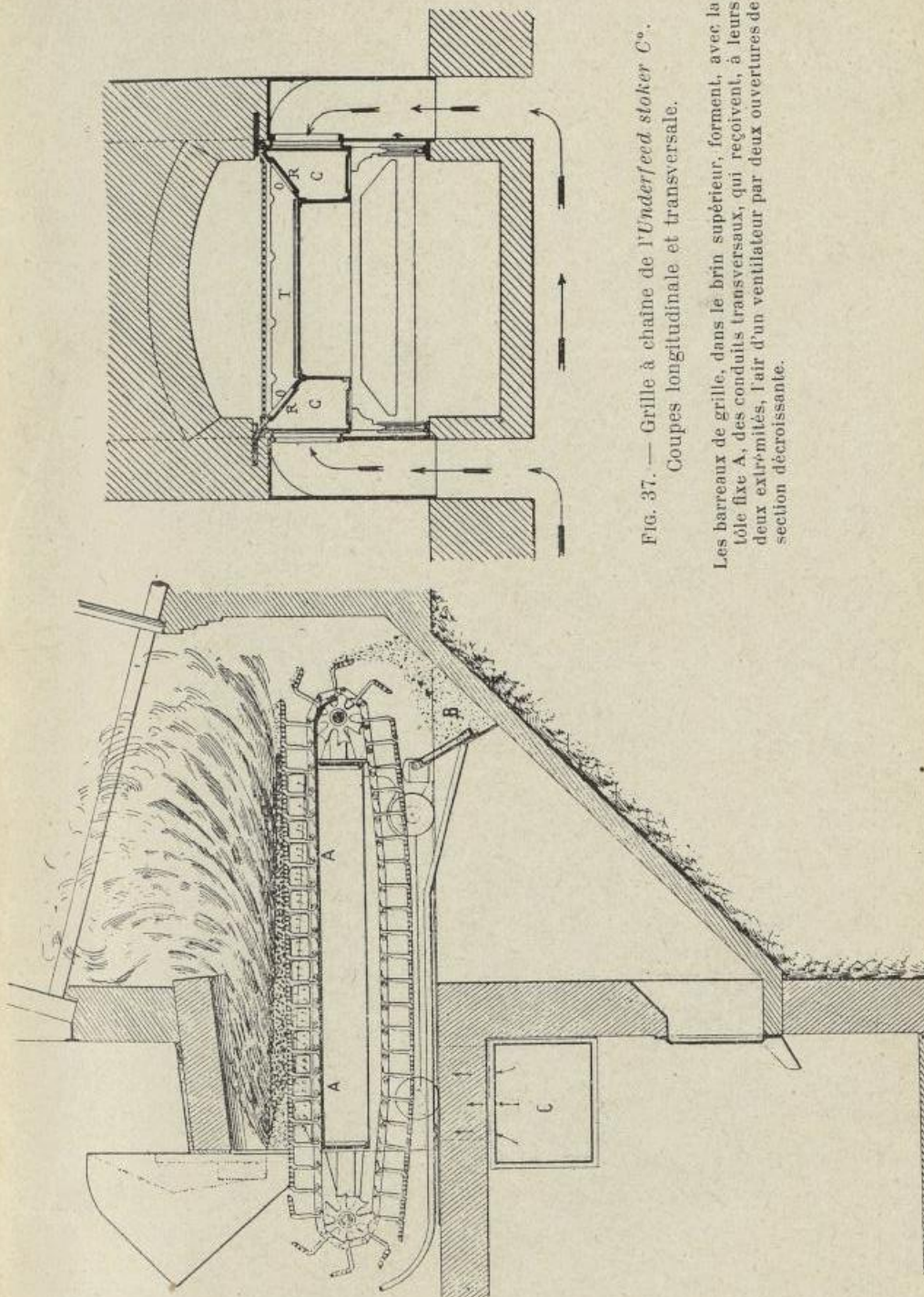


FIG. 37. — Grille à chaîne de l'Underfeed stoker C^o.
Coupes longitudinale et transversale.

Les barreaux de grille, dans le brin supérieur, forment, avec la tôle fixe A, des conduits transversaux, qui reçoivent, à leurs deux extrémités, l'air d'un ventilateur par deux ouvertures de section décroissante.

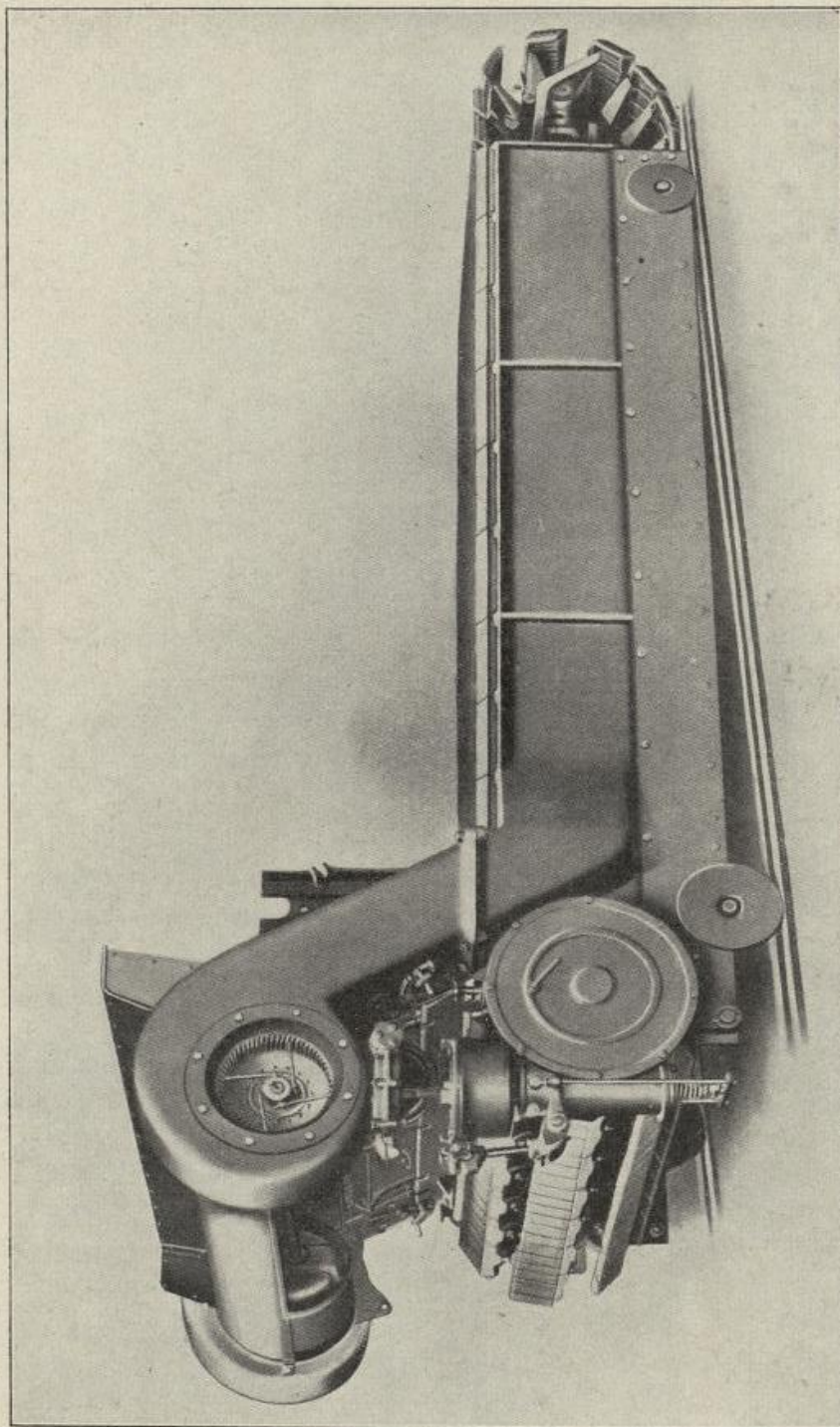


FIG. 38. — Grille à chaîne de l'*Underfeed stoker C°*, avec commande de la grille et ventilateurs sur un chariot unique. On voit sur la figure le conduit d'air latéral débouchant sous la grille.

forme, la question ne se pose plus pour les grandes chaufferies, où les grilles mécaniques sont admises sans conteste. Elle a été l'objet d'une intéressante discussion en Angleterre au sein

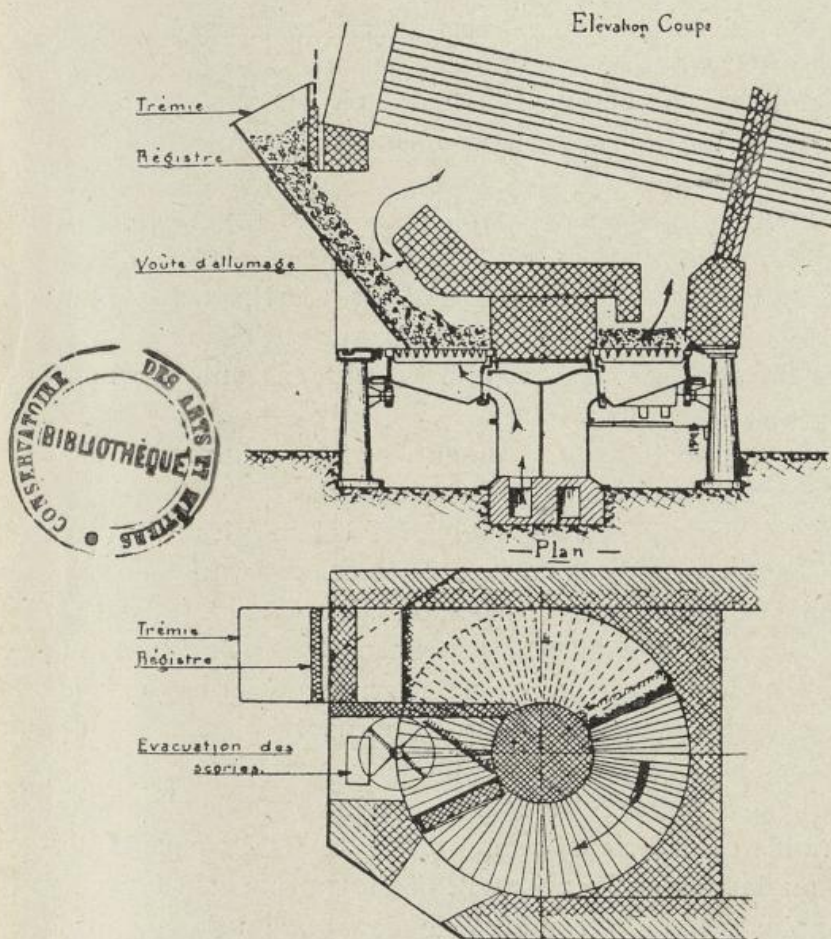


FIG. 39. — Grille rotative Romanet, construite par la maison Joya.

de l'*Institution of mechanical engineers* (*Proceedings*, janvier-avril 1920, p. 263) (1).

Il est clair que les grilles mécaniques doivent être bien installées, bien entretenues et conduites avec soin. Quand ces conditions sont observées, il semble bien qu'en général elles

(1) Voir aussi, sur cette question, *Chaleur et industrie*, janvier 1921, p. 36.



donnent une économie de combustible par rapport au chauffage à la main, à moins qu'il ne soit fait par des chauffeurs exceptionnels.

Leurs avantages les plus certains sont le décrassage automatique, l'emploi de combustibles inférieurs, et la fumivorité.

11. Combustibles pulvérisés. — La poudre de charbon, fine et sèche, s'enflamme aisément, et forme même avec l'air des mélanges explosibles.

Le chauffage au charbon pulvérisé, dont les premières applications sont anciennes, s'est beaucoup développé depuis quelques années, surtout aux Etats-Unis. C'est principalement pour la cuisson du ciment que ce mode de chauffage s'est trouvé convenable; aussi les applications en sont-elles nombreuses pour cette opération.

Pour la production de la vapeur, quoique plus rares, elles commencent à prendre quelque importance (1).

L'emploi du combustible pulvérisé est séduisant, car ce procédé permet un réglage précis de la combustion et se prête à l'emploi de charbons très médiocres. Par contre, le broyage est une opération coûteuse; le transport des broyeurs aux foyers demande des installations soignées, car les explosions sont à craindre; enfin les cendres obstruent les carneaux des chaudières, et exigent de fréquents nettoyages.

Le broyage peut se faire dans une usine centrale alimentant une grande chaufferie, et même plusieurs établissements distincts, ou dans de petits appareils desservant un seul foyer.

La préparation du combustible dans une usine centrale comporte quatre opérations successives : le concassage, le séchage, la pulvérisation et le triage.

Le concassage, en morceaux de la grosseur d'une noix, est nécessaire pour la dessiccation et pour la facilité du broyage.

(1) On trouvera, sur cette question, dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (mai 1921, p. 477), un important rapport de la Commission d'utilisation des combustibles. Voir aussi un article de M. STEIN dans *Chaleur et industrie*, mai 1920, p. 136.

Le concasseur est suivi d'un séparateur magnétique, qui enlève les morceaux de fer pouvant se trouver mélangés à la houille.

La température du séchage n'atteint pas 100°, pour éviter tout commencement de distillation.

Le broyage se fait par boulets ou galets dans un cylindre tournant; la poudre obtenue doit être d'autant plus fine que le charbon est plus pauvre en matières volatiles.

Le triage se fait, soit avec des tamis, soit par l'action d'un courant d'air qui n'entraîne que les particules suffisamment ténues et les abandonne dans un séparateur.

Pour transporter le charbon broyé, on est conduit à l'emploi de wagons ou de camions-citernes dans le cas d'une centrale desservant plusieurs établissements distincts. A l'intérieur d'un établissement, le transport est mécanique ou pneumatique.

Le transport mécanique, par vis, peut convenir pour de petites distances : de la trémie de réserve, le charbon tombe dans un convoyeur qui le conduit à une trémie de réception au point de consommation.

Pour les installations étendues, avec nombreuses ramifications, le transport pneumatique paraît préférable. Ce transport se fait de diverses manières.

Dans le transport *par émulsion*, c'est un courant d'air, à la vitesse de 25 mètres par seconde, qui entraîne le combustible : la teneur en charbon est d'environ 1 kilogramme pour 4 à 5 kilogrammes d'air.

Des ventilateurs convenablement installés maintiennent le charbon en suspension. Des branchements conduisent le combustible aux divers foyers, non munis de trémies.

La régularité de la chauffe exige une teneur constante du mélange et un débit toujours suffisant.

La distribution *à haute pression* transporte le charbon pulvérisé d'un récipient central aux trémies des foyers, et de ces trémies aux brûleurs, au moyen d'air comprimé à une pression plus ou moins élevée, suivant le débit demandé. Le diamètre des conduites est de 10 centimètres. La quantité d'air n'est guère que le septième de celle qui est nécessaire pour la

combustion, de sorte que le poids de l'air ne dépasse pas beaucoup celui des poussières qu'il entraîne, et que le mélange n'est pas inflammable.

Le brûleur de la Société Quigley (fig. 40) est alimenté par un distributeur à débit réglable, placé sous la trémie du foyer : le charbon tombe dans un courant d'air comprimé et s'échappe par une tuyère cylindrique, placée à l'intérieur d'une tuyère plus grande, qui débite l'air supplémentaire. L'arrivée du mélange dans le foyer, où il s'enflamme, se fait à faible vitesse.

Le distributeur (fig. 41) consiste en une vis qui refoule le charbon dans une ouverture réglable au moyen de deux demi-

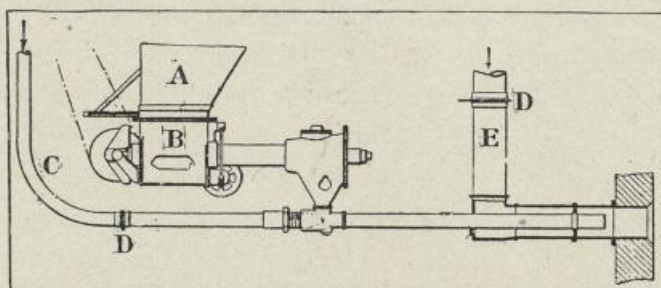


FIG. 40. — Brûleur de charbon pulvérisé de la Société Quigley-France.

A, trémie; B, distributeur; C, conduite d'air comprimé; D, vannes; E, conduite d'air supplémentaire.

diaphragmes articulés, commandés de l'extérieur. Une palette mobile, à la sortie du distributeur, régularise l'écoulement.

La trémie est alimentée par un *séparateur cyclone* (fig. 42), qui laisse déposer le charbon et échapper l'air.

La Société Quigley indique, pour une de ses installations, un débit de 1.270 kilogrammes de houille pulvérisée en une minute, dans une conduite de 40 centimètres de diamètre, longue de 180 mètres, la pression effective de l'air étant de 1 kg. 05 par centimètre carré. En supposant que le poids de l'air fut légèrement supérieur à celui de la houille, ce débit correspondrait à une vitesse de 115 mètres par seconde.

Les appareils individuels, desservant un seul foyer, se construisent pour des débits de 100 à 2.000 kilogrammes à l'heure. Ils se composent d'un pulvérisateur et d'un ventilateur, refou-

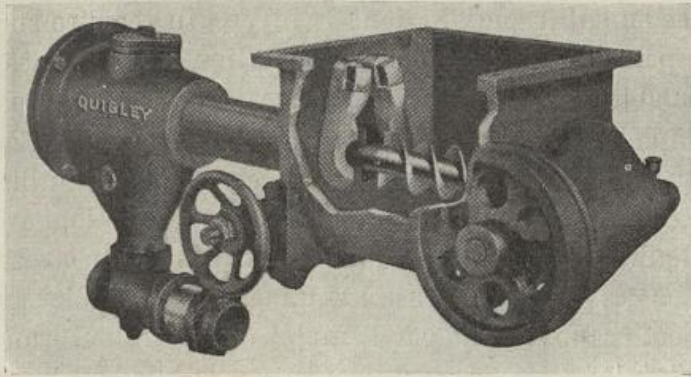


FIG. 41. — Distributeur de charbon pulvérisé, de la Société Quigley-France. La palette mobile est dans la partie gauche de la figure, non coupée, immédiatement au-dessus de l'entrée dans la conduite d'air comprimé.



FIG. 42. — Séparateur cyclone, pour charbon pulvérisé, de la Société Quigley-France.

lant directement la poudre dans le foyer. Un registre sur l'aspiration permet le réglage de la proportion d'air. La dessiccation préalable ne paraît pas indispensable avec ces appareils.

Si l'emploi du charbon pulvérisé permet un bon réglage de la combustion sans grand excès d'air, et se prête à l'utilisation de charbons de qualité inférieure, par contre il a donné lieu à des difficultés causées par l'obstruction des tubes et des carneaux par les cendres infusibles ou en scories pâteuses. On atténue cet inconvénient par l'emploi de foyers suffisamment vastes, d'où le courant gazeux sort à faible vitesse. On recommande un volume de 25 à 30 décimètres cubes par kilogramme de houille brûlée à l'heure. En outre, la grande dimension des foyers, combinée avec des brûleurs ne donnant pas de flammes trop longues, évite l'altération rapide des parois, pour lesquelles il est d'ailleurs nécessaire d'employer des briques réfractaires de très bonne qualité.

En résumé, ce procédé paraît devoir se répandre de plus en plus, et on peut espérer que le perfectionnement des appareils fera disparaître les difficultés du début.

12. Combustibles liquides. — La bonne combustion des liquides exige qu'ils soient très finement pulvérisés au milieu d'une masse d'air suffisante. Cette pulvérisation est obtenue, soit mécaniquement, par refoulement dans un brûleur approprié, soit par jets de vapeur, soit par jets d'air comprimé. Le procédé primitif, qui consistait à faire couler le liquide dans le foyer en minces filets, est d'un réglage difficile et ne donne qu'une combustion incomplète.

Pour la pulvérisation mécanique, les liquides, généralement épais et visqueux, doivent être au préalable chauffés une première fois jusque vers 50° pour acquérir une fluidité suffisante. Ils sont ensuite filtrés, et passent dans une pompe qui les refoule sous une pression de 5 à 12 kilogrammes par centimètre carré. Cette pompe doit pouvoir être actionnée indépendamment de la chaudière à chauffer. Le liquide refoulé traverse un second réchauffeur, qui le porte à une température de 120°

à 150°; il est de nouveau filtré avant d'arriver aux brûleurs, munis d'un organe de réglage.

La figure 43 représente le brûleur à pulvérisation mécanique Gènevet et Compagnie. Un essai de chauffage au mazout,

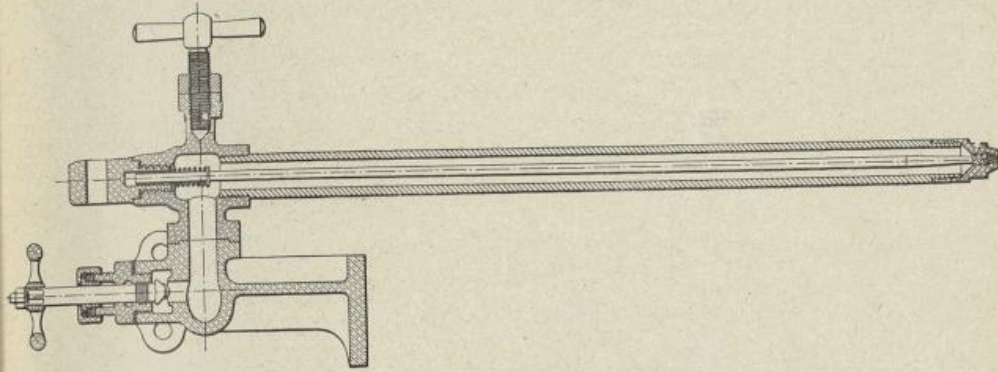


FIG. 43. — Brûleur à pulvérisation mécanique Gènevet et C^{ie}. Le liquide s'échappe par une rainure hélicoïdale de la tuyère.

avec ces brûleurs, à l'usine d'Ivry de la Ville de Paris, a donné les résultats suivants :

Densité du mazout.....	0,890.
Pouvoir calorifique	10.120 calories.
Poids de mazout consommé.....	2.847 kg.
Température de l'eau d'alimentation.....	18°,4
Pression de la vapeur.....	5 kg. 6 par cm ² .
Poids vaporisé par kilogramme de mazout.	12 kg. 952.
Température des gaz rejetés.....	260°.

L'utilisation dépasse 80 p. 100.

Dans le brûleur à vapeur, le jet de fluide produit à la fois l'entraînement et la pulvérisation du combustible, préalablement chauffé jusqu'à ce qu'il soit bien fluide, et filtré. Ces brûleurs entraînent une dépense appréciable de vapeur. Leur consommation peut descendre à 3 p. 100 de la quantité de vapeur produite, mais elle s'élève parfois jusqu'à 10 p. 100, soit par disposition défectueuse des appareils, soit par mauvais réglage, soit par usure des tuyères. Comme rien n'indique cette consom-

mation, dans les installations usuelles, l'exagération peut en être fréquente.

La pression de la vapeur fournie aux brûleurs est, en général, de 3 kilogrammes par centimètre carré.

L'air comprimé peut remplacer la vapeur, et certains brûleurs fonctionnent également avec l'un ou l'autre fluide. En général, cependant les brûleurs à air comprimé sont spécialisés : le débit de l'air, qui sert à la combustion est plus fort que le débit de vapeur, et la pression en est moindre. Un supplément d'air est d'ailleurs nécessaire pour la combustion.

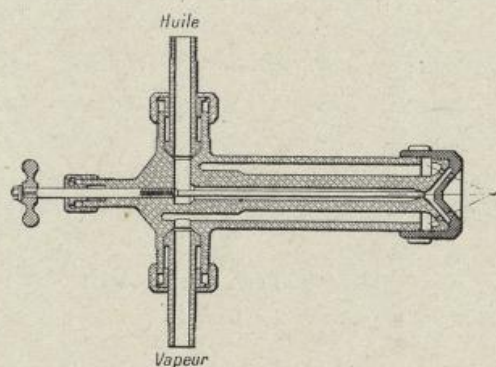


FIG. 44. — Brûleur à jets de vapeur Gènevet et C^{ie}. Le débit de l'huile est réglé par une aiguille centrale.

L'emploi de l'air évite une consommation de vapeur, non condensée, qui serait onéreuse sur mer. Il se justifie également lorsqu'on dispose d'une distribution d'air comprimé pour d'autres usages.

Dans le brûleur à vapeur Gènevet et Cie (fig. 44), le combustible, amené par un orifice central réglable, est entraîné par une série de jets de vapeur convergents.

Certains brûleurs donnent une flamme plate, notamment celui de la figure 45, où l'huile s'écoule par une fente horizontale et tombe sur une nappe de vapeur qui le pulvérise. Ce brûleur est employé pour les locomotives.

Les types de brûleurs sont, d'ailleurs, très variés (1).

(1) On en trouvera de nombreux dessins dans la *Revue de mécanique*, janvier 1912, p. 49.

La bonne utilisation des combustibles liquides exige une chambre de combustion spacieuse. Il convient que le tirage soit toujours actif pour éviter les retours de flamme; le réglage de la combustion ne se fait plus par le registre de la cheminée, comme avec la houille, mais par modification des débits de combustible et d'air. Les foyers sont en grande partie entourés de briques réfractaires, de très bonne qualité; le jet de flammes ne doit jamais frapper normalement les parois et les tubes de la chaudière.

La pratique des constructeurs diffère en ce qui concerne le

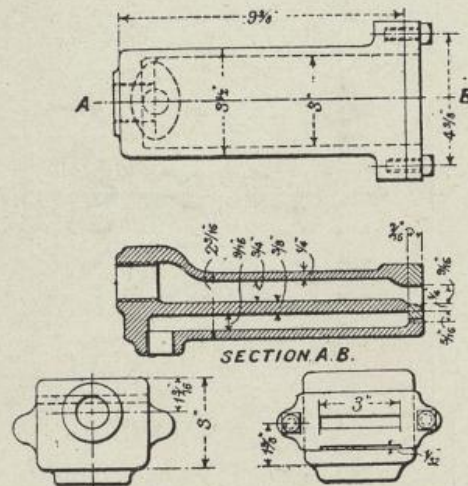


FIG. 45. — Brûleur plat : l'orifice rectangulaire supérieur donne passage au combustible, et l'orifice inférieur, très mince, à la vapeur.

nombre des brûleurs : tantôt on préfère un brûleur unique, tantôt deux ou plusieurs. Ils sont généralement placés sur la façade avant; quelquefois, notamment sur les locomotives, ils sont au fond du foyer et envoient leurs flammes vers la façade.

En installant les brûleurs au niveau du cendrier (fig. 46), on peut se réserver la facilité de rétablir la grille pour le chauffage à la houille. Les brûleurs étant au-dessus de la grille (fig. 47), il suffit de la recouvrir de briques réfractaires.

On a quelquefois essayé de réunir dans un même foyer les deux modes de chauffage, le combustible liquide servant à forcer la production. Les quelques applications de ce genre, faites sur

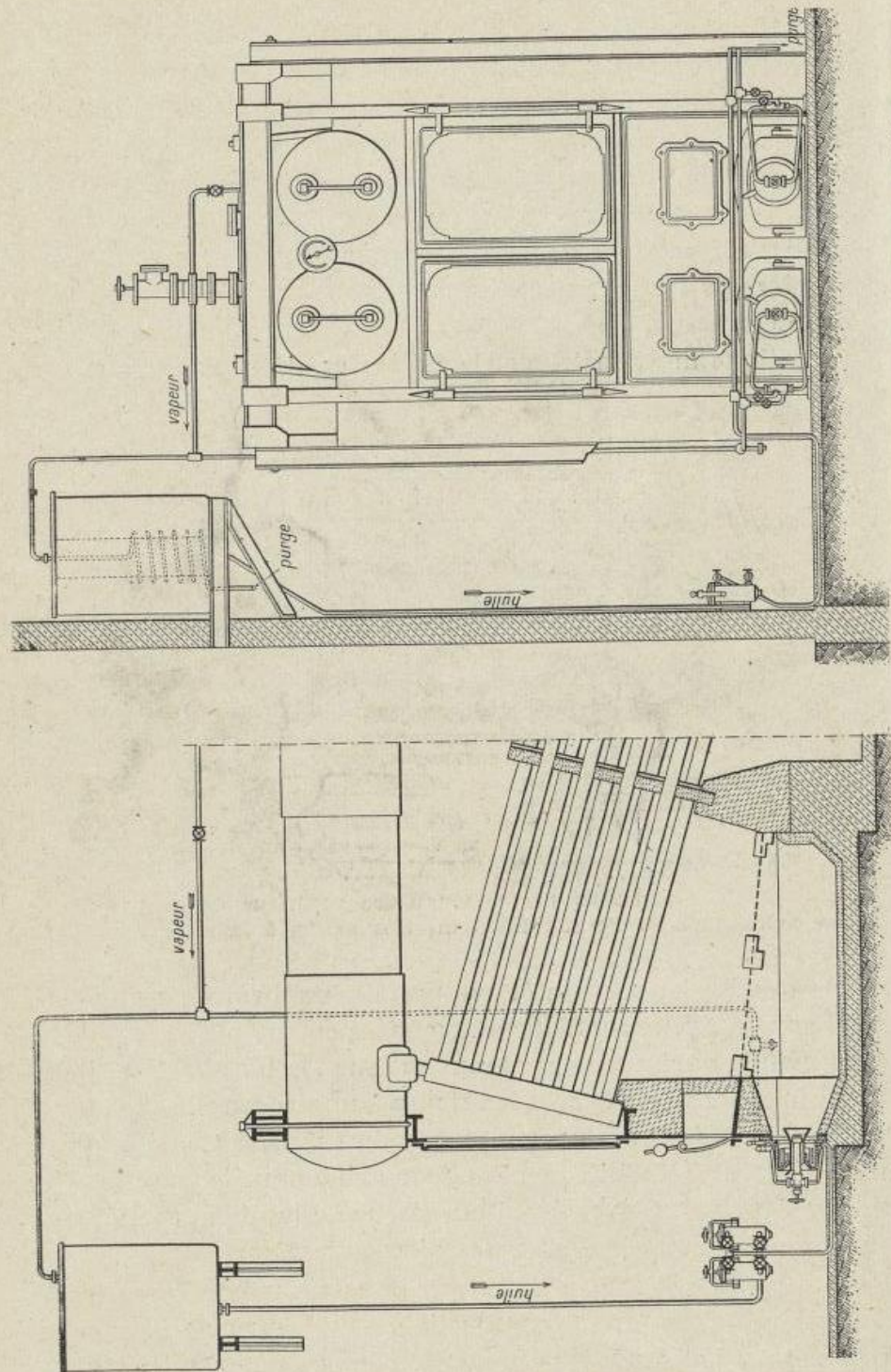


FIG. 46. — Installation d'un brûleur à injection de vapeur Genève et Cie sous une chaudière Babcock et Wilcox.
En haut, bac à mazout ; en dessous, filtre double ; devant le condenseur brûleur à réglage d'air.

des locomotives, n'ont pas donné de bons résultats et paraissent abandonnés.

L'obligation de portes automatiques, édictée par l'article 16 du décret du 9 octobre 1907, s'applique aux chaudières chauffées à l'huile lourde comme aux autres (1). Ce mode de chauffage comporte souvent des tuyères qui pénètrent dans le foyer

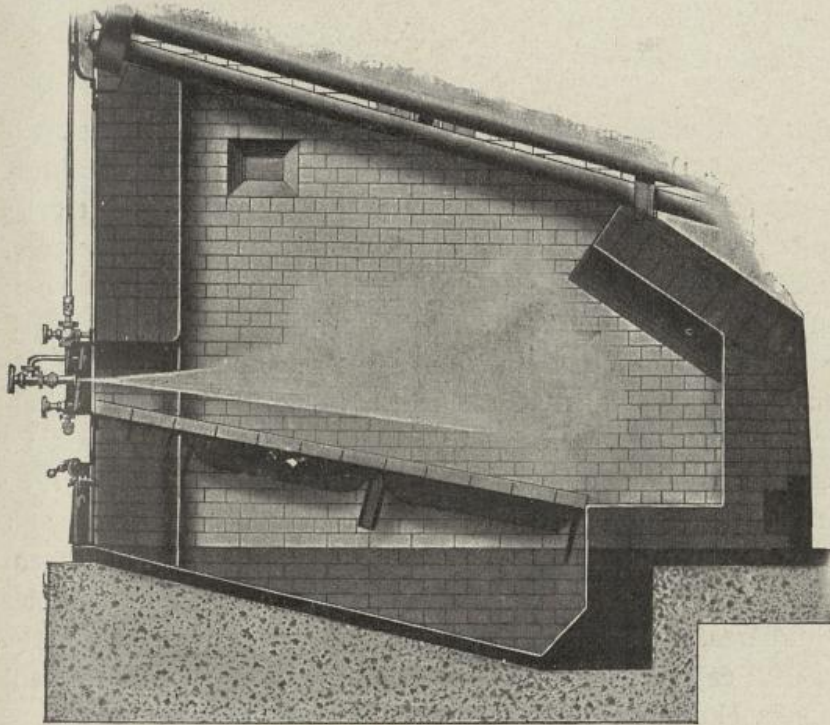


FIG. 47. — Chaudière Babcock et Wilcox, avec foyer pour brûler alternativement du mazout et du charbon.

à travers des ouvertures laissant un assez large passage que rien ne vient obturer, disposition non conforme aux prescriptions réglementaires.

Un des moyens employés consiste à amener l'air à ces ouvertures par des gaines qui vont le prendre latéralement, en un point où un flux de vapeur ne peut présenter de danger.

(1) Circulaire du 6 mai 1920, *Annales des mines*, partie adm., 11^e série, t. IX, p. 462.

L'emploi des combustibles liquides est extrêmement commode; malheureusement la production mondiale est bien minime, comparée à celle de la houille, qu'ils ne peuvent par suite remplacer que dans une faible proportion. C'est surtout sous les chaudières marines que ce remplacement est utile; viendraient ensuite les locomotives. D'ailleurs, pour bien utiliser les combustibles liquides, ce n'est pas sous des chaudières qu'il convient de les brûler, mais dans des moteurs à combustion interne, tels que le Diesel.

13. Combustibles gazeux. — La combustion des gaz se règle facilement. Dans quelques régions, on dispose de gaz naturel, dont la production est malheureusement peu durable; les hauts fourneaux produisent de grandes quantités de gaz combustibles, à base d'oxyde de carbone, que toutefois on utilise de plus en plus dans des moteurs à combustion interne, au lieu de le brûler sous des chaudières; enfin, on peut gazéifier le combustible solide, méthode courante pour les fours métallurgiques, mais peu recommandable pour les chaudières. La quantité de chaleur dégagée dans le gazogène, qui produit de l'oxyde de carbone, correspond à peu près aux trois dixièmes du pouvoir calorifique, et cette chaleur n'est que partiellement récupérée: les avantages du combustible gazeux, pour les chaudières, ne sont pas assez grands pour justifier cette perte. On peut cependant l'éviter en plaçant le gazogène directement sous la chaudière (1).

Le gaz pénètre à faible vitesse dans un foyer en briques par une série d'ouvertures, d'autres ouvertures donnant passage à l'air. Ou bien on fait usage de brûleurs analogues au Bunsen, qui amènent le gaz et l'air en jets concentriques.

Un procédé intéressant consiste à brûler le gaz au contact d'une matière poreuse réfractaire, qui se trouve portée à l'incandescence, sans production de flammes. Le procédé W.-A. Bone consiste à remplir de cette matière les tubes à fumée d'une chaudière, dans lesquels on insuffle un mélange

(1) Voir dans *Chaleur et industrie*, mai 1920, p. 132, *Charbon pulvérisé et gazogène*, par M. MARCONNET.

d'air et de gaz combustible (1). L'allumage se fait à la sortie des tubes; la vitesse du courant étant suffisamment faible, la flamme rentre dans les tubes, et la combustion se produit dans les fragments poreux au voisinage de l'entrée. L'utilisation du combustible est bonne, mais les tubes d'amenée sont rapidement mis hors de service par combustion avant les matériaux réfractaires.

La *Surface combustion Co* dispose dans le foyer de la chau-

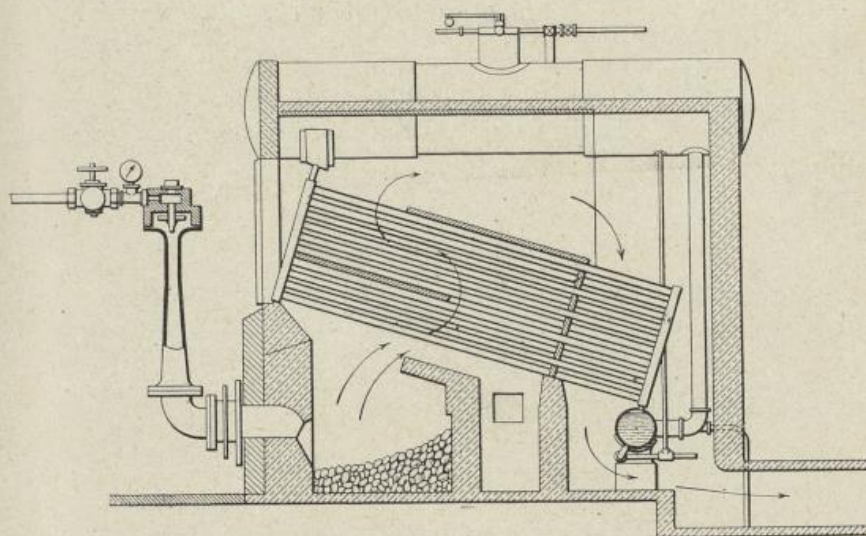


FIG. 48. — Chauffage d'une chaudière par les procédés de la *Surface combustion Co* (exploités en France par la *Compagnie générale de construction de fours*). Le mélange d'air et de gaz combustible, lancé par une trompe, brûle au contact des matières réfractaires accumulées au fond du foyer.

dière un amas de matières réfractaires (fig. 48), sur lesquelles on envoie le mélange d'air et de gaz avec une vitesse d'une dizaine de mètres par seconde, supérieure à celle de propagation de la flamme. La combustion ne se produit qu'au point où le courant gazeux vient s'écraser contre les matières réfractaires. La chaudière reçoit la chaleur rayonnée par ces ma-

(1) Consulter la *Revue universelle des mines, de la métallurgie, etc.*, 1914; 1^{er} trimestre, pp. 81 et 195 : *La combustion sans flamme et ses applications*.

tières, et celle des gaz de la combustion, qui circulent à la manière ordinaire.

Le mélange d'air et de gaz est produit par une trompe où le fluide moteur est le gaz sous pression qui entraîne l'air, ou bien l'air comprimé entraînant le gaz. Bien disposées, ces trompes donnent un dosage constant avec de grandes variations de débit.

La matière réfractaire est un silicate d'alumine en petits fragments. La buse qui projette le courant gazeux est exposée à un rayonnement intense : elle est en fonte épaisse, avec ailettes de refroidissement.

Ce procédé permet une combustion complète, sans excès d'air; il n'exige pas de grandes chambres de combustion: l'allumage est rapide.

14. Tirage. — Le tirage *naturel* est produit par une cheminée, le tirage *forcé* par un ventilateur ou par des jets de vapeur ou d'air. La différence de pression du courant gazeux à l'entrée et à la sortie de la chaudière en donne la mesure: un manomètre à eau indique cette différence, en millimètres d'eau, un millimètre correspondant à une pression d'un décigramme par centimètre carré.

Le tirage produit deux effets successifs, le passage de l'air à travers la grille et le combustible, et la circulation des gaz chauds autour de la chaudière, du foyer à la cheminée. La vitesse de l'air, à travers un orifice quelconque, est proportionnelle à la racine carrée de la différence de pression motrice. Comme on peut admettre, d'autre part, la proportionnalité du poids de combustible brûlé et du débit d'air, en supposant, pour les divers régimes de combustion, une couche uniforme, le nombre de kilogrammes brûlés par mètre carré de grille et par heure sera proportionnel à la racine carrée de la différence des pressions dans le cendrier et dans le foyer. En pratique, à un tirage plus intense correspond généralement une couche plus épaisse de combustible.

A titre d'indication générale, l'abaque établi par M. Izart

(fig. 49) donne pour divers combustibles les quantités brûlées par mètre carré et par heure, suivant le tirage.

D'autre part, la Société française des Constructions Babcock et Wilcox indique les consommations suivantes pour ses chaudières à corps supérieur longitudinal, munies de grilles ordinaires :

NATURE DE LA HOUILLE	TIRAGE en millim. d'eau au registre	CONSOMMATION par m ² de grille et par heure kg.
Cardiff (Nixon's navigation)	13	78
— — — — —	16	88 à 98
— — — — —	19	98 à 122
— — — — —	25	122 à 146
Cardiff (Powel Duffryn)	13	88
— — — — —	16	105 à 112
Anthracite pur de Swansea	13	39 à 49
— — — — —	19	73 à 97
— — — — —	25	97 à 107
Semi-bitumineuse dure, française ou belge	13	59
	22	73
	25	98

15. Tirage naturel.— Le tirage naturel résulte de la différence de densité de l'atmosphère et des gaz chauds de la cheminée. Sous une pression constante, la densité des gaz chauds est inversement proportionnelle à leur température absolue. Mais pour calculer cette densité, il faut aussi tenir compte de la composition des gaz dont l'oxygène est partiellement transformé en gaz carbonique. Avec une proportion en volume de 15 p. 100 de gaz carbonique, rarement dépassée, le poids du mètre cube, ramené à la température de 0° et à la pression de 1 kg. 033 par centimètre carré, serait de 1,366, le poids du mètre cube d'air pur étant 1 kg. 293.

Sous une autre forme, on voit que le courant gazeux élève jusqu'en haut de la cheminée le poids du combustible brûlé.

Si la combustion d'un kilogramme, laissant 0 kg. 1 de résidus, demande 13 mètres cubes d'air froid, chaque mètre cube d'air se charge de 69 grammes, et son poids, ramené à 0°, passe de 1.293 à 1 kg. 362.

Les deux dimensions caractéristiques d'une cheminée sont la hauteur et la section. De la hauteur dépend l'intensité la plus

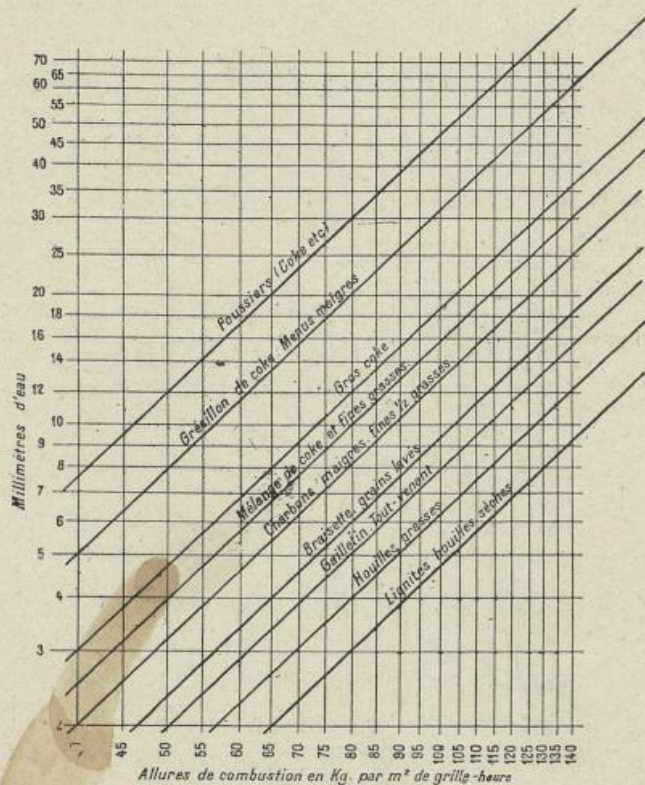


FIG. 49. — Abaque Izart des différences de pression entre cendrier et foyer et des quantités de combustible brûlées.

grande possible du tirage : la cheminée étant remplie de gaz chauds immobiles ou animés d'une faible vitesse, le tirage correspond à la différence de pression d'une colonne de gaz chauds et d'une colonne d'air froid, de hauteur égale à celle de la cheminée.

Avec des températures de 15° et 300°, en prenant 1,29 et 1,36 pour poids du mètre cube à 15°, H étant la hauteur, en mètres,

de la cheminée, la différence de pression est en kilogrammes par mètre carré, ou en millimètres d'eau :

$$H \left(1,29 - 1,36 \frac{15 + 273}{300 + 273} \right) = 0,61 H.$$

Une cheminée de 30 mètres de hauteur, dimension au-dessous de laquelle on ne descend guère, donnerait une dépression de 18 millimètres au plus; une hauteur de 50 mètres, une dépression de 30 millimètres. Ces nombres, établis pour une température de 300°, varient avec la température des gaz. D'autre part, les frottements du courant gazeux dans la cheminée, et la vitesse avec laquelle il est rejeté, réduisent la dépression motrice à la base.

Pour assurer un même débit en poids, la vitesse, dans une cheminée de section déterminée, devra être d'autant plus grande que la température est plus élevée. Dans ces conditions, on constate que l'intensité du tirage varie peu pour des températures des gaz comprises entre 150° et 450°.

La section de la cheminée dépend de la vitesse qu'on admet pour les gaz, supposés à 300°. Une vitesse de 3 mètres par seconde donnerait, avec une section d'un mètre carré, un débit horaire de 10.800 mètres cubes de gaz chauds ou de 5.400 mètres cubes d'air froid. Ce débit est largement suffisant pour brûler 360 kilogrammes de houille.

La Société française des Constructions Babcock et Wilcox indique la règle pratique suivante pour déterminer la section, en mètres carrés, d'une cheminée de hauteur H en mètres :

$$S = \frac{P}{100 \sqrt{H}},$$

P étant le nombre de kilogrammes de houille brûlés en une heure.

Quant à l'intensité du tirage nécessaire pour obtenir un débit déterminé, elle dépend de l'ensemble des résistances opposées par la grille, la couche de combustible, les divers circuits autour de la chaudière. La Société qui vient d'être citée

donne, pour les diverses résistances exprimées en millimètres d'eau, les formules empiriques suivantes :

Pour une grille ordinaire chauffée à la main, recouverte de combustible :

$$K \left(\frac{P}{100} \right)^2$$

P étant le nombre de kilogrammes brûlés par mètre carré et par heure et K un coefficient égal à :

- 5 pour des gaillettes ou des grains lavés;
- 6 pour du tout-venant;
- 7 pour des fines;
- 8 pour du poussier (1).

Ces nombres seront majorés de 2 avec les grilles mécaniques.

La résistance de la chaudière, toujours en millimètres d'eau, sera :

$$K' \left(\frac{P}{100} \right)^2,$$

le coefficient K' variant de 4 à 9, suivant les types de chaudières, et devant être majoré de 1 à 2 si la chaudière est munie d'un surchauffeur.

Un réchauffeur d'eau d'alimentation donne une résistance :

$$K'' \left(\frac{P}{100} \right)$$

avec $K'' = 3$ à 6.

Enfin, les carneaux droits ou à peu près, avec une section égale au cinquième de la grille, donneront une résistance de 4 pour une longueur de 50 mètres.

En résumé, la cheminée doit être assez haute pour donner le tirage le plus énergique dont on puisse avoir besoin, le tirage effectif étant contrôlé par un registre placé en un point quel-

(1) Ces valeurs sont notablement inférieures à celles données par le graphique de la figure 49.

conque du circuit, généralement à la sortie de la chaudière. La section de la cheminée doit être suffisante pour assurer le débit maximum nécessaire, sans que l'exagération de la vitesse réduise le tirage.

Une cheminée peut être envisagée comme un moteur thermique, produisant le travail mécanique demandé pour la circulation de l'air. Si la dépression nécessaire pour cette circulation est de 15 millimètres d'eau, le travail pour un mètre cube de gaz, supposés à 300° , sera de 15 kilogrammètres, équivalent de 0,035 calorie. La température extérieure étant 20° , le mètre cube de gaz, pesant 0 kg. 650, contient $(300 - 20) \times 0,650 \times 0,2$ ou 36,5 calories. Ce moteur thermique transforme donc en travail environ un millième de la chaleur qu'il reçoit.

Le registre, placé entre la chaudière et la cheminée, a souvent trop de jeu dans ses guides, et donne lieu à une rentrée d'air qui peut être nuisible en limitant l'intensité du tirage. On corrige facilement ce défaut en montant une gaine qui entoure le registre ouvert : la seule ouverture est celle de la tige de manœuvre. On rend automatique la manœuvre du registre en le commandant par un piston sensible à la pression de la chaudière, avec ressort antagoniste. Ce montage, bien qu'assez simple, est rarement usité.

16. Tirage forcé. — Le tirage forcé agit, soit par insufflation d'air, soit par aspiration des gaz de la combustion. Si la température de ces gaz est voisine de 300° , le volume en est à peu près double du volume de l'air froid entrant dans le foyer, ce qui exige, pour le tirage par aspiration, de plus grands ventilateurs. Même dans ce cas, le travail mécanique absorbé par le ventilateur est minime. Pour 15 mètres cubes d'air froid par kilogramme de houille, avec une dépression de 20 millimètres d'eau, ce travail serait théoriquement de 15×20 ou 300 kilogrammètres. Il serait double avec l'aspiration des gaz chauds. Le travail effectif est plus grand, mais n'est encore qu'une petite fraction de celui que peut donner la vapeur produite.

Dans les locomotives, la vapeur d'échappement produit un tirage intense par aspiration, la dépression dans la boîte à

fumée atteignant et même dépassant 200 millimètres d'eau. Le même procédé est employé dans les locomobiles.

L'aspiration ou l'insufflation, produite par des jets de vapeur directement empruntés à la chaudière, est peu économique et ne doit être employée qu'accidentellement. Toutefois, dans de petites installations, ce procédé très simple peut être utile pour brûler certains combustibles, tels que les fines de coke ou d'anthracite. On en a vu l'emploi pour la combustion du mazout. Il faut veiller à ce que le débit de vapeur ne soit pas exagéré, soit par ouverture trop grande des robinets, soit par usure des ajutages.

On attribue à la présence de vapeur d'eau dans l'air traversant la grille une influence favorable : elle conserverait les barreaux et empêcherait l'adhérence des mâchefers.

Au lieu d'aspirer directement les gaz de la combustion, on peut faire usage d'un éjecteur, où le fluide moteur est l'air refoulé par un ventilateur. Ce fluide moteur est de l'air froid pris à l'extérieur, ou bien une fraction des gaz chauds du foyer. Cette méthode indirecte augmente en principe le travail à fournir, puisqu'il subit deux réductions successives, dans le ventilateur et dans l'éjecteur. Par contre, elle emploie de plus petits ventilateurs, refoulant une moindre quantité d'air à une pression plus forte (1); elle évite, avec la première disposition, la traversée du ventilateur par les gaz chauds, bien qu'avec des paliers à circulation d'eau, le fonctionnement n'en présente pas de difficultés.

Le système Prat (fig. 50) fonctionne par insufflation dans une tuyère surmontée d'une cheminée divergente de petites dimensions. Sous sa dernière forme (*tirage « MIX »* de la Société des Etablissements E. Prat-Daniel), il comprend un ventilateur bilatéral, placé dans la cheminée même (fig. 51) :

(1) Dans *La technique moderne* du 1^{er} février 1914, M. Schwartz indique, comme puissance en chevaux à fournir pour brûler 1.000 kilogrammes de charbon à l'heure :

- Avec ventilateur soufflant sous grille, 1,6;
- Avec ventilateur aspirant, 2,4;
- Avec éjecteur et ventilateur à gaz chauds, 4,1;
- Avec éjecteur et ventilateur à air froid, 5,5.

le passage des gaz est ainsi direct, et les changements brusques de direction, causes de pertes de travail, sont évités. La

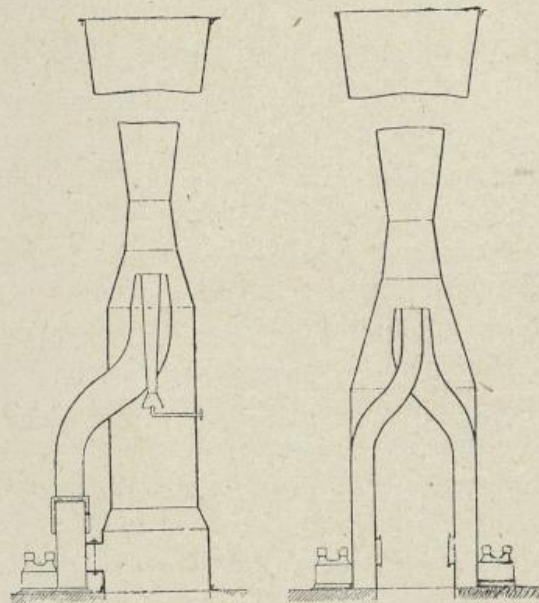


FIG. 50. — Tirage Prat, avec éjecteur alimenté par ventilateur à air chaud : à gauche, avec soufflerie de secours à vapeur; à droite, avec deux ventilateurs.

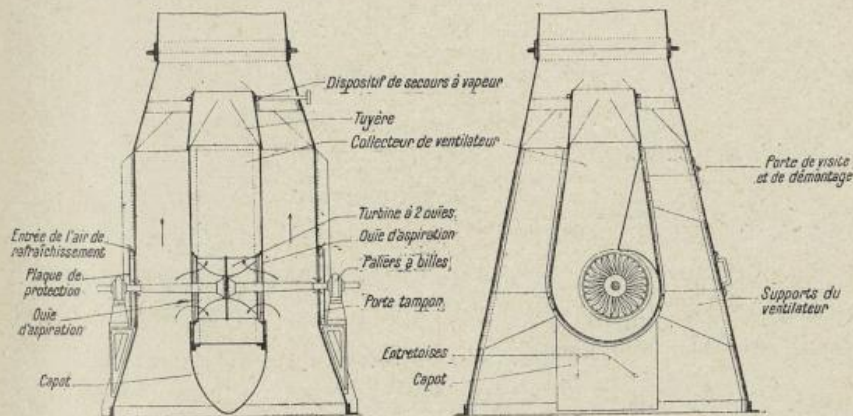


FIG. 51. — Tirage « MIX » des Etablissements E. Prat-Daniel. La partie supérieure de la cheminée est un tronc de cône divergent.

sortie du ventilateur sur son arbre, par une porte latérale, est facile. Un souffleur annulaire à vapeur est prévu comme secours.

Lorsque le régime de combustion doit varier, le réglage se fait : par variation de la vitesse du ventilateur ou par l'emploi de deux ventilateurs, placés sur deux arbres parallèles dans la cheminée.

Au moins dans les grandes installations, le tirage forcé a d'importants avantages. Il permet de régler la combustion exactement suivant les besoins; il évite la construction dispendieuse de grandes cheminées; il facilite l'emploi des combustibles inférieurs.

17. Tirage équilibré. — Le tirage naturel et le tirage forcé par aspiration donnent, au-dessus de la grille et dans les carneaux de la chaudière, une pression inférieure à la pression atmosphérique : une entrée d'air se produit par les fissures des maçonneries et par les ouvertures du massif, notamment par la porte de chargement. On peut, il est vrai, éviter l'entrée d'air excessive lors des chargements, en fermant le registre pendant l'ouverture de la porte. Quelquefois une conjugaison des deux appareils rend cette manœuvre automatique.

Les essais des gaz pris un peu au delà du foyer et à la sortie de la chaudière, avec dosage de la quantité d'oxygène libre, font connaître l'importance des rentrées d'air.

Avec le tirage forcé par insufflation, au contraire, la pression à l'intérieur des massifs est supérieure à celle de l'atmosphère, d'où sortie de gaz chauds et de flamme par la porte de chargement ouverte.

En combinant les deux systèmes, on peut arriver à faire régner la pression atmosphérique au-dessus de la grille, de telle sorte que l'ouverture de la porte de chargement ne donne lieu ni à entrée d'air ni à sortie de gaz : c'est le système dit *tirage équilibré* (1).

En conservant la cheminée employée pour le tirage naturel, il est clair que le tirage équilibré permet une combustion plus intense, puisque la dépression à la base de la cheminée n'a plus

(1) Consulter dans la *Revue universelle des mines, de la métallurgie, etc.*, 1914, 2^e trimestre, p. 109, *La production économique de la vapeur et le tirage équilibré*, par M. WASSEIGE.

à mettre en mouvement que les gaz dans les carnaux, autour de la chaudière, au lieu de vaincre, en outre, l'importante résistance de la grille chargée de combustible. Le débit de l'appareil soufflant doit correspondre à l'aspiration de la chemi-

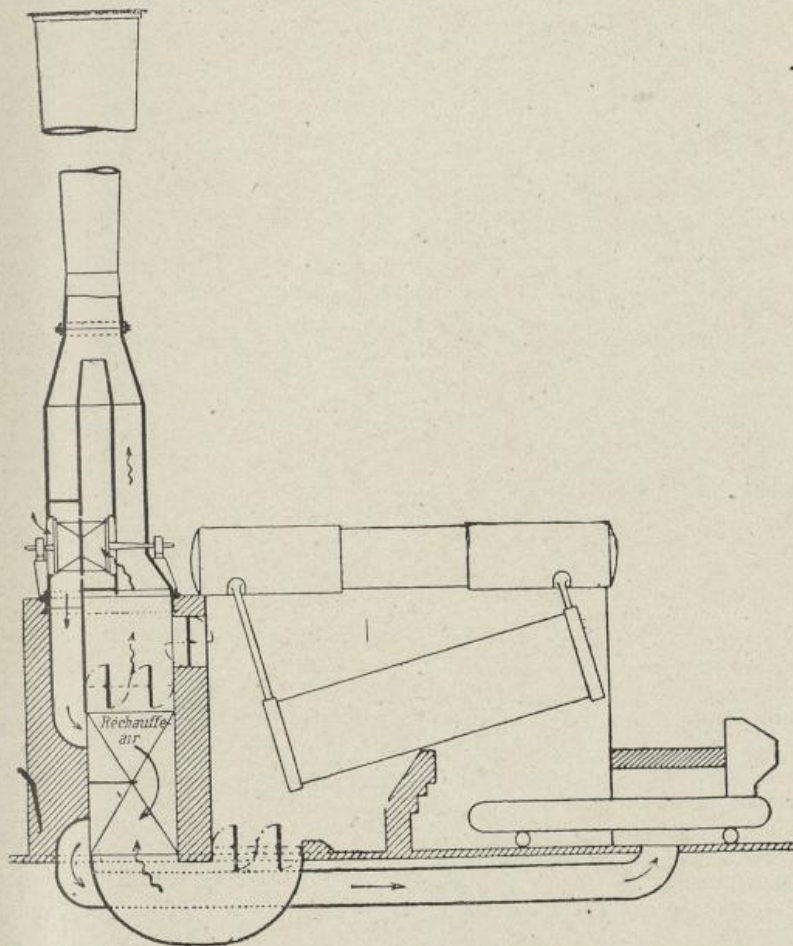


FIG. 52. — Tirage combiné des Etablissements E. Prat-Daniel, avec ventilateur soufflant et aspirant.

née : le réglage exige des appareils automatiques sensibles à de très faibles variations de pression

La Société des Etablissements E. Prat-Daniel a modifié l'installation du ventilateur « MIX », décrite un peu plus haut, pour obtenir un effet analogue (fig. 52). Le ventilateur bilatéral

est divisé par une cloison médiane en deux moitiés, dont une prend l'air extérieur et le refoule sous la grille à travers un réchauffeur et dont l'autre produit l'aspiration et l'entraînement des gaz chauds.



FIG. 53. — Manomètre à eau « Usco ».

Au tube en U du manomètre ordinaire, on substitue deux tubes concentriques, le tube intérieur communiquant avec l'enceinte dont on veut mesurer la pression. La différence de niveau dans les deux tubes est indiquée par un flotteur portant une graduation dont le zéro affleure le niveau du tube intérieur. Sur cette graduation, on lit l'affleurement du niveau extérieur d'un côté ou de l'autre du zéro.

L'appareil triple représenté est destiné à donner la pression sous la grille, dans la chambre de combustion et à la base de la cheminée.

La pression est indiquée par un simple manomètre à eau formé d'un tube en U, ou de deux tubes concentriques (fig. 53). L'enregistreur Izart (fig. 54) est un flotteur avec cloche annulaire soumise à la pression qu'on veut mesurer, flotteur dont le déplacement vertical s'inscrit sur un tambour tournant. L'appareil duplex (fig. 55) comprend deux flotteurs qui inscrivent sur un tambour unique les pressions en deux points dif-

18. Appareils d'observation du courant gazeux. — Pour contrôler la combustion, il est nécessaire de connaître la composition et la température des gaz rejetés dans la cheminée, ainsi que la pression en certains points du courant gazeux, notamment au-dessus de la grille et à la base de la cheminée. Parmi les nombreux appareils construits à cet effet, les plus simples peuvent suffire dans bien des cas, et il est surprenant de voir combien de chaufferies sont dépourvues de tout moyen de contrôle.

La pression est indiquée par un simple manomètre à eau formé d'un tube en U, ou de deux tubes concentriques (fig. 53). L'enregistreur Izart (fig. 54) est un flotteur avec cloche annu-

férents. Le *déprimomètre* Morin (fig. 56) mesure la pression à l'aide d'un diaphragme élastique.

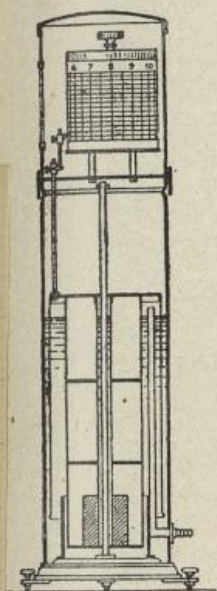


FIG. 54.

FIG. 54. — Manomètre enregistreur Izart (*doseur d'air simple*). La pression à mesurer, s'exerçant dans la cloche annulaire, diminue le poids du flotteur et lui fait prendre sur l'eau une position d'équilibre. En même temps le niveau extérieur de l'eau s'élève, tandis qu'il s'abaisse dans la cloche. Le déplacement du flotteur est proportionnel à la pression effective à mesurer. (Le flotteur étant cylindrique, s'élève par rapport au plan extérieur d'une hauteur proportionnelle à la pression dans la cloche annulaire; d'autre part, l'élévation de ce niveau, par rapport au niveau initial, est proportionnel à la même pression.)

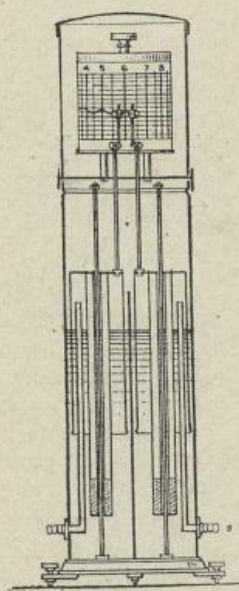


FIG. 55.

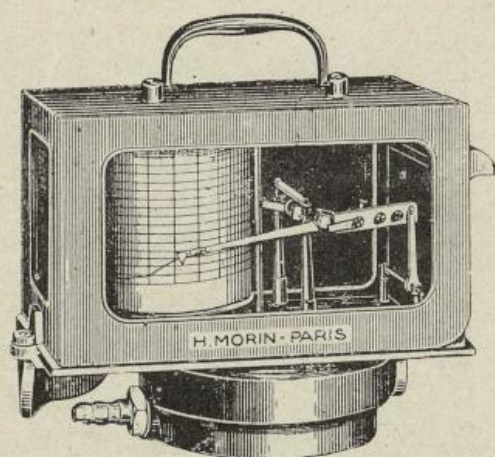
FIG. 55. — Manomètre enregistreur Izart (*doseur d'air duplex*).


FIG. 56. — Déprimomètre enregistreur Morin.

L'enregistrement continu de la pression au-dessus de la grille (fig. 57) fait connaître la régularité plus ou moins grande du travail des chauffeurs, en inscrivant les intervalles entre

les chargements, la fermeture ou l'ouverture du registre pendant les chargements et les décrassages.

De nombreux appareils font connaître la composition des

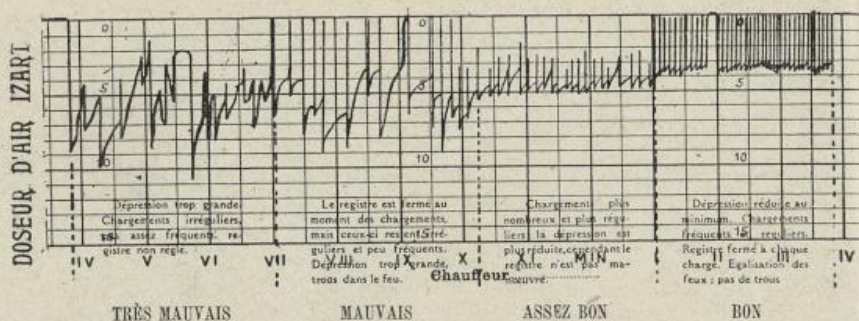


FIG. 57. — Exemples de relevés avec le manomètre enregistreur (*doseur d'air*) Izart, monté dans la chambre de combustion d'une chaudière. Le retour au zéro (dépression nulle) indique la fermeture du registre; une simple diminution de la pression indique l'ouverture de la porte du foyer, sans fermeture du registre. Les ordonnées indiquent les dépressions, en millimètres d'eau.

gaz de la combustion, et surtout leur teneur en gaz carbonique.

L'appareil Orsat (fig. 58) permet un dosage facile du gaz

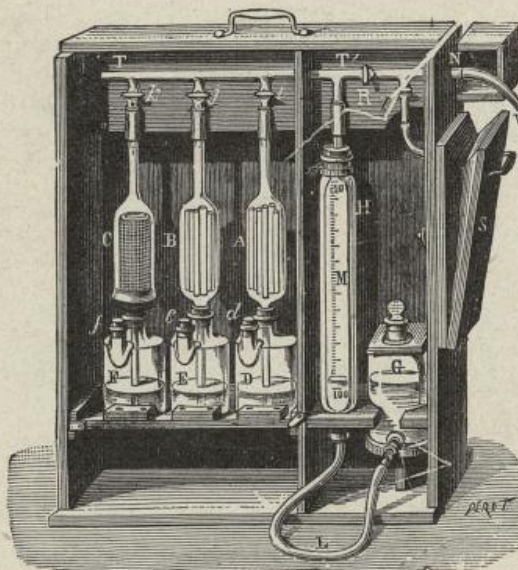


FIG. 58. — Appareil Orsat pour l'analyse des gaz de la combustion, dosant le gaz carbonique, l'oxygène libre, et l'oxyde de carbone.

carbonique, de l'oxygène libre et de l'oxyde de carbone dans les produits de la combustion. On aspire, dans le mesureur M, 100 centimètres cubes des gaz à analyser, puis on envoie ces gaz dans le laboratoire A, où ils sont en contact avec une lessive de soude qui absorbe le gaz carbonique. En ramenant les gaz dans le mesureur, la diminution de volume fait connaître la quantité de gaz carbonique. On opère de même avec le laboratoire B, qui renferme une dissolution de pyrogallate de potasse absorbant l'oxygène; puis, avec le troisième laboratoire, pour l'absorption de l'oxyde de carbone par une solution de protochlorure de cuivre ammoniacal.

Plusieurs autres appareils servent au dosage du gaz carbonique dans les fumées; certains sont enregistreurs. A quelques-uns, on peut reprocher une complication un peu trop grande pour un appareil industriel de ce genre (1).

L'appareil Ados effectue automatiquement, à intervalles rapprochés, les opérations faites à la main avec celui d'Orsat, en mesurant les volumes de fumée avant et après l'absorption du gaz carbonique.

Le *thermoscope* (fig. 59) dose le gaz carbonique par la quantité de chaleur que dégage sa combinaison avec la soude. Une capsule contenant un poids

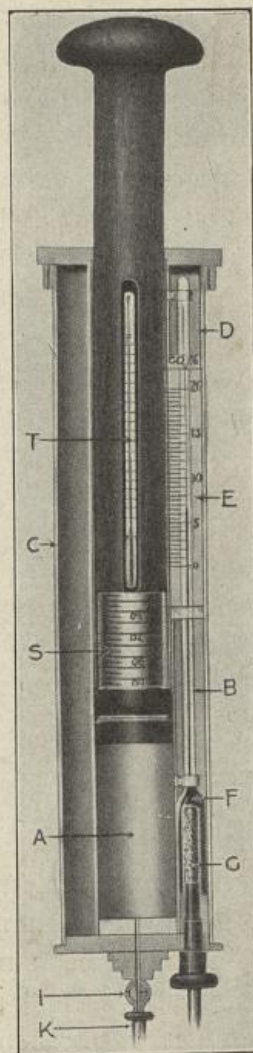


FIG. 59. — Thermoscope.

A, corps de pompe dans lequel on aspire le gaz à analyser; le volume aspiré est réglé suivant la température donnée par le thermomètre T, en arrêtant devant un index la graduation S, portée par le piston; G, cartouche métallique contenant de la soude pulvérisée, et percée aux deux extrémités au moment de l'emploi; F, bulbe du thermomètre-calorimètre; E, graduation donnant la teneur en CO_2 .

(1) Consulter, sur ces appareils, les numéros d'avril et de mai 1921 de *Chaleur et industrie* (pages 177 et 285), et une note de M. FRION dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, juin 1921, p. 553.

déterminé de soude, qui absorbe le gaz, est placée dans un calorimètre simple, réduit à un thermomètre à mercure dont le liquide absorbe la quantité de chaleur à mesurer et l'indique par sa dilatation.

Le *catharomètre* utilise la variation de conductibilité calorifique des gaz de la combustion suivant la proportion de gaz carbonique qu'ils renferment; deux spires identiques, montées, l'une dans l'air, l'autre dans le gaz à analyser, sont parcourues par un courant électrique et se refroidissent inégalement, suivant la composition du gaz; il en résulte une variation de conductibilité enregistrée par un galvanomètre.

L'appareil Chopin utilise les différences de résistance électrique de solutions de soude pure et carbonatée.

La viscosité et la densité du gaz dépendent de la proportion de gaz carbonique : l'*unographe* en mesure les variations par l'écoulement du gaz dans un tube capillaire et par un orifice en mince paroi.

Dans l'indicateur *Sterose*, les gaz convenablement refroidis pénètrent dans un vase poreux, où un alcali absorbe le gaz carbonique. Cette absorption produit à l'intérieur du vase un abaissement de pression indiqué par un manomètre, d'où on déduit la teneur.

En ce qui concerne les températures, la plus importante à connaître constamment est celle des gaz rejetés dans la cheminée. Pour cette mesure, les thermomètres à mercure peuvent servir jusqu'à 400°; jusqu'à 700°, les pyromètres Fournier, qui donnent la pression de vapeur saturée d'un fluide, sont applicables. Au delà, on a recours aux couples thermo-électriques ou au pyromètre Féry; mais ces mesures de températures très élevées ne s'imposent pas dans la pratique courante des chaudières.

A défaut d'appareils de mesure, on peut utiliser la fusibilité de certains métaux, l'étain fondant à 230°, le plomb à 322°, et le zinc à 391°.

19. **Résidus solides de la combustion.** — Certaines houilles contiennent une forte quantité de cendres; la proportion des

résidus atteint et dépasse fréquemment le dixième du poids amené aux foyers.

Dans un cendrier plein d'eau les fragments qui tombent à travers la grille s'éteignent immédiatement, et on peut alors, par l'incinération des résidus, déterminer la proportion de combustible qu'ils contiennent. Du reste, la simple pesée des résidus, comparée à celle du charbon brûlé, et rapprochée de la teneur déterminée par l'incinération du charbon, donne une indication utile à ce sujet.

Dans les grandes chaufferies, des dispositions sont prévues

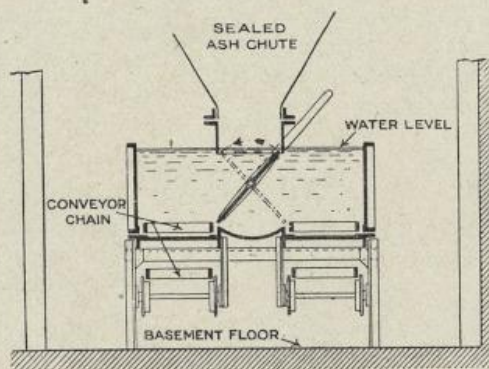


FIG. 60. — Transporteur de cendres Usco, à brin de retour sous la cuve; appareil double.

pour l'enlèvement facile des résidus. Une galerie en dessous des chaudières sert à la circulation de wagonnets qui les reçoivent par trémies, ou bien à l'installation d'appareils transporteurs continus. Sous les grilles mécaniques, on a soin de recueillir à part les menus non brûlés qui tombent à travers la grille dans la partie voisine du chargement.

Des résidus solides sont aussi entraînés par un tirage actif et doivent être enlevés périodiquement. Notamment, on trouve dans les boîtes à fumée des locomotives de grandes quantités de *fraisil*, mélange de cendres et de grains de coke, qui constitue un combustible encore utilisable.

Les figures 60 à 64 donnent des exemples des appareils de l'*Underfeed stoker Co*: une chaîne sans fin, munie de raclettes,

nettoie le fond d'une rigole pleine d'eau, dans laquelle tombent les résidus amenés par une trémie qui plonge dans l'eau pour éviter tout passage d'air. La vitesse de la chaîne est en moyenne

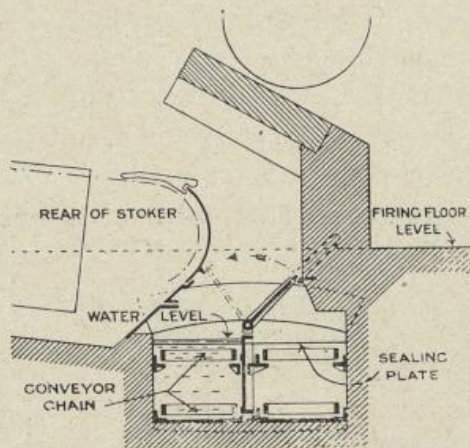


FIG. 61. — Transporteur de cendres Usco, à brin de retour dans la cuve; appareil double.

de 3 mètres par minute. Suivant l'emplacement dont on dispose, le brin de retour est en dessous ou en dessus du brin

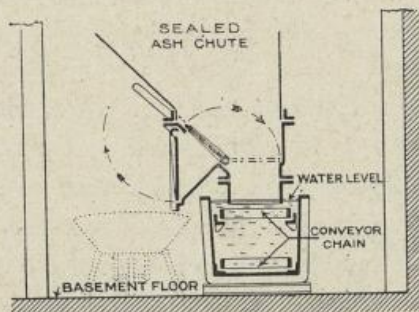


FIG. 62. — Transporteur de cendres Usco; appareil simple, avec emploi éventuel de brouettes.

actif; dans les grandes installations, on prévoit deux chaînes, dont une en réserve.

Réduits en grains suffisamment fins, les déchets sont enlevés par un courant d'air, dans le système Babcock et Wilcox

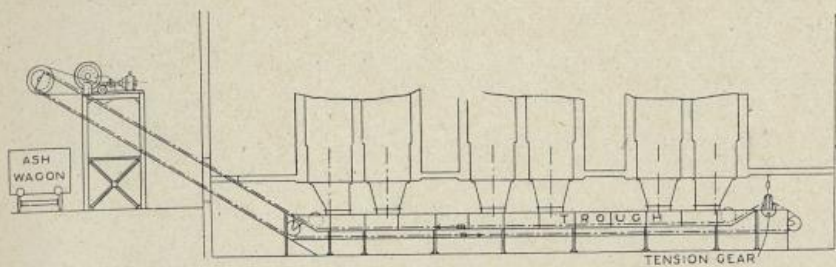


FIG. 63. — Transporteur de cendres Usco, avec déversement en wagons.

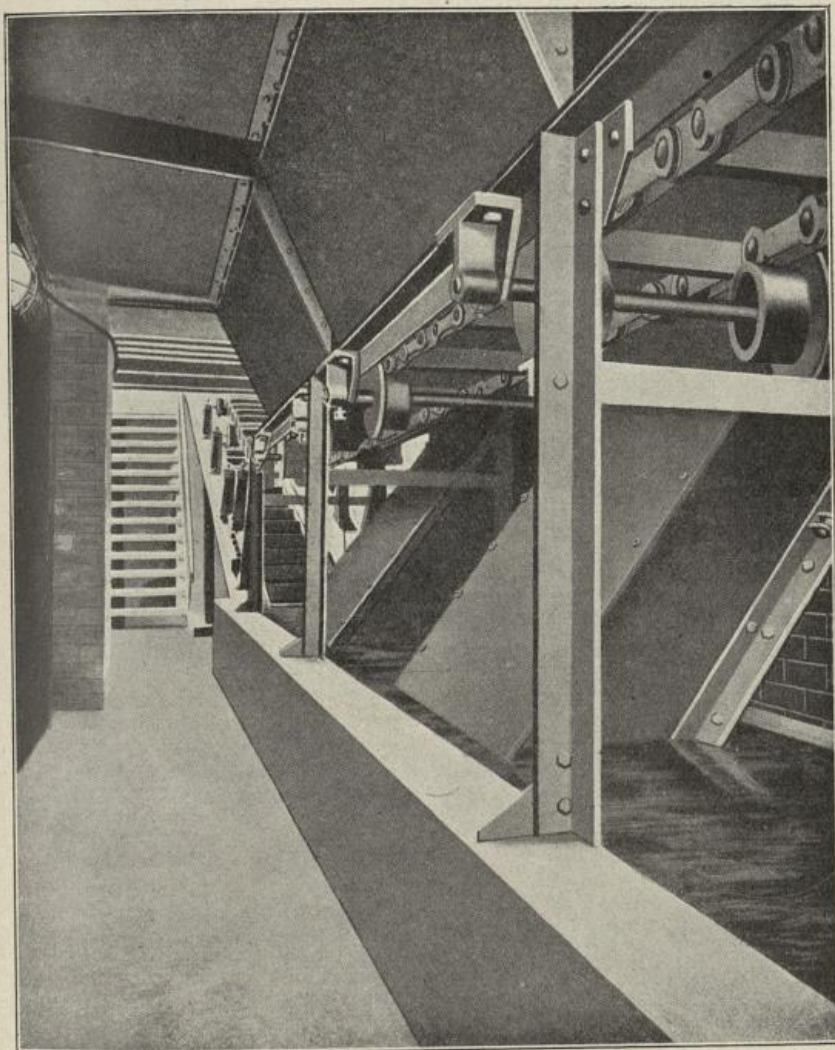


FIG. 64. — Transporteur de cendres Usco, avec brin de retour au-dessus de la cuve.

(fig. 65). Un concasseur mobile, avec moteur électrique, est amené sous les trémies à cendres; les déchets broyés pénètrent dans un tube convoyeur en fonte aboutissant à un réservoir clos, dans lequel aspire un ventilateur; ils sont humectés avant

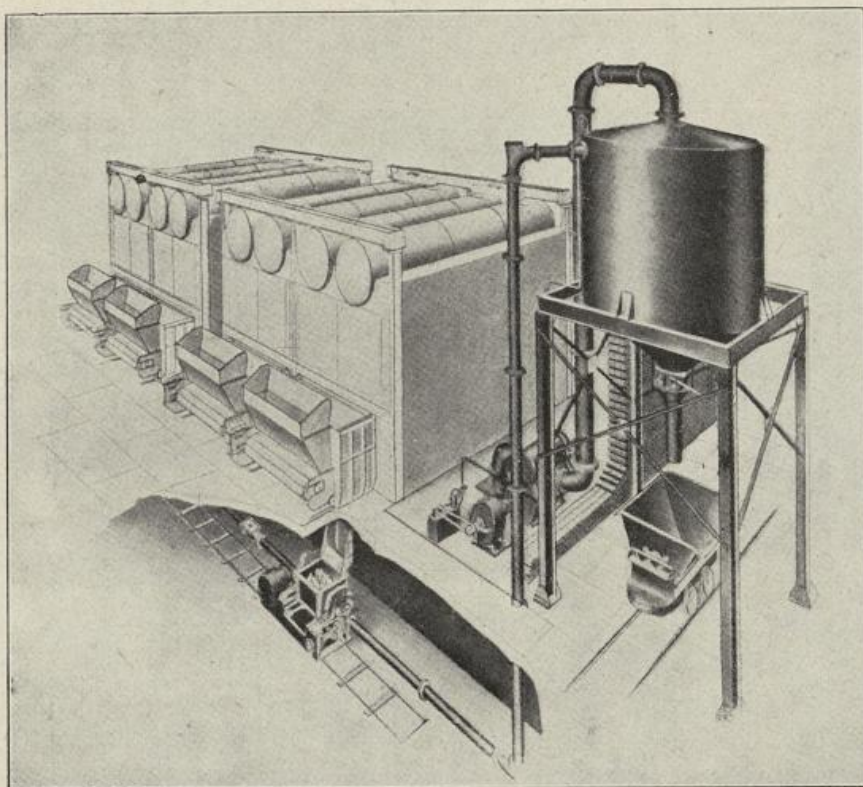


FIG. 65. — Diagramme d'une installation d'enlèvement pneumatique de cendres et mâchefers, système Babcock et Wilcox, montrant le concasseur mobile et son moteur, la conduite, le réservoir avec trémie de vidange, le ventilateur aspirant et son moteur. L'injection d'eau se fait dans la conduite, un peu avant son arrivée au réservoir.

d'entrer dans ce réservoir, afin de soustraire le ventilateur aux poussières.

Lorsque la production des mâchefers est abondante, on en fabrique des briques silico-calcaires, en les mélangeant, après broyage, à de la chaux éteinte, dans la proportion d'un kilo-

gramme de chaux à 9 kilogrammes de mâchefers. Le mélange, moulé par une presse, est cuit à la vapeur dans un autoclave, sous la pression de 8 à 10 kilogrammes par centimètre carré, pendant une dizaine d'heures (1).

(1) Consulter le mémoire de M. LEDUC sur les briques silico-calcaires, dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, année 1907, p. 1179.

CHAPITRE IV

UTILISATION DE LA CHALEUR

20. **Surfaces de chauffe.** — La surface de chauffe se compte sur la paroi métallique en contact avec les gaz de la combustion. L'autre face de cette paroi doit être baignée par l'eau, sauf dans quelques cas spéciaux, quand les gaz sont à une température suffisamment basse et exception faite pour les surchauffeurs. Il convient de compter ainsi la surface de chauffe à l'extérieur, du côté chauffé, plutôt que du côté de l'eau, parce que c'est surtout cette face extérieure qui contrôle le flux de chaleur. La différence entre les deux surfaces peut être assez grande dans les chaudières formées de tubes.

La surface de chauffe *directe*, qui limite le foyer, reçoit la chaleur rayonnée par le combustible, outre celle que lui cèdent par convection les gaz chauds; la surface *indirecte* est chauffée par convection. Toutefois, certaines portions de la surface indirecte reçoivent aussi de la chaleur rayonnée par les parois en briques de la chaudière.

Aux surfaces de chauffe de la chaudière peuvent s'ajouter celles d'un réchauffeur d'eau, d'un surchauffeur de vapeur, et d'un réchauffeur d'air.

21. **Transmission de la chaleur.** — La transmission de la chaleur à travers les tôles de chaudières a été l'objet de nombreuses études théoriques. Dans sa *physique industrielle*, Ser donne pour cette transmission des règles simples, qui, si elles ne sont pas exactes, indiquent utilement la marche générale du phénomène. Ser admet que le nombre des calories, qui traversent un mètre carré de surface de chauffe en une seconde, est proportionnel à la différence de température des gaz de la

combustion et de l'eau dans la chaudière. En portant en abscisses (fig. 66) la surface de chauffe, comptée à partir du foyer, et, en ordonnées, la température des gaz, constante suivant CD sur la surface directe S_d , décroissante suivant DE le long de la surface indirecte S_i , ainsi que la température constante de l'eau AB, on obtient un diagramme dont la surface représente la quantité de chaleur transmise : l'élément $mm'n'$ de ce diagramme a pour base la surface infiniment petite ds , et pour hauteur la différence des températures des gaz et de l'eau, pro-

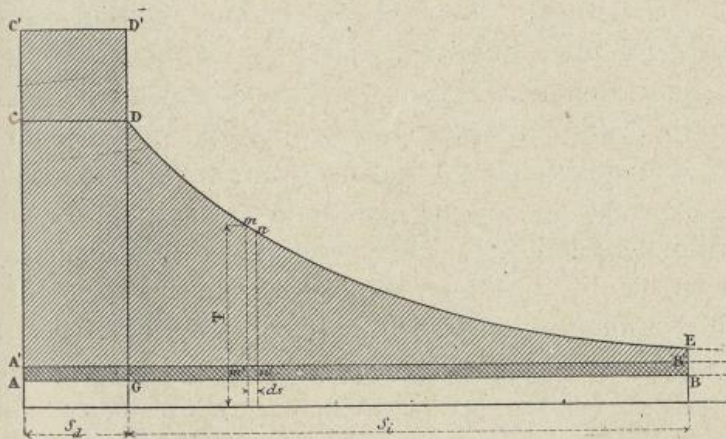


FIG. 66. — Diagramme de Ser représentant les quantités de chaleur reçues par une chaudière le long de sa surface de chauffe.

C'D'DC, chaleur rayonnante; A'B'BA, chaleur perdue par rayonnement extérieur.

portionnelle au nombre des calories transmises. Le diagramme met en évidence la diminution de l'efficacité de la surface de chauffe à mesure qu'elle s'éloigne de l'origine.

Le rectangle C'D'DC figure la chaleur rayonnante qui s'ajoute à la chaleur de convection sur la surface directe. Le rectangle A'B'BA représente la chaleur perdue par rayonnement extérieur de la chaudière, dont la surface externe est supposée croître en proportion de la surface de chauffe.

Comme documents plus récents, on trouvera dans les *Proceedings of the Institution of Mechanical engineers* (1909, p. 921) une analyse d'un très grand nombre de travaux sur cette question, par le professeur W. E. Dalby; une étude de

M. Leprince-Ringuet dans la *Revue de mécanique*, 1911, 2^e semestre, p. 5; une note de M. Kammerer dans le *Compte rendu des séances du 39^e Congrès des ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur, tenu à Mulhouse en 1919*, p. 65; un mémoire de M. Dieterlen sur les *Lois numériques de la transmission de la chaleur entre les fluides dans les échangeurs industriels* dans *Chaleur et industrie*, juin 1921, p. 312.

Pour utiliser le mieux possible une surface de chauffe, il conviendrait de lui faire absorber toute la chaleur rayonnante donnée par le combustible, et c'est ce que réalisent certaines chaudières à foyer intérieur.

Lorsque la chaleur rayonnée n'est pas reçue par la chaudière, elle chauffe des parois de briques qui la restituent aux gaz de la combustion dont la température est alors plus élevée. On compare les deux modes d'action en imaginant d'une part une chaudière dont la surface directe reçoit la chaleur rayonnante, et d'autre part une chaudière de même surface totale chauffée uniquement par convection. Les formules de transmission montrent que la première partie de cette seconde chaudière, de surface égale à la surface directe de la première, absorbera moins de calories : les gaz arriveront donc plus chauds sur la seconde partie, correspondant à la surface indirecte de la première chaudière, et sortiront par suite un peu plus chauds.

Mais en considérant la production de la chaleur, on voit que les grandes chambres de combustion, avec parois et voûtes en briques, sont très avantageuses. Aussi ne se préoccupe-t-on pas beaucoup de recueillir sur une surface directe la plus grande partie de la chaleur rayonnée; on ne craint pas, au contraire, de masquer en partie les tôles de la chaudière par des voûtes et des murs en briques, afin d'améliorer la combustion. On fait même usage d'avant-foyers, qui suppriment complètement la surface directe.

La légère réduction du nombre des calories utilisées, qui résulte de ces dispositions, est largement compensée par l'amélioration de la combustion.

Dans le mémoire précité, M. Kammerer indique, comme proportions de la chaleur transmise par rayonnement et par convection, environ 30 et 70 p. 100; il admet que cette proportion, relevée sur les chaudières dont il a étudié le fonctionnement, s'applique à d'autres types de générateurs à foyers extérieurs.

D'autre part, les constructeurs de la chaudière Belleville, qui a une grande surface directe, estiment qu'elle reçoit en une heure par rayonnement 150.000 à 200.000 calories pour un mètre carré de grille. Avec une combustion horaire, par mètre carré, de 100 kilogrammes de houille à 7.500 calories et un rendement thermique de la chaudière égal à 0,7, on utiliserait par convection 375.000 à 325.000 calories : ce sont des proportions comprises entre 28 à 72 et 38 à 62.

Pour une chaudière marchant au tirage naturel, avec une combustion horaire de 100 kilogrammes de houille par mètre carré de grille, une surface de chauffe totale égale à 35 fois la surface de grille est en général convenable.

Lorsque le tirage forcé augmente la quantité de combustible brûlée par mètre carré de grille et par heure, il conviendrait, pour conserver la même utilisation, d'augmenter dans la même proportion la surface de chauffe : une grille d'un mètre carré, brûlant 200 kilogrammes, développe la même quantité de chaleur qu'une grille de 2 mètres carrés brûlant 100 kilogrammes par mètre carré. Mais le tirage forcé a pour objet d'accroître la production d'une chaudière sans en exagérer le poids, l'encombrement et le prix. C'est ainsi que beaucoup de chaudières de locomotives, où la combustion par mètre carré de grille et par heure est de 400, 500 kilogrammes et même davantage, ont une surface de chauffe égale à 75 fois celle de la grille.

On donne souvent, comme caractéristique d'une chaudière, la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe et par heure; il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'une moyenne, obtenue en divisant la production horaire par la surface, et que les nombres qui constituent cette moyenne ont entre eux de très grandes différences.

A titre d'exemple de différences de ce genre, l'essai n° iv d'une chaudière ambitubulaire, donné au § 36, indique, comme proportions des calories reçues par une chaudière de 130,5 mètres carrés de surface de chauffe, par un surchauffeur de 20,3 mètres carrés et par un réchauffeur de 68 mètres carrés, 68,3 — 8,3 — 6,4. Rapportées au mètre carré, ces proportions deviennent 0,52 pour la chaudière, 0,41 pour le surchauffeur, 0,09 pour le réchauffeur.

La transmission de la chaleur aux chaudières est contrôlée presque uniquement par le passage des calories des gaz chauds dans la tôle. Ces calories traversent facilement le métal, en suivant les lois simples de la conductibilité, puis passent aisément dans l'eau. Il en résulte que les températures des deux faces de la tôle diffèrent peu, et sont voisines de celles de l'eau. La grosse différence se trouve entre les gaz et la paroi. Ce fait en assure la conservation. Si, par suite d'un abaissement excessif du plan d'eau, la vapeur se trouve en contact avec la tôle, le coefficient de transmission devient à peu près le même des deux côtés : le métal prend une température égale à la moyenne arithmétique des températures des gaz et de la vapeur, et peut se trouver ainsi porté au rouge.

D'autres causes amènent une surchauffe dangereuse des tôles, la présence d'incrustations très épaisses, ou de dépôts huileux.

La suie, du côté des gaz chauds, ralentit la transmission et doit être soigneusement enlevée.

22. Circulation de l'eau. — Pour la conservation des tôles, comme pour la bonne utilisation de la surface de chauffe, l'eau doit baigner toutes les parties chauffées d'une chaudière. La vapeur doit donc être remplacée par l'eau dès qu'elle se forme sur les tôles. Dans les chaudières à grand corps, l'arrivée permanente de l'eau sur les tôles n'exige pas de dispositions spéciales, qui néanmoins peuvent être utiles même pour ce type de générateur. Dans les chaudières à tubes d'eau, l'accès constant de l'eau pour remplacer la vapeur formée est plus difficile, lorsqu'on active la vaporisation. Aussi cherche-t-on,

dans la plupart de ces chaudières, à obtenir non seulement le remplacement de l'eau vaporisée, mais une circulation rapide, de manière que la vapeur soit entraînée par un courant d'eau en excès.

On attribue parfois à la circulation l'avantage d'augmenter la transmission de la chaleur, par rapport à ce qu'elle serait dans l'eau stagnante. Il ne semble pas cependant que l'influence de la vitesse de l'eau à ce point de vue puisse être très grande, car c'est surtout le passage de la chaleur des gaz chauds dans

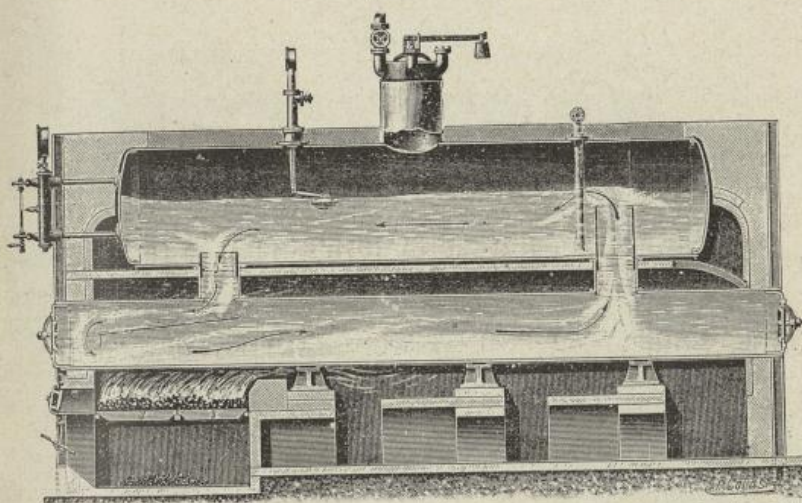


FIG. 67. — Chaudière à bouilleurs, avec appareil Montupet pour la circulation.

la tôle qui contrôle le phénomène. Toutefois, si la vaporisation est active et la vitesse de l'eau faible, une fraction notable de la surface de la tôle peut cesser d'être en contact avec l'eau, ce qui ralentit la transmission de la chaleur. L'augmentation de la vitesse améliorerait alors cette transmission.

Dans les chaudières à bouilleurs directement chauffés, la vaporisation est active au-dessus du foyer : la vapeur se dégage surtout par le cuissard le plus voisin, et l'eau qui la remplace descend par le cuissard le plus éloigné. Il en résulte dans le bouilleur un courant qui accumule les dépôts de tartre sur les tôles de coup de feu : des avaries dues à cette cause ont été plusieurs fois constatées.

La chaudière Montupet (fig. 67) est munie d'un déflecteur

dans le bouilleur au-dessus du foyer, et d'un tube de dégagement dans le corps supérieur, à l'autre extrémité, ce qui renverse le sens du courant. Une disposition analogue est prévue pour les chaudières semi-tubulaires (fig. 68). La figure 69 donne le détail du déflecteur.

La circulation dans les chaudières à tubes d'eau a été l'objet

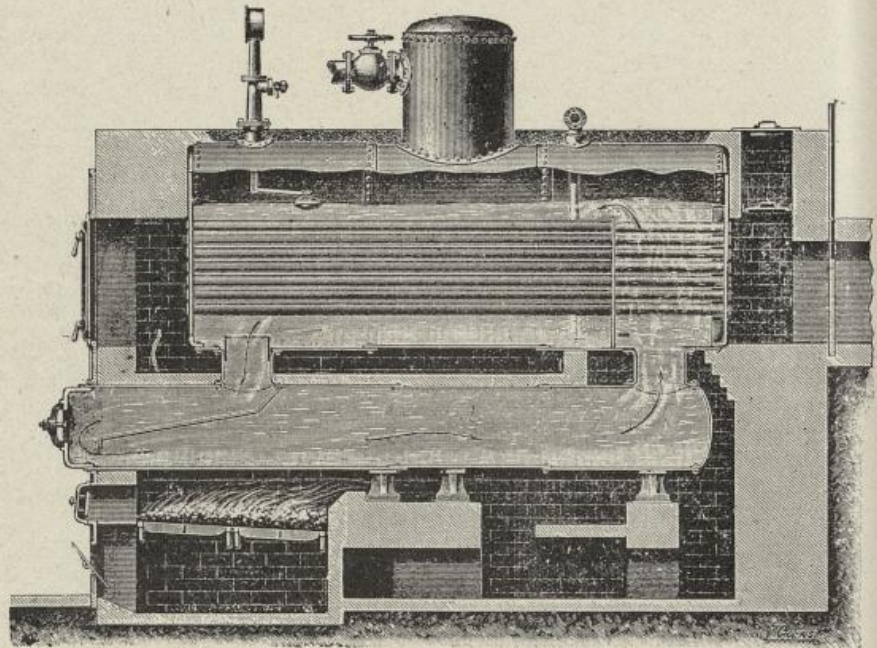


FIG. 68. — Chaudière semi-tubulaire, système Montupet, construite par Leroux et Gatinois. Le déflecteur dans le bouilleur, au-dessus du foyer, et la fausse plaque tubulaire dans le corps cylindrique déterminent une circulation, qui empêche les accumulations de dépôts sur la tôle de coup de feu.

de plusieurs études théoriques importantes. On consultera notamment Walckenaer dans la *Revue de mécanique* (1897, p. 143), Brillié dans le *Génie civil* (21 octobre 1899), Bellens, *Traité des chaudières à vapeur*.

Quel que soit l'intérêt de ces études, les règles pratiques de construction sont difficiles à formuler avec précision dans tous les cas. Notamment, dans une chaudière donnée, jusqu'à quelle

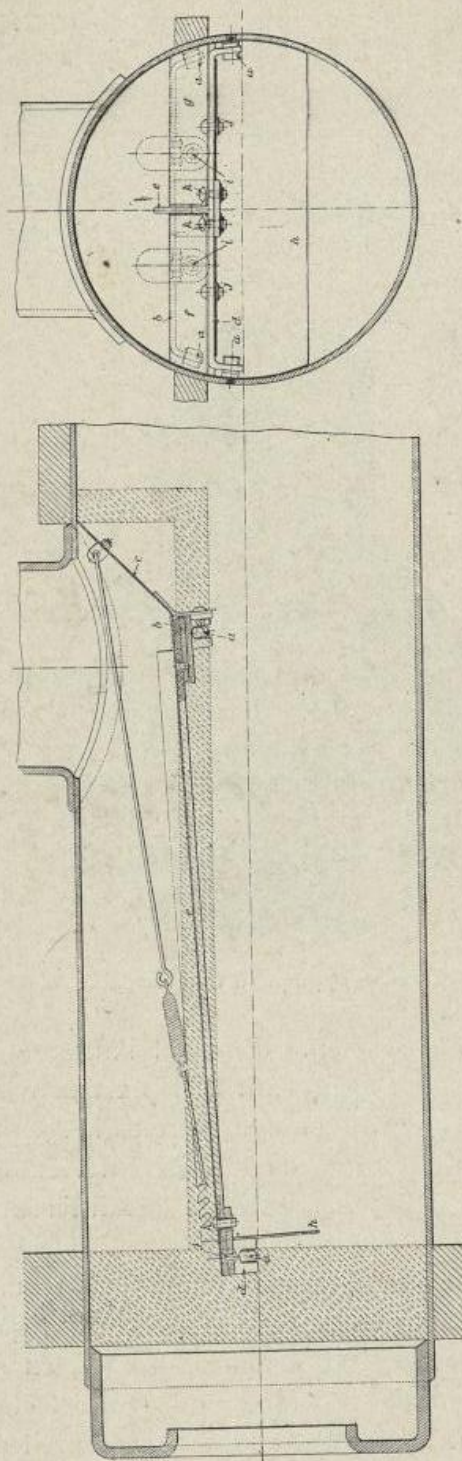


FIG. 69. — Appareil de circulation Montpet pour chaudières à bouilleurs et semi-tubulaires; montage du déflecteur et blocage de la maçonnerie. Le déflecteur repose sur 4 goujons; le petit panneau de droite est maintenu par un tirant à ressort.

valeur peut-on pousser la vaporisation sans risquer des avaries de tubes par arrêt ou renversement de la circulation ?

Une théorie très simple, mais dont l'exactitude est contestable, rend compte du phénomène, celle de la densité moyenne du fluide. En considérant un circuit fermé composé d'une branche horizontale supérieure, de deux branches verticales et d'une branche inférieure chauffée, on constate que l'une des

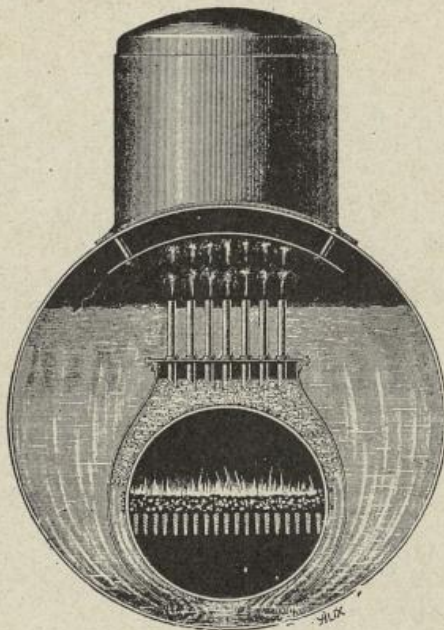


FIG. 70. — Emulseur Dubiau, appliqué à une chaudière à foyer intérieur.

branches verticales est pleine d'eau, et l'autre d'un mélange d'eau et de vapeur. En négligeant le déplacement relatif de la vapeur par rapport à l'eau, on considère cette seconde branche comme remplie d'un fluide de densité inférieure à celle de l'eau, et l'écoulement se fait en raison des différences de poids des deux colonnes.

Cette théorie est rigoureusement applicable quand le diamètre du tube de dégagement est assez petit pour que les bulles de vapeur, séparées par des pistons liquides, en occupent la section entière. L'*émulseur* Dubiau (fig. 70) est établi suivant ce principe : composé de tubes verticaux de petit diamètre, et

placé en un point où l'eau est mélangée de vapeur, il assure la circulation. Il ne semble pas que les applications de cet appareil, faites vers 1895, se soient continuées.

L'observation du mouvement de l'eau dans les chaudières offre un très grand intérêt; malheureusement les observations de ce genre, ou du moins celles dont les résultats ont été publiés, faites sur des générateurs en service, sont peu nombreuses. Celles de M. Brüll (1) ont porté sur une chaudière de l'espèce très répandue, présentant un faisceau de tubes parallèles à faible inclinaison. Un jaugeur Pitot est introduit dans un des tubes de la chaudière, suivant son axe : il traverse un bouchon spécial, substitué au tampon ordinaire placé devant le tube (fig. 71). Ce jaugeur Pitot se compose de deux tubes concentriques : le tube extérieur, percé de petits trous, reçoit la pression dans une direction perpendiculaire au sens du courant, c'est-à-dire la pression statique, tandis que le tube intérieur, ouvert en bout, reçoit cette pression augmentée ou diminuée de l'effet de la vitesse, suivant le sens du mouvement. Un manomètre indique la différence des pressions dans les deux tubes. Cette différence est fonction de la vitesse, mais, la densité moyenne du fluide n'étant pas connue, elle ne donne pas la valeur absolue de cette vitesse.

Monté dans un tube inférieur du faisceau, l'appareil a constamment indiqué une circulation normale, très sensible aux variations de l'état du feu : lors des chargements, la vitesse diminuait, pour se relever progressivement jusqu'à la charge suivante. Dans un tube situé à mi-hauteur du faisceau, la circulation a été constamment en sens inverse de la direction normale, avec des variations de vitesse du même ordre que dans le tube du bas, mais moins grandes. Enfin, dans un tube supérieur on a constaté une circulation inverse plus intense que la précédente.

Ces observations sont fort intéressantes, puisqu'elles mon-

(1) *Comptes rendus mensuels de la Société de l'industrie minérale*, nov.-déc. 1901, et *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, année 1902, 1^{er} sem., p. 103.

trent que la circulation ne se fait pas, comme on l'admet généralement, par tous les tubes dans le même sens, avec

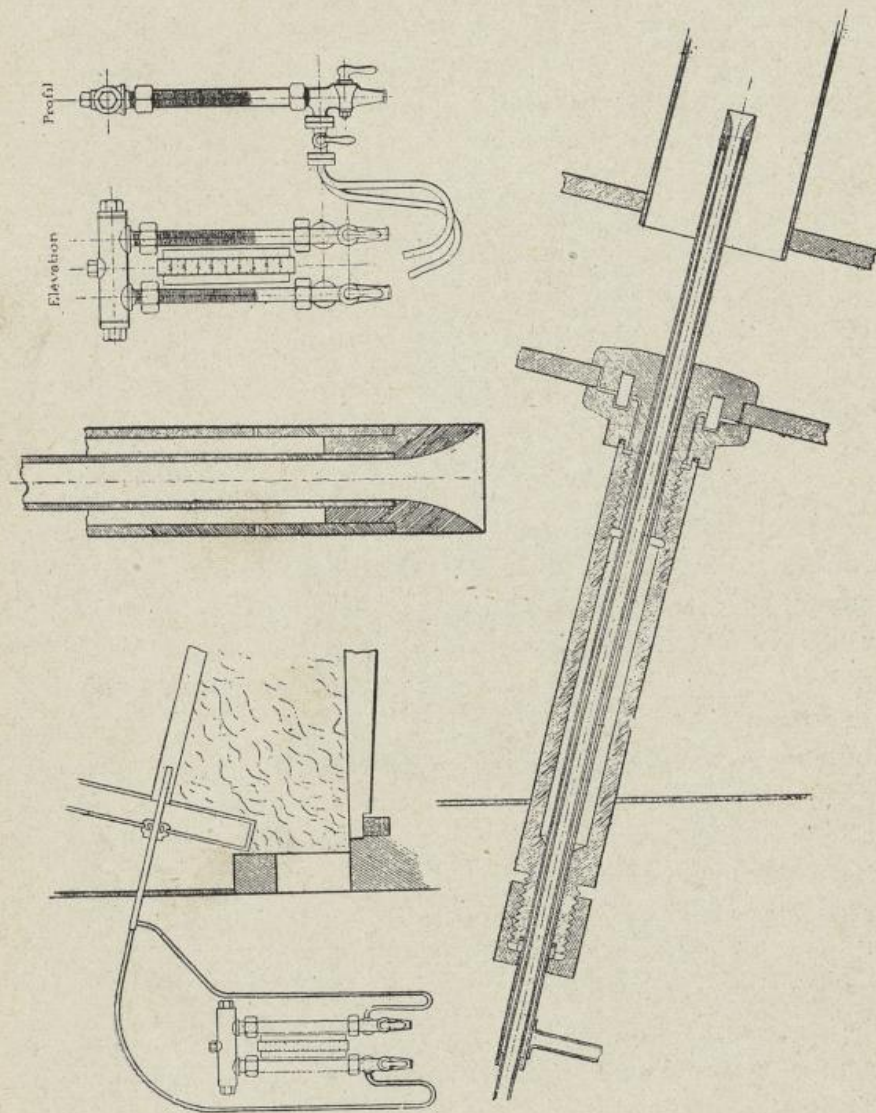


FIG. 74. — Appareil Brüll pour l'étude de la circulation dans les chaudières à tubes d'eau. Le manomètre différentiel est composé des pièces de deux indicateurs du niveau de l'eau dans les chaudières.

retour par le corps supérieur, mais que le retour se fait partiellement par les tubes du haut du faisceau. Cette circonstance ne facilite pas le dégagement des bulles de vapeur.

Des études expérimentales de ce genre, sur les chaudières des divers types, auraient une grande utilité.

23. **Réchauffage de l'eau d'alimentation.** — La température de l'eau dans une chaudière dépend de la pression : elle est souvent de 180° à 200° . Un écart d'une cinquantaine de degrés au moins entre la température des fumées et celle de l'eau étant nécessaire pour que la surface de chauffe soit utilisée industriellement, la chaudière ne peut guère refroidir les gaz au-dessous de 250° . Mais la température de l'eau d'alimentation, qui vient d'une source extérieure ou d'un condenseur, est comprise entre 0° et 50° . Il est donc illogique de l'envoyer directement dans la chaudière, où elle s'échauffe immédiatement, au lieu de profiter du grand écart de température qu'elle présente avec les fumées quittant la chaudière pour soutirer des calories à ces fumées par un chauffage *méthodique*, c'est-à-dire en faisant circuler en sens inverse les gaz qui se refroidissent et l'eau qui s'échauffe.

La disposition qui utilise le mieux la chaleur est, au point de vue théorique, la suivante : disposant d'une surface de chauffe totale donnée, la diviser en deux parties, l'une formant un réchauffeur avec circulation méthodique à contre-courants de l'eau et des gaz qui amène l'eau à la température de vaporisation, l'autre servant exclusivement à la formation de la vapeur. Cette répartition est représentée par le diagramme de Ser (fig. 72). Elle est difficile à réaliser en pratique, et ne se trouve guère que dans certains types de chaudières, peu répandus d'ailleurs, où cette division se fait automatiquement par suite de la circulation de l'eau dans une série de bouilleurs successifs.

Le plus souvent, le réchauffeur est un organe distinct de la chaudière, dans lequel on désire que jamais la vapeur ne puisse se former, ce qui en réduit l'effet utile. Quand on voit d'énormes réchauffeurs, aussi volumineux que la chaudière qu'ils desservent, ne pas même chauffer l'eau jusqu'à 100° , il semble que les deux appareils pourraient être combinés d'une manière plus efficace et moins coûteuse comme construction.

Le débit en poids des gaz qui circulent autour du réchauffeur est à peu près le double du débit de l'eau ; d'autre part, la chaleur spécifique de ces gaz est voisine du quart de celle de l'eau. Il en résulte que pour chauffer l'eau de un degré, les gaz doivent

altérerait le métal, qui n'est pas rafraîchi par la vapeur comme par l'eau et qui prend une température voisine de la moyenne arithmétique de celles des gaz et de la vapeur. On concilie ces deux conditions opposées, en montant le surchauffeur vers le milieu du parcours des gaz, plus près cependant du foyer que de la cheminée. Les directions respectives des courants de vapeur et de gaz chauds ont de l'importance à ce point de vue : si la circulation méthodique, à contre-courants, paraît théoriquement la meilleure pour bien utiliser la surface de chauffe, la circulation inverse, faisant arriver la vapeur dans la partie du surchauffeur la plus fortement chauffée, en ménage le métal. D'ailleurs la différence entre les nombres de calories transmises dans les deux sens de circulation, calculée suivant les formules usuelles, est en réalité insignifiante.

Le débit en poids des gaz chauds est à peu le double du débit de la vapeur (un kilogramme de houille donnant 16 kilogrammes de gaz et produisant 7 à 8 kilogrammes de vapeur); d'autre part, la chaleur spécifique à pression constante de ces gaz est la moitié de celle de la vapeur : il en résulte que la variation de la température est la même pour la vapeur et pour les gaz. Lorsque les courants des deux fluides sont en sens inverses, en chaque point du parcours, la différence des deux températures est constante. Soient θ_1 la température initiale de la vapeur, et θ_2 sa température finale; θ'_1 et θ'_2 les températures initiale et finale des gaz; Q le débit en poids de la vapeur, c , sa chaleur spécifique; S , la surface du surchauffeur.

$$\theta'_1 - \theta_2 = \theta'_2 - \theta_1.$$

La vapeur se surchauffe de $d\theta$, et, d'après les lois de la transmission sur un élément de surface infiniment petit,

$$Qcd\theta = k(\theta'_1 - \theta_2)ds,$$

k étant le coefficient de transmission.

En intégrant :

$$Qc(\theta_2 - \theta_1) = k(\theta'_1 - \theta_2)S.$$

La surface S nécessaire pour obtenir une surchauffe déterminée θ_2 est donc :

$$S = \frac{Qc}{k} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta'_1 - \theta_2}$$

Si les deux courants sont de même sens, avec les mêmes notations, la somme des températures, θ et θ' , de la vapeur et des gaz, est constante et égale à $\theta_1 + \theta'_1$.

$$Qcd\theta = k(\theta' - \theta) ds.$$

$$\text{Comme : } \theta + \theta' = \theta_1 + \theta'_1$$

$$\theta' - \theta = \theta_1 + \theta'_1 - 2\theta$$

d'où

$$\frac{Qc}{k} \frac{d\theta}{\theta_1 + \theta'_1 - 2\theta} = ds$$

$$\frac{Qc}{k} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\theta_1 + \theta'_1 - 2\theta} = S = \frac{Qc}{2k} \mathcal{L} \frac{\theta'_1 - \theta_1}{\theta_1 + \theta'_1 - 2\theta_2}$$

Avec les données numériques suivantes :

$$\theta_1 = 200^\circ$$

$$\theta_2 = 350^\circ$$

$$\theta'_1 = 800^\circ$$

d'où

$$\theta'_2 = 650^\circ$$

On trouve que la surface du surchauffeur doit être :
avec la circulation à contre-courants :

$$0,33 \frac{Qc}{k}$$

et, avec les courants parallèles :

$$0,346 \frac{Qc}{k}$$

L'avantage de la circulation à contre-courants est illusoire.

Le coefficient k n'est d'ailleurs pas connu exactement, de sorte que la détermination de la surface nécessaire présente quelque incertitude; les valeurs adoptées par divers constructeurs ne sont pas les mêmes.

Dans son traité sur *La vapeur d'eau surchauffée* (leçons faites en 1907-1908 à la Faculté des Sciences de l'Université de

Bordeaux), M. Marchis propose, pour expression du nombre de calories transmises en une heure à travers une surface d'un mètre carré, la formule :

$$k (\theta' - \theta),$$

θ' et θ étant les températures moyennes des gaz et de la vapeur, et k un coefficient variant de 12 à 16. D'autre part, M. Duquenne indique une surchauffe de 190° à 320° pour 200 kilogrammes de vapeur à l'heure par mètre carré dans un essai de surchauffeur. C'est une transmission de $200 \times 0,5 \times (320 - 190)$ ou 13.000 calories à l'heure. En supposant que la température moyenne des gaz chauds était de 800°, le coefficient k aurait la valeur 24.

A égalité de température des gaz chauds, et de surface, un surchauffeur reçoit moins de calories qu'un vaporisateur, puisque la température du métal y est beaucoup plus élevée.

Le surchauffeur ne doit pas donner lieu à une perte de pression importante, ce qui limite la vitesse admissible de la vapeur. Cette vitesse est souvent de 15 à 20 mètres par seconde; certains constructeurs la portent à 25 mètres.

La vapeur qui pénètre dans un surchauffeur doit être sèche, pour éviter les dépôts laissés par la vapeur humide.

25. Chauffage de l'air. — Même après le passage le long des surfaces d'un réchauffeur d'eau d'alimentation, les gaz de la combustion sont à une température souvent supérieure à 150°, et ils emportent une quantité appréciable de chaleur. On peut les en dépouiller en les faisant passer dans un réchauffeur d'air. Le chauffage de l'air peut paraître moins avantageux que le chauffage de l'eau, puisque le coefficient de transmission étant le même sur les deux faces de la tôle, l'écart de température entre les gaz chauds et la tôle est moindre avec l'air qu'avec l'eau. Par contre, le chauffage de l'air se fait à travers des surfaces métalliques très minces, plus faciles à installer que les réchauffeurs d'eau.

Le poids d'air à chauffer diffère peu du poids des gaz chauds rejetés; l'élévation de la température de l'air est à peu près

égale à l'abaissement de la température des gaz. Le calcul qui vient d'être donné pour les surchauffeurs s'applique donc aux réchauffeurs d'air. Avec des températures initiales et finales 170° et 110°, 15° et 75° pour les gaz et pour l'air, les formules indiquent comme surfaces nécessaires $0,63 \frac{Q_c}{k}$ avec la circulation à contre-courants, $0,74 \frac{Q_c}{k}$ avec la circulation parallèle dont le désavantage est ici marqué.

L'emploi de l'air chaud relève la température de combustion. Ce réchauffage, appliqué depuis longtemps à certaines chaudières marines, paraît se développer dans les installations fixes. Il rend indispensable le tirage forcé.

CHAPITRE V

PRINCIPAUX TYPES DE CHAUDIÈRES

26. **Classification.** — La forme la plus simple est le cylindre à fonds bombés ou hémisphériques, mais elle donne une surface de chauffe faible relativement au volume. On l'augmente par l'addition de *bouilleurs*, cylindres de diamètre plus petit, placés en dessous et reliés par des *cuissards* au corps cylindrique. Des *carneaux* en maçonnerie conduisent les gaz chauds autour des bouilleurs et du corps cylindrique.

Le foyer de la chaudière *de Cornouailles* est à l'entrée d'un tube qui traverse le corps cylindrique suivant sa longueur. Comme les conditions de résistance imposent une limite assez basse au diamètre de ce tube-foyer, on dispose deux tubes parallèles dans la chaudière *de Lancashire*.

Ces divers appareils se rangent dans la classe des *chaudières à grands corps*, avec foyers *extérieurs* ou foyers *intérieurs*.

La disposition tubulaire, où des tubes, parcourus par les gaz chauds, traversent l'eau à chauffer, augmente la surface de chauffe des générateurs, avec un poids et un encombrement donnés. Les appareils établis selon ce principe, dits *à tubes de fumée*, sont d'un emploi très étendu, surtout pour les locomotives et les bateaux.

Une troisième classe est celle des chaudières à tubes d'eau, chauffés par leur surface extérieure.

Dans la *Description des machines et procédés spécifiés dans les brevets d'invention, de perfectionnement et d'importation*, publiée en 1818 à Paris, on trouve (partie II, p. 252) la mention suivante :

« 24 août 1793, brevet d'importation de 15 ans, pour des appareils dits *fourneaux à chaudières...*, au S^r Barlow, des Etats-Unis.

« L'objet de ces appareils est de présenter à l'action du feu la plus grande étendue de surface possible. Pour cela on fait passer l'eau dans des tuyaux ou cylindres, et ceux-ci dans le foyer même; on le peut encore en faisant passer la flamme du foyer à travers de petits tuyaux répandus dans l'eau à échauffer. »

Un dessin, joint à cette description, figure une chaudière à tubes d'eau bien complète. Pour les tubes à fumée, le dessin ne montre qu'un serpentín entre le foyer et la cheminée.

Comme il arrive dans la plupart des classifications, certaines chaudières se rattachent à des classes différentes.

Les chaudières de construction moderne sont remarquables par leurs grandes dimensions et leur pression de marche élevée. Les unités de 1.000 mètres carrés de surface de chauffe ne sont pas rares dans les grandes stations centrales pour la production de l'électricité, et de plus en plus on augmente cette surface. La pression atteint et dépasse 20 kilogrammes par centimètre carré.

Les descriptions qui suivent sont nécessairement limitées à quelques types choisis dans l'immense variété des chaudières existantes. De ce qu'un type n'est pas mentionné, il ne faut pas conclure qu'il est inférieur à d'autres qui sont décrits.

27. Chaudières à grands corps, avec foyers extérieurs. —

Le type ancien de la chaudière à bouilleurs a été fort employé en France, et se voit encore fréquemment en service. La conduite en est facile, la grande masse d'eau qu'elle renferme constituant un accumulateur de chaleur qui pare aux inégalités de la combustion et de la dépense de vapeur. Par contre, l'appareil est lourd et encombrant.

Les bouilleurs, chauffés sur toute leur surface, doivent être constamment pleins d'eau; il importe qu'il ne puisse s'y former de chambre de vapeur; les cuissards doivent être disposés en conséquence et prendre la vapeur aux points les plus hauts. Par suite du défaut d'horizontalité de la génératrice supérieure des viroles du bouilleur, ou de la mauvaise position des cuissards, les avaries de tôle par cantonnement de vapeur sont

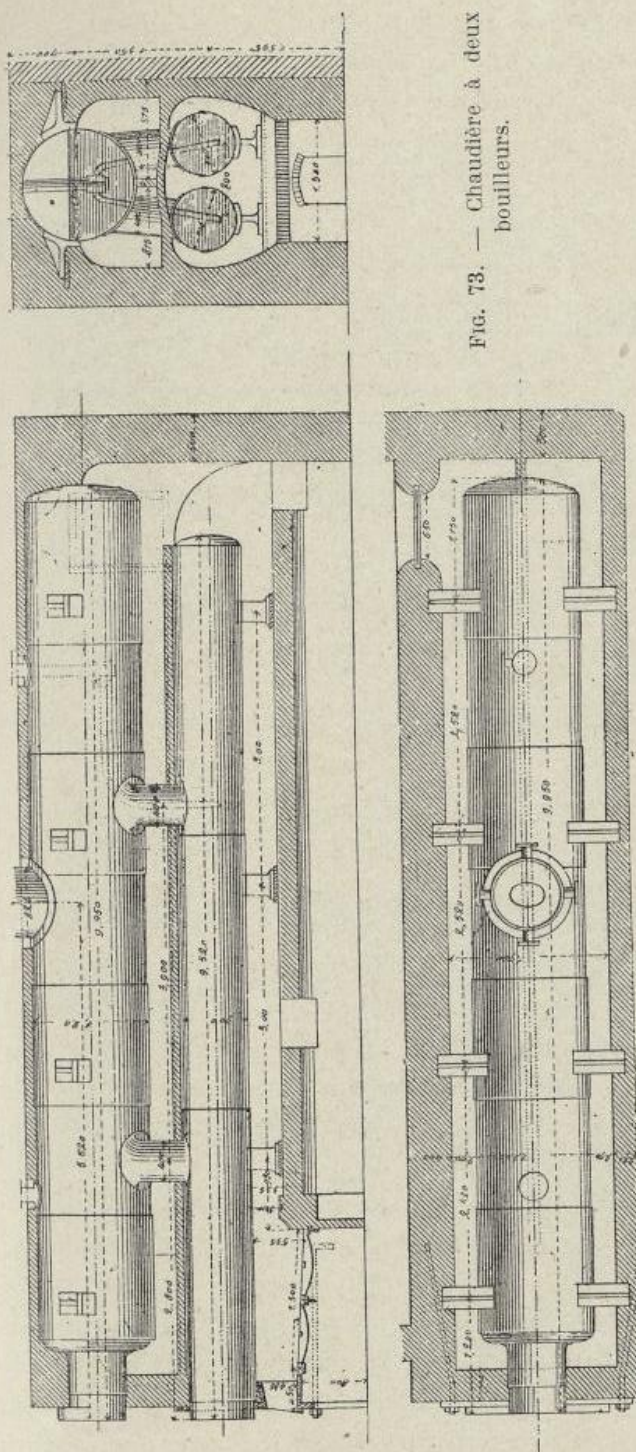


Fig. 73. — Chaudière à deux bouilleurs.

assez fréquentes. La disposition des maçonneries contribue à l'avarie : lorsqu'une voûte unique recouvre les bouilleurs, sans les toucher, la partie supérieure en est fortement chauffée. Il

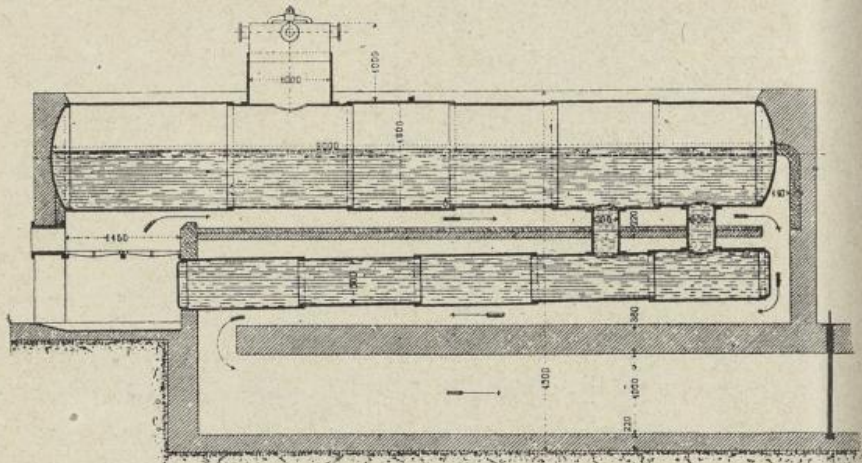


FIG. 74. — Chaudière à bouilleurs, avec corps cylindrique directement chauffé.

n'en est pas de même avec de petites voûtes appuyées sur les bouilleurs.

Il y a d'habitude deux bouilleurs (fig. 73), quelquefois un

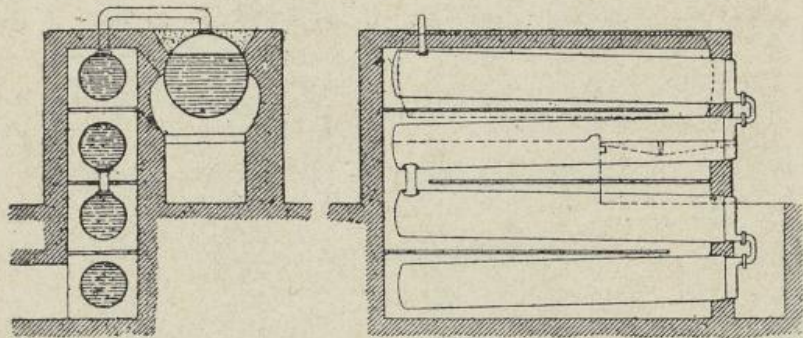


FIG. 75. — Chaudière à bouilleurs latéraux, servant de réchauffeurs.

seul ou trois. Placés au-dessus de la grille, leur partie antérieure constitue la surface de chauffe directe. Après avoir circulé autour des bouilleurs, les gaz chauds sont conduits par un carneau le long d'un des côtés du corps cylindrique, puis

reviennent sur l'autre côté, parcourant ainsi trois fois la longueur de la chaudière.

Quelquefois les bouilleurs sont plus courts que le corps cylindrique, directement chauffé (fig. 74), ce qui réduit la hauteur du massif. Les bouilleurs peuvent aussi être placés latéralement (fig. 75); successivement parcourus par l'eau, les premiers de ces bouilleurs sont alors des réchauffeurs.

Les parois extérieures et les cloisons intérieures, en maçonnerie, canalisent les gaz. Il est difficile d'éviter les fissures dans

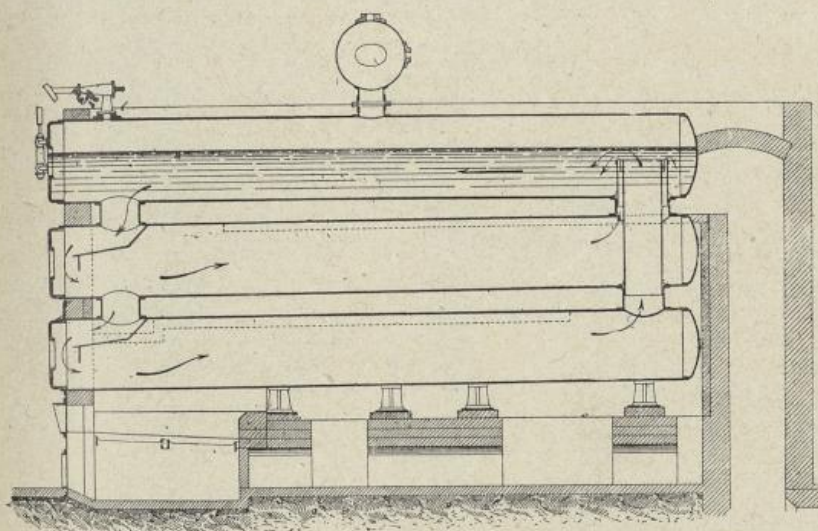


FIG. 76. — Chaudière multibouilleurs, construite par Leroux et Gatinois : coupe longitudinale. Cette chaudière est formée de deux ou trois rangées verticales de bouilleurs, munis de l'appareil Montupet pour la circulation.

ces maçonneries, au bout de quelque temps de service. Ces fissures donnent lieu à des rentrées d'air extérieur et à des passages directs de gaz chauds vers la cheminée.

Les chaudières dites *multibouilleurs* (fig. 76) se composent de deux ou trois rangées verticales de bouilleurs superposés.

28. Chaudières à grands corps avec foyers intérieurs. —

Un corps cylindrique avec foyers intérieurs donne une surface de chauffe analogue à celle d'une chaudière à bouilleurs, mais avec un moindre encombrement. Par contre, la surface de

grille est forcément restreinte, le volume de la chambre de combustion est limité : aussi cette chaudière ne convient que pour des combustibles qui brûlent facilement, à moins qu'on ne la munisse d'un avant-foyer en briques.

Au point de vue de la résistance du cylindre, les conditions ne sont pas les mêmes pour une pression extérieure et pour une pression intérieure : les tubes-foyers sont raidis soit par le profil ondulé (foyers des chaudières marines), soit par les collerettes Adamson (fig. 77).

La chaudière de Cornouailles a un seul foyer : sortis du

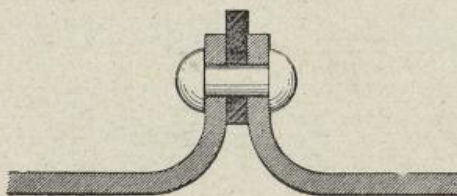


FIG. 77. — Joint Adamson, pour assemblage de viroles de foyers cylindriques. La rondelle intermédiaire sert pour le matage.

tube-foyer, les gaz chauds parcourent deux carneaux autour du corps cylindrique (fig. 78).

La chaudière de Lancashire (fig. 79 et 80) a deux foyers parallèles (1).

La chaudière Galloway (fig. 81) dérive de la précédente : les deux tubes se réunissent en un seul de section ovale, traversé par une série de tubes tronconiques qui le raidissent et augmentent la surface de chauffe (fig. 82). En outre, ces tubes provoquent la circulation de l'eau, ce qui en évite la stagnation au fond de la chaudière. Lors de l'allumage des chaudières à foyer intérieur, l'eau peut rester longtemps froide à la partie inférieure, d'où résulte une déformation du cylindre par dilatations inégales.

(1) Une intéressante étude sur les chaudières de Lancashire, par M. BOSWELL, a paru dans les *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, 1891, p. 484.

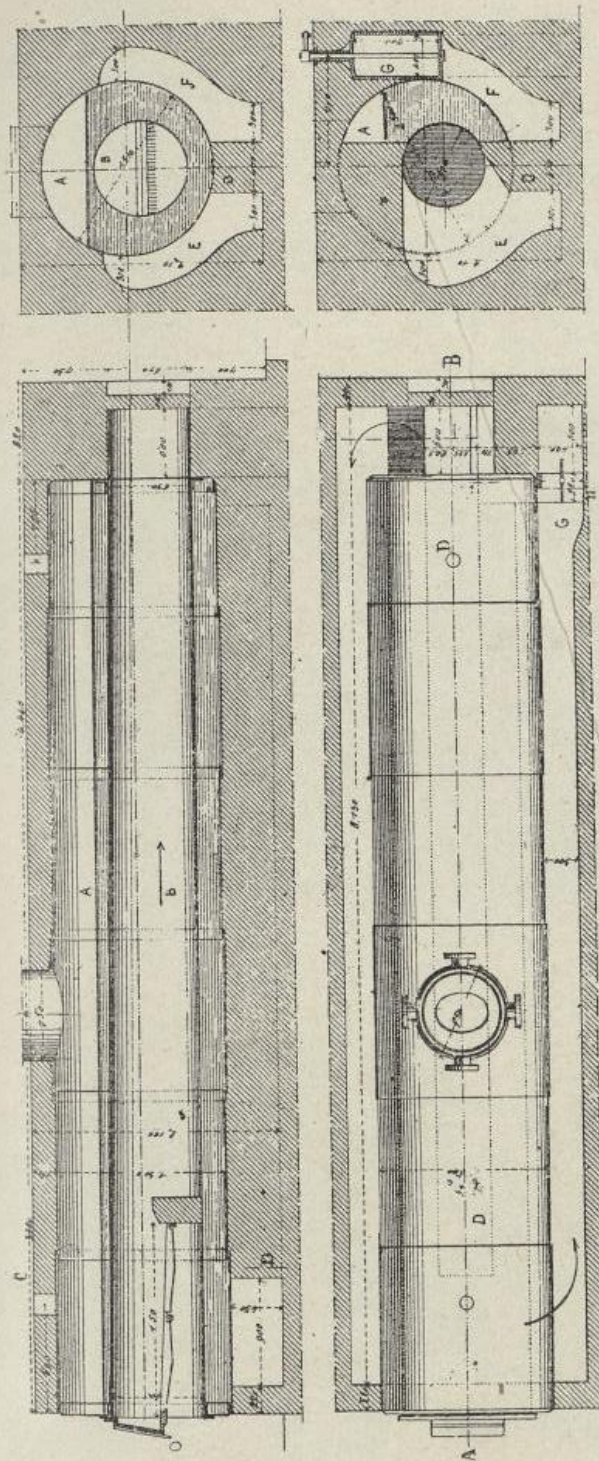


Fig. 78. — Chaudière de Cornouailles; coupe longitudinale, plan et coupes transversales. Les gaz parcourent successivement le tube foyer B, les carneaux E et F; en G, registre tournant.

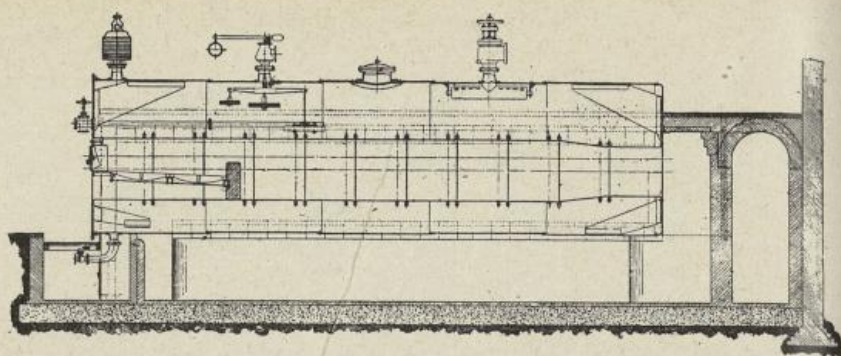


FIG. 79. — Chaudière de Lancashire, à deux tubes foyers; coupe longitudinale par l'un de ces tubes. Les gaz chauds font un trajet aller et retour à l'extérieur du corps cylindrique.

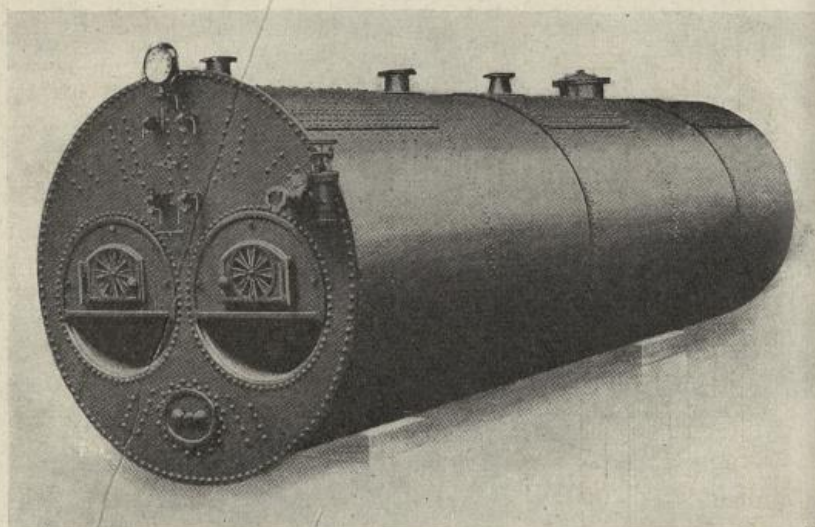


FIG. 80. — Chaudière de Lancashire; vue extérieure.

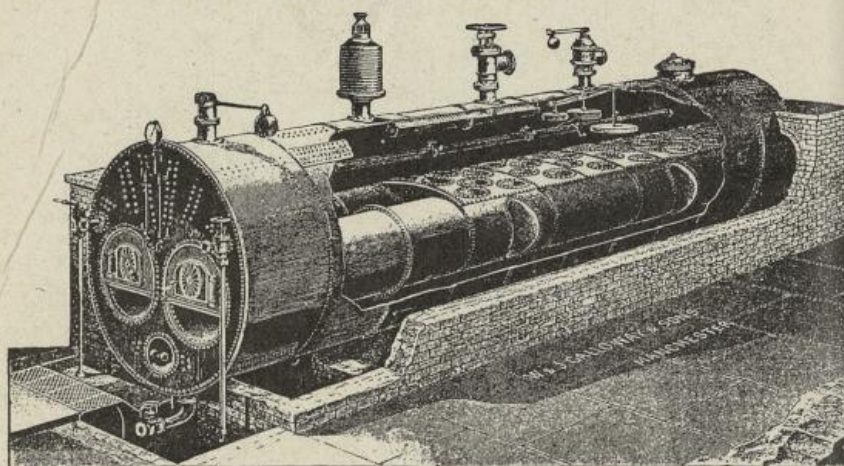


FIG. 81. — Chaudière Galloway.

Voici les dimensions principales de quelques types de chaudières Galloway, d'après le constructeur :

N ^{os}	LONGUEUR	DIAMÈTRE	N. DE TUBES tron- coniques	SURFACE de chauffe	SURFACE de grille	DIAMÈTRE extérieur des foyers	POIDS pour un timbre de	
							8 kg. 5	12 kg.
	m.	m.		m ²	m ²	m.	kg.	kg.
1	4,260	1,670	6	27,87	1,34	0,639	7,100	»
10	7,310	1,980	18	62,70	2,55	0,780	12,000	14,700
21	9,140	2,740	25	121,70	3,99	1,110	25,900	32,000

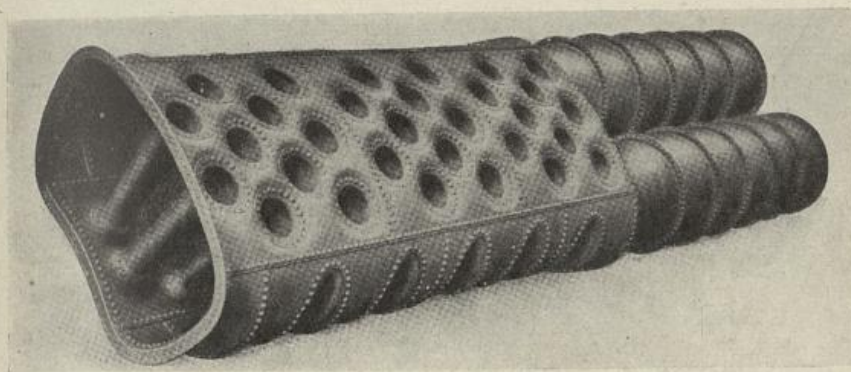


FIG. 82. — Système intérieur de la chaudière Galloway : deux tubes foyers, chambre aplatie et tubes tronconiques.

Ces chaudières sont prévues pour des combustions horaires, par mètre carré de grille, de 95 à 140 kilogrammes de charbon demi-gras, au tirage naturel, avec cheminée de 50 mètres.

29. Chaudières à tubes de fumée. — Marc Séguin appliqua aux locomotives la chaudière à tubes de fumée (fig. 83), objet du brevet n° 3744 du 22 février 1828 :

« Brevet d'invention de dix ans aux sieurs Séguin et Cie, à Lyon, pour la construction perfectionnée d'une chaudière à tubes creux. »

« La vapeur se produisant en raison de la surface de chauffe, on a pensé qu'un moyen simple et tenant le moins d'espace possible était de faire une chaudière tubulaire.

« Celle inventée par nous se compose donc, comme on le voit

dans le dessin, d'un nombre plus ou moins grand de tubes qui sont traversés par le calorique, et ces tubes, entourés d'eau, forment une très grande surface de chauffe. »

Cette chaudière est constamment employée, depuis l'origine,

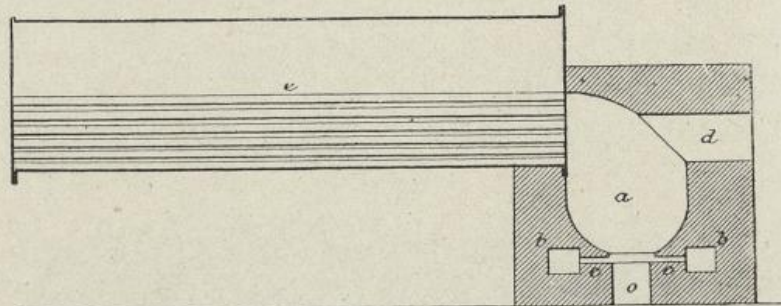


FIG. 83. — Chaudière à vapeur, par Marc Séguin (d'après la spécification du brevet).

a, fourneau alimenté par un ventilateur ou autrement; *b*, chambres d'air; *c*, tuyaux amenant l'air au foyer; *d*, porte pour alimenter le fourneau; *e*, tuyaux calorifères; *o*, foyer.

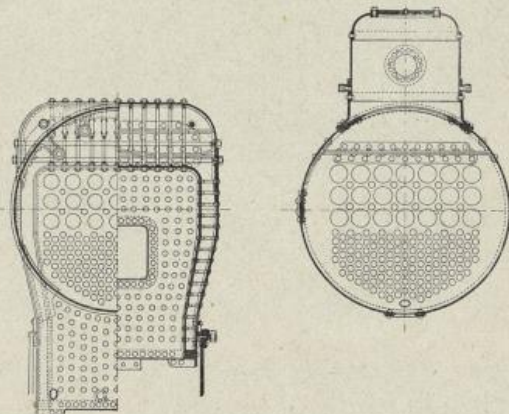


FIG. 84. — Chaudière de locomotive; coupes transversales.
Les gros tubes à fumée contiennent le surchauffeur.

pour les locomotives. Les types, assez nombreux, de chaudières à tubes d'eau pour ces machines n'ont eu que des applications restreintes.

A titre d'exemple, les figures 84 et 85 représentent une chaudière de locomotive de modèle courant. Cette même chaudière sert parfois à des installations fixes; mais, pour cet emploi, la

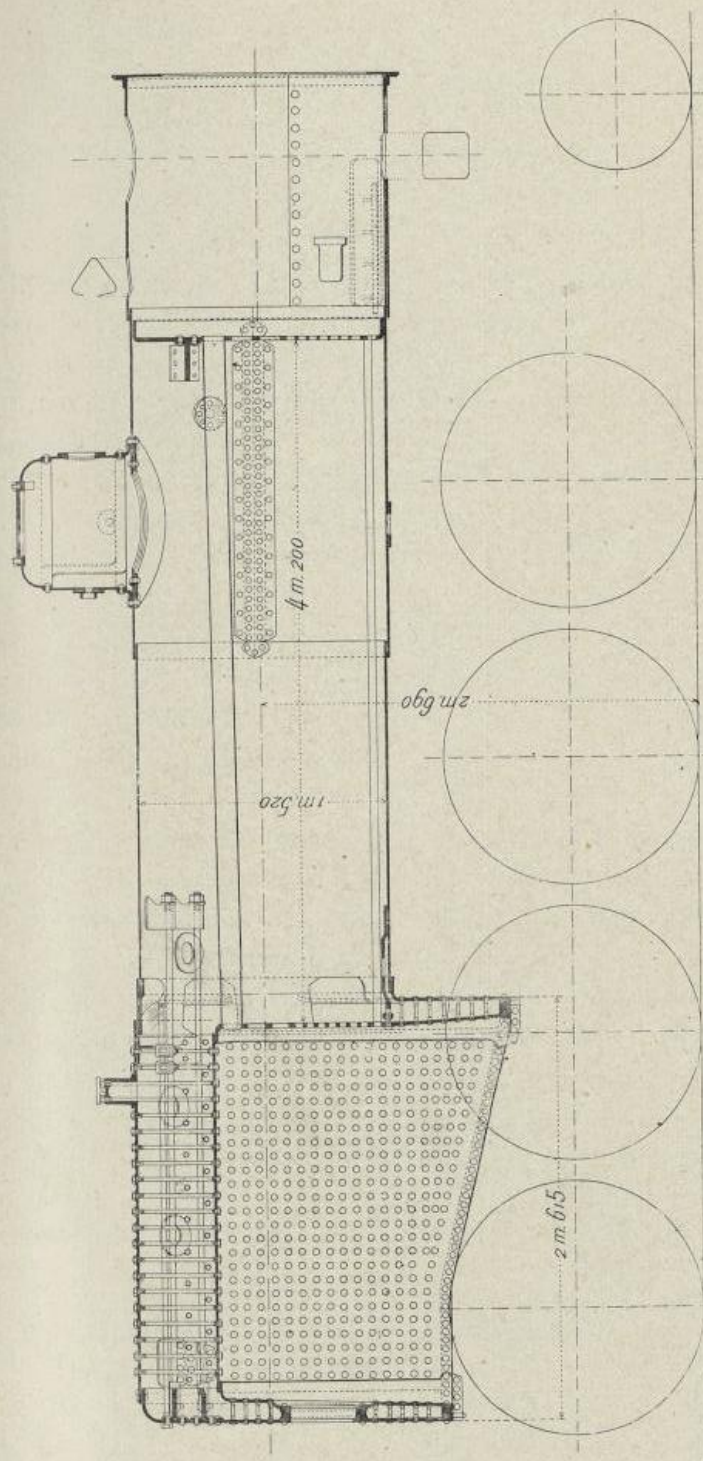


FIG. 85. — Chaudière de locomotive; coupe longitudinale.

Parties intérieures : foyer, tubes ; parties extérieures : boîte à feu, corps cylindrique, plaque tubulaire de boîte à fumée.

complication de ses formes n'est guère justifiée. Le type convient mieux pour les locomobiles.

La chaudière marine, avec foyers cylindriques et tubes en retour (fig. 86), dite chaudière écossaise, a reçu d'innombrables applications; elle est encore très fréquemment construite. Le nombre des foyers s'élève jusqu'à quatre.

Parmi les générateurs fixes à tubes de fumée, un des plus employés est le type dit *semi-tubulaire* (fig. 87 et 88), dérivé de la chaudière à bouilleurs, dont le corps cylindrique est traversé par des tubes. La même surface de chauffe s'obtient avec une moindre longueur de la chaudière. La circulation des gaz chauds est établie de deux manières différentes : d'abord autour des bouilleurs, puis dans les tubes et autour du corps cylindrique, ou bien autour du corps cylindrique et en dernier lieu dans les tubes.

La chaudière Tischbein (fig. 89) est composée de deux corps superposés, avec foyer dans le corps inférieur et tubes dans le corps supérieur. Le corps inférieur n'est pas complètement rempli d'eau, mais il a, comme le corps supérieur, une chambre de vapeur, d'où elle se dégage par un tuyau de communication avec la chambre supérieure. L'alimentation se fait normalement dans le corps supérieur, d'où l'eau déborde dans l'inférieur, pour lequel on a prévu néanmoins une alimentation de secours.

Le foyer intérieur, avec tubes en retour, est amovible dans la chaudière Weyher et Richemond (fig. 90 et 91) : tout le système intérieur est libre dans la *calandre* et n'adhère qu'à la tôle de façade; rien n'en gêne la dilatation, et la fixation se faisant par une couronne de boulons facilement démontables, on peut sortir de la chaudière le foyer et ses tubes (fig. 92), après avoir enlevé la tôlerie légère de la boîte à fumée, rapportée contre la façade.

Les tubes sont mandrinés dans les plaques à l'aide du *dudgeon*, les trous étant en général légèrement coniques vers l'extérieur : on complète l'assemblage en rabattant la partie qui reste en saillie sur la plaque (fig. 93). Souvent on fait usage de

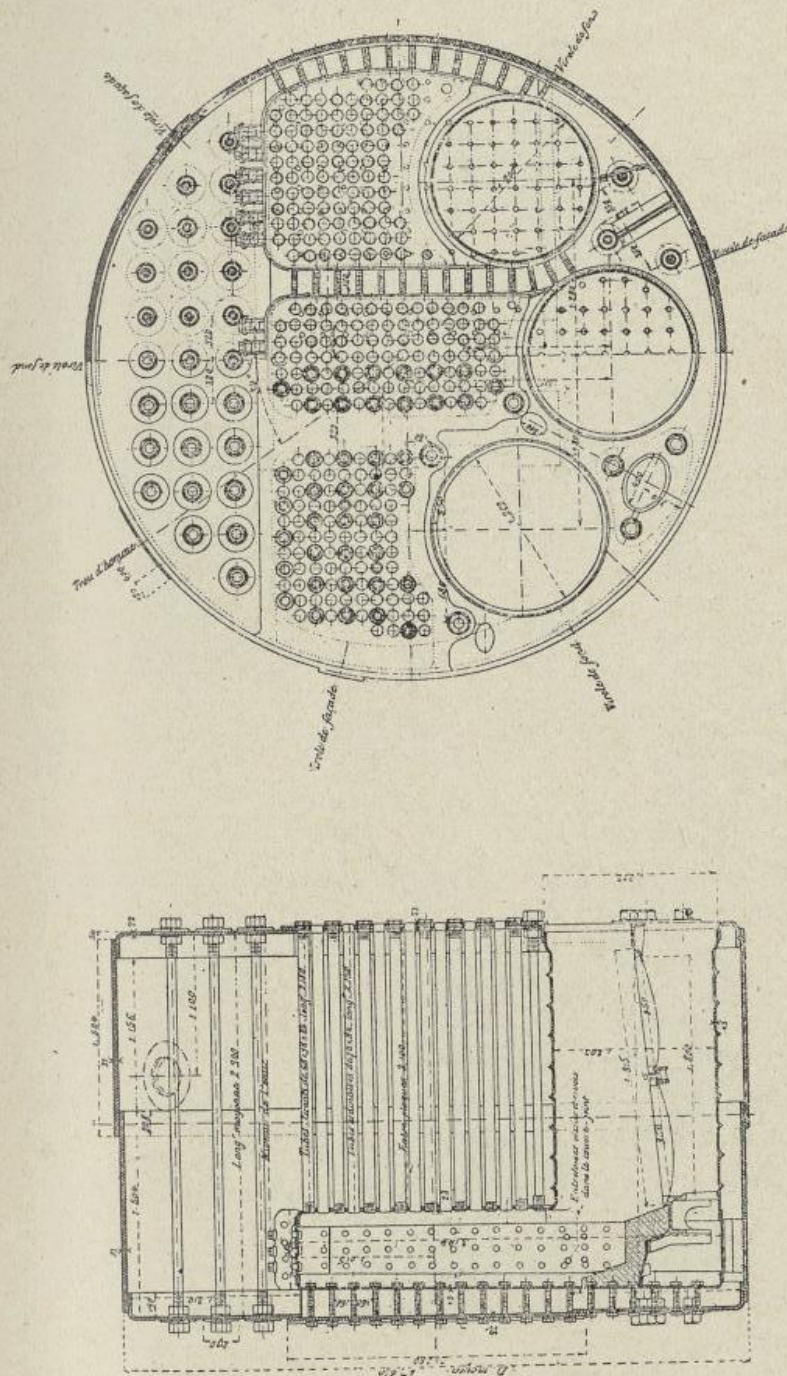


FIG. 86. — Chaudière marine à trois foyers, avec tubes en retour; coupe longitudinale; demi-coupe transversale et demi-élévation (sans boîtes à fumée, enveloppes et accessoires).

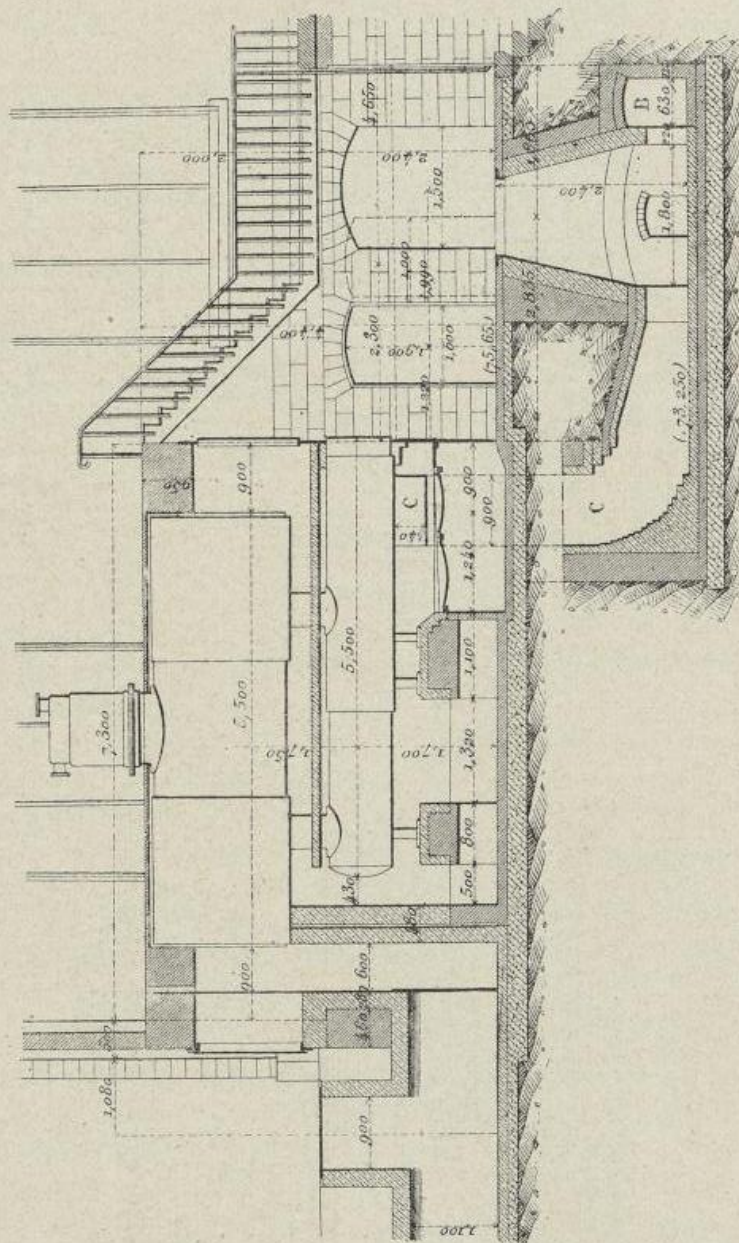
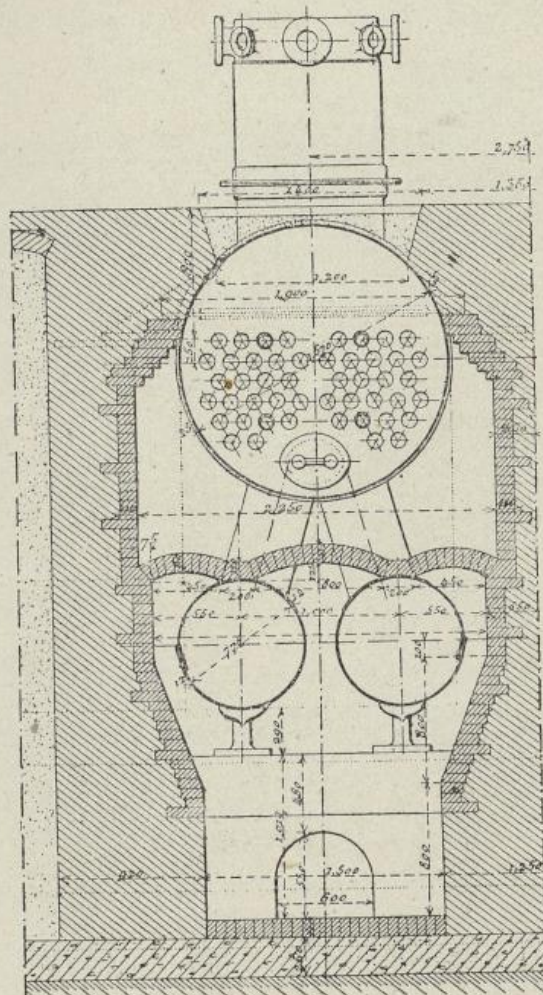


FIG. 87. — Chaudière semi-tubulaire chauffée avec des copeaux et déchets de bois (ateliers de la Compagnie des chemins de fer de l'Est, à Romilly); coupe longitudinale. Les produits de la combustion débouchent, par le carneau C, au-dessus de la grille, qui est conservée.

Les tubes sont en acier doux. Anciennement on a fait un



grand usage de tubes en laiton, sans doute parce qu'on se les procurait plus facilement que les tubes en fer ou en acier. Le laiton a d'ailleurs l'inconvénient d'être cassant au rouge sombre, ce qui avait conduit à rabouter en cuivre rouge, du côté du foyer, les tubes de locomotives.

Les ailettes des tubes Serve (fig. 94) augmentent la surface de chauffe en contact avec les gaz chauds. D'après quelques essais, la surface de chauffe supplémentaire ainsi obtenue serait aussi efficace qu'une surface lisse; d'autre part, certains ingénieurs estiment qu'on ne doit la compter que pour la moitié de sa

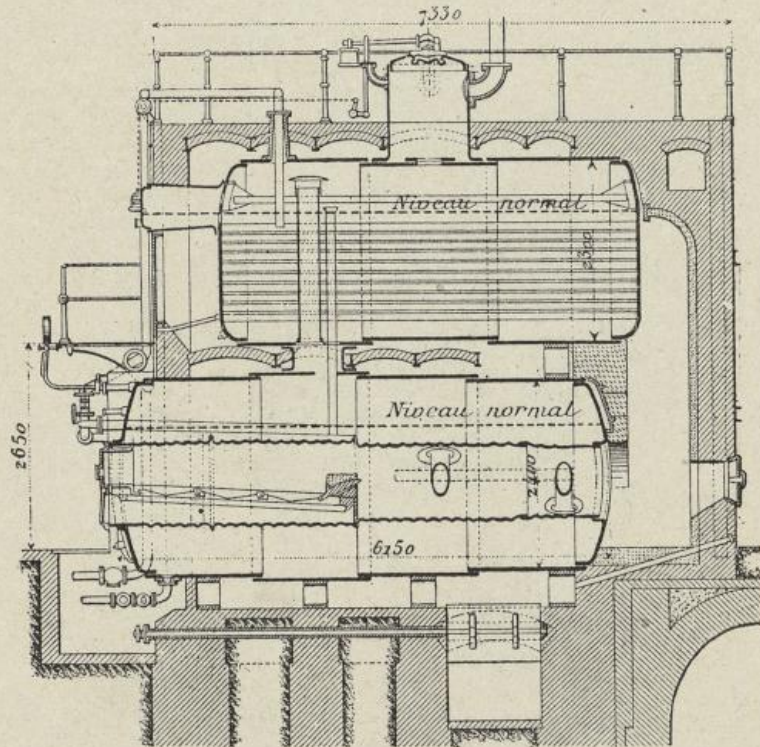


FIG. 89. — Chaudière Tischbein, à deux niveaux. L'alimentation se fait normalement dans le corps supérieur, d'où l'eau déborde dans l'inférieur. La surface entière de la chaudière est en contact avec les gaz chauds.

valeur. Ces divergences d'opinion sont une nouvelle marque de notre connaissance incertaine des lois de la transmission de la chaleur à travers les tôles des chaudières, et surtout de la difficulté d'appliquer dans les cas variés de la pratique les résultats obtenus dans les expériences spéciales.

Les diamètres intérieurs des tubes, qui descendent à 45 et 40 millimètres pour les locomotives, s'élèvent à 80, 100, 120 mil-

limètres dans les grandes chaudières fixes. Avec les tubes à ailettes, on ne descend guère au-dessous de 70 millimètres pour éviter une trop rapide obstruction par les escarbilles.

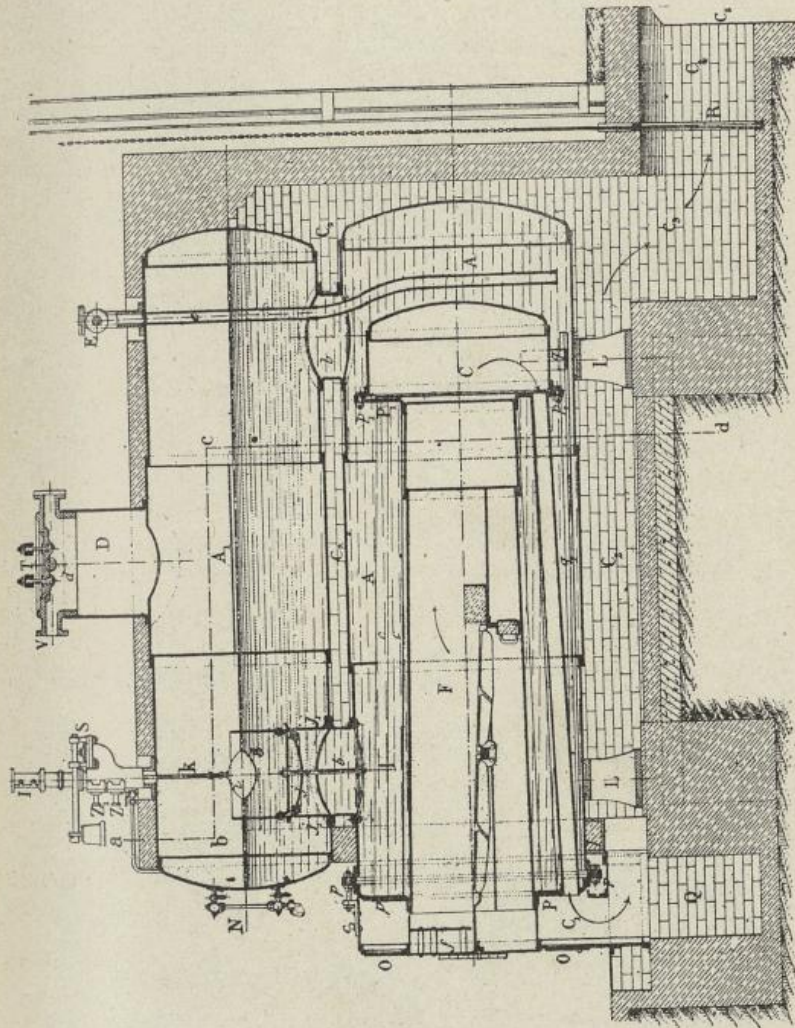


FIG. 90. — Chaudière Weyher et Richmond, à foyer amovible; coupe longitudinale

Le tube démontable Bérendorf s'assemble par deux portées coniques de même sens. Par suite de cette disposition, le déboîtement du tube serait facile sous la poussée due à la pression,

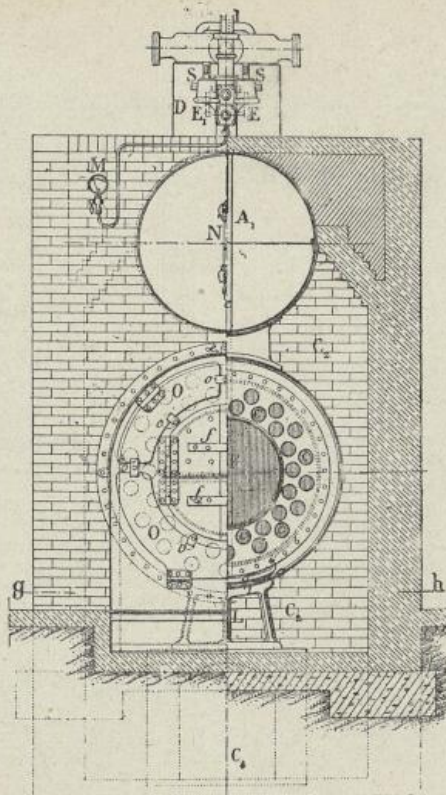


FIG. 91. — Chaudière Weyher et Richmond, à foyer amovible; demi-coupe transversale et demi-élévation transversale.

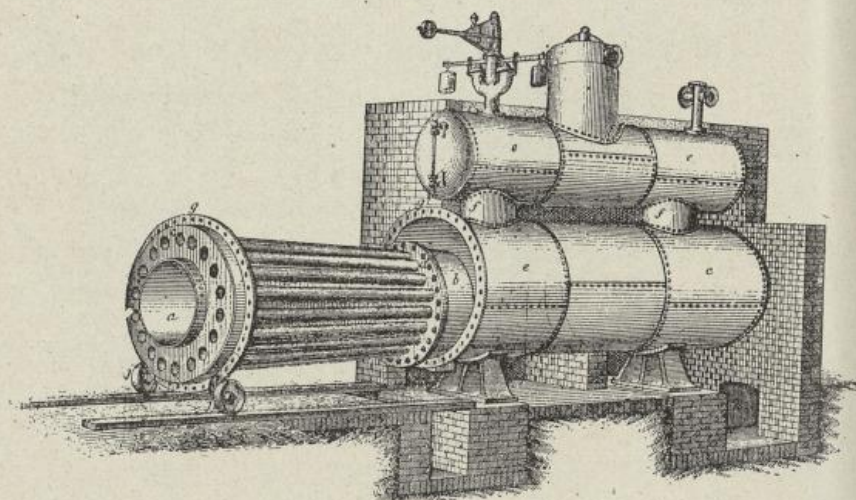


FIG. 92. — Chaudière tubulaire, à foyer amovible, de la Société de Pantin. Vué avec le foyer démonté et sorti de la calandre *c a*, foyer cylindrique, contenant la grille; *b*, boîte à feu, d'où partent les tubes en retour, entourant le foyer et débouchant dans une boîte à fumée extérieure (non figurée sur le dessin), fixée contre la façade de la chaudière.

étant donnée la différence de diamètre des deux trous. Une plaque de garde extérieure s'oppose à ce déboîtement.

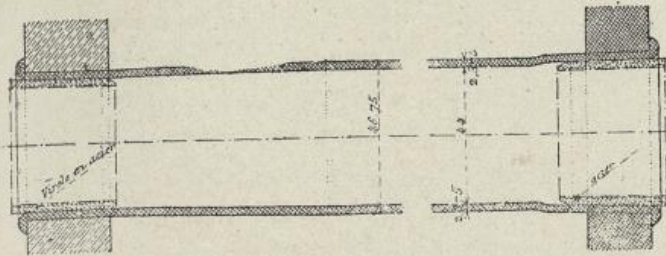


FIG. 93. — Tube à fumée, dudgeonné et rivé, avec viroles.

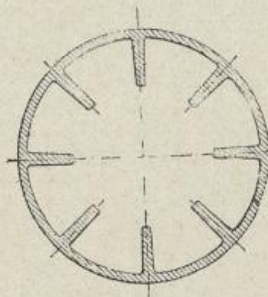


FIG. 94. — Tube Serve, à ailettes. Les ailettes sont enlevées aux deux extrémités pour permettre le mandrinage.

30. Chaudières à tubes d'eau. — En chauffant extérieurement les tubes, on peut diminuer le volume d'eau pour une surface de chauffe déterminée, et réduire ainsi les dégâts d'une explosion. Toutefois, le nom d'*inexplosibles* donné à certaines chaudières à tubes d'eau n'est pas complètement justifié, car les nombreux assemblages de tubes, ainsi que les tubes eux-mêmes, ont donné lieu à des ruptures dangereuses pour le personnel.

Quoi qu'il en soit, ces chaudières ont de sérieux avantages, et on n'en emploie plus guère d'autres pour les chaufferies à grande production. Comme le diamètre des tubes ne dépasse guère 120 millimètres, de faibles épaisseurs peuvent supporter de fortes pressions.

Au point de vue de l'obstruction, les tubes d'eau présentent un avantage sur les tubes à fumée : ceux-ci peuvent se remplir

de cendres, tandis qu'elles ne peuvent se déposer que sur la partie supérieure des tubes à eau horizontaux.

On range en diverses catégories les types très variés de ces chaudières : l'une comprend celles dites à circulation limitée, dont les dispositions ne se prêtent pas à une circulation active de l'eau; une autre, très importante, les chaudières à tubes montés en parallèle, chaque tube recevant ou devant recevoir un courant d'eau individuel; ces tubes sont le plus souvent modérément inclinés, mais, dans certaines chaudières, voisins de la verticale. Une catégorie bien caractérisée est celle des chaudières à tubes fermés à une extrémité, avec tube intérieur de circulation. Enfin, au lieu de tubes rectilignes, de diamètre assez fort, voisin du décimètre, certaines chaudières comportent des tubes de petit diamètre, qui se prêtent au cintrage.

Les pièces de communication, dans lesquelles se fixent les tubes, présentent des dispositions variées. On en trouvera la description dans un mémoire sur *Les assemblages dans la construction des chaudières à tubes d'eau* (*Annales des mines*, 9^e série, t. XIX, p. 70, et *Revue de mécanique*, juin 1901, p. 644), par M. Walckenaer, qui en a étudié la résistance, en examinant les accidents qu'ils ont causés.

31. Chaudières à tubes d'eau, à circulation limitée. — La chaudière Belleville est le type bien connu de ce genre. Créée vers 1850, elle n'a pas cessé d'être construite, depuis cette époque; elle a reçu des perfectionnements de détail et continue à être employée avec succès. Une modification assez importante a été récemment apportée aux dispositions primitives. ^{ou ?}

L'ancienne chaudière, dont de nombreux exemplaires sont depuis longtemps en service, est composée d'éléments juxtaposés, chaque élément, qui comprend deux rangées de tubes superposés, formant un circuit continu (fig. 95). Le premier tube, au bas de chaque élément, part d'un *collecteur d'alimentation* transversal; le dernier tube, en haut de l'élément, débouche dans un *collecteur supérieur*, séparateur d'eau et de vapeur. Un *tube de retour*, extérieur, relie le collecteur d'alimentation au collecteur supérieur. Une *colonne de niveau*

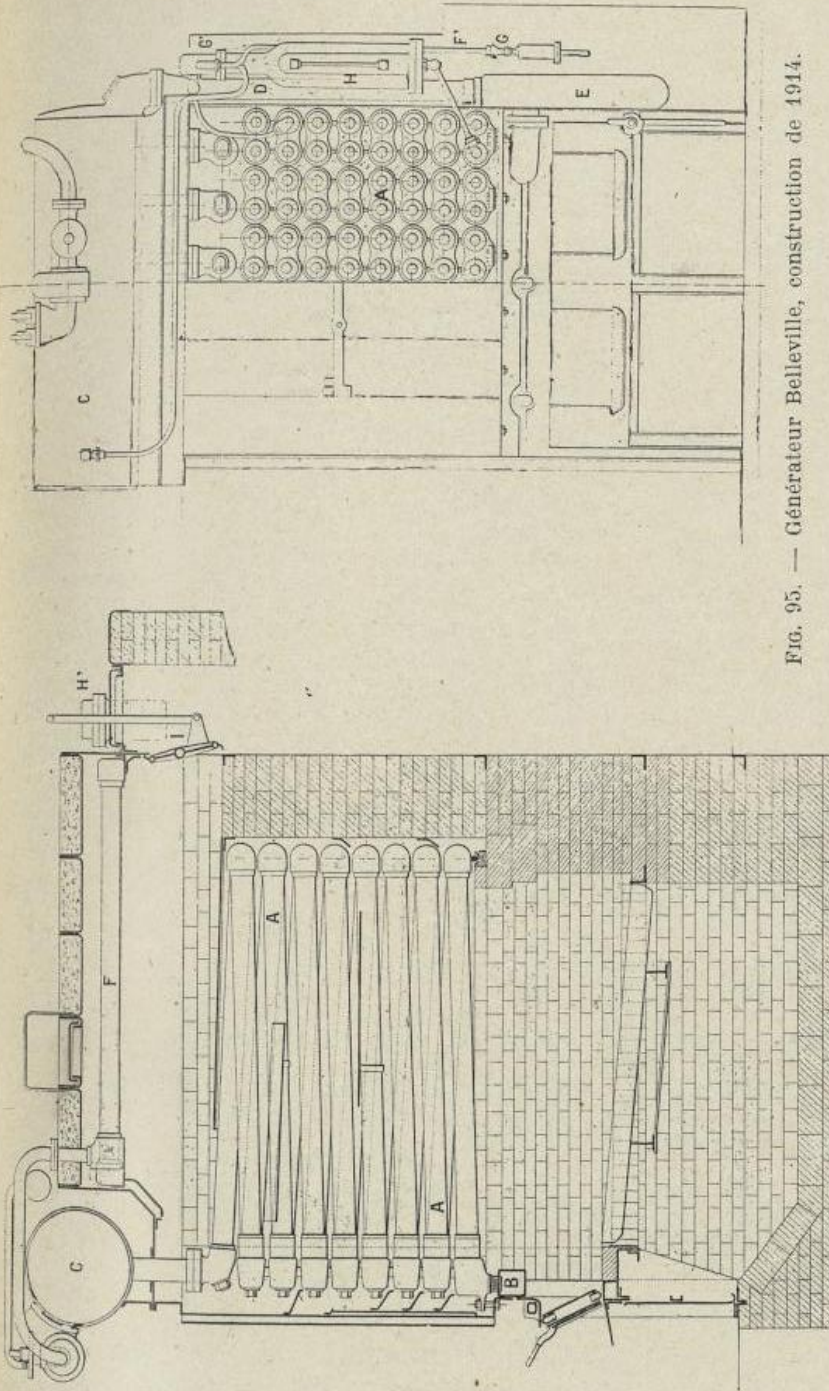


Fig. 95. — Générateur Belleville, construction de 1914.

A, Éléments générateurs de vapeur; B, co-lecteur d'alimentation des éléments A; C, collecteur épurateur de vapeur et d'eau d'alimentation; D, tuyau de retour d'eau de l'épurateur C au collecteur B; E, récipient déj-cleur dans lequel se déposent les boues calcaires précipitées dans l'épurateur C; F, sècheur de vapeur, composé d'une série de tubes assemblés en serpent; G, robinet gradué d'alimentation et son tuyau F' de communication avec le régulateur G; H, colonne de niveau d'eau surmontée du régulateur d'alimentation G; I, registre valve de la cheminée commandé par le régulateur automatique de combustion et de pression H.

d'eau, rattachée par de petits tubes à la partie supérieure et à la partie inférieure d'un élément, porte un tube de niveau en verre et renferme un flotteur qui règle automatiquement l'alimentation (fig. 96), en ouvrant ou fermant une soupape d'ad-

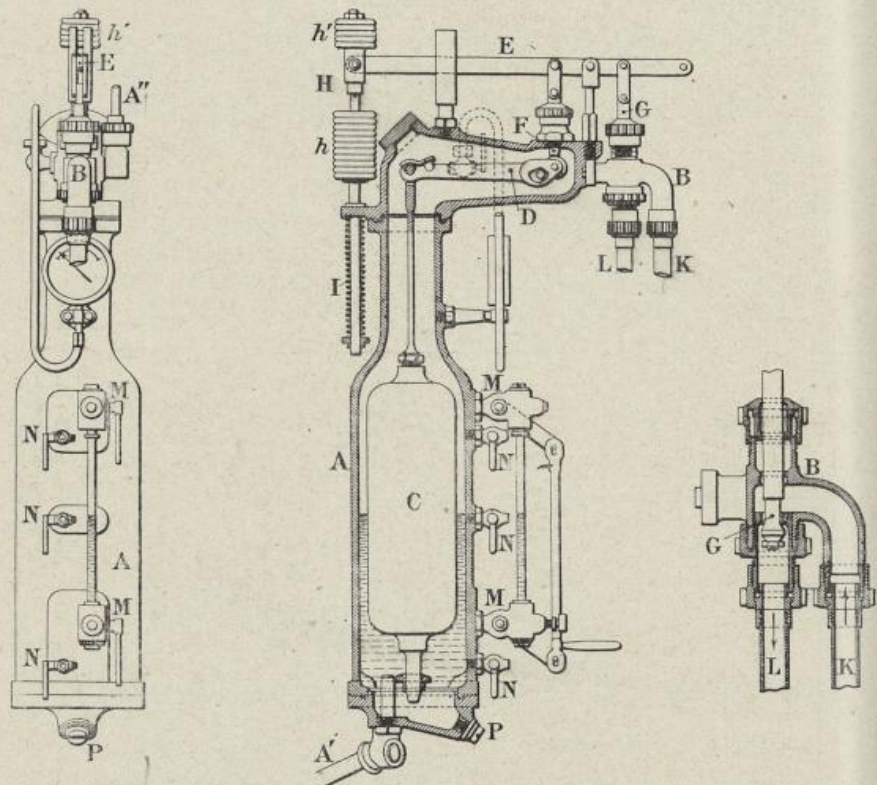


FIG. 96. — Générateur Belleville : régulateur d'alimentation.

A, colonne de niveau; A' tuyau de communication avec l'eau du générateur; A'', tuyau de communication avec la vapeur du générateur; B, robinet automoteur d'alimentation; C, flotteur; D, levier du flotteur; E, levier du contrepoids; F, poinçon de commande du levier E; G, poinçon soupape du robinet automoteur B; H, contre-poids; h, partie fixe; h', partie variable; I, ressort du contrepoids; K, tuyau d'arrivée d'eau au robinet automoteur; L, tuyau de sortie d'eau du robinet automoteur; M, robinets de visite; N, robinets de jauge; P, bouchon de visite.

mission d'eau, refoulée par un appareil alimentaire. L'injection d'eau se fait dans la vapeur du collecteur supérieur, d'où elle s'écoule dans le tube de retour. Celui-ci est prolongé, à sa partie inférieure, par un *déjecteur*, destiné à recueillir les dépôts, expulsés par un robinet d'extraction.

Lorsque la chaudière n'est pas en feu, le niveau de l'eau dans

le faisceau tubulaire est le même que dans la colonne. Mais pendant la vaporisation, il n'existe plus de plan d'eau dans le faisceau tubulaire ; l'indication de la colonne fait seulement savoir que la chaudière contient une quantité d'eau convenable. Le bon fonctionnement de la chaudière Belleville, qui est incontestable, est remarquable et peut même surprendre, car la vapeur, produite en abondance dans les tubes inférieurs, doit parcourir en zig-zag un long circuit avant d'atteindre le collecteur supérieur. Par contre, l'eau, amenée par le tube de

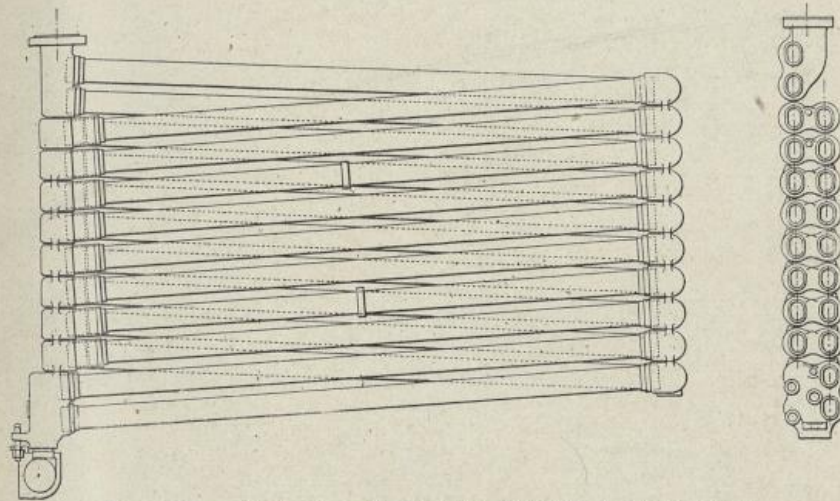


FIG. 97. — Générateur Belleville : élément à double spire, en tubes de 82 millimètres.

retour et le collecteur inférieur, accède facilement aux tubes du bas pour remplacer celle qui se vaporise.

Le registre automatique, commandé par la pression de la vapeur, est un des détails intéressants du générateur Belleville. A l'intérieur du corps supérieur, des chicanes sont destinées à séparer de la vapeur l'eau entraînée.

Afin d'augmenter la production possible de vapeur, que les dispositions anciennes limitaient à un maximum de 55 à 60 kilogrammes par heure et par mètre carré de surface de chauffe, les constructeurs du générateur Belleville ont adopté la disposition dite à *double spire*, qui diminue notablement la résistance à l'écoulement du fluide. Chaque élément (fig. 97), au

lieu de former un circuit unique, est composé de deux circuits séparés, comprenant chacun la moitié des tubes de l'élément. Le parcours de la vapeur se trouve ainsi réduit à moitié; pour une même production, le débit de vapeur, dans chacun des circuits, est également réduit à moitié. L'entrée de l'eau, à l'origine inférieure de chacun des deux circuits, se fait par des orifices de section relativement faible (fig. 100).

Les essais d'un générateur ainsi modifié ont donné les résultats ci-après, très satisfaisants :

Nombre d'éléments	16			
Nombre de tubes par élément (10×2)	20			
Surface de chauffe: chaudière	204 m ²	96		
— — réchauffeur	86 m ²	12		
Surface de grille	7 m ²	25		
Charbon brûlé par heure et				
mètre carré de grille... kg.	97	180	225	225
Pression de la vapeur kg p. cm ² .	18	18	18	18
Vaporisation de l'eau à 9°. kg.	7.223	11.348	13.281	13.705
Vaporisation de l'eau par m ² de				
surface de chauffe..... kg.	35,2	55,3	64,8	67
Rendement thermique	0,885	0,748	0,7	0,722

Le pouvoir calorifique maximum du charbon était de 7.870 calories, le pouvoir minimum de 7.630.

Une autre modification du générateur a été l'augmentation du volume d'eau, obtenue en portant de 0 m. 5 à 1 m. 4 le diamètre du réservoir supérieur.

En même temps, le niveau normal, au lieu d'être maintenu aux deux tiers de la hauteur du faisceau tubulaire, a été relevé jusqu'à l'axe du réservoir supérieur, dans lequel est reporté le flotteur qui commande l'alimentation.

L'accroissement du volume d'eau facilite la marche de l'appareil et laisse beaucoup plus de temps pour remédier à un arrêt de l'alimentation.

Les figures 98 et 99 représentent un générateur du nouveau

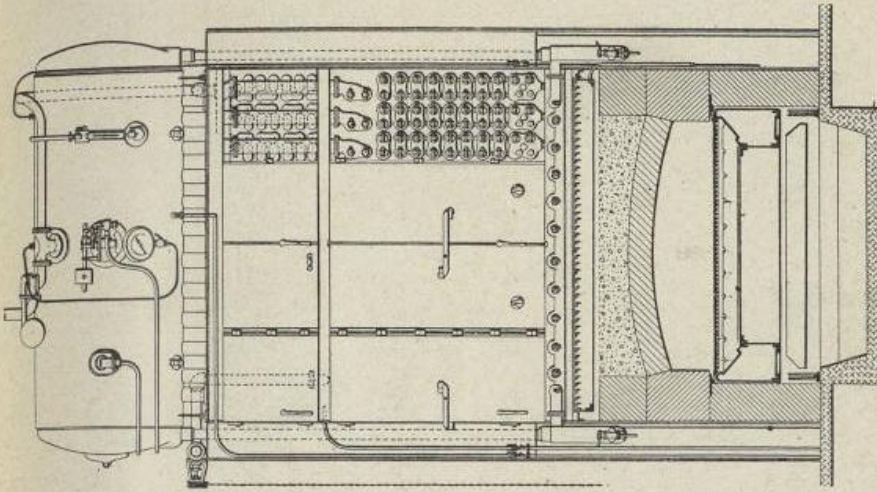


FIG. 99. — Générateur Belleville, avec éléments à double spire : élévation, et coupe transversale de la partie antérieure du foyer avec grille à chaîne.

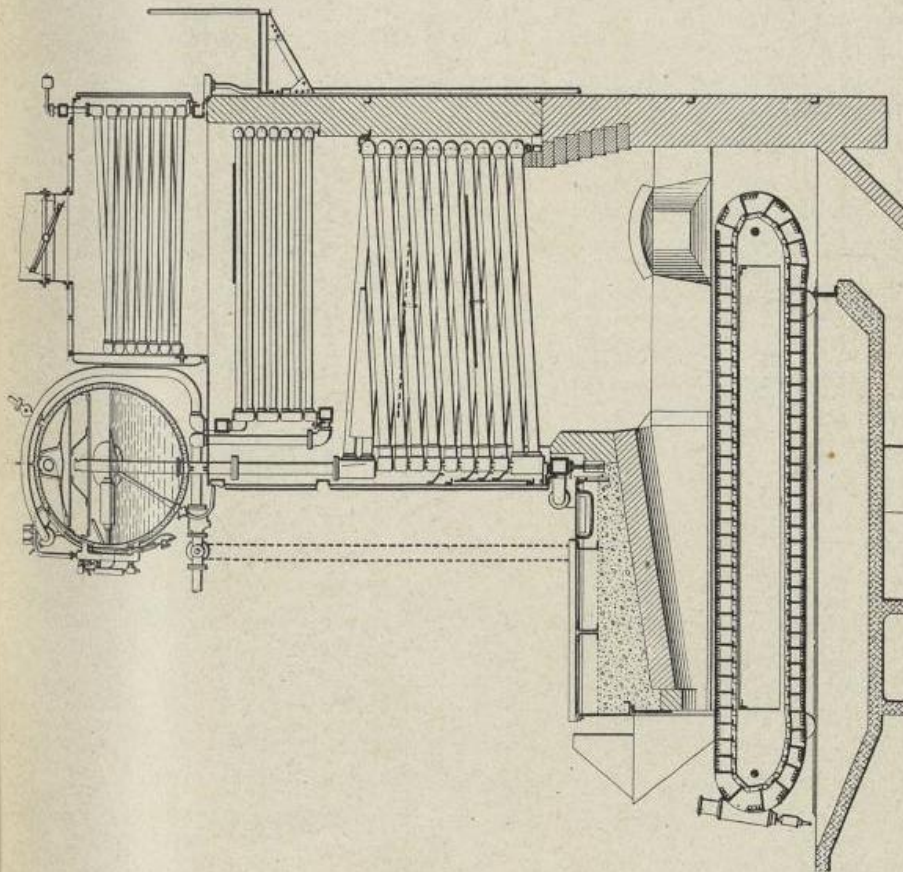


FIG. 98. — Générateur Belleville, à grand volume d'eau, avec éléments à double spire, surchauffeur et réchauffeur; coupe longitudinale.

type avec surchauffeur et réchauffeur d'eau d'alimentation. Sur la figure 100, se voit le détail de l'emmanchement inférieur des tubes.

Un générateur Belleville du nouveau modèle, avec éléments

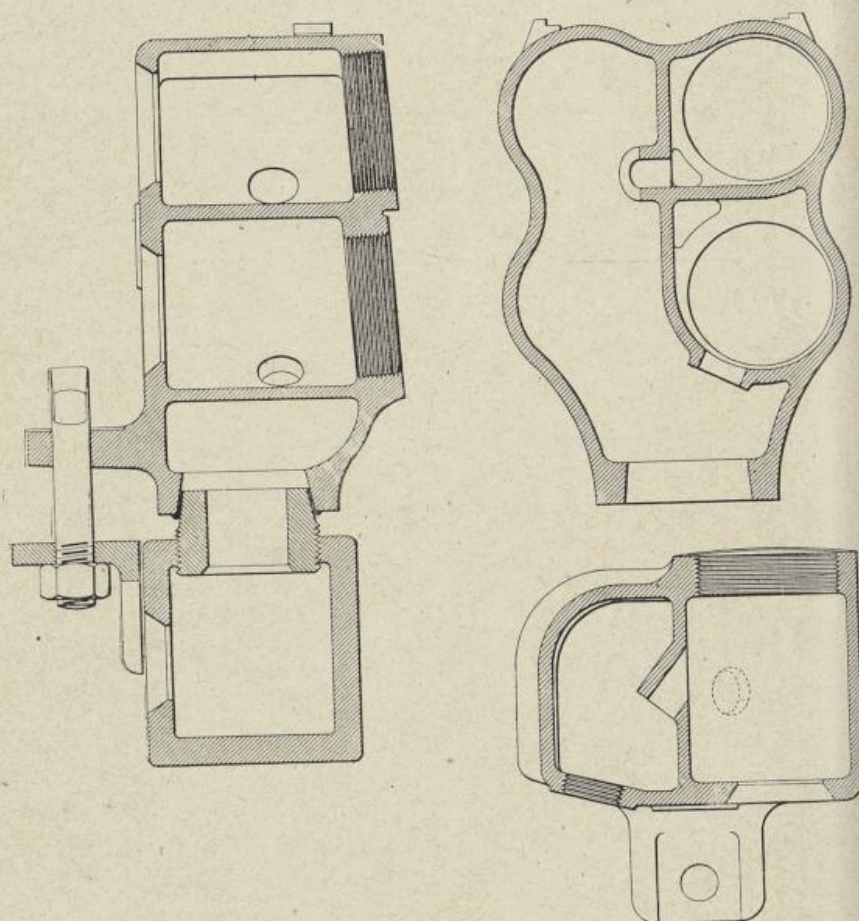


FIG. 100. — Générateur Belleville, avec éléments à double spire : boîte de communication du collecteur d'alimentation et des tubes; coupe longitudinale, coupe transversale et coupe horizontale.

à double spire et collecteur supérieur de grand diamètre, sans réchauffeur, ni surchauffeur, a donné aux essais les résultats suivants :

Nombre d'éléments	8
Nombre de tubes par élément.....	20
Surface de chauffe	102 m ² 70
Surface de grille	3 m ² 56
Volume d'eau	2.778 litres.

Charbon brûlé par heure et mètre carré de grille kg.	100	120	180	225	250
Pouvoir calorifique.....	7.620	7.480	7.860	7.450	7.800
Pression... kg. par cm ² .	15	15	15	15	15
Eau à 25° vaporisée par heure..... kg.	2.730	3.210	4.900	4.970	5.520
Vaporisation par heure et mètre carré de surface de chauffe..... kg.	26,4	30,8	43,8	48,3	53,6
Rendement thermique...	0,70	0,70	0,627	0,587	0,558

Ces rendements sont élevés, étant donnée l'absence de réchauffeur.

La figure 101 représente un générateur Belleville, avec éléments à double spire, adapté à l'usage sur mer.

A la catégorie des appareils à circulation limitée se rattache la chaudière Grille, avec tuyères Solignac : pour assurer une vaporisation régulière, et éviter tout dégagement de vapeur en sens contraire de la circulation, l'eau ne pénètre dans chaque tube que par une étroite tuyère.

Cette chaudière (fig. 102 à 104) se compose d'un réservoir cylindrique, portant deux séries de collecteurs contigus, inférieurs et supérieurs, que réunissent des tubes en U. Dans les collecteurs inférieurs, un bouchon, vissé à travers la paroi extérieure, obture l'entrée de chaque tube, dans lequel l'eau ne peut pénétrer que par une tuyère de petit diamètre. A froid, le niveau de l'eau est le même dans le réservoir et dans les tubes. Par suite de la vaporisation, le tube se vide partiellement, et l'eau s'écoule par la tuyère avec une vitesse d'autant plus grande que la vaporisation est plus active. Le niveau de l'eau

dans le réservoir peut d'ailleurs, sans inconvénient, varier entre de larges limites.

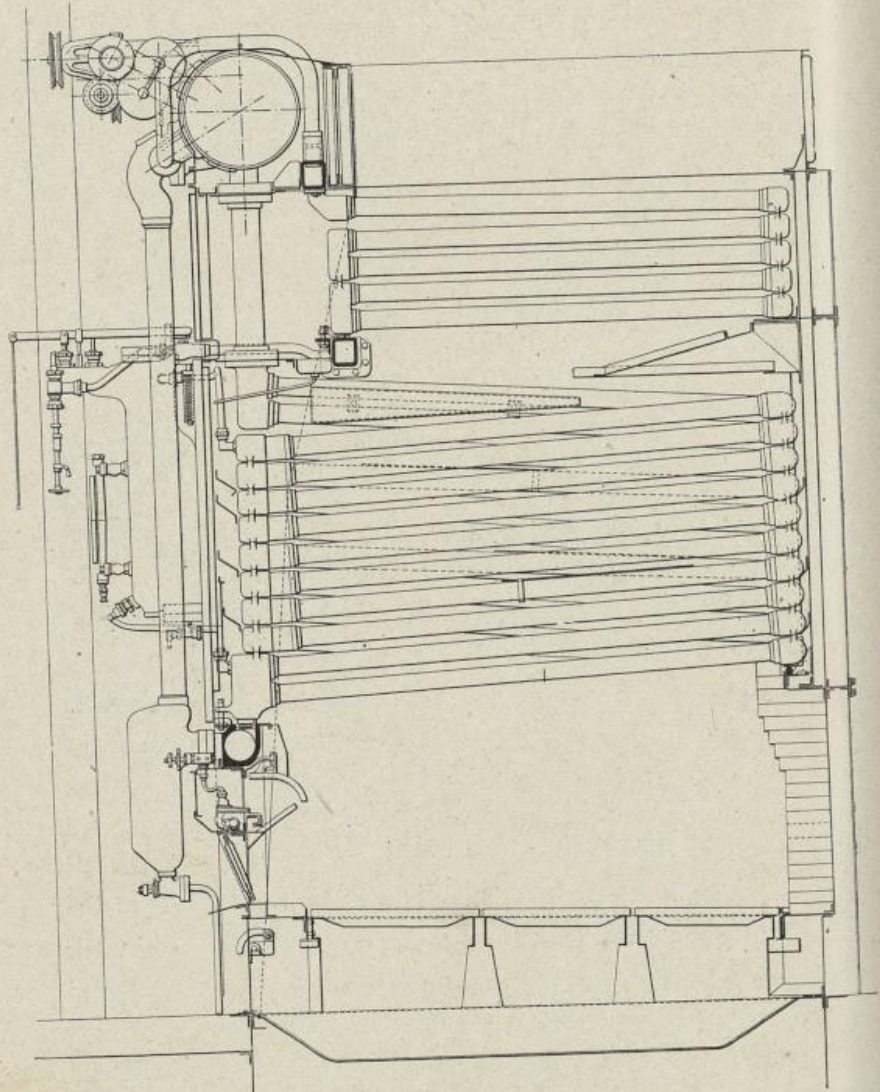


FIG. 101. — Générateur Belleville, marin, à éléments à double spire, avec grille ordinaire et brûleurs à pétrole.

Cette disposition permet une vaporisation intense, ainsi que l'indiquent les résultats ci-après d'une chaudière marine (tor-

pilleur n° 198, essais des 31 octobre, 4 novembre, 4 et 6 décembre 1905, à Toulon).

Surface de grille d'une chaudière.....	2 m² 60
Surface de chauffe d'une chaudière.....	83 m² 67
Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille	32
Volume d'eau en ordre de marche.....	800 litres.
Charbon : Briquette d'Anzin n° 1 à 3,25 p. 100 de cendres.	
Température de l'eau d'alimentation.....	25°
Tirage : aspiré par souffleur dans la cheminée.	

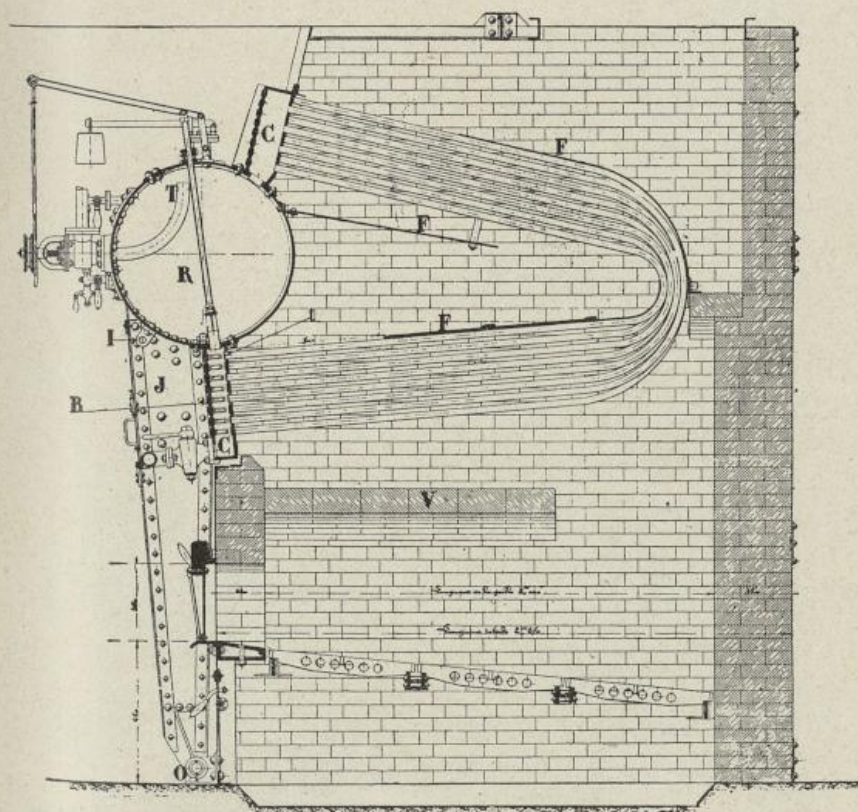


FIG. 102. — Chaudière Grille, avec tuyères Solignac; coupe longitudinale.

<i>Durée des essais</i>	8 heures	8 heures	4 heures	2 heures
Combustion par m ² de grille et par heure kg.	100	200	300	350
Pression de marche kg par cm ² .	16	16	16	16
Tirage en millimètres d'eau	15	60	115	130
Température à la cheminée	325°	375°	430°	425°
Vaporisation par m ² de surface de chauffe et par heure..... kg.	29,6	55,1	78,9	88,2
Rendement en brut kg. de vapeur.	9,569	8,875	8,462	8,116
Rendement de et à 100° kg.	11,865	11,005	10,492	10,063
Eau entraînée mesurée à l'appareil Rateau.....	0,00185	0,0021	0,0093	0,007

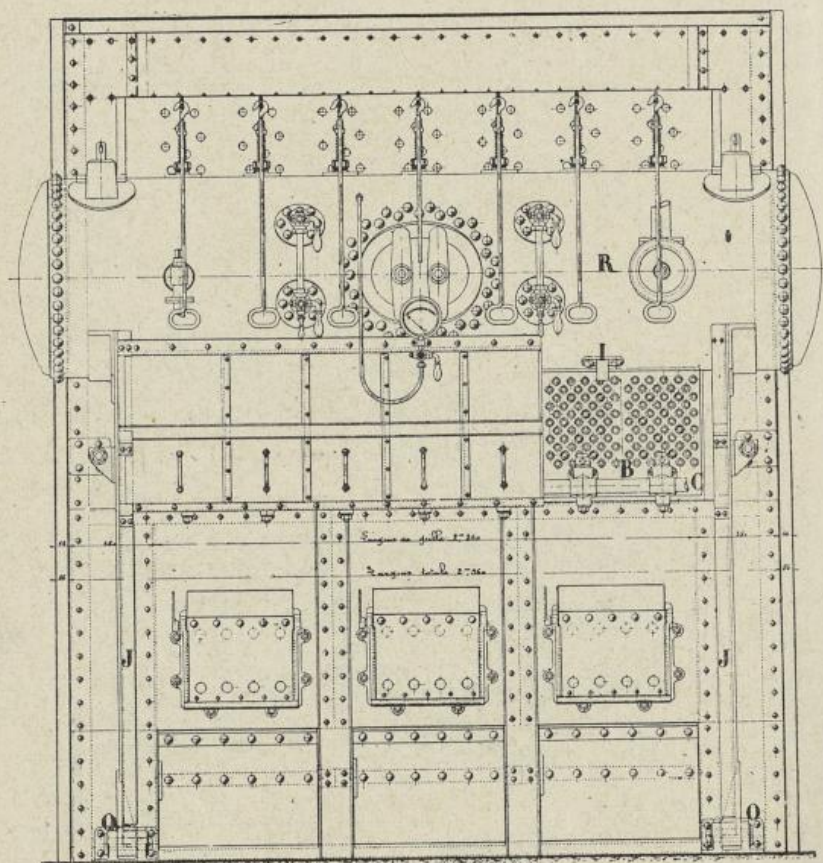


FIG. 103. — Chaudière Grille, avec tuyères Solignac; vue de face.

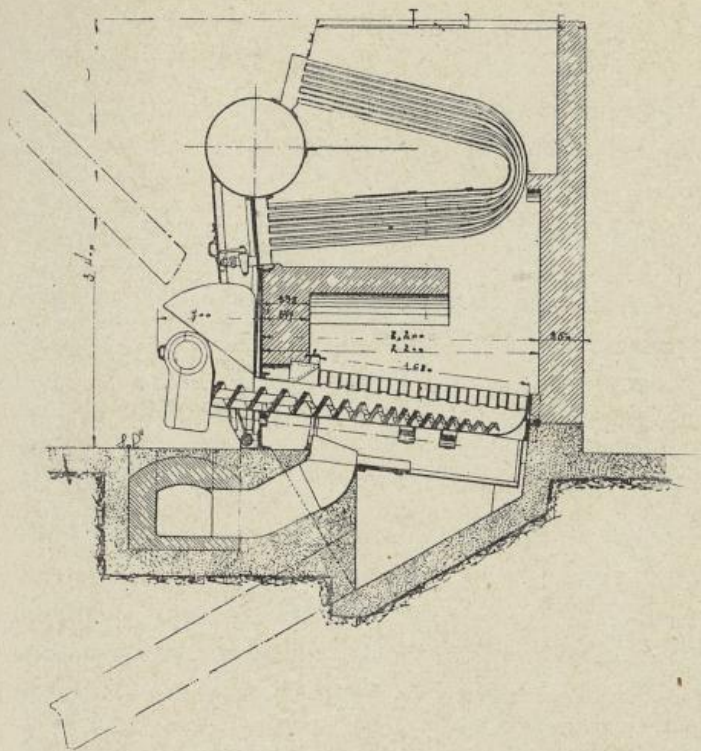


FIG. 104. — Chaudière Grille, avec chargeur mécanique par en dessous.

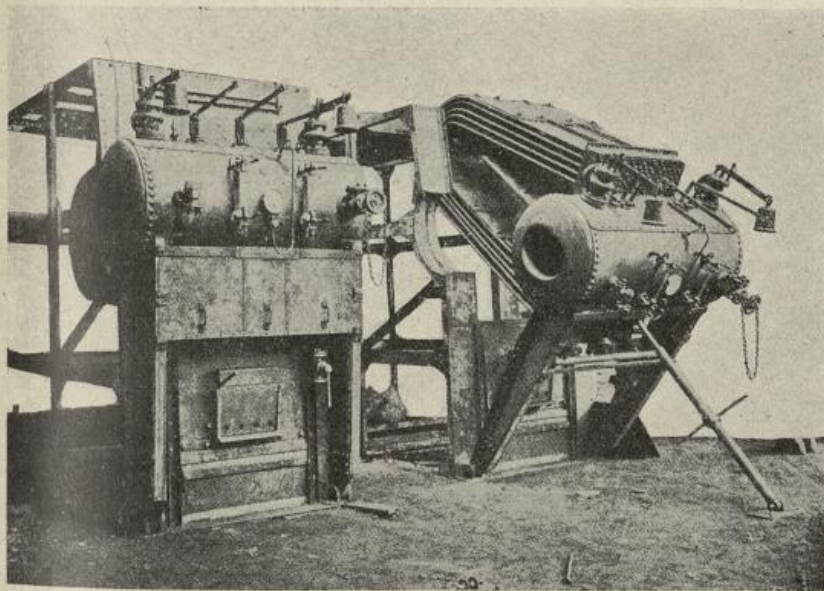


FIG. 105. — Chaudière Grille; dispositif de basculage.

L'ensemble de l'appareil évaporatoire est monté sur deux jambes qui peuvent pivoter dans des chapes placées au niveau du sol. Ce montage permet de faire basculer l'appareil hors de l'enveloppe extérieure, et facilite la visite et l'entretien (fig. 105).

Chaque collecteur inférieur est alimenté (fig. 106) par une tubulure que peut fermer une soupape manœuvrée de l'extérieur. La fermeture de cette soupape et l'ouverture du robinet de vidange correspondant provoquent une chasse sous l'action de la vapeur, qui expulse l'eau avec les boues et les dépôts qu'elle contient. Cette chasse, d'une durée de 30 secondes par collecteur, est répétée une fois par jour, avec des eaux de qualité normale.

Un surchauffeur peut se loger entre les deux branches des tubes en U, avec entrée et sortie de vapeur latérales.

Appliquée à la marine, la chaudière Grille a donné de bons résultats, notamment sur les paquebots de la Compagnie des Chemins de fer du Nord. Elle s'emploie également sur les tracteurs à vapeur (fig. 107).

32. Chaudières à tubes d'eau peu inclinés. — Ces chaudières sont composées d'un *réservoir supérieur*; de deux séries de *collecteurs* verticaux en communication avec ce réservoir; de *tubes* modérément inclinés qui réunissent les collecteurs verticaux. L'ensemble forme un circuit fermé. L'eau accède à l'extrémité la plus basse des tubes par les collecteurs *arrière*; la vapeur et l'excès d'eau se dégagent par les collecteurs *avant*. La liaison des collecteurs arrière et du réservoir supérieur est directe dans certaines chaudières; dans d'autres, elle se fait par l'intermédiaire d'un *réservoir inférieur*, relié au réservoir supérieur par un ou deux *tubes de retour*.

La longueur des tubes chauffés est telle que, le plus souvent, ils couvrent une surface plus grande que celle de la grille.

Les collecteurs verticaux consistent, soit en petites pièces assemblées les unes avec les autres et avec les tubes, soit en conduits verticaux sur lesquels se branche une rangée de tubes à eau, soit enfin en caisses plates, à faces entretoisées.

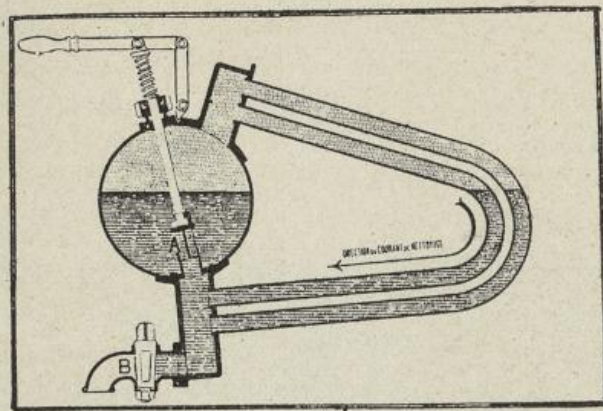


FIG. 106. — Chaudière Grille : schéma de l'expulsion des boues.

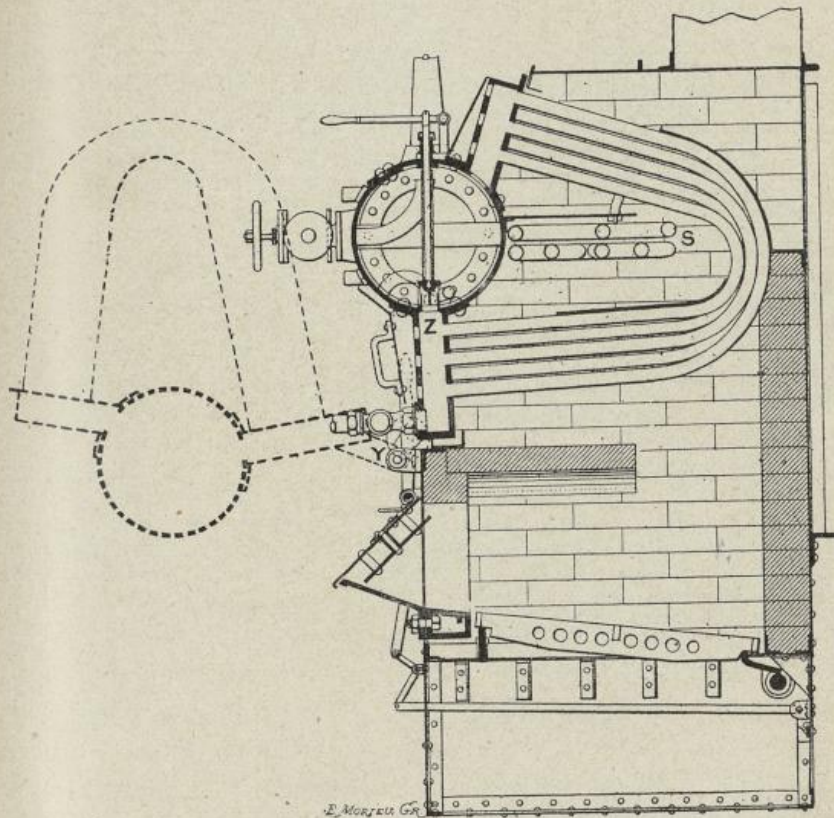


FIG. 107. — Chaudière Grille, avec surchauffeur, pour tracteur de 35 chevaux : S, tubes surchauffeurs.

Devant chaque tube, un tampon démontable permet le nettoyage intérieur. La disposition autoclave est bien préférable à celle des tampons extérieurs, appuyés contre leur siège par le serrage d'un écrou sur un boulon dont la rupture est toujours à craindre, surtout à cause des charges excessives auxquelles le soumettent les serrages trop énergiques de l'écrou.

Pour calculer la force qui tend à déboîter un tube, on en

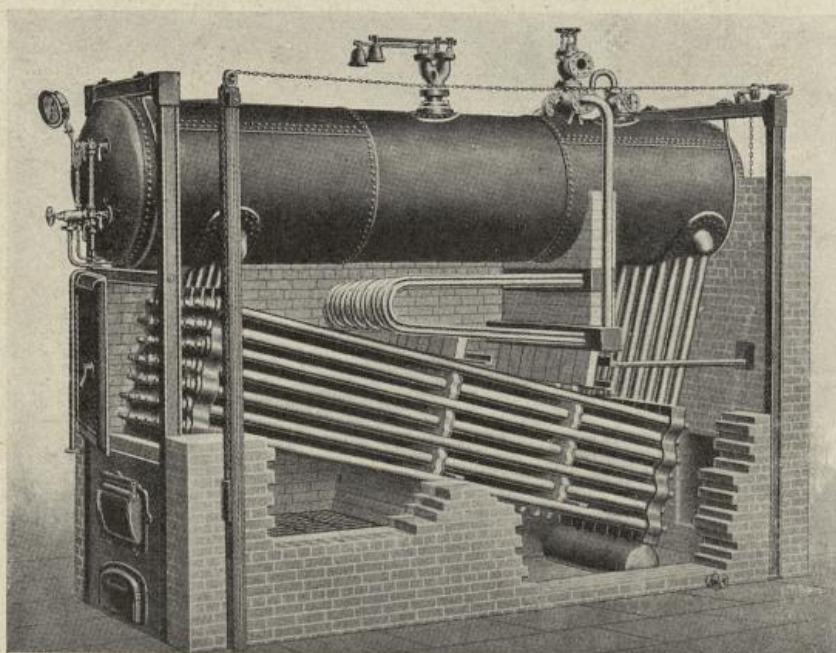


FIG. 108. — Chaudière Babcock et Wilcox, avec surchauffeur pour surchauffe modérée.

multiplie la surface par la pression : elle est de 2.260 kilogrammes pour un tube de 120 millimètres de diamètre extérieur et une pression de 20 kilogrammes par centimètre carré. Le procédé d'assemblage le plus simple consiste à mandriner le tube dans son logement, à l'aide du *dudgeon*; ce procédé est couramment employé, mais on ne doit pas compter uniquement, pour la tenue du tube, sur le serrage qu'il produit : il est nécessaire de pratiquer à l'extrémité du tube, dans la partie qui dépasse la paroi qui le porte, un évasement ou un bourrelet,

qui s'oppose sûrement au glissement en cas de desserrage. Le mandrinage se fait, d'ailleurs, dans des trous légèrement coniques, qui ont le même effet.

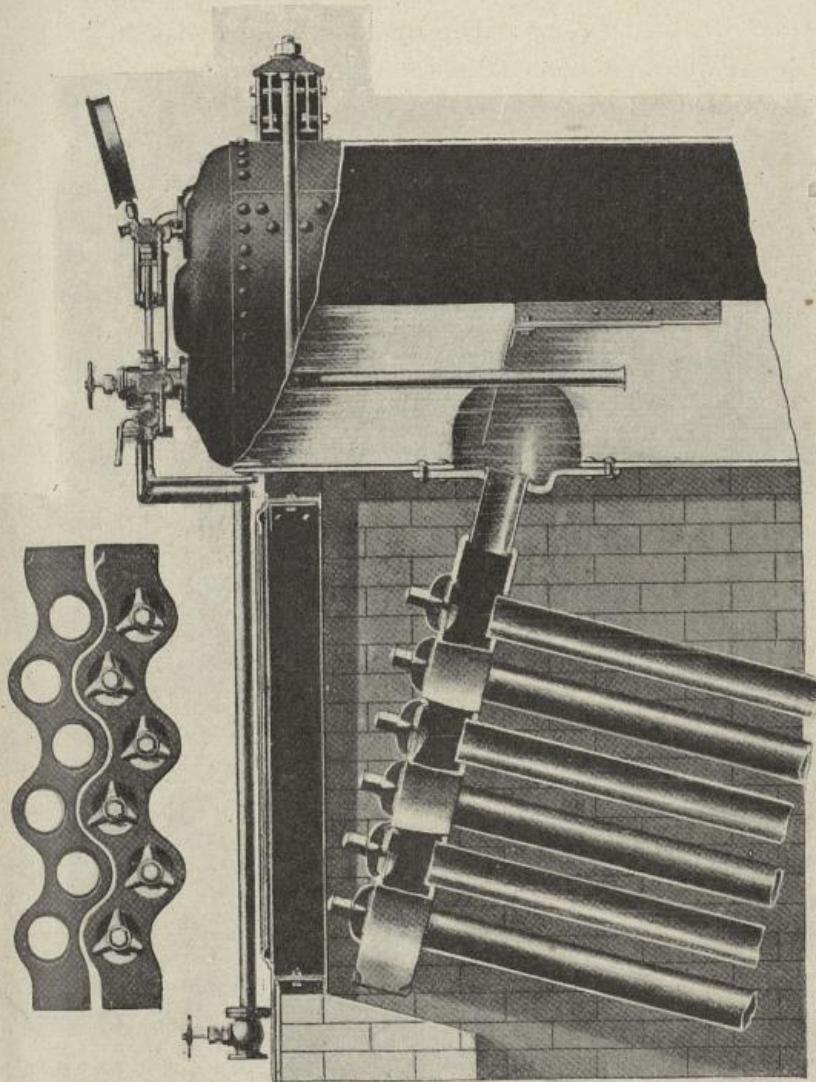


FIG. 109. — Collecteurs verticaux de chaudière Babcock et Wilcox :
assemblage avec le réservoir supérieur.

La chaudière Babcock et Wilcox est un exemple de l'alimentation directe des tubes vaporisateurs par le collecteur supérieur (fig. 108). Chaque rangée verticale de tubes débouche, à

ses deux extrémités, dans des collecteurs de forme serpentine (fig. 109), qui disposent en quinconce l'ensemble des tubes. Ces collecteurs communiquent avec le réservoir supérieur par des tubes courts mandrinés dans des boîtes de connexion en acier embouti (fig. 110). La partie inférieure des collecteurs arrière est assemblée de même dans un *collecteur de boues*. Les ouver-

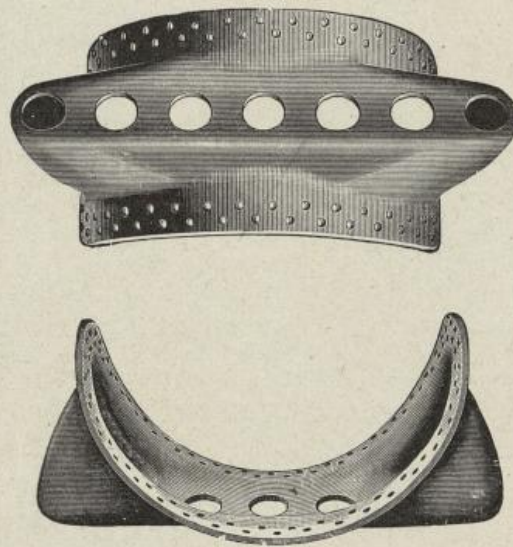


FIG. 110. — Boîte de connexion, en acier embouti, des chaudières Babcock et Wilcox.

tures de nettoyage, en regard de chaque tube, sont fermées par des tampons ajustés métal contre métal, sans interposition de joint.

Les dimensions du réservoir supérieur varient entre de larges limites, suivant les volumes d'eau et de vapeur nécessaires.

Le collecteur de boues est en fonte, résistant mieux que l'acier aux corrosions dans les fumées refroidies.

La chaudière est suspendue, par le réservoir supérieur, à des poutres en fer en U reposant sur des colonnes en fer à double T: ces supports sont indépendants du massif de maçonnerie.

La chaudière marine Babcock et Wilcox (fig. 111) diffère de la précédente par la moindre longueur des tubes et par la disposition transversale du corps supérieur. Cette disposition a été imitée dans certaines chaudières fixes (fig. 112, 113, 114),

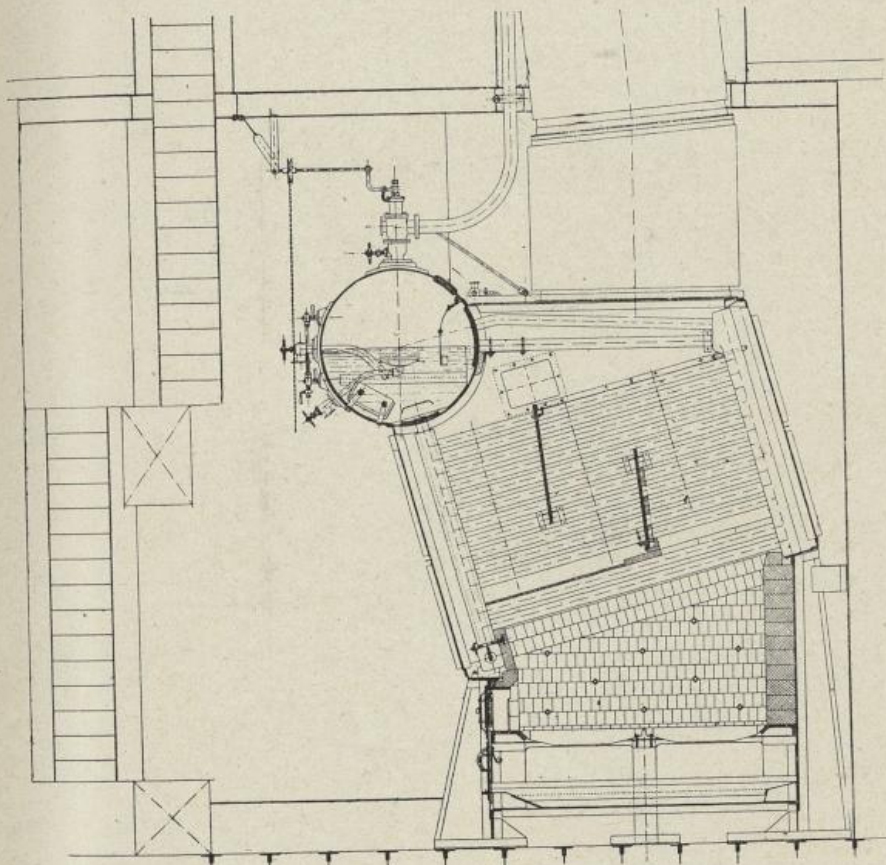


FIG. 111. — Chaudière marine Babcock et Wilcox.

pour les motifs suivants : classement de la chaudière dans la 2^e ou 3^e catégorie du règlement français; utilisation d'emplacements restreints; mise en pression rapide; facilités de transport, pour régions peu accessibles.

La figure 114 est une chaudière dont la maçonnerie est remplacée par une enveloppe en tôle garnie de matières réfractaires.

Comme exemple d'installation générale, la figure 115 donne les coupes et le plan de la chaufferie de l'usine de la Société d'Electricité de Paris, à Saint-Denis. En sous-sol, manutention des déchets; au rez-de-chaussée, chaudières avec grilles à

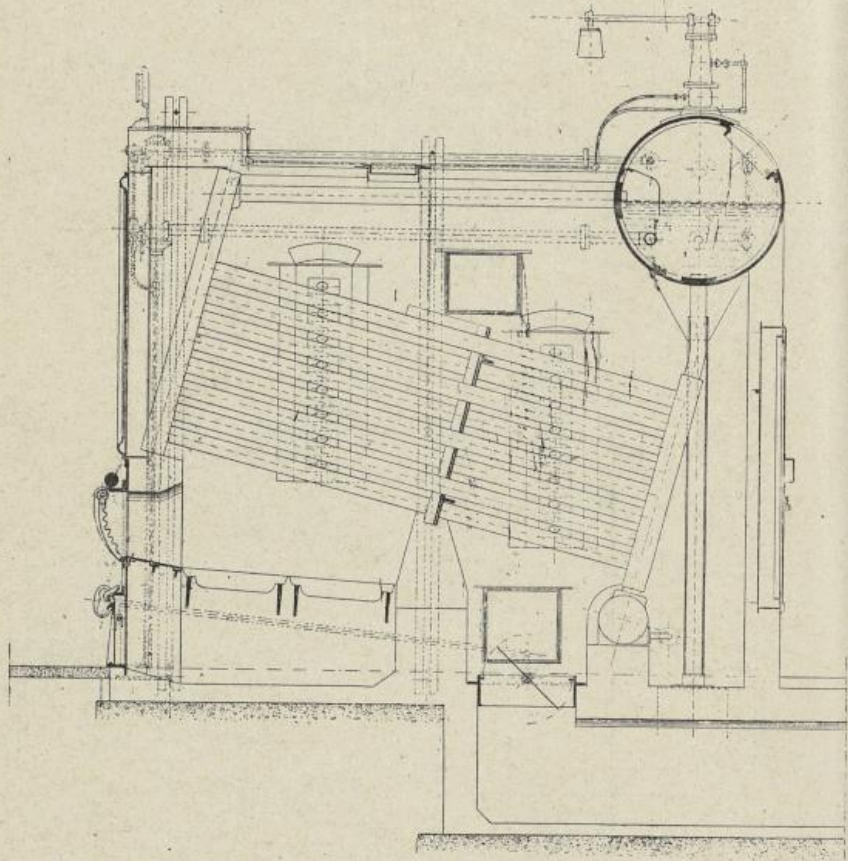


FIG. 112. — Chaudière Babcock et Wilcox, à corps transversal.

chaîne et surchauffeurs; en dessus, réchauffeurs et silos à combustible.

En branchant les collecteurs arrière sur un corps inférieur, relié au corps supérieur par tube de retour, on alimente plus directement les tubes, fortement chauffés, du bas. Par contre, il semble que l'inversion du courant puisse plus facilement se produire dans les tubes du haut. En l'absence d'observations

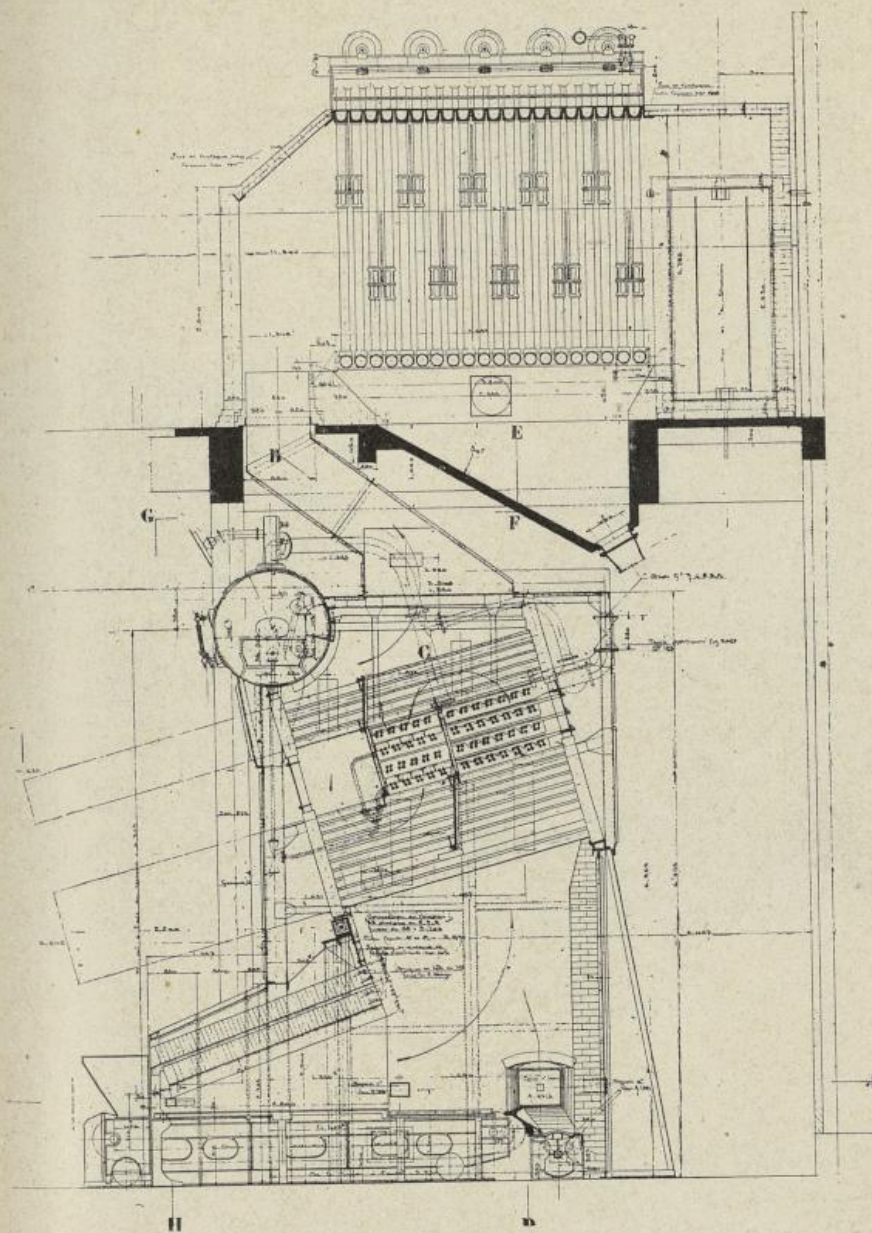


FIG. 113. — Chaudière Babcock et Wilcox, à corps transversal, avec surchauffeur, réchauffeur d'eau et grille à chaîne.

du genre de celles de M. Brüll, rapportées au paragraphe 22, il est difficile de se prononcer à ce sujet. On peut dire qu'en pratique des chaudières établies avec les deux modes d'alimentation des collecteurs d'arrière font un bon service.

La chaudière Roser (fig. 116) est un exemple de l'alimentation par corps inférieur et tube de retour. Les tubes vaporisateurs sont en rangées verticales, disposition que le construc-

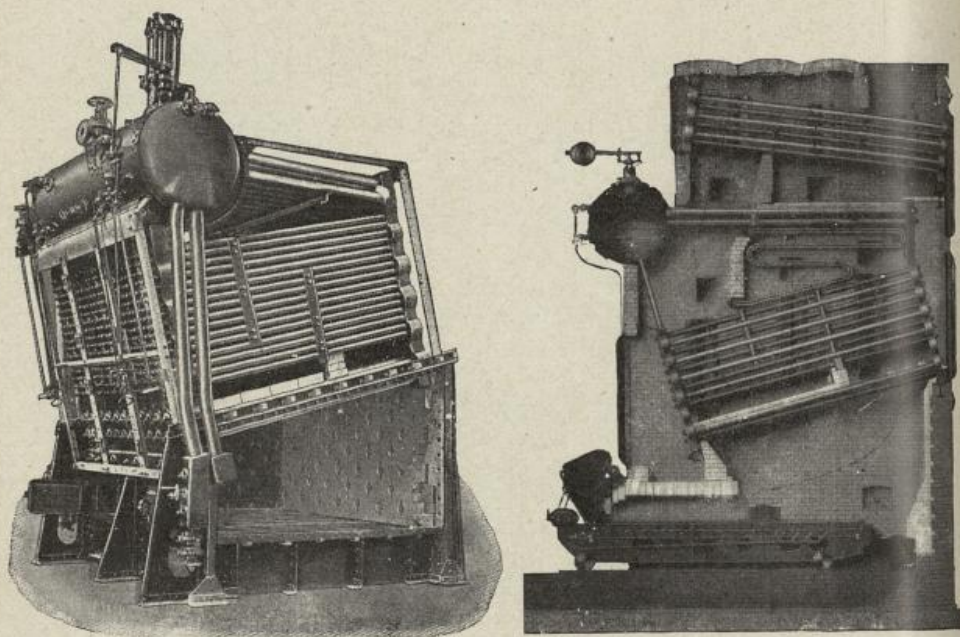


FIG. 114. — Chaudières Babcock et Wilcox, à corps transversal, avec enveloppe en tôle et enveloppe en briques.

teur préfère à celle en quinconce. Le nombre des tubes superposés est de 7 au plus, la surface de chauffe nécessaire étant obtenue en leur donnant une longueur suffisante, plutôt qu'en augmentant ce nombre.

La capacité du corps supérieur, composé de deux cylindres perpendiculaires en T, est aussi grande qu'on le désire, le diamètre de ces cylindres s'élevant jusqu'à 1 m. 800.

Le corps inférieur, dit *hydro-déjecteur* ou *collecteur de boues*, porte à une extrémité un trou d'homme et un robinet de

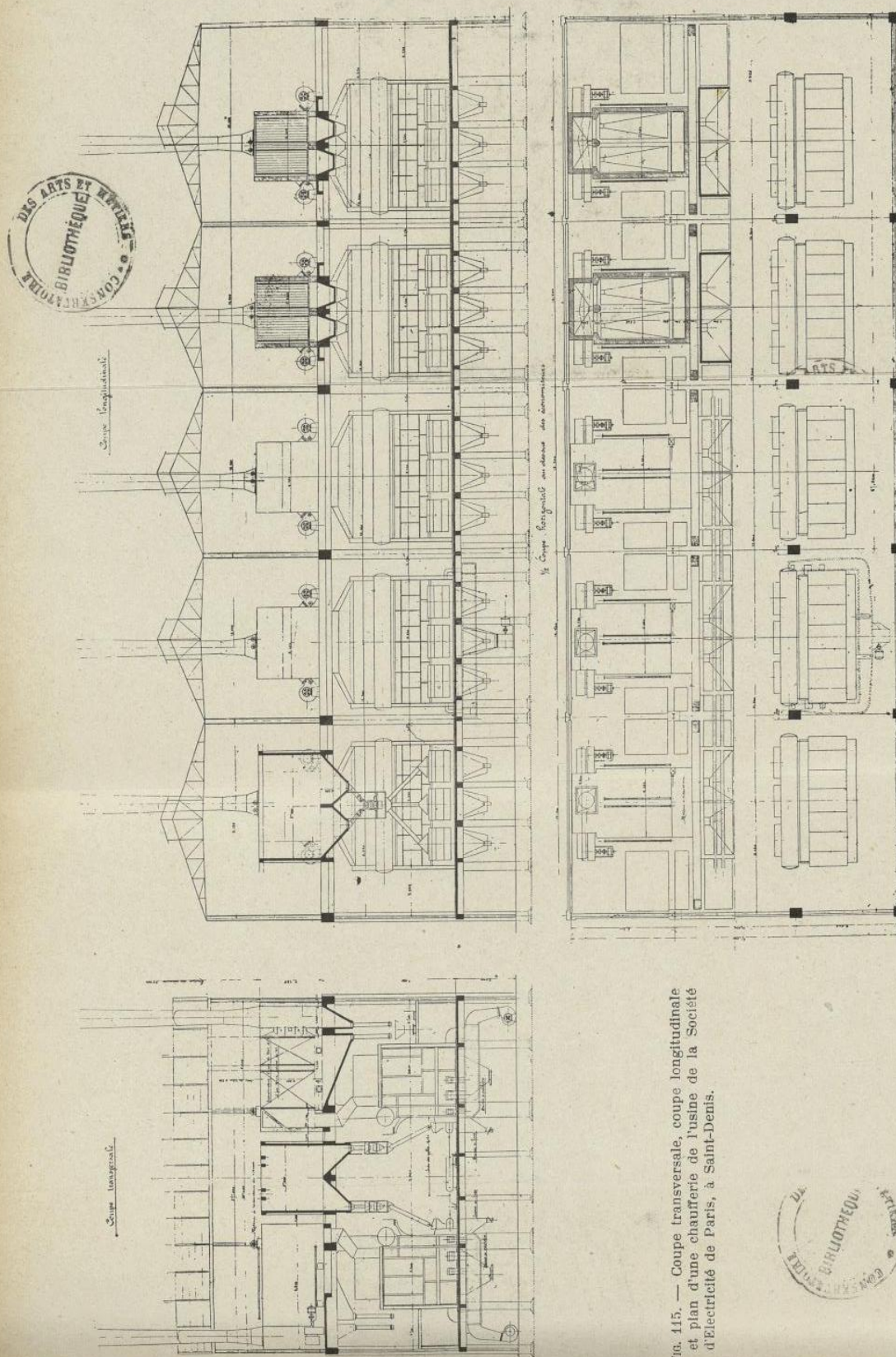
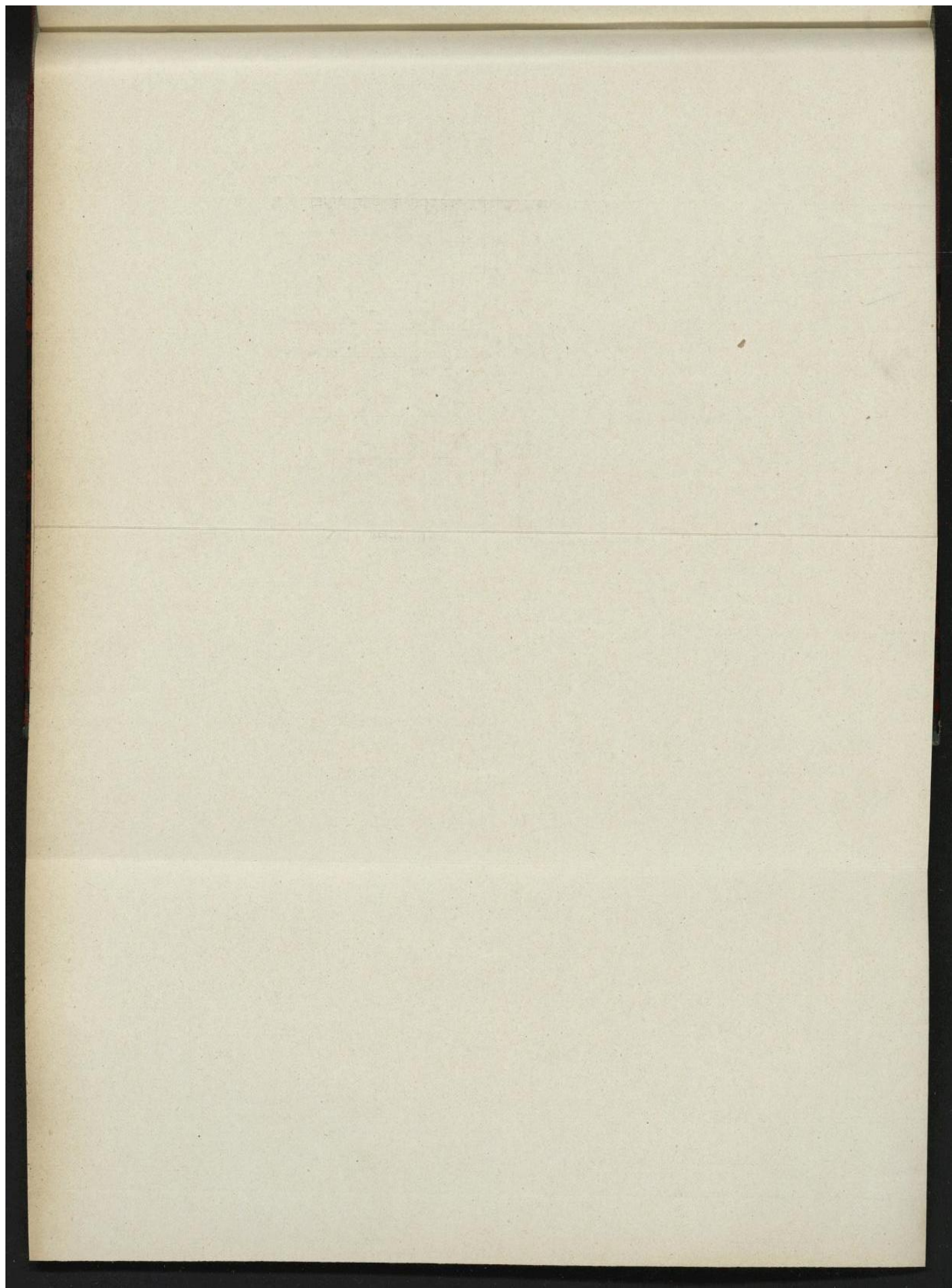


FIG. 115. — Coupe transversale, coupe longitudinale et plan d'une chaufferie de l'usine de la Société d'Electricité de Paris, à Saint-Denis.



lavage, et, au milieu, un cuissard recevant le tube de retour d'eau.

Les tubes sont mandrinés dans les collecteurs, puis évasés pour rendre le déboîtement impossible. Les tampons de visite (fig. 117) sont coniques, le joint se faisant métal contre métal.

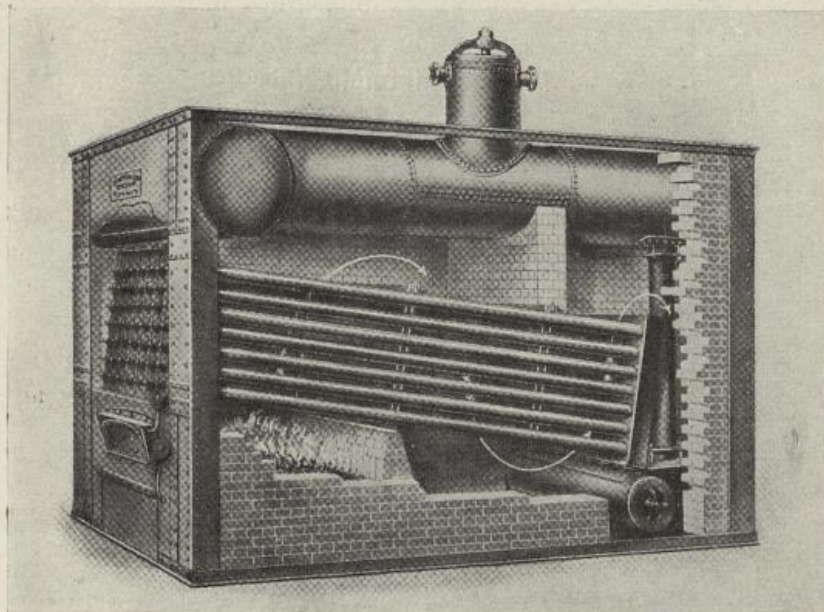


FIG. 116. — Chaudière Roser, série courante.

Dimensions d'un des types de cette série :

Nombre d'éléments.....	15	Poids.....	22.900 kg.
Tubes par élément.....	7	Maçonnerie au-dessous du sol	7 m ³
Surface de chauffe.....	249 m ²	Maçonnerie au-dessus du sol.	27 m ³
Capacité.....	15 m ³ 7	Emplacement : longueur.....	6 m. 85
Timbre.....	12 kg.	largeur.....	3 m. 45
Production horaire.....	3.600 kg	hauteur.....	4 m. 15

Un chapeau extérieur, serré par un écrou, sert pour le montage et préserve la surface extérieure du tampon de l'action des gaz chauds.

Les collecteurs s'assemblent avec le corps supérieur et avec le corps inférieur par l'intermédiaire de bagues biconiques (fig. 118), serrées contre les deux pièces à réunir par deux boulons et deux étriers, le joint se faisant métal contre métal. Le

serrage de ces boulons doit être fait avec ménagement, pour ne pas ajouter, à la charge qu'ils doivent normalement supporter, une tension initiale excessive.

Les chicanes verticales, qui canalisent les gaz chauds, sont formées de bandes de fonte, avec encoches demi-circulaires pour les tubes, et de briques de forme correspondante.

Le diamètre des tubes vaporisateurs est, à l'intérieur, de 120 millimètres, à moins qu'il ne soit nécessaire de le réduire à 100 millimètres pour qu'ils n'entrent pas en compte dans le

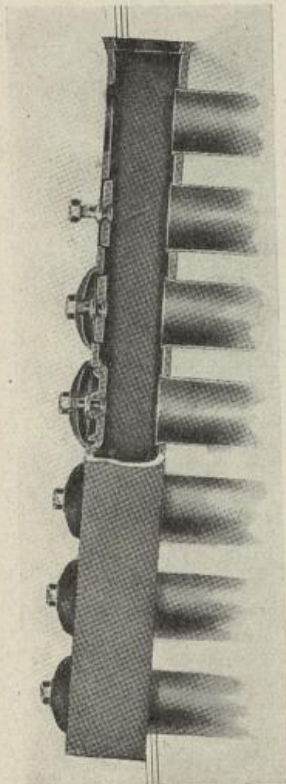


FIG. 117. — Collecteur de chaudière, Roser, avec tampons de visite coniques et circulaires, sauf celui du milieu qui est ovale.

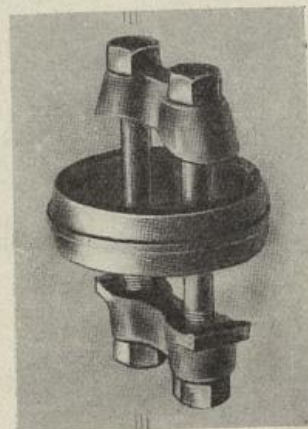


FIG. 118. — Bague biconique, avec boulons et étriers, pour assemblage des collecteurs.

calcul de la capacité de la chaudière en fixant la catégorie réglementaire.

Les deux extrémités du jambage transversal du T, formé par le corps supérieur, posent sur la maçonnerie, protégée par une plaque d'acier. D'autre part, le corps inférieur est porté par

deux sabots semi-circulaires, dans lesquels il peut tourner légèrement lorsque la chaudière se dilate, la dilatation se faisant vers l'arrière.

En vue d'assurer une circulation normale dans tout le faisceau tubulaire, certains constructeurs le divisent en deux par-

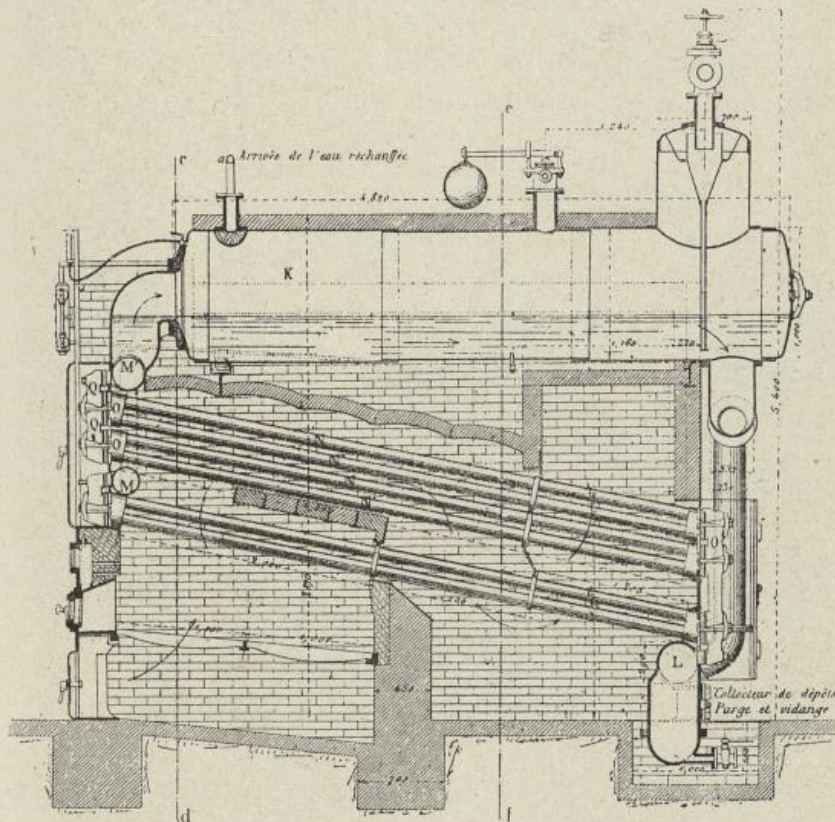


FIG. 119. — Chaudière Lagosse et Bouché, à deux collecteurs de vapeur, M et M'.

ties séparées. Le collecteur inférieur L du générateur Lagosse et Bouché (fig. 119), réuni par tubes de retour au corps supérieur, alimente les deux faisceaux de tubes. Le faisceau inférieur, le plus chauffé, comprend un tiers seulement des tubes. Les deux faisceaux dégagent séparément la vapeur dans les collecteurs M et M', qui l'amènent au corps supérieur. L'alimentation avec de l'eau réchauffée se fait dans la vapeur.

Les deux circuits du générateur P. Brouhon (fig. 120) sont entièrement distincts.

Cette division du faisceau est logique, mais elle ne semble pas présenter en pratique d'avantages bien marqués.

33. Chaudières à tubes d'eau voisins de la verticale. — La disposition verticale des tubes est ancienne; elle a été reprise dans quelques constructions récentes. Voisins de la verticale, les tubes peuvent réunir directement deux corps cylin-

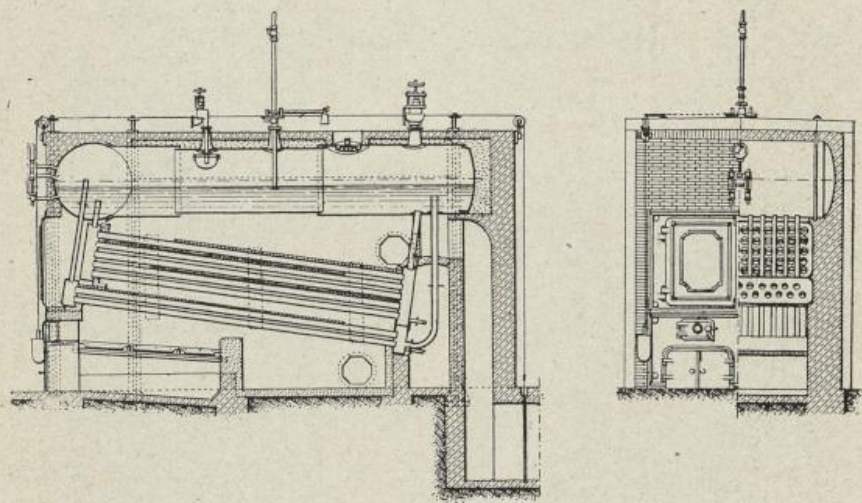


FIG. 120. — Chaudière P. Brouhon, à deux circuits indépendants.

driques, sans l'intermédiaire de collecteurs à leurs deux extrémités: le circuit de l'eau est plus simple et offre moins de résistance. Par contre, sauf exceptions, on n'a plus devant chaque tube un tampon démontable qui en permet la visite et même le remplacement.

La chaudière Stirling (fig. 121) se compose de trois faisceaux tubulaires, reliant un corps inférieur unique à trois corps supérieurs. Ces trois corps communiquent, en outre, par des tubes de vapeur, à leurs parties supérieures, et les deux corps de droite, sur la figure, par des tubes d'eau à leurs parties inférieures. L'eau pénètre dans le corps de gauche, dont le fais-

[illegible]

Fig. 121. — Chaudière Stirling, chauffée à l'huile lourde.

Des équerres rivées sur les fonds des corps cylindriques reposent sur la maçonnerie, garantie par une plaque en fonte.

Le générateur « à flux direct » de la Société Alsacienne de Constructions mécaniques (fig. 122 à 126) se compose de tubes rectilignes reliant deux corps cylindriques. La forte inclinaison des tubes les éloigne de la grille et permet une vaste chambre de

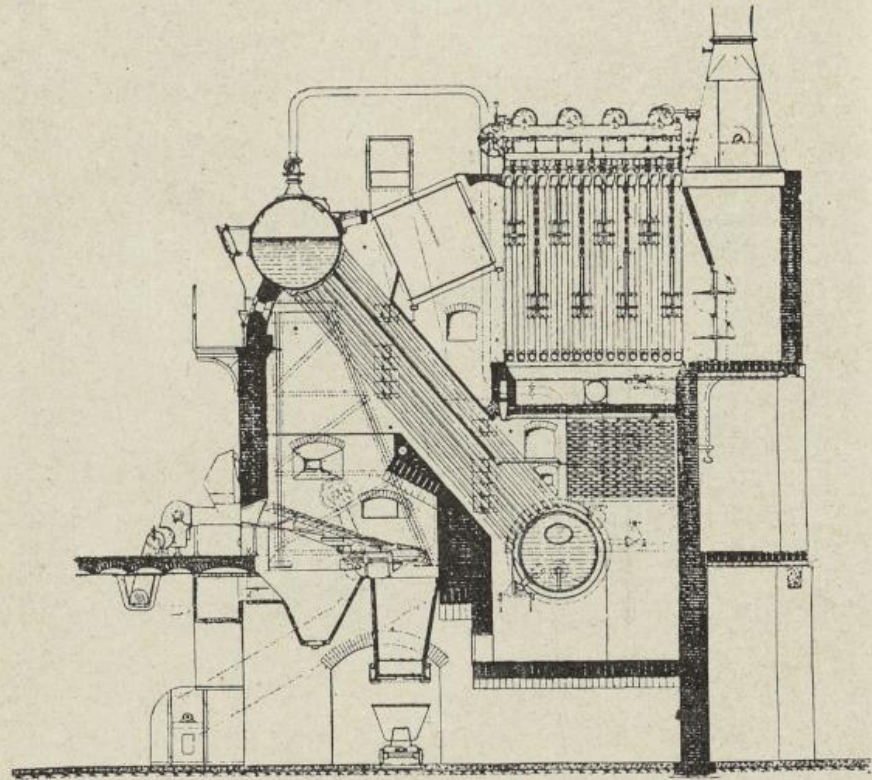


FIG. 122. — Générateur à flux direct de la Société alsacienne de constructions mécaniques, avec surchauffeur, réchauffeur d'eau et réchauffeur d'air (type S).

combustion; elle facilite la circulation, et réduit l'encombrement en plan.

La production normale de vapeur est de 32 à 38 kilogrammes par heure et mètre carré de surface de chauffe. Le volume d'eau dans la chaudière est assez grand pour se prêter à un débit variable de vapeur.

Les viroles des corps cylindriques, embouties à la presse

hydraulique, présentent des parties planes dans lesquelles sont mandrinés les tubes.

Pour les eaux très incrustantes, l'alimentation se fait dans un compartiment spécial, avec injection d'eau pulvérisée dans

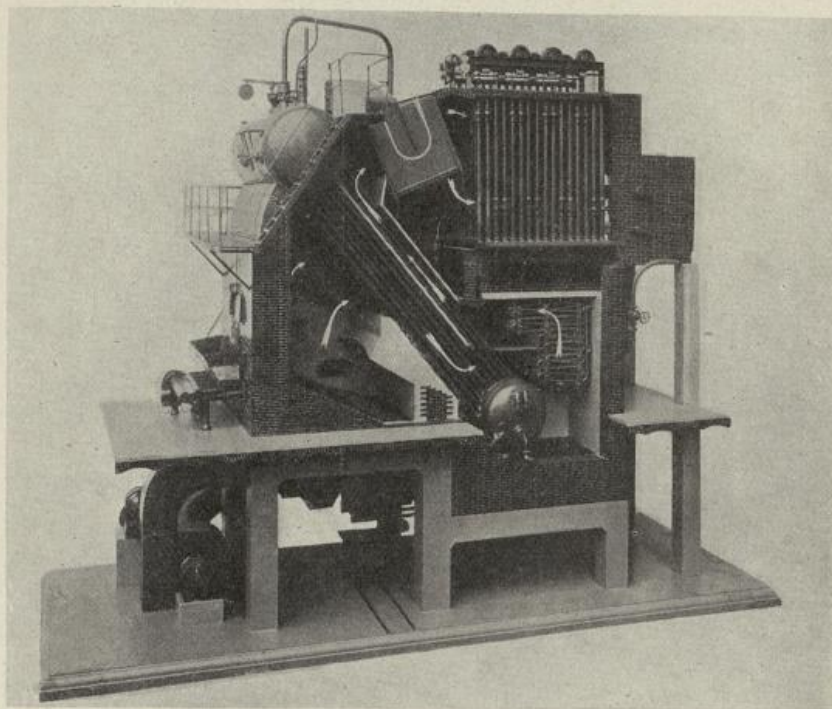


FIG. 123. — Générateur à flux direct de la Société alsacienne de constructions mécaniques : photographie d'un modèle.

la vapeur; ce compartiment est muni d'un robinet d'extraction des boues.

Le corps supérieur de la chaudière est supporté par des pylones métalliques indépendants de la maçonnerie; le corps inférieur repose sur deux supports en forme d'osselets, qui en permettent la dilatation en tous sens.

La maçonnerie laisse un accès facile aux parties métalliques de la chaudière et aux garnissages réfractaires.

Le tableau ci-après, page 154, donne des résultats d'essais d'une chaudière de ce genre, avec des combustibles de qualité inférieure.

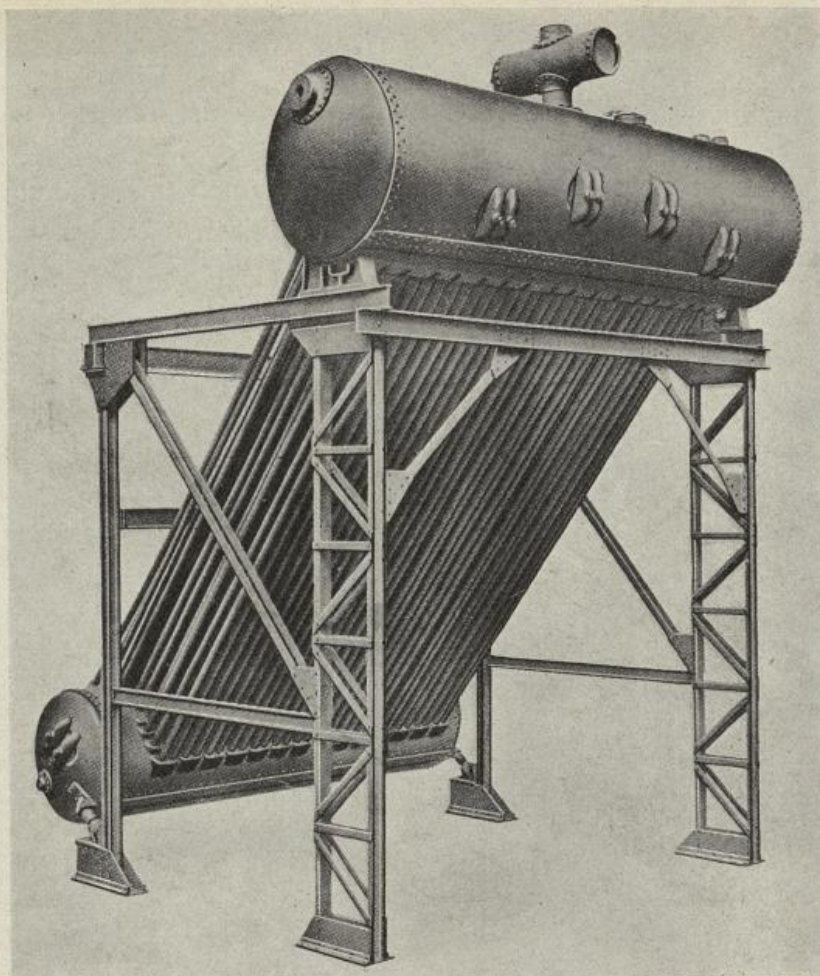


FIG. 124. — Générateur à flux direct de la Société alsacienne de constructions mécaniques (type N) : faisceau tubulaire et corps cylindriques ; charpente métallique portant la chaudière.

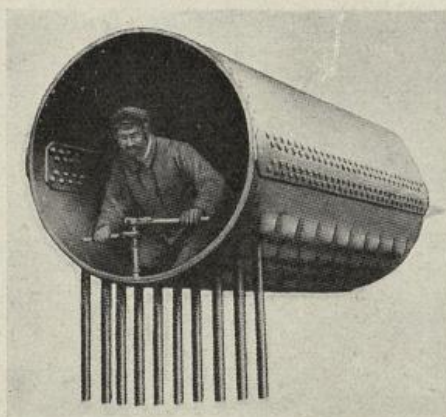


FIG. 125. — Générateur à flux direct de la Société alsacienne de constructions mécaniques : mandrinage des tubes.

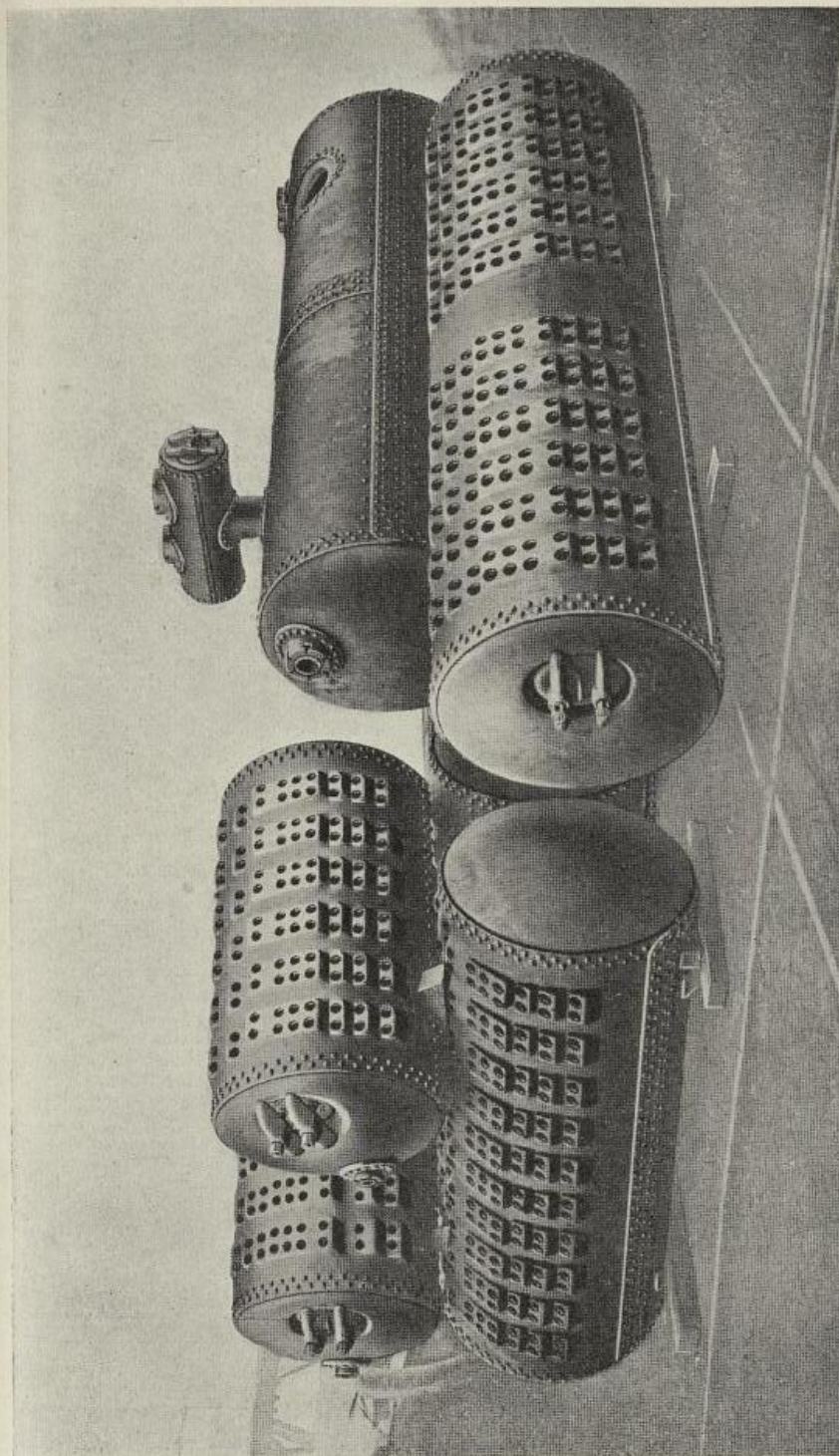


FIG. 126. — Générateur à flux direct de la Société alsacienne de constructions mécaniques : corps cylindriques pour générateurs de divers types (production : 6.000 à 12.000 kg. de vapeur à l'heure).

GÉNÉRATEUR DE VAPEUR, TYPE S

		27 au 30 Janv. 1919	25 au 26 Juil. 1919	31 Octobr. 1919
		37 heures	25 heures	4 heures
Date de l'essai.....				
Durée de l'essai.....				
Nature du combustible.....				
COMBUSTIBLE	Pouvoir calorifique.....	5.682	6.783	1/6 fine de la Sarre 4.700
	Brûlé pendant l'essai.....	34.091	26.569	5/6 Schlamms 3.363
	Brûlé par heure et par élément de surface de grille.....	183,5	200	• 168
	Cendres et scories.....	6.643,5	3.331	924
	Cendres et scories.....	19,4	12,5	27
DÉCHETS	Poids injecté { pendant l'essai.....	213.700	195.290	15.300
	Temp. avant le réchauffeur d'eau.....	5.760	7.820	3.820
EAU D'ALIMENTATION	Temp. pendant l'essai.....	28,8	39,4	49
	Temp. avant le réchauffeur d'eau.....	9,5	25	22
VAPEUR	Temp. après le réchauffeur d'eau.....	85,3	90	116
	Pression effective.....	12,19	13,2	12,8
AIR COMBURANT	Temp. de la vapeur surchauffée.....	336,4	354	339
	Chaleur contenue dans 1 kg. de vapeur.....	748,5	758	750
GAZ DE LA COMBUSTION	Temp. avant réchauffair.....	34,1	32	30
	Temp. après réchauffair.....	125	134	103
VAPORISATION	Tirage à la sortie du générateur en mm. d'eau.....	8,5	24	14
	Teneur en acide carbonique à la sortie du générateur.....	11,5	10	6,25
BILAN CALORIFIQUE	Industrielle par kg. de combustible brut et humide.....	149,5	157	167,5
	Rendement global du générateur.....	6,25	7,37	4,55
	Pertes à la cheminée.....	80,9	79,5	70
	Autres pertes (imbrûlés, rayonnement, etc.).....	7	7,2	14
		12,1	13,3	16

Le tableau ci-dessous d'essais d'une chaudière de type analogue, construite par la Société Alsacienne de Constructions mécaniques pour l'usine du triphasé à Asnières, contient divers détails intéressants :

**Essais de vaporisation à la Compagnie « Le Triphasé »
(Paris-Asnières)**

	ESSAI I le 30 juin 1910	ESSAI II le 2 juillet 1910
Surface de chauffe utile de la chaudière m ²	1×300	2×300
Surface de chauffe du surchauffeur m ²	1× 80	2× 80
Surface de grille (grille à chaîne) m ²	1× 7,50	2× 7,50
Rapport { surface de chauffe } { surface de grille } ...	40	40
Volume d'eau de la chaudière. m ³	1× 17,65	2× 17,65
Surface de vaporisation..... m ²	1× 10,50	2× 10,50
Durée des essais	8 heures	8 heures

COMBUSTIBLE :

Genre de la houille.....	houille d'Anzin	houille d'Anzin
Pouvoir calorifique. Calor. par kg.	7.471	7.514
Brûlé pendant l'essai kg.	7.942	13.538
— par heure kg.	993	1.692
— p. heure et m ² de grille. kg.	132,4	112,8
— p. heure et m ² de surface de chauffe kg.	3,31	2,82

DÉCHETS :

Poids total	kg.	668	955
Fraction du combustible consommé	p. 100	8,41	7,05

GAZ :

Température de l'air sous la grille (degrés centigr.)	21°	21°
--	-----	-----



	ESSAI I le 30 juin 1910	ESSAI II le 2 juillet 1910
Température des gaz avant le sur- chauffeur	774°	785°
Température à la sortie de la chau- dière	270°	263°
Tirage au foyer mm. d'eau	9	5,8
Tirage à la sortie de la chau- dière mm. d'eau	18	15,2

COMPOSITION DES GAZ

A LA SORTIE DES CHAUDIÈRES

Teneur en gaz carbonique.. p. 100	11	10,5
Teneur en oxygène..... p. 100	8	8
Teneur en azote..... p. 100	81	81,5
Quantité d'air par rapport à la quant. théorique nécess.....	1,59	1,58

EAU D'ALIMENTATION

Température de l'eau d'alimenta- tion à l'entrée de la chaudière....	93°,1	93°,5
Poids total injecté..... kg.	69.640	116.234
Poids injecté par heure..... kg.	8.705	14.529
Poids injecté par heure et m² de surface kg.	29,01	24,21

VAPEUR

Pression moyenne..... kg./cm²	11,7	11,98
Température correspondante.....	190°,2	190°,6
Température de la vapeur sur- chauffée	373°	383°,3
Chaleur nécessaire à 1 kg. de vapeur saturée (d'après Mollier).... cal.	575,6	575,4
Chaleur nécessaire à 1 kg. de vapeur surchauffée (d'ap. Mollier).. cal.	674,2	679,1

VAPORISATION

Eau vaporisée par 1 kg. de combus- tible kg.	8,769	8,586
---	-------	-------

	ESSAI I le 30 juin 1910	ESSAI II le 2 juillet 1910
Equivalent en eau prise à 0° et vaporisée à 100°..... kg.	9,210	9,114

RÉCHAUFFEUR

Surface de chauffe du réchauffeur..... m ²	1×240	2×240
Températ. des gaz à l'entrée du réchauffeur.....	270°	263°
Températ. des gaz à la sortie du réchauffeur.....	144°	142°,5
Températ. de l'eau à l'entrée du réchauffeur.....	31°,5	32°
Températ. de l'eau à la sortie du réchauffeur.....	93°,1	92°
Différence de la températ. moyenne entre gaz et eau.....	144°,7	140°,7

Le bilan thermique de ces deux essais s'établit comme il suit :

	ESSAI I le 30 juin 1910		ESSAI II le 2 juillet 1910	
	Calories	p. 100	Calories	p. 100
<i>Chaleur utilisée pour 1 kg de houille :</i>				
a) Pour l'évaporation.....	5.047	67,554	4.940	65,744
b) Pour la surchauffe.....	865	11,578	890	11,845
c) Pour le réchauffage de l'eau d'alimentation au réchauffeur	540	7,228	528	7,026
<i>Chaleur totale utilisée...</i>	6.452	86,360	6.358	84,615

La chaudière Duquenne (fig. 127 et 128) comporte des tubes verticaux de diamètre moyen (40 à 60 mm.), assemblés dans des collecteurs à section rectangulaire, réunis eux-mêmes au réservoir supérieur A et au collecteur inférieur B, dit de retour d'eau, par un joint conique, métal sur métal, serré par deux boulons

(fig. 129). Le démontage d'un élément est, par suite, facile. Des bouchons vissés dans les collecteurs, devant chaque tube vaporisateur, en permettent la visite intérieure. Le collecteur supérieur débouche au-dessus du plan d'eau dans le réservoir supérieur

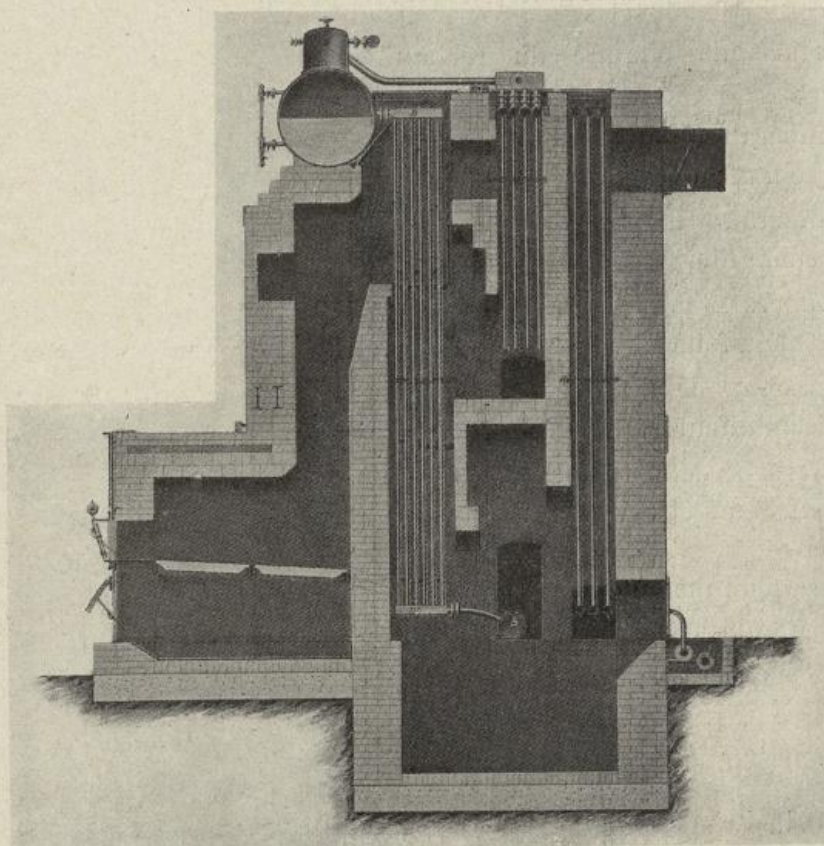


FIG. 127. — Chaudière Duquenne, à éléments verticaux démontables, avec surchauffeur et réchauffeur.

rieur. Des tubes de retour d'eau relient le réservoir supérieur au collecteur inférieur B (fig. 128).

En sortant du réchauffeur, l'eau arrive à la partie supérieure des tubes de retour d'eau.

La combustion se fait dans un avant-foyer. Un registre permet de régler le débit des gaz autour du surchauffeur.

A titre d'exemple, une chaudière prévue pour une production horaire normale de 2.000 kilogrammes de vapeur, à la pression de 15 kilogrammes par centimètre carré et surchauffée à 310° , a les dimensions caractéristiques suivantes :

Surface de grille. $3,2 \text{ m}^2$

Surfaces de chauffe :

vaporisateur...	72 m^2
surchauffeur...	15 —
réchauffeur....	28 —

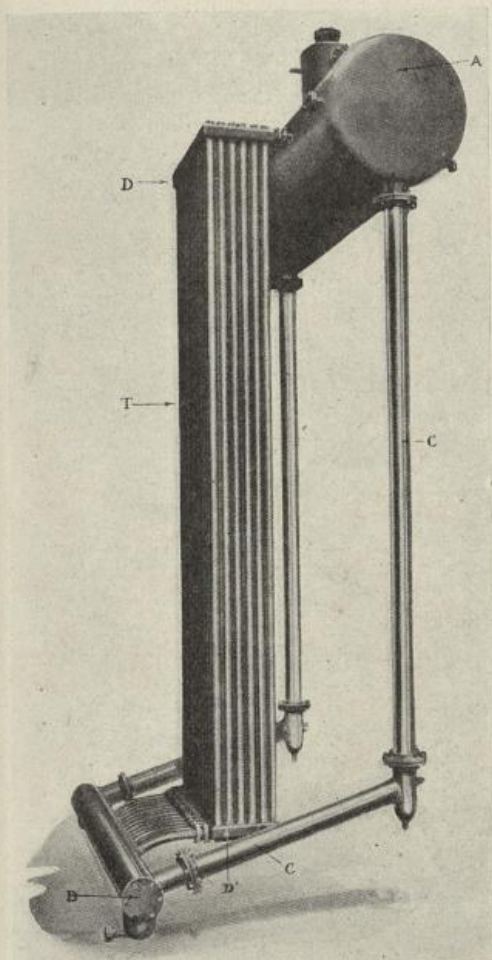


FIG. 128. — Chaudière Duquenne.

A, réservoir d'eau et de vapeur;
B, collecteur inférieur de retour d'eau;
C, tubes de retour d'eau;
D D', collecteurs, supérieur et inférieur;
T, tubes vaporisateurs.

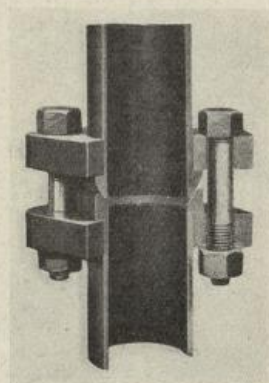


FIG. 129. — Chaudière Duquenne; assemblage des collecteurs avec le réservoir d'eau et de vapeur et avec le collecteur inférieur de retour d'eau.

La figure 130 est un projet de chaudière, chauffée au charbon pulvérisé, pour les mines de Béthune.

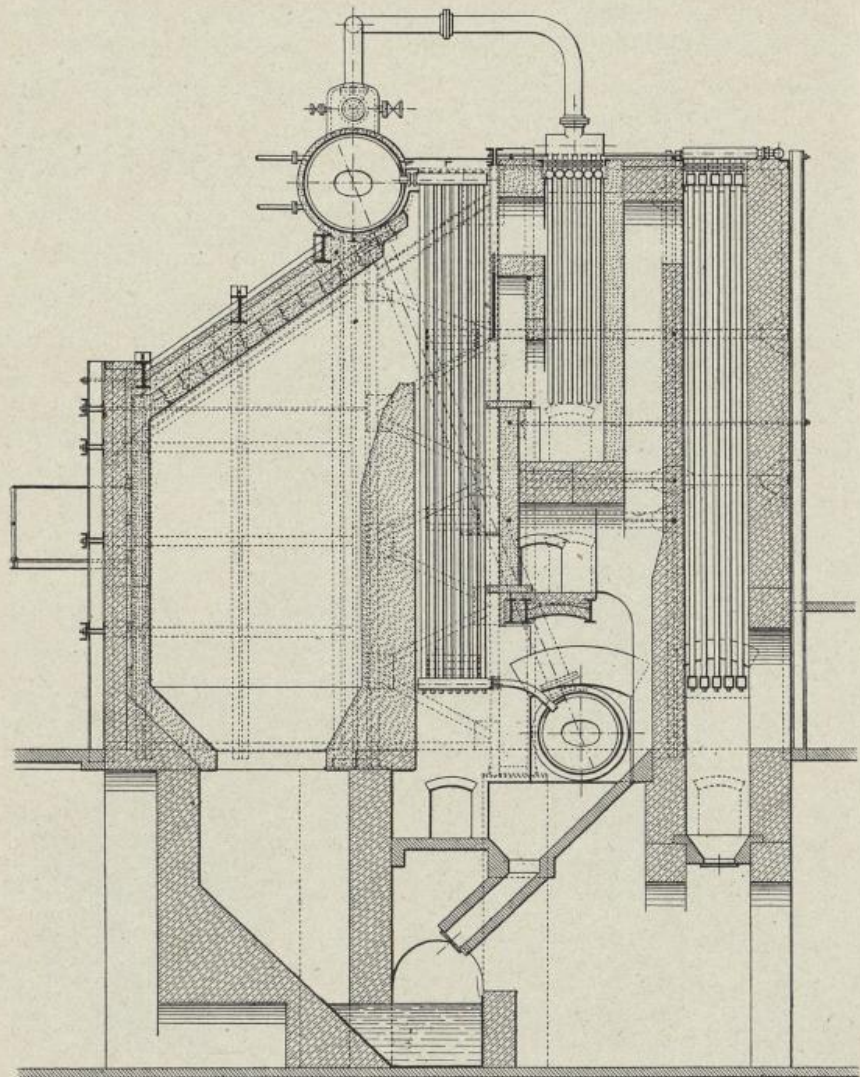


FIG. 130. — Chaudière Duquenne avec chauffage au charbon pulvérisé.

Surfaces de chauffe : Vaporisateur.....	500 m ²
Surchauffeur.....	120 —
Réchauffeur.....	300 —
Timbre : 15 kg.	

34. Chaudières à tubes d'eau concentriques. — En fermant une extrémité des tubes à eau, il devient nécessaire d'y placer un tube de circulation pour amener l'eau malgré le dégagement de vapeur. Tel est le tube Field (voir fig.132). L'entrée d'eau

dans le tube intérieur est gênée par le dégagement de vapeur sur tout son pourtour; la prise d'eau latérale du tube Montupet (fig. 131) corrige ce défaut.

La petite chaudière Field (fig. 132) est souvent employée, bien que la surface de chauffe en soit mal utilisée par suite du pas-

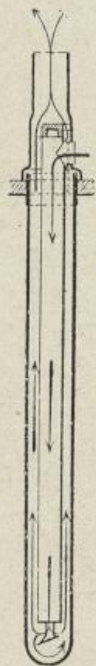


FIG. 131. — Tube Field, avec séparation des courants, de Montupet; l'eau entre dans le tube central par une ouverture latérale; la petite plaque placée à la partie inférieure est destinée à empêcher l'entrée de vapeur dans le tube central.

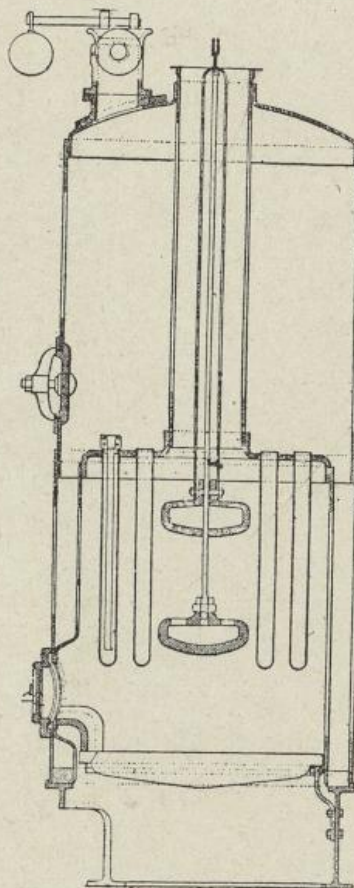


FIG. 132. — Chaudière Field.

sage direct des gaz de la grille à la cheminée, l'obturateur central n'étant pas très efficace, et malgré le danger de la cheminée fortement chauffée qui traverse la chambre de vapeur.

La disposition du tube Field a été appliquée, avec de grandes dimensions, dans plusieurs types de chaudières.

Les tubes de la chaudière Niclausse (fig. 133 et 134), légèrement inclinés, sont branchés sur des collecteurs; un collecteur,

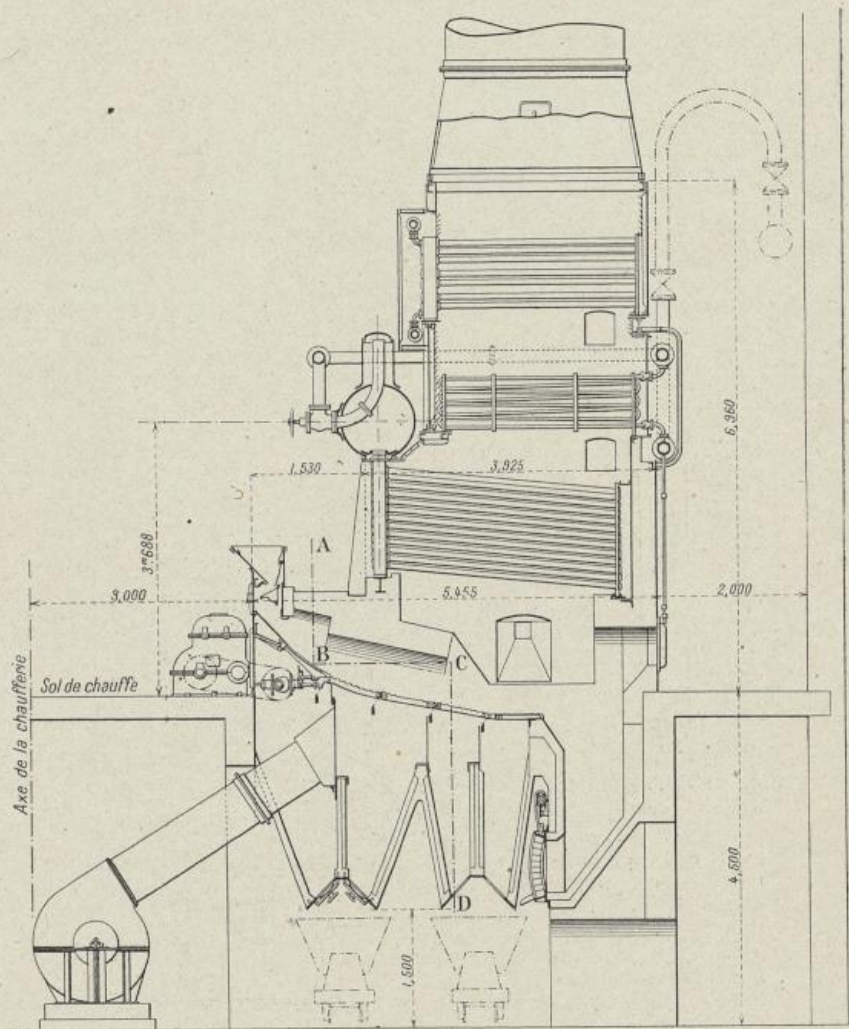


FIG. 133. — Chaudière Niclausse: dispositions les plus récentes (1921); coupe longitudinale.

Longueur de la grille.....	3 m. 750
Largeur de la grille.....	6 m. 940
Surface de grille	26 m ² .
Surfaces de chauffe : Tubes vaporisateurs.....	620 m ² .
Tubes réchauffeurs	310 m ² .
Surchauffeur	308 m ² .
Timbre.....	20 kg.
Température de surchauffe	350°.
Production horaire de vapeur avec charbon à 7.200 calories ..	20.000 kg.

avec deux rangées verticales de tubes en quinconce, constitue un *élément*. Les collecteurs sont divisés en deux passages par une cloison verticale : un de ces passages, d'où partent les tubes

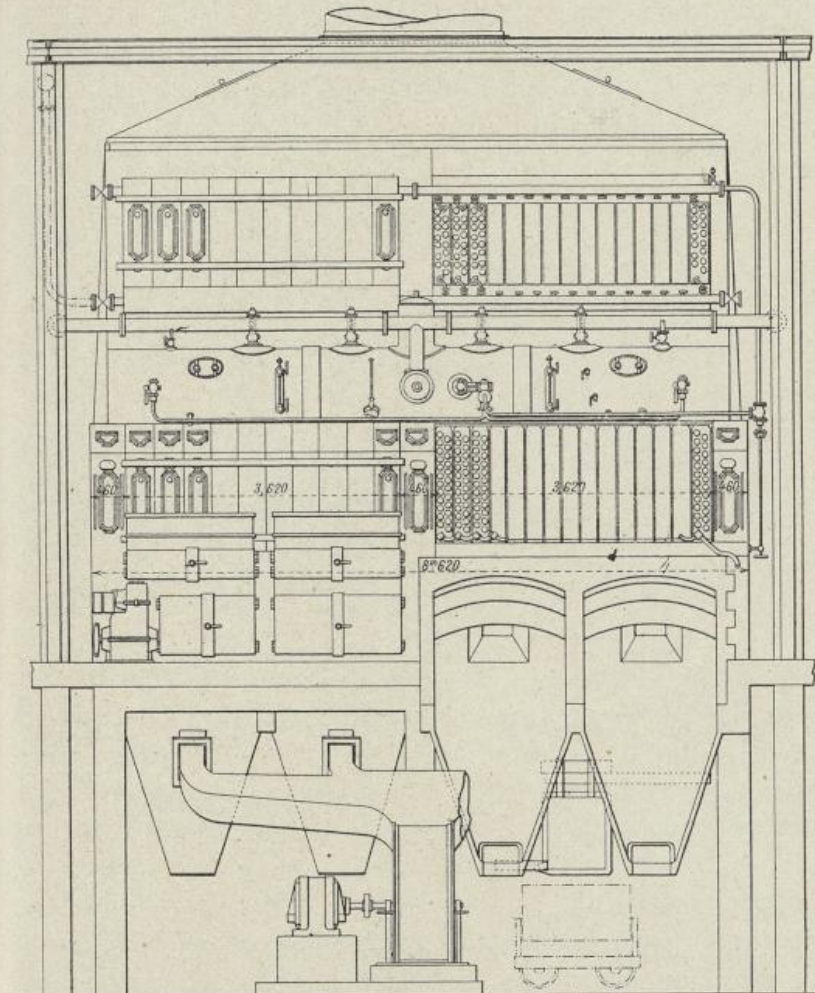


FIG. 134. — Chaudière Nielauss : demi-vue de face et demi-coupe transversale.

intérieurs, sert à la descente de l'eau ; l'eau et la vapeur remontent par le second passage, dans lequel débouchent les tubes extérieurs. Les éléments sont assemblés à la partie inférieure d'un corps cylindrique à moitié plein d'eau.

Les tubes extérieurs (fig. 135) sont montés dans les deux faces planes du collecteur; ils sont maintenus, deux à deux, par un étrier que serre un écrou; vu la faible différence de diamètre des deux trous d'assemblage du tube dans le collecteur, la force qui tend à le déboîter est minime. Le diamètre extérieur des tubes de la figure 133 est de 80 millimètres. L'extrémité fermée des tubes repose librement dans les trous d'une plaque de support.

Le constructeur avait muni l'extrémité fermée de chaque tube

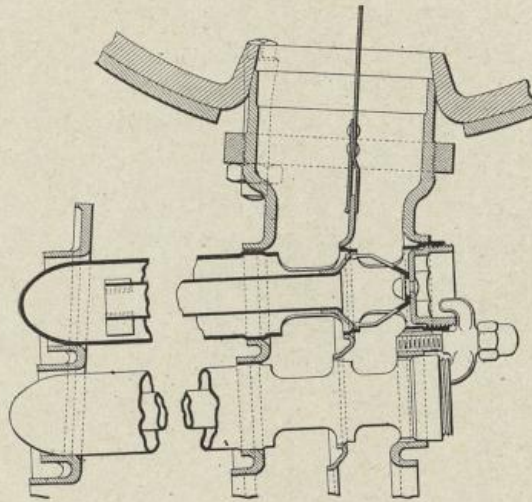


FIG. 135. — Chaudière Niclausse : coupe par un élément avec détail des tubes.

d'un bouchon vissé, qui en permettait la vidange. Mais ces bouchons, rarement enlevés, ont été supprimés dans les constructions récentes.

Le tube intérieur est fixé à un bouchon qui se visse dans le tube extérieur. Tous les assemblages de tubes doivent être exécutés avec une grande précision.

La longueur des tubes est à peu près la même que celle de la grille; ils sont superposés en nombre suffisant pour donner la surface voulue.

Tous les collecteurs portent à leur partie inférieure des pièces dites *clarinettes* (fig. 136), reliées par des tuyaux, et servant à la vidange.

Pour éviter les avaries des tubes inférieurs, dues à l'emploi d'eau très incrustante, MM. Niclausse ont divisé le faisceau de tubes en deux circuits, successivement parcourus par l'eau. Le premier comprend la partie supérieure de 4 collecteurs sur 5 (fig. 137) divisés par une cloison placée vers le tiers de la hauteur à partir du bas; le corps supérieur est divisé par une cloison en deux compartiments; l'alimentation se fait dans la vapeur, et l'eau tombe dans le compartiment qui dessert le premier circuit. Elle circule ainsi dans le faisceau supérieur des tubes, qui l'échauffent sans produire beaucoup de vapeur. Mais dans

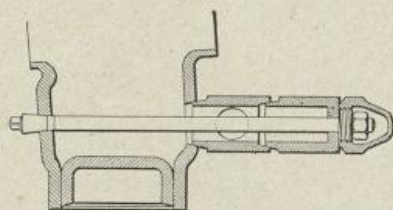


FIG. 136. — Chaudière Niclausse: coupe par un élément, partie inférieure, avec montage des clarinettes de vidange.

ce premier trajet elle dépose une grande partie de ses matières solides.

Le second circuit comprend le collecteur non cloisonné, un collecteur horizontal de communication, la partie inférieure des collecteurs cloisonnés et les tubes le plus fortement chauffés.

Cette disposition, qui remonte à 1910, a donné de bons résultats, mais elle n'est appliquée que dans des cas exceptionnels.

35. Chaudières à tubes d'eau de petit diamètre. — A condition de les alimenter avec de l'eau ne contenant pas de matières incrustantes, on peut donner aux tubes à eau des chaudières un petit diamètre.

Le diamètre intérieur est de 20 à 30 millimètres dans les chaudières *express* de la marine, qui ont une grande surface de chauffe avec un poids et un encombrement restreints.

36. Chaudières mixtes. — Certaines chaudières réunissent les caractères de catégories différentes, notamment en ayant à la

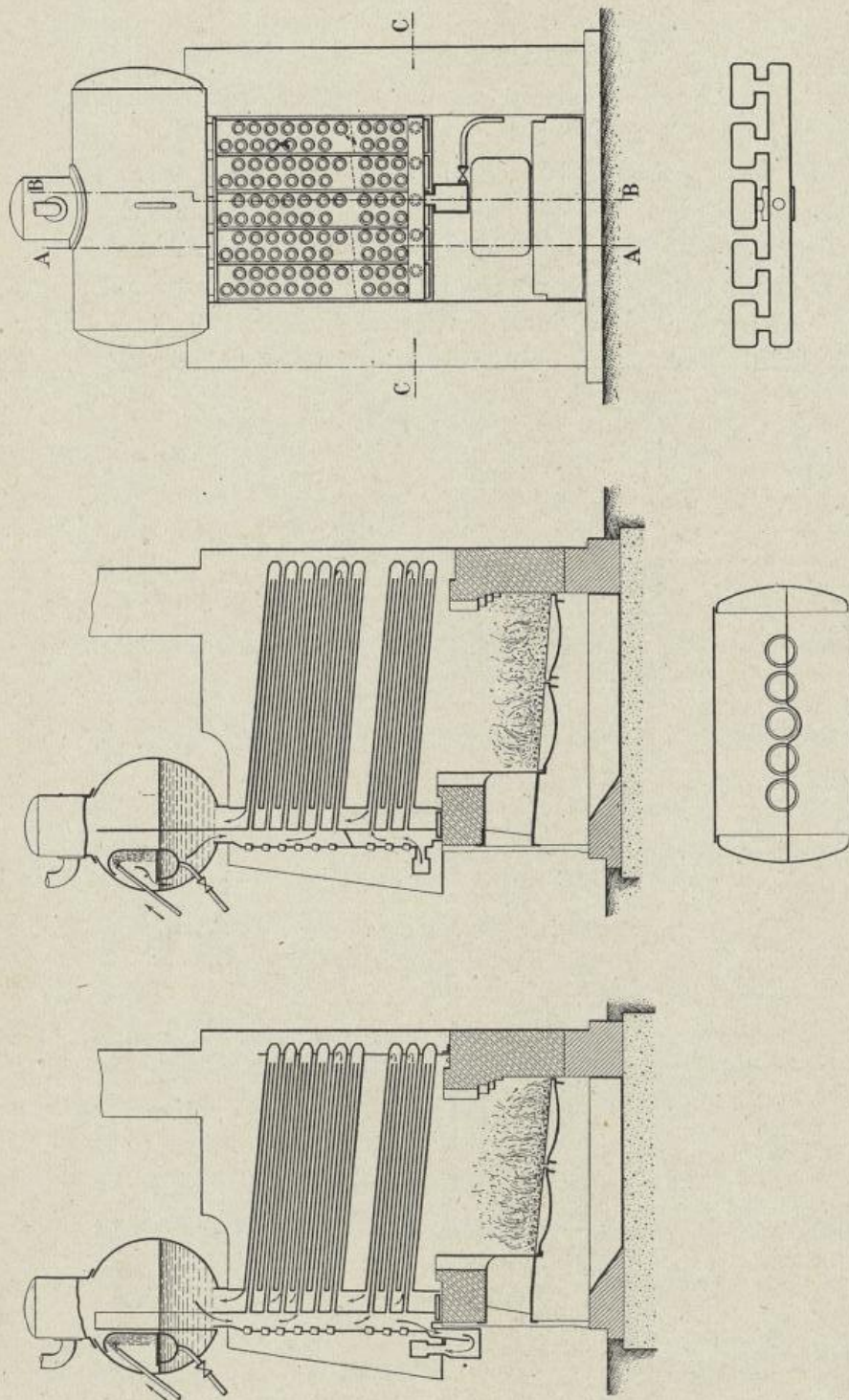


Fig. 137. — Chaudière Niclausse avec double circuit de circulation pour eaux très incrustantes : coupe suivant BB; coupe suivant AA; vue de face; vue en plan du corps cylindrique; coupe horizontale, suivant CC, de la partie inférieure des collecteurs.

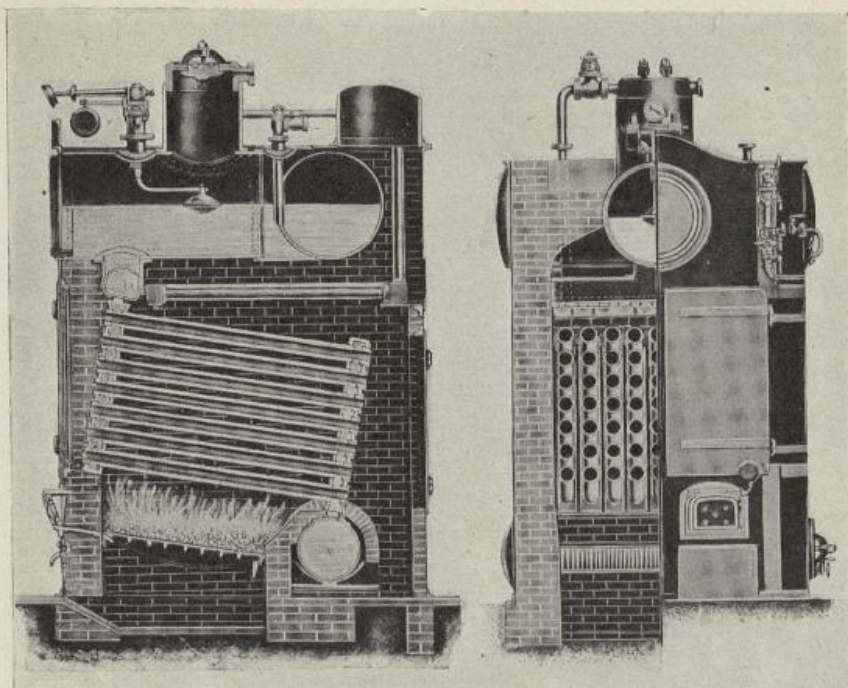


FIG. 138. — Chaudière Roser à tubes d'eau et tubes de fumée concentriques. Les gaz chauds circulent autour des tubes d'eau, puis dans des tubes à fumée et enfin sous le réservoir d'eau, au-dessus de la cloison formée par le sécheur.

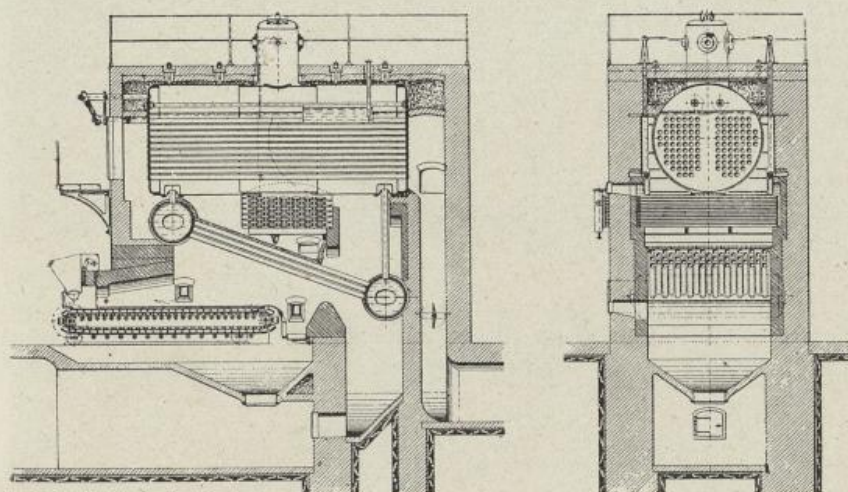


FIG. 139. — Chaudière ambitubulaire de la Société alsacienne de constructions mécaniques avec grille à chaîne et surchauffeur.

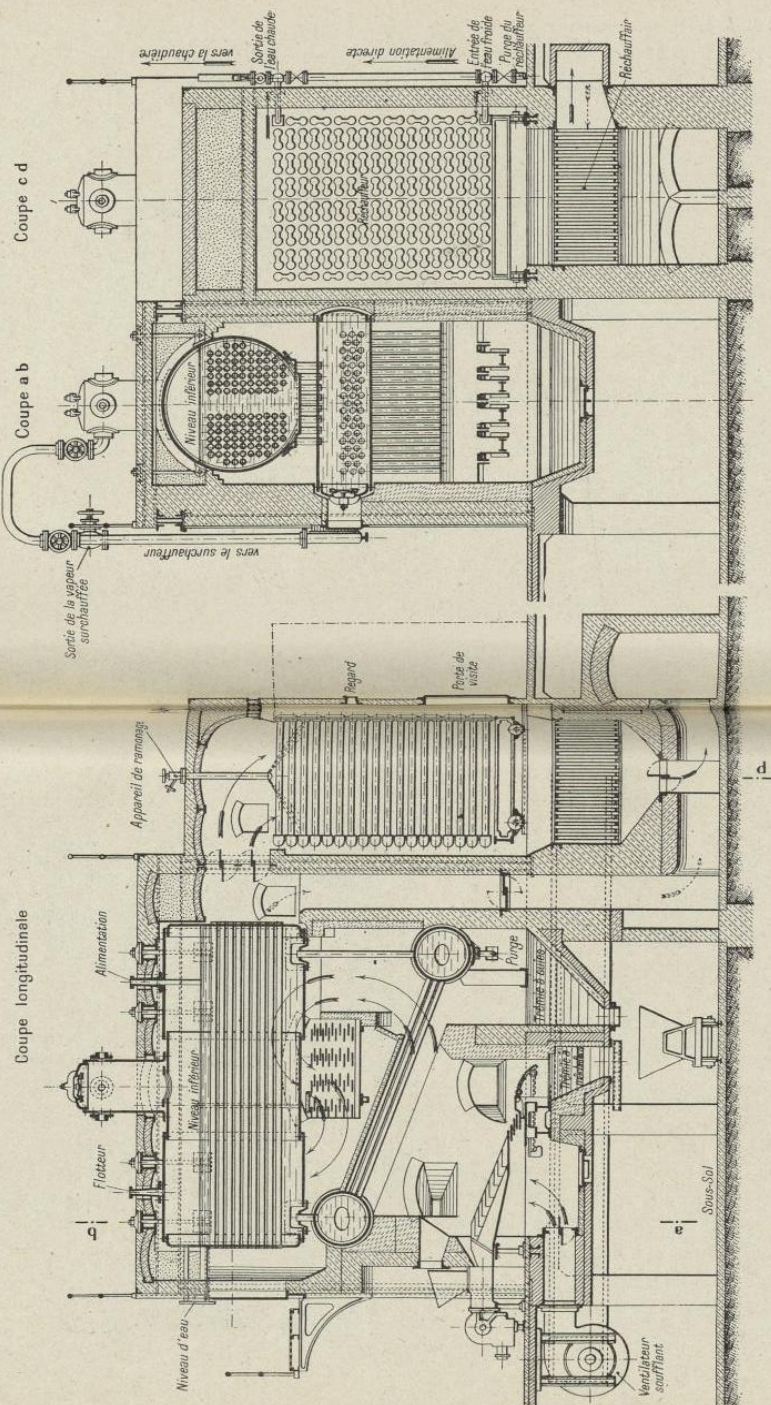


FIG. 140. — Chaudière ambitubulaire de la Société alsacienne de constructions métalliques avec foyer Erith-Riley, surchauffeur, réchauffeur d'eau et réchauffeur d'air; coupe longitudinale.

FIG. 141. — Chaudière ambitubulaire de la Société alsacienne de constructions mécaniques: coupes *ab* et *cd* de la fig. 140.

fois des tubes de fumée et des tubes d'eau concentriques. Telle est la chaudière Roser (fig. 138), étudiée pour occuper un emplacement restreint. Ces chaudières se construisent avec une surface de 18 à 200 mètres carrés, pour une production normale

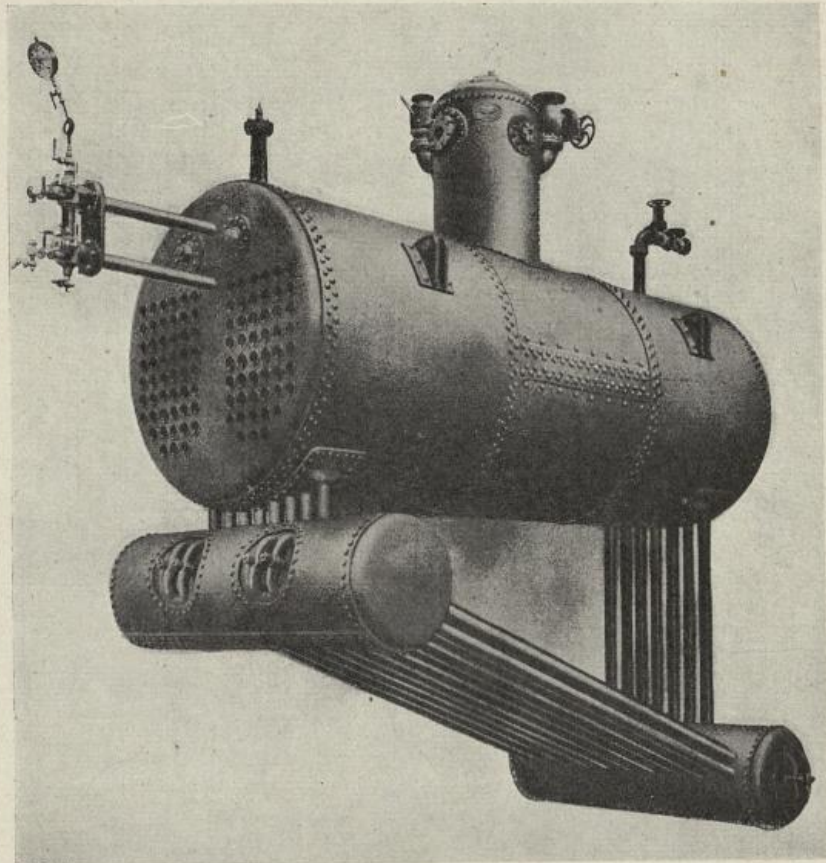


FIG. 142. — Chaudière ambitubulaire de la Société alsacienne de constructions mécaniques, sans le massif de briques.

de 250 à 2.500 kilogrammes de vapeur à l'heure. Les tubes à eau sont mandrinés dans les communications verticales; les tubes à fumée sont assemblés à joints Bérendorf. Au-dessus du faisceau tubulaire, des tubes sécheurs de vapeur forment cloison pour les gaz chauds.

Dans la chaudière *ambitulaire* de la Société Alsacienne de Constructions mécaniques (fig. 139 à 142), des tubes à eau réu-

nissent deux bouilleurs transversaux, communiquant avec un corps cylindrique par des tubes verticaux. Ce corps cylindrique est traversé par des tubes à fumée. L'appareil peut être considéré comme dérivant de la chaudière semi-tubulaire, dont les bouilleurs longitudinaux sont remplacés par des tubes à eau. Le corps supérieur est suspendu à une charpente métallique indépendante de la maçonnerie.

On trouvera ci-après les résultats d'essais d'une de ces chaudières.

Essais exécutés par l'Association alsacienne de propriétaires d'appareils à vapeur sur une chaudière ambitubulaire de 130 m² 5 de surface de chauffe, 3 m² 51 de surface de grille, munie d'un surchauffeur de 20 m² 3 et d'un réchauffeur de 68 m².

ESSAI N°	I	II	III	IV
Combustible :				
Pouvoir calorifique inférieur (calories par kg.)	7.165	7.207	7.245	7.195
Poids brûlé par heure et mètre carré de grille kg.	72,9	87,3	108,9	150,2
Eau d'alimentation vaporisée par heure kg.	2.172,3	2.651,8	3.285,3	4.295,6
Température à l'entrée du réchauffeur	11°3	11°6	11°3	11°7
Température à la sortie du réchauffeur	65°5	60,9	62°4	65°2
Pression effective kg. par cm ²	11,19	11,53	11,67	12,40
Température de la vapeur surchauffée	283°	292°	302°	324°
Teneur en CO ² des gaz à la sortie de la chaudière, en vol. p. 100	11,64	12,75	12,00	12,40
Température des gaz à la sortie de la chaudière	251°	261°	278°	313°
Température des gaz à la sortie du réchauffeur	133°	141°	160°	191°
Tirage à la sortie de la chaudière en mm. d'eau	3,06	4,15	7,81	14,96

ESSAI N°	I	II	III	IV
Eau vaporisée par kilogramme de combustible	8,492	8,655	8,640	8,146
Chaleur utilisée dans la chaudière p. 100	71,4	73,0	72,3	68,3
Chaleur utilisée dans le surchauffeur p. 100	6,3	6,9	7,4	8,3
Chaleur utilisée dans le réchauffeur p. 100	6,4	5,9	6,1	6,1
Chaleur perdue par la cheminée p. 100	6,7	6,5	8,0	9,6
Chaleur perdue par les cendres et scories p. 100	0,7	0,5	0,5	0,7
Chaleur perdue par combustion incomplète, rayonnement, etc. p. 100	8,3	6,4	5,2	6,8
Rendement thermique de l'appareil	84,1	85,8	85,8	82,7

Les chaudières Mac-Nicol (fig. 143 et 144) et Joya (fig. 145 et 146) dérivent de la chaudière à bouilleurs, dont la partie antérieure des bouilleurs est remplacée par des tubes d'eau.

37. Chaudières à flammes perdues. — Certains fours rejettent des gaz à une température élevée, qu'on peut utiliser pour la production de vapeur. L'ancienne chaudière cylindrique verticale, fréquemment employée dans les forges, où elle avait l'avantage d'occuper peu de place, a causé quelques accidents graves qui lui ont donné une mauvaise réputation.

La figure 147 représente une de ces chaudières verticales, munie par J. Lanet d'un faisceau de tubes d'eau et d'un cloisonnement intérieur pour l'amélioration de la circulation.

Toute chaudière peut fonctionner à flammes perdues : il convient de la choisir peu encombrante, soit qu'on la monte au-dessus du four qu'elle dessert, soit qu'on la place à côté, ce qui permet de la chauffer directement lors des arrêts du four. Les chaudières à tubes d'eau conviennent bien pour cet usage (fig. 148).

On peut estimer, d'après les considérations suivantes, la sur-

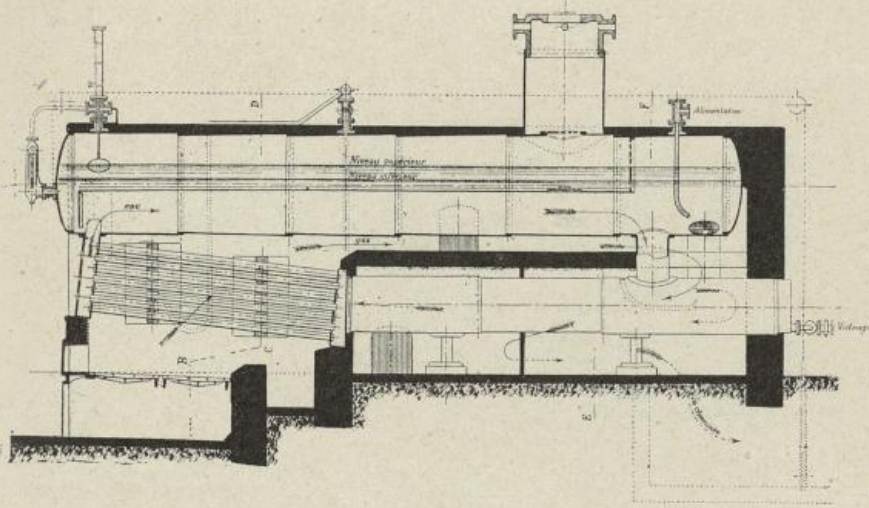


FIG. 143. — Chaudière horizontale Mac-Nicol, à deux bouilleurs, construite par J. Lanet : coupe longitudinale. Cloisonnement intérieur destiné à améliorer la circulation et à donner de la vapeur sèche.

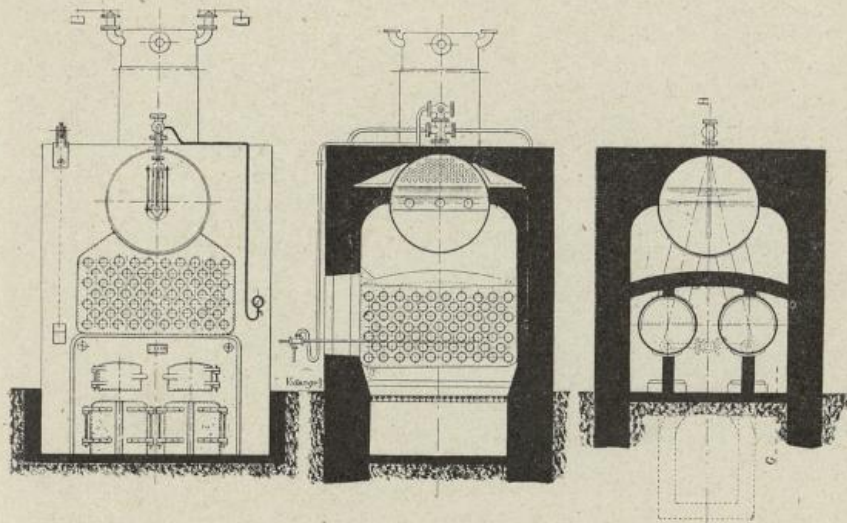


FIG. 144. — Chaudière Mac-Nicol: élévation transversale; coupe ABCD et coupe EF de la fig. 143.

face à donner à une telle chaudière par rapport à la surface qu'aurait une chaudière ordinaire brûlant la même quantité de

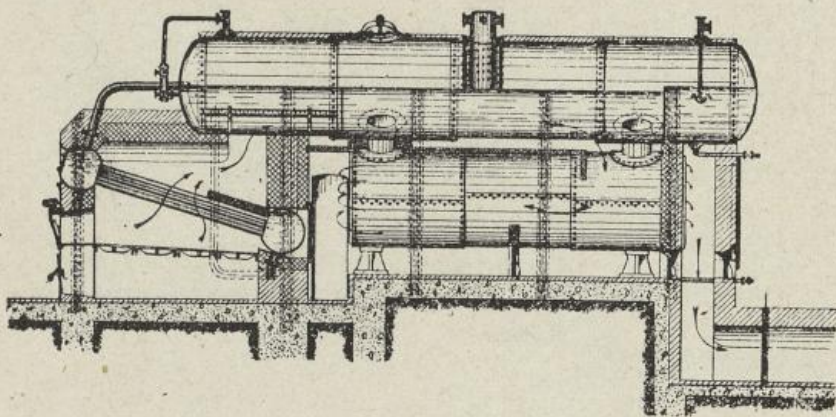


FIG. 145. — Chaudière Joya, à dérivation et à bouilleurs tubulaires.

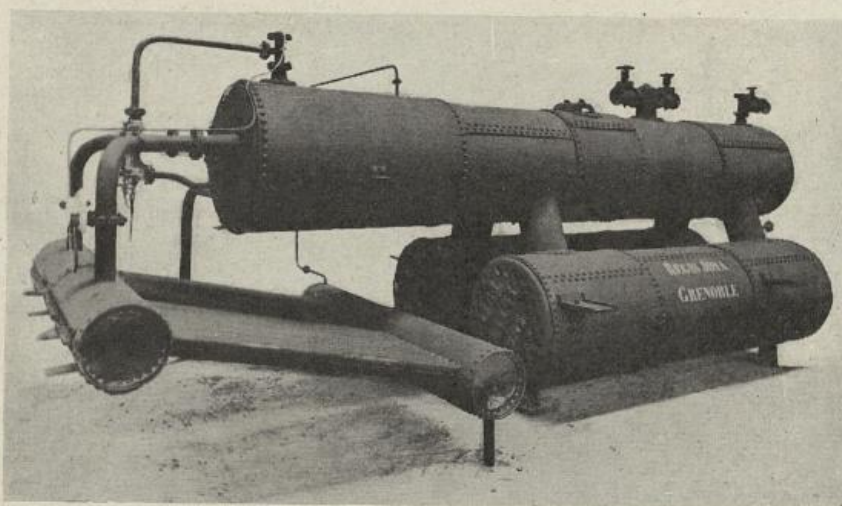


FIG. 146. — Chaudière Joya, à dérivation et à bouilleurs tubulaires.

charbon que le four desservi. En considérant seulement la chaleur transmise par convection, et en admettant un flux de chaleur proportionnel à l'écart des températures, la surface S qui

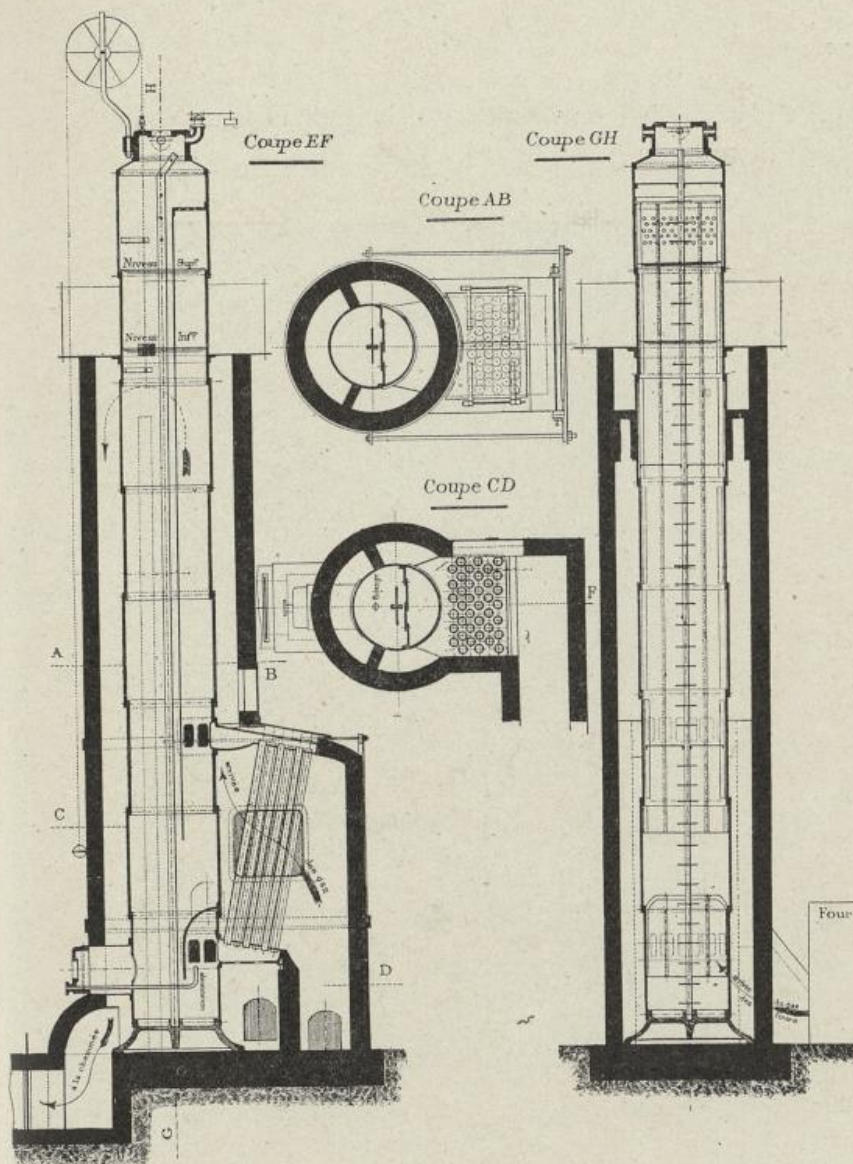


FIG. 147. — Chaudière verticale Mac-Nicol, chauffée par les gaz perdus d'un four.

refroidit les gaz de t_1 à t_2 , avec une température t_0 dans la chaudière, est donné par la formule :

$$S = K \mathcal{L} \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0},$$

où $\mathcal{L}$ désigne le logarithme hyperbolique et K un coefficient qui tient compte du débit de gaz.

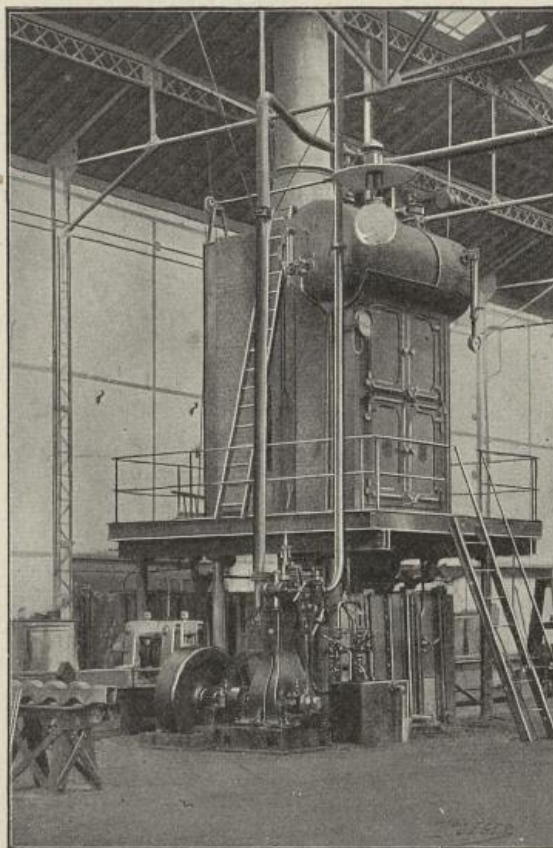


FIG. 148. — Chaudière Babcock et Wilcox de 81 m² de surface de chauffe, au-dessus d'un four à souder.

La chaudière à flammes perdues recevant le même débit de gaz à la température t'_1 devra, pour les refroidir jusqu'à la température t_2 , avoir une surface S' telle que :

$$S' = K \mathcal{L} \frac{t'_1 - t_0}{t_2 - t_0},$$

d'où :

$$S' = S \frac{\mathcal{L} \frac{t'_1 - t_0}{t_2 - t_0}}{\mathcal{L} \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}}$$

$$\text{Avec } t_1 = 1.600^\circ, \quad t'_1 = 800^\circ, \\ t_2 = 300^\circ, \quad t_0 = 200^\circ,$$

on trouve :

$$S'_1 = 0,53 S_1,$$

à peu près la moitié de la surface de la chaudière ordinaire.

Ce calcul revient à déterminer sur le diagramme de la figure 66 le point où la température des gaz est descendue à la valeur t'_1 ; la surface de chauffe est comptée à partir de ce point.

38. Réchauffeurs d'eau. — Les réchauffeurs d'eau ou *économiseurs* sont formés de tubes. Ils sont installés à la suite des chaudières dans le courant gazeux; les conditions d'installation sont telles qu'il ne s'y forme pas de vapeur, l'eau n'étant pas chauffée jusqu'à la température de vaporisation. Il en résulte qu'ils ne satisfont pas au programme qui consisterait à séparer la surface de chauffe totale en deux parties, un vaporisateur et un réchauffeur à circulation méthodique amenant l'eau à la température de vaporisation dans les conditions indiquées au § 23.

Par suite de la faible température des gaz des dépôts de suie se forment rapidement sur les tubes des réchauffeurs; on les enlève soit à l'aide de racloirs, soit avec des jets de vapeur.

Dans le travail cité au § 20, M. Kammerer signale des essais d'un économiseur Green où le coefficient de transmission 17 sur des surfaces propres s'abaissait à 13 lorsqu'on n'enlevait pas la suie.

Si la communication entre le réchauffeur et la chaudière qu'il dessert peut être interrompue par la manœuvre d'une vanne (vanne dont l'absence serait d'ailleurs gênante), il est indispensable que le réchauffeur soit muni de soupapes de sûreté, non seulement en vue de la production éventuelle de vapeur, mais

parce que la dilatation de l'eau amènerait la rupture de l'appareil.

Les tubes des réchauffeurs sont en fonte ou en acier, l'acier paraissant plus exposé aux piqûres que la fonte.

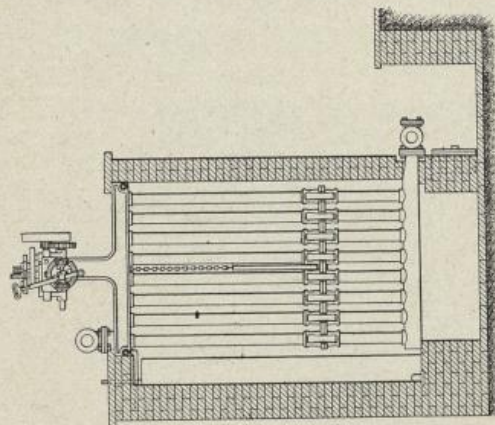
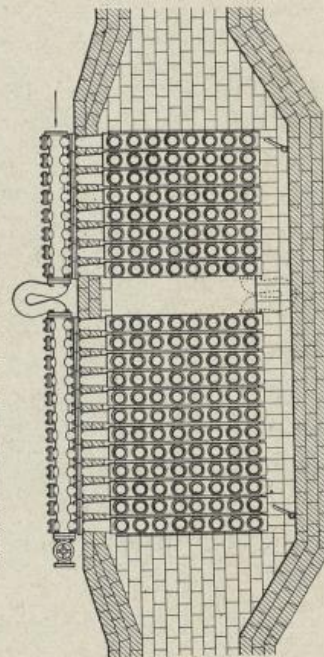
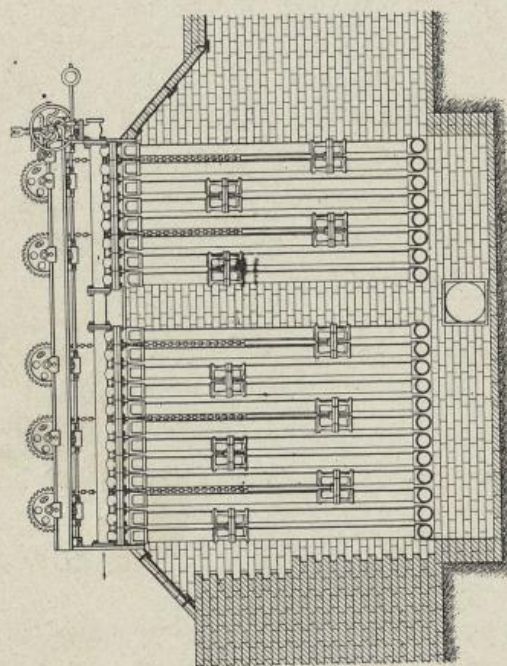


FIG. 149 et 150. — Economiseur Green de 160 tubes : coupe longitudinale, coupe transversale et plan.



L'économiseur Green (fig. 149 et 150) est formé de tubes verticaux en fonte, longs de 2 m. 750 et de 116 millimètres de diamètre intérieur. Ces tubes sont assemblés à leurs deux extrémités

dans des conduits horizontaux. L'ensemble de deux conduits réunis par un faisceau de tubes constitue une sorte de grille qu'on place perpendiculairement au courant gazeux. Ces faisceaux sont disposés à la suite les uns des autres. Tous les conduits horizontaux inférieurs sont branchés sur un collecteur d'arrivée d'eau, et tous les conduits supérieurs sur un collecteur d'eau chaude. La circulation se fait donc par courants parallèles dans tous les tubes, et avec lenteur.

Le collecteur supérieur porte une soupape de sûreté. Les conduits supérieurs sont munis de tampons de visite au-dessus des tubes verticaux. Ces tampons ont une portée conique et la pression de l'eau les applique sur leur siège sans joint intermédiaire. Sur chaque conduit, un tampon un peu plus grand que les autres permet de les enlever sans démontage d'autres pièces. On remarquera que ces tampons n'existent pas pour les tubes extrêmes, placés au-dessous du collecteur supérieur, à moins que ce collecteur lui même n'en soit muni.

Une particularité est le ramonage continu des tubes par des racloirs, qui reçoivent un mouvement lent de montée et de descente. Une chambre à suie est ménagée dans le carneau au-dessous de l'économiseur. En outre, on laisse dans le carneau un passage latéral pour la visite, passage fermé par une porte à chacune de ses extrémités.

Pour fixer les dimensions de l'économiseur, le constructeur indique qu'il doit renfermer la quantité d'eau d'alimentation employée en une heure. Chaque tube contenant 29 litres, cette règle détermine le nombre des tubes nécessaires. En supposant que la température de l'eau s'élève de 100° , la surface d'un tube, égale à un mètre carré, transmettra par heure 2.900 calories; en supposant en outre un écart moyen de 180° entre les températures des gaz et de l'eau, le coefficient de transmission serait 15.

Ce calcul admet que tous les tubes fonctionnent de même; mais les faisceaux successifs sont en contact avec des gaz de moins en moins chauds, de sorte que l'eau doit sortir plus chaude des premiers faisceaux que des derniers, et circuler plus vite dans ces premiers faisceaux. Il est vrai qu'une certaine

compensation doit se produire entre ces deux actions, l'augmentation de la vitesse réduisant l'élévation de température. Des expériences à ce sujet seraient intéressantes.

La figure 151 représente un économiseur Green à enveloppe métallique.

Les figures 98 et 99 montrent un réchauffeur en tubes d'acier annexé à une chaudière Belleville.

Considérant que souvent les réchauffeurs n'élèvent pas la température de l'eau jusqu'à 100°, M. L. Neu soustrait son réchauffeur à la pression de la chaudière : la pompe alimentaire y prend l'eau chaude.

L'appareil (fig. 152) se compose d'éléments formés chacun de tubes verticaux en fonte raccordés par des coudes semi-circulaires : dans chaque élément, l'eau circule méthodiquement en entrant du côté de la sortie des gaz. Tous les points hauts des coudes supérieurs sont reliés par une tuyauterie, de 10 millimètres de diamètre, débouchant dans l'atmosphère, pour le dégagement de l'air. Les tubes sont nettoyés extérieurement par des souffleries à vapeur.

Il est clair qu'on pourrait combiner ce réchauffeur avec un second, faisant partie de la chaudière.

39. Surchauffeurs. — Les surchauffeurs sont généralement composés de tubes en acier de petit diamètre, cintrés en U. Exceptionnellement la fonte a été employée dans le surchauffeur Schwœrer (fig. 153).

Les constructions usuelles comprennent deux collecteurs réunis par les tubes surchauffeurs. La vapeur saturée pénètre dans un collecteur, et le second reçoit la vapeur surchauffée. Les tubes en U sont placés horizontalement ou verticalement. En principe, la position verticale paraît préférable à l'horizontale, plus sujette aux déformations en cas de température excessive. Mais l'orientation est commandée par l'emplacement disponible.

Les tubes sont mandrinés dans les collecteurs. M. Duquenne les fixe par soudure autogène.

Pour les locomotives, la disposition Schmidt (fig. 154), où les

tubes surchauffeurs font quatre parcours dans des tubes à fu-

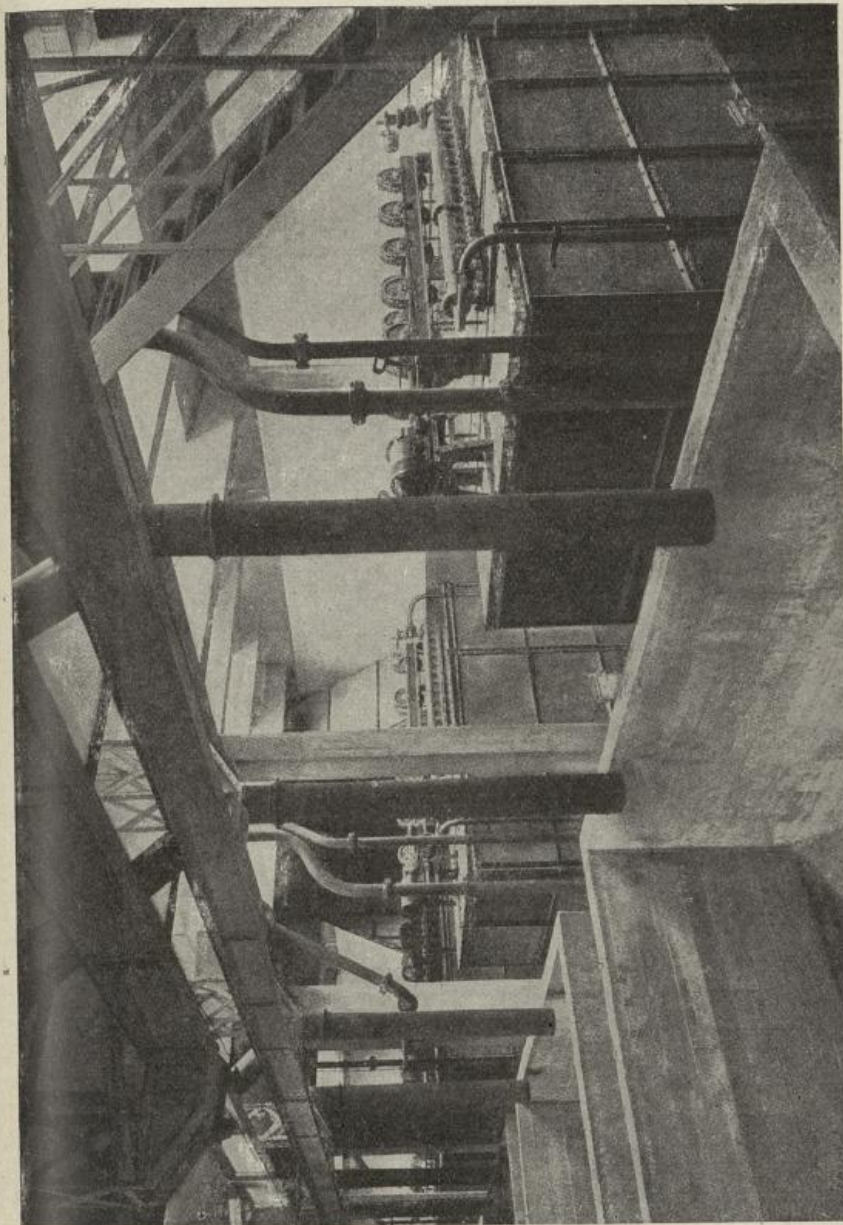


Fig. 151. — Economiseurs à enveloppes métalliques et silos à charbon au-dessus de chaudières Babcock et Wilcox (usines de la C^{ie} parisienne de distribution d'électricité à Saint-Ouen et à Issy-les-Moulineaux).

mée de 120 millimètres de diamètre, est très largement employée.
Pour les chaudières marines, à tubes de fumée, M. Duquenne

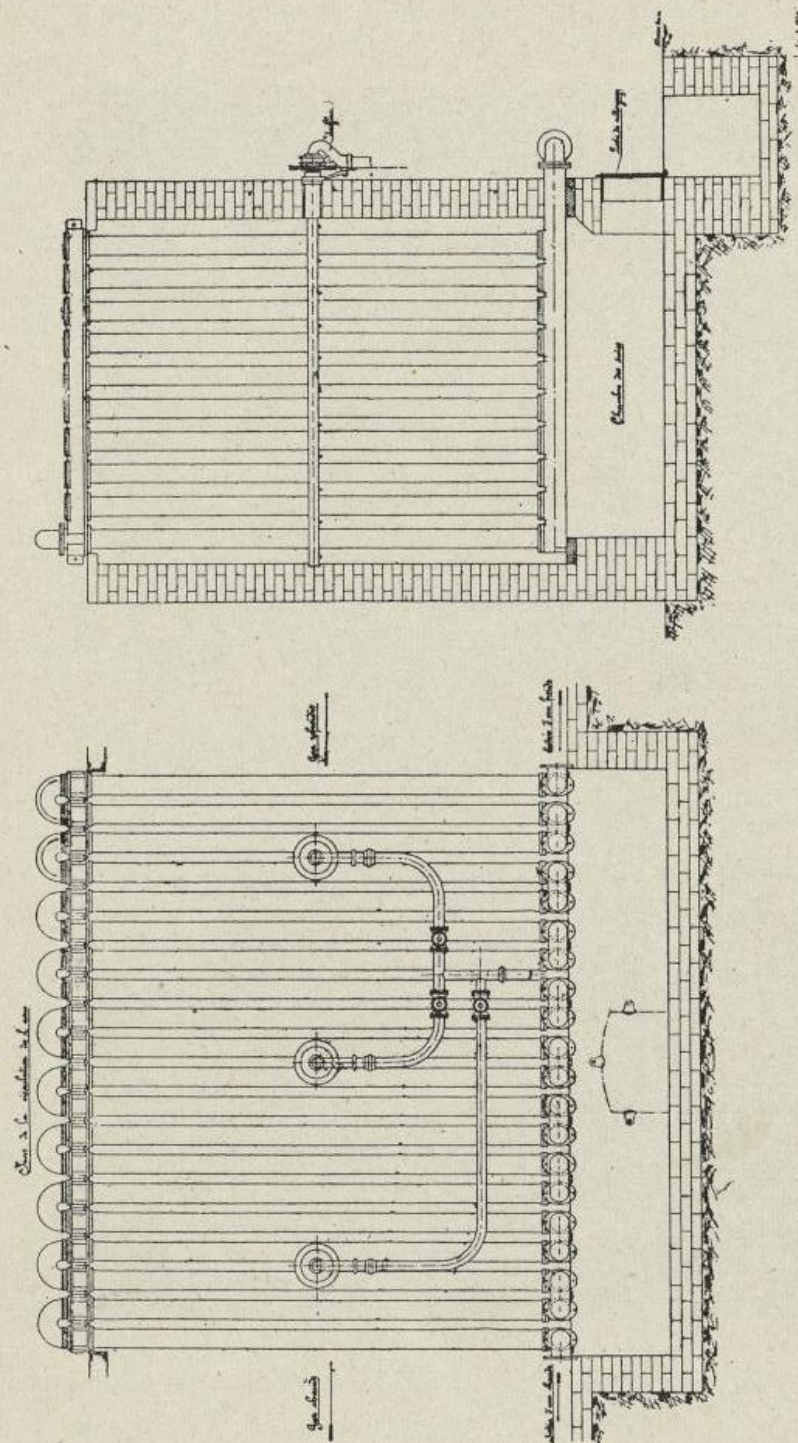


Fig. 152. — Réchauffeur d'eau à basse pression et circulation méthodique, système L. Neu, avec souffleries à vapeur pour le ramonage.

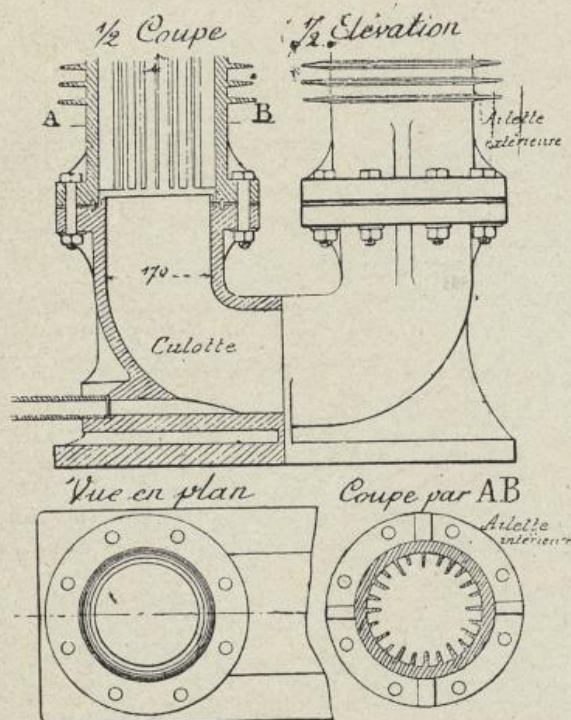


FIG. 153. — Surchauffeur Schwærer, en fonte: culotte d'assemblage des éléments verticaux à ailettes intérieures et extérieures.

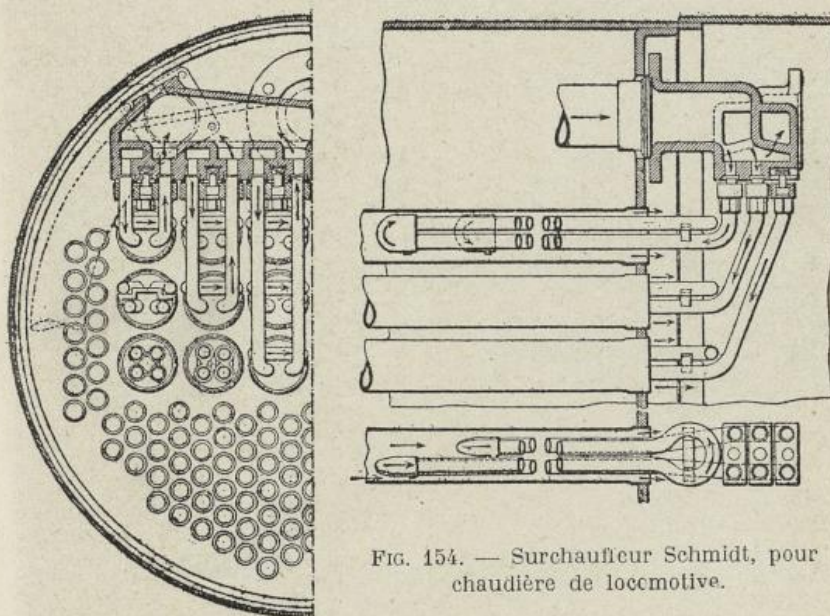


FIG. 154. — Surchauffeur Schmidt, pour chaudière de locomotive.

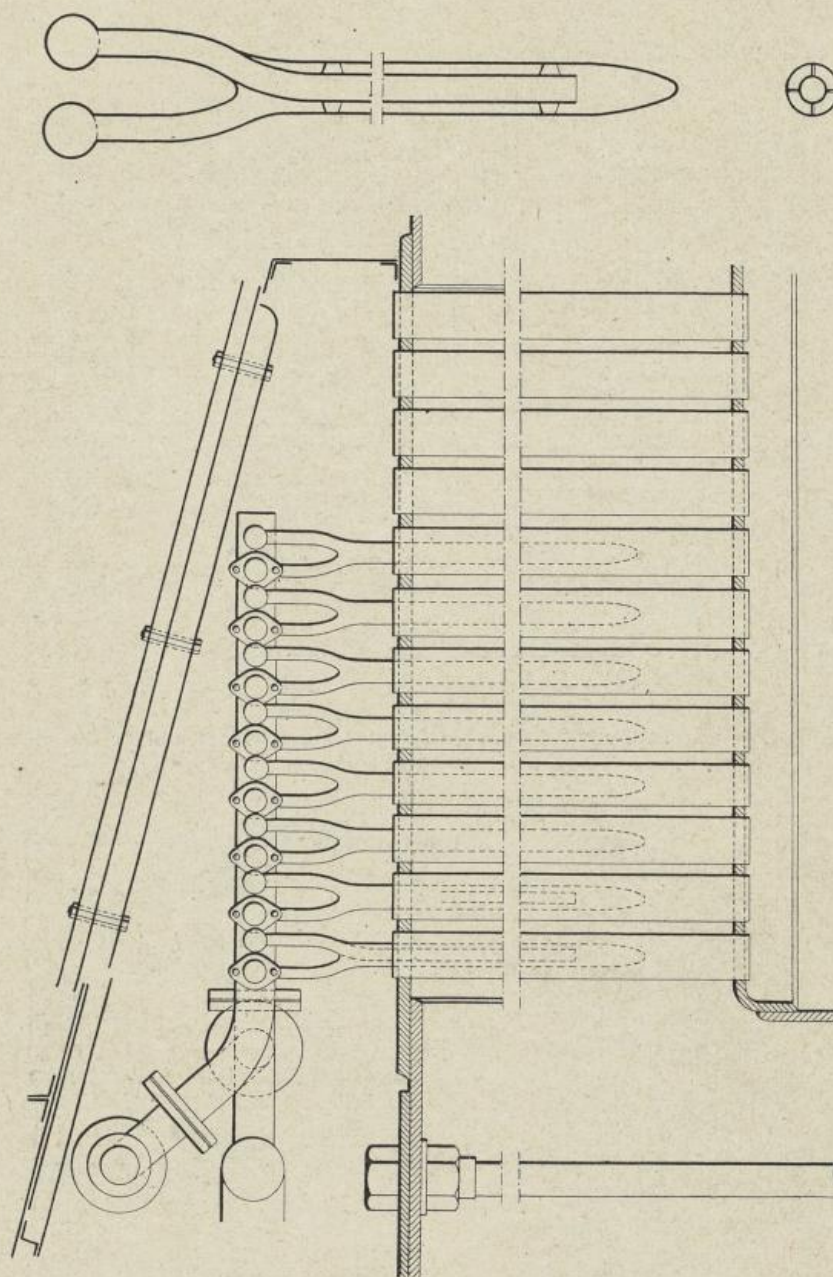


FIG. 155. — Surchauffeur Duquenne à tubes concentriques, pour chaudière marine à tubes à fumée en retour. Des conduits horizontaux superposés amènent, dans les tubes intérieurs, la vapeur saturée; d'autres conduits, entre les précédents, reçoivent la vapeur surchauffée.

emploie des tubes concentriques (fig. 155), qui se logent dans les tubes à fumée existants. La vapeur arrive par le tube inté-

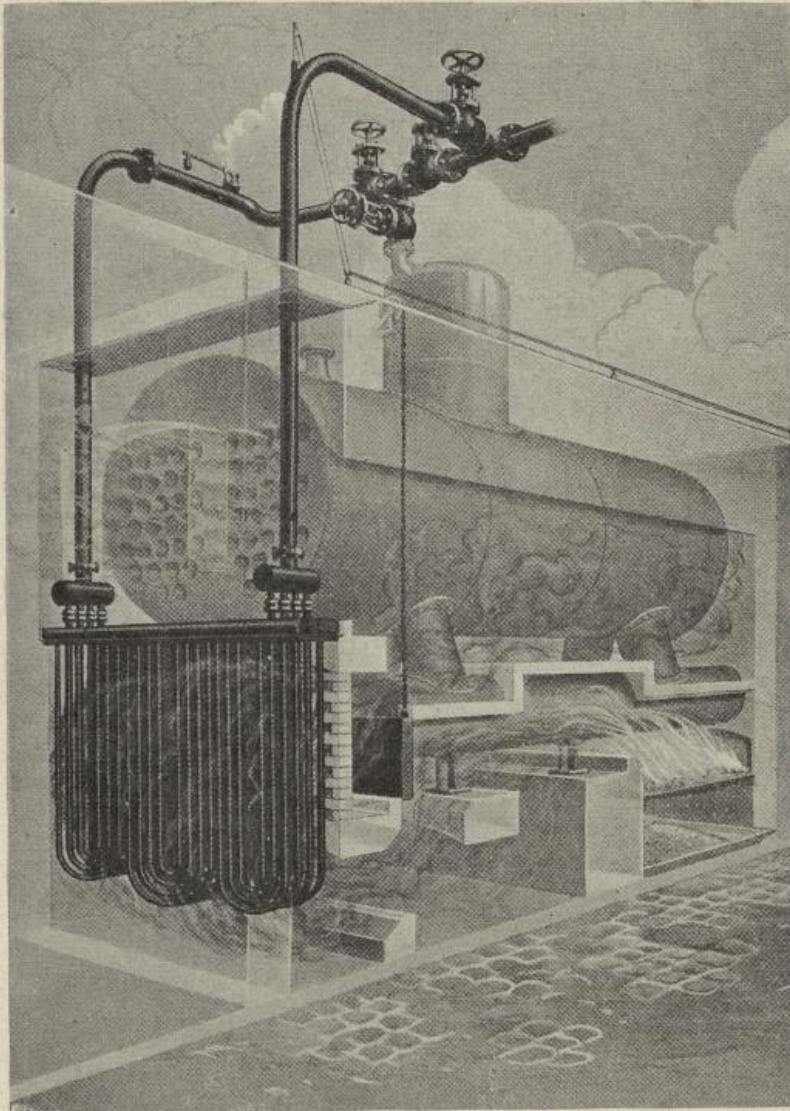


FIG. 156. — Surchauffeur Duquenne, à l'arrière d'une chaudière semi-tubulaire.

rieur, pour empêcher l'échauffement excessif de l'extrémité du surchauffeur voisine du foyer. Deux collecteurs desservent les tubes d'une rangée horizontale.

Les figures 156 et 157 représentent deux montages différents de surchauffeurs Duquenne sur une chaudière semi-tubulaire.

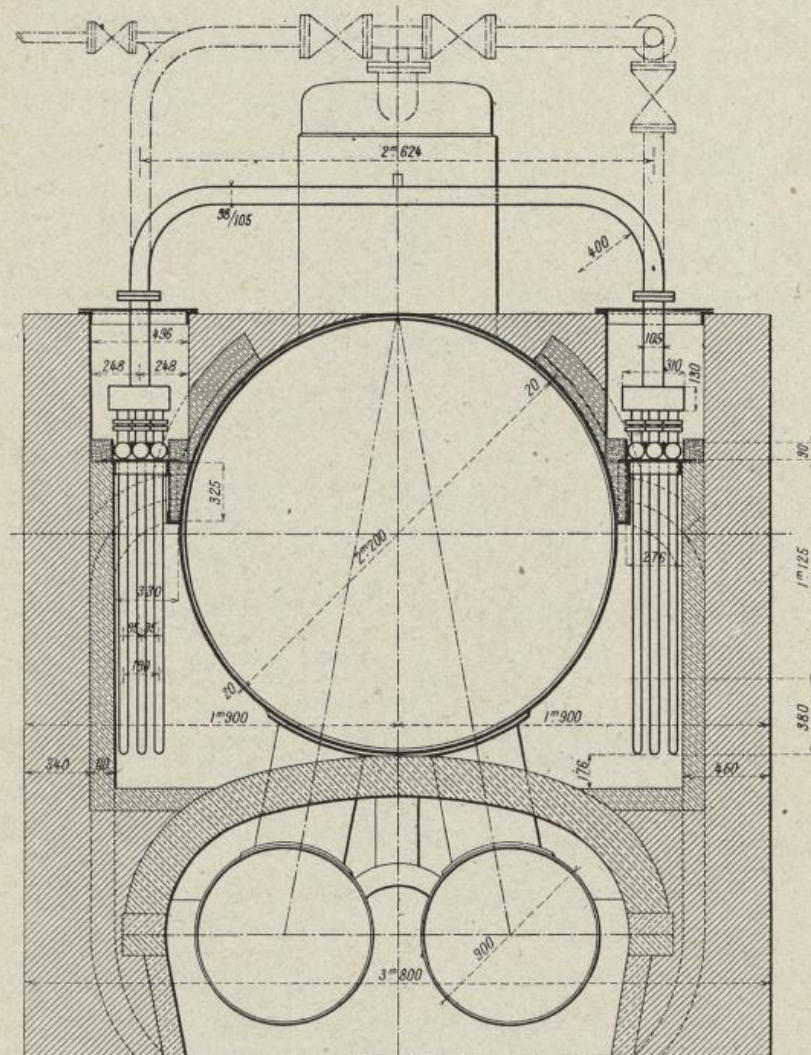


FIG. 157. — Surchauffeur Duquenne, sur les côtés d'une chaudière semi-tubulaire.

Le premier est placé sur le parcours des gaz entre les bouilleurs et les tubes à fumée; le débit en est réglable par un registre. Le second montage est employé quand la place manque pour le pre-

mier. Ce surchauffeur est placé dans des gaz déjà fortement refroidis, de sorte que, même avec une grande surface, il ne donne qu'une surchauffe modérée. Aucun réglage n'est nécessaire.

Le montage du surchauffeur Galloway (fig. 158) est analogue

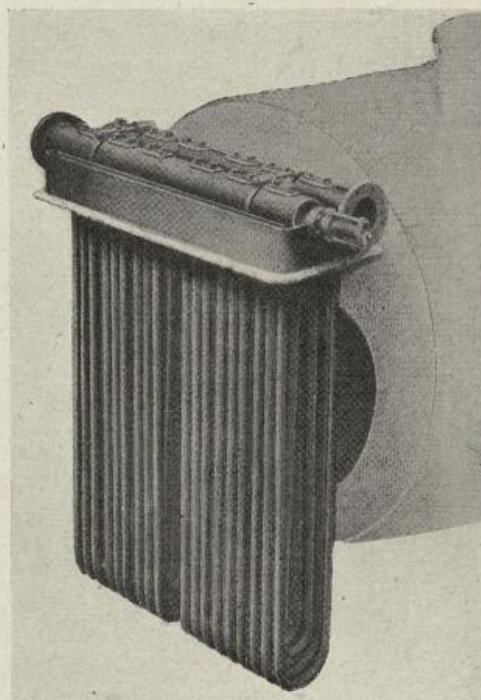


FIG. 158. — Surchauffeur Galloway.

à l'un des précédents : il est placé au débouché de la chambre intérieure de la chaudière de ce constructeur.

La figure 108 représente une chaudière Babcock et Wilcox, avec surchauffeur en tubes en U, établi pour une surchauffe de 70 à 100°. Pour une surchauffe plus forte, de 300° à 400°, le double repli des tubes (fig. 159 et 160) donne une plus grande surface. Les figures 161 et 162 représentent des chaudières munies de ce surchauffeur; la figure 163 en montre l'installation sur une chaudière type marine.

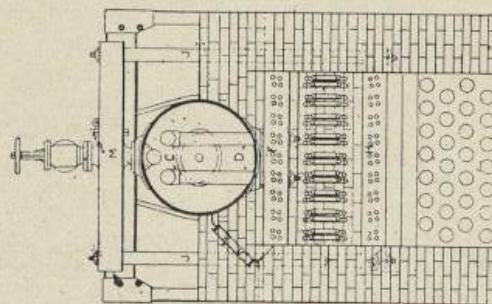


FIG. 160. — Surchauffeur Babcock et Wilcox, pour forte surchauffe : coupe transversale.

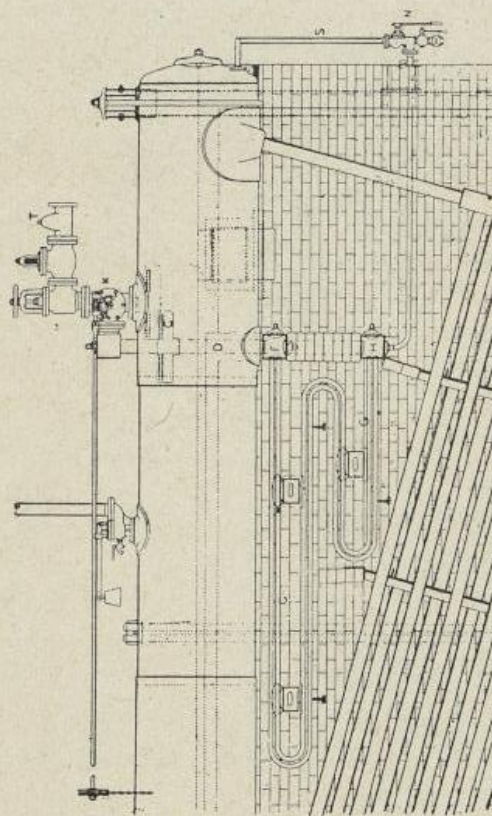


FIG. 159. — Surchauffeur Babcock et Wilcox, pour forte surchauffe : coupe longitudinale.

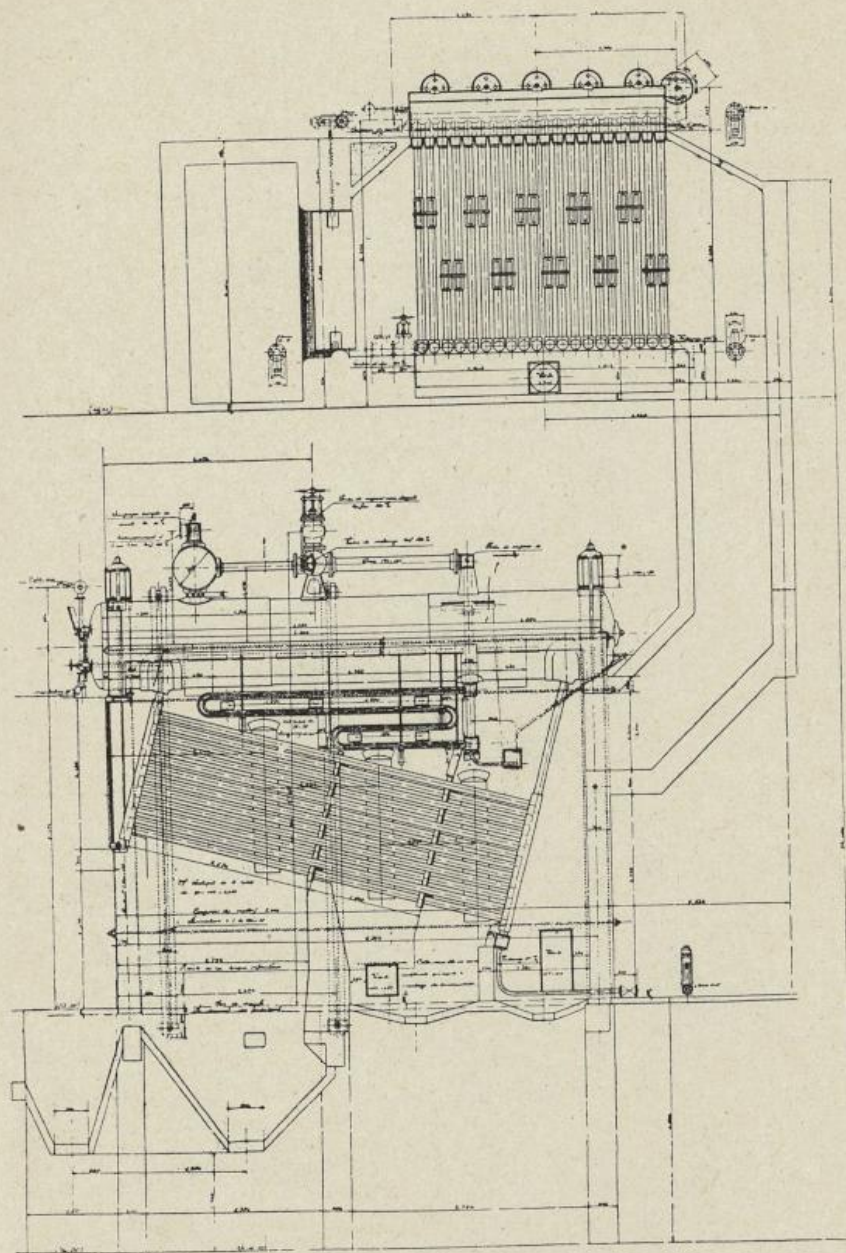


FIG. 461. — Chaudière Babcock et Wilcox avec surchauffeur pour forte surchauffe et économiseur Green : coupe longitudinale.

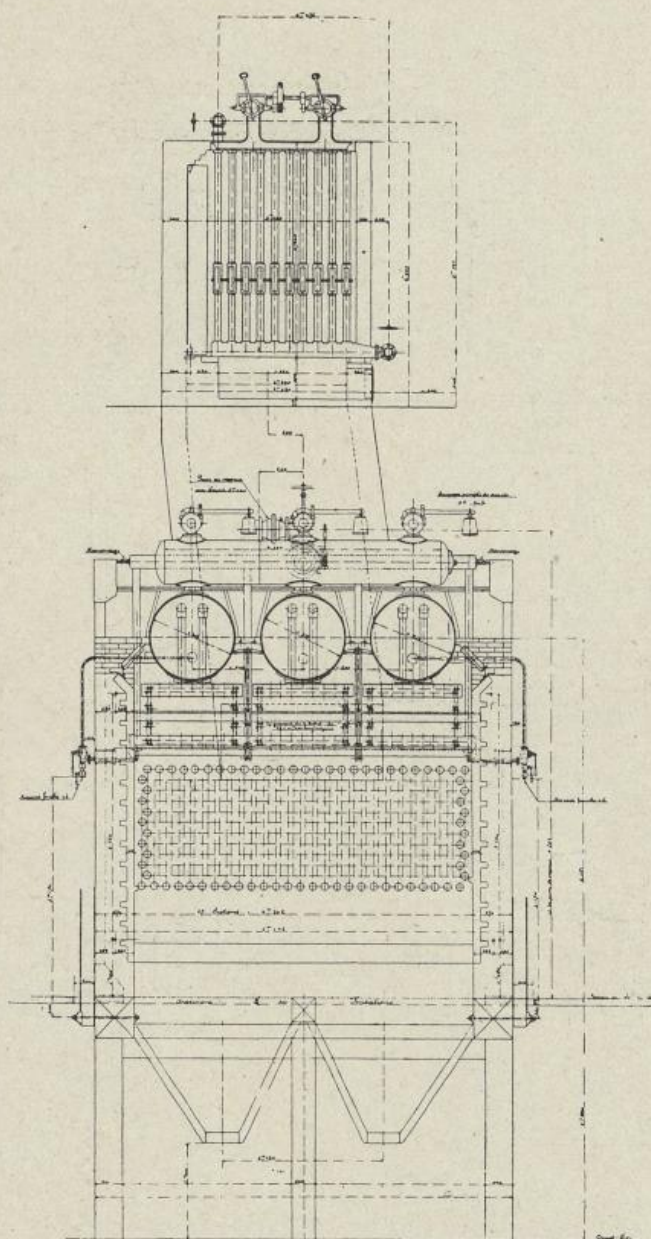


FIG. 162. — Chaudière Babcock et Wilcox avec surchauffeur pour forte surchauffe et économiseur Green : coupe transversale.

Dans la chaudière Roser, le surchauffeur se place de même entre le faisceau tubulaire et le corps supérieur (fig. 164).

Lorsque les surchauffeurs ne peuvent être mis hors du circuit des gaz chauds, ils sont parfois disposés pour être remplis

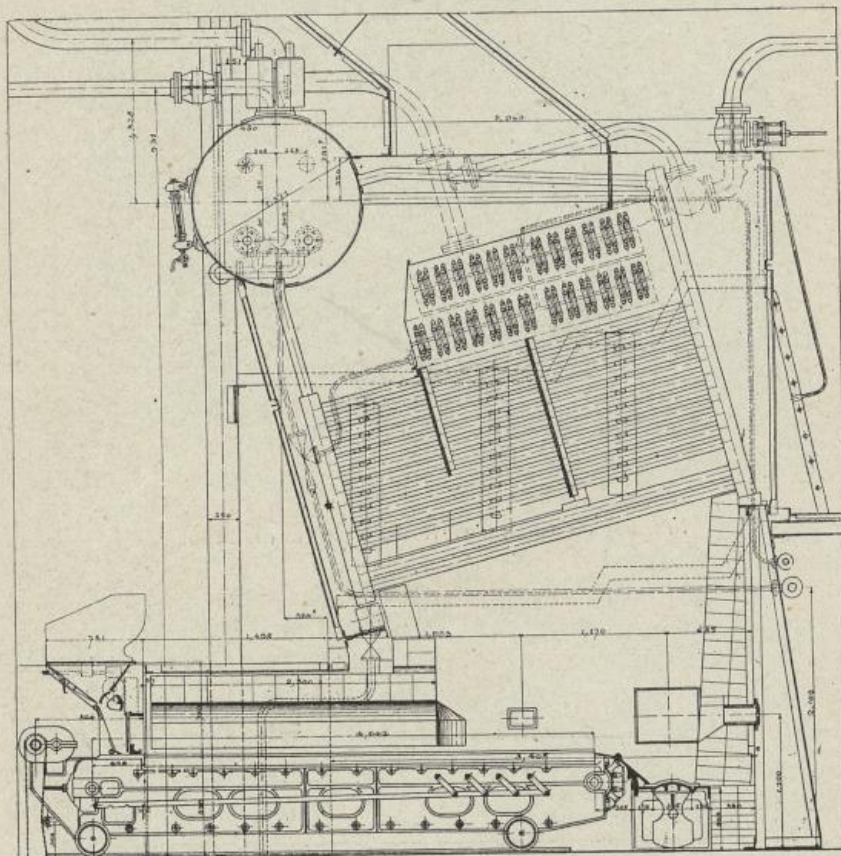


FIG. 163. — Chaudière Babcock et Wilcox, type marine (installée à terre), avec surchauffeur, monté entre le premier et le second parcours des gaz chauds autour des tubes vaporisateurs.

d'eau lors de la mise en pression (fig. 165), afin de ne pas être exposés à une température trop élevée tant qu'ils ne débitent pas. Le robinet de vidange du surchauffeur sur cette figure, *r*, porte une petite glace qui permet de voir quand cesse l'écoulement de l'eau. Il importe de vaporiser aussi peu d'eau que possible dans le surchauffeur, afin de ne pas l'entartrer, sans compter le dan-

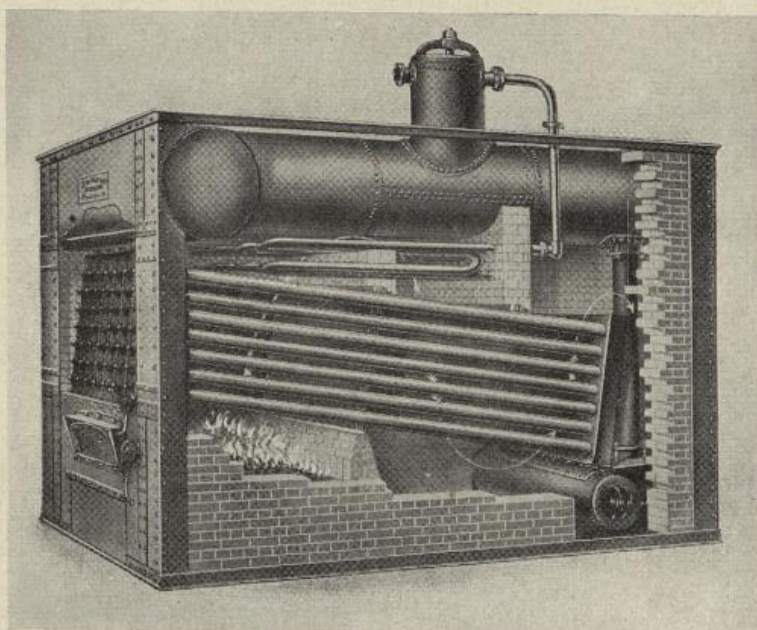


FIG. 164. — Chaudière Roser avec surchauffeur.

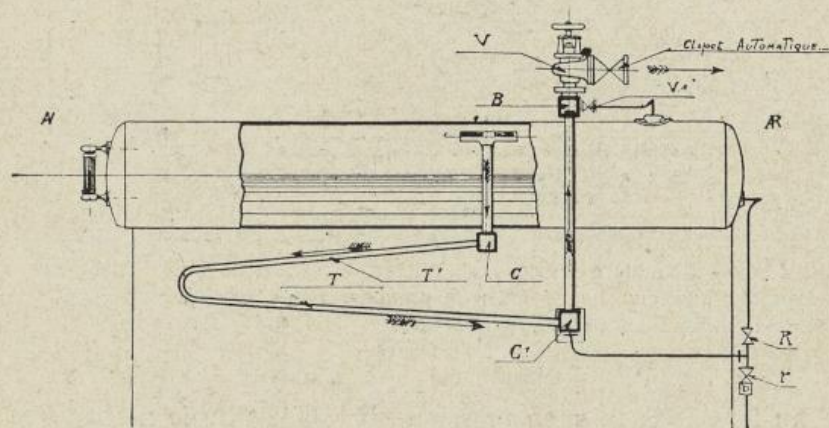


FIG. 165. — Schéma de surchauffeur Babcock et Wilcox. Les robinets R et V_1 étant ouverts et r fermé, le surchauffeur se remplit d'eau. En fermant R et en ouvrant r , on vide le surchauffeur. En marche, V_1 est ouvert ou fermé suivant qu'on veut ajouter ou non un peu de vapeur saturée à la vapeur surchauffée.

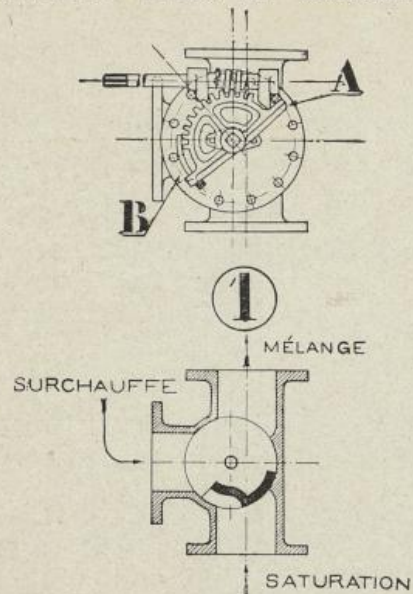


FIG. 166. — Valve mélangeuse de vapeur saturée et de vapeur surchauffée Babcock et Wilcox. Deux butées, A et B, limitent les positions extrêmes de la valve.

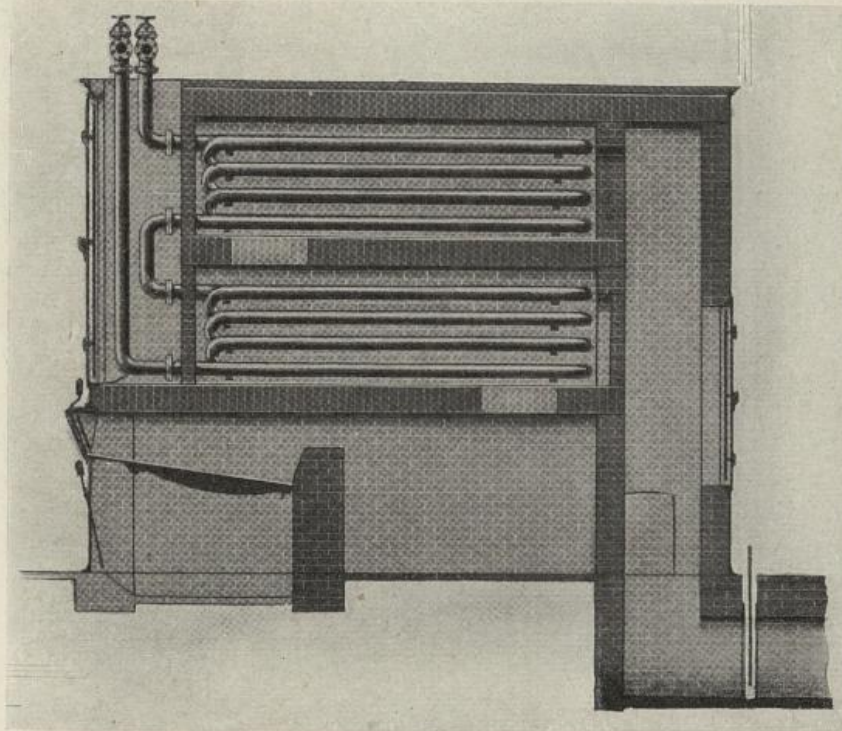


FIG. 167. — Surchauffeur indépendant Roser.

ger de l'entraînement dans les conduites de l'eau d'un surchauffeur mal vidé.

On règle la température de la vapeur surchauffée en installant

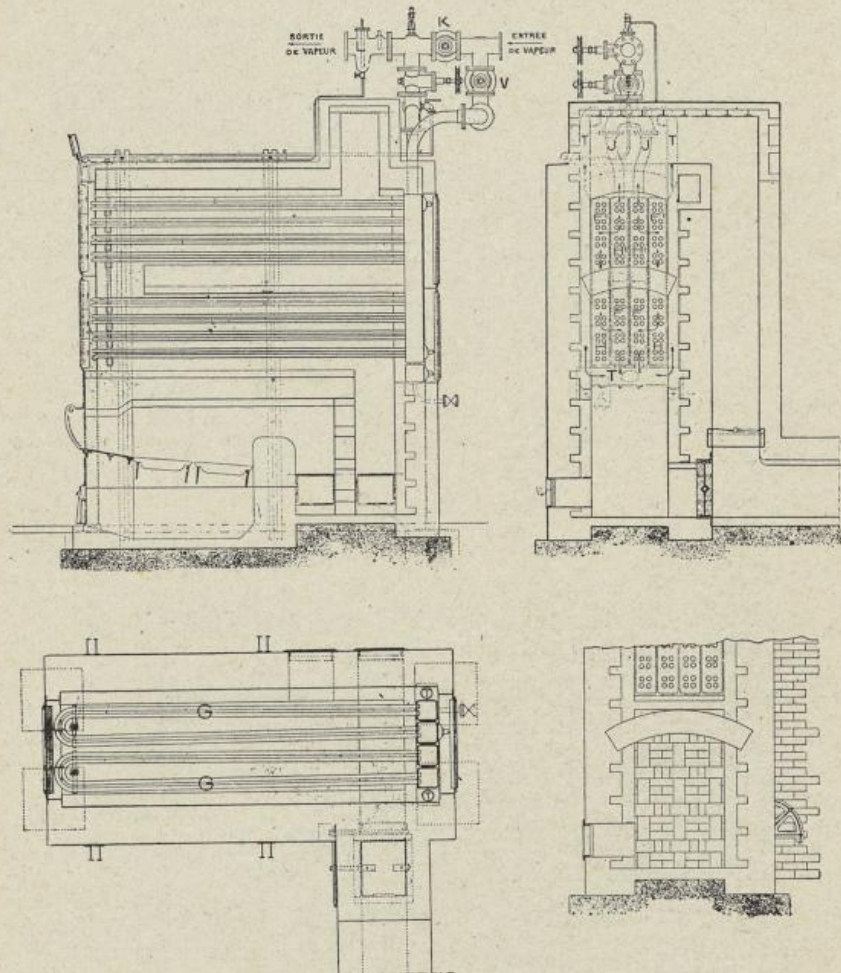


FIG. 168. — Surchauffeur indépendant Babcock et Wilcox.

le surchauffeur dans un carneau spécial, muni de registres qui permettent de réduire le débit des gaz chauds. Mais beaucoup de chaudières ne se prêtent pas, sans grandes complications, à ce montage.

Un autre procédé consiste à mélanger la vapeur saturée et la

vapeur surchauffée. La figure 166 représente une valve mélangeuse disposée à cet effet. On remarquera qu'elle ne réduit pas complètement tout débit de vapeur saturée. Par suite de cette disposition, la valve V_1 de la figure 165 devient inutile. Ce mélange permet de réduire la température de la vapeur en vue de l'emploi; mais en même temps il augmente la température de

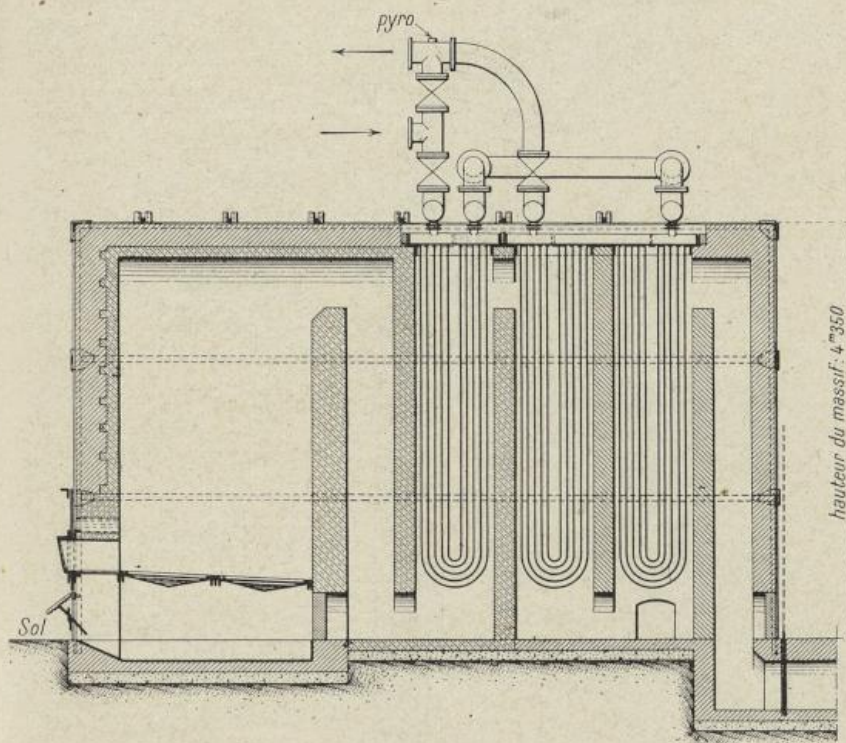


FIG. 169. — Surchauffeur indépendant Duquenne, pour 10.000 kg. de vapeur à l'heure, à porter de 190° à 350° .

Surface de grille : $2 \text{ m}^2 \text{ 34}$. — Surface de chauffe : 160 m^2 .

La vapeur circule d'abord dans le groupe de gauche sur la figure, puis revient de droite à gauche, à contre-courants, à travers le troisième, puis le deuxième groupe.

la vapeur donnée par le surchauffeur, puisqu'il en réduit le débit. Quand la surface d'un surchauffeur n'est pas très grande, une surchauffe exagérée de la vapeur, nuisible pour le surchauffeur même ou pour le moteur actionné, n'est pas à craindre, car lorsqu'on pousse les feux, l'augmentation du débit de vapeur tend à en maintenir à peu près constante la température de surchauffe.

Au lieu de monter le surchauffeur sur la chaudière même, on fait parfois usage de surchauffeurs indépendants, avec foyer

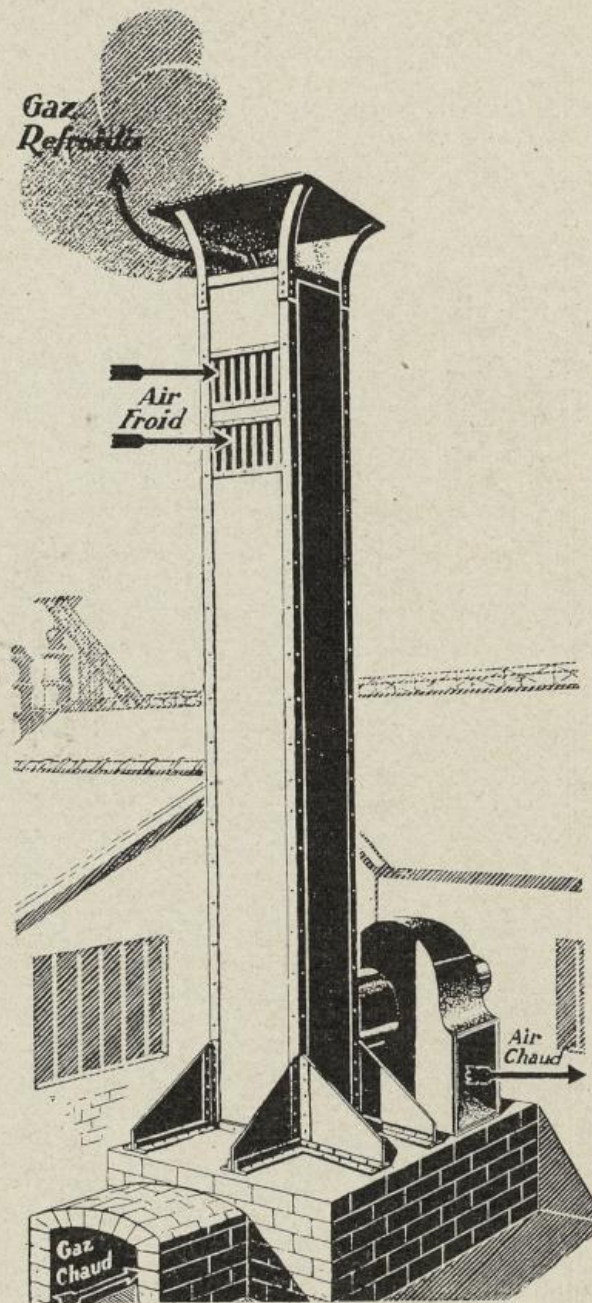


FIG. 170. — *Cheminée calorigène Sturtevant.*

spécial. Cette disposition se justifie par les facilités d'installation dans des chaufferies existantes, et par la commodité du réglage de la température. L'utilisation du combustible y est moins bonne que dans les surchauffeurs faisant partie des chaudières : d'une part, la température des gaz de la combustion doit être réduite avant qu'ils n'arrivent sur le surchauffeur ; d'autre part, ils sont rejetés à une température assez élevée.

Le surchauffeur indépendant Roser (fig. 167) se compose de

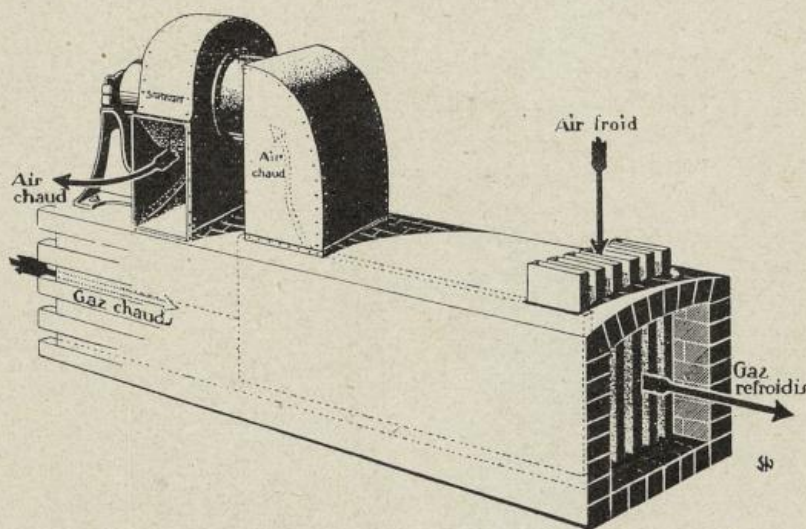


FIG. 171. — Carneau calorigène Sturtevant.

serpentins en gros tubes, de 80, 100 ou 120 millimètres de diamètre, avec épaisseur de 5 millimètres. Le surchauffeur indépendant Babcock et Wilcox (fig. 168) est formé de tubes horizontaux en U, reliant des collecteurs verticaux.

Le surchauffeur indépendant Duquenne (fig. 169) admet la vapeur dans un premier faisceau de tubes exposés aux gaz les plus chauds, puis la ramène à contre-courant dans deux autres faisceaux.

40. Réchauffeurs d'air. — Un bon réchauffeur d'air satisfait aux conditions suivantes : avoir une grande surface de chauffe

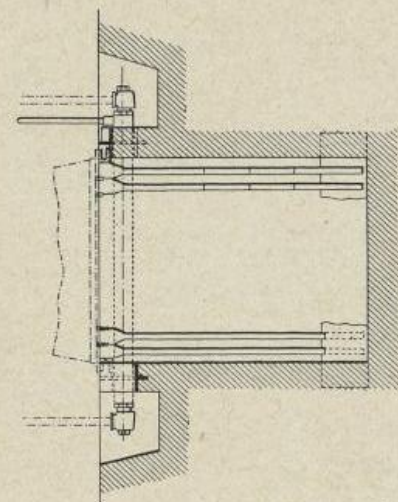
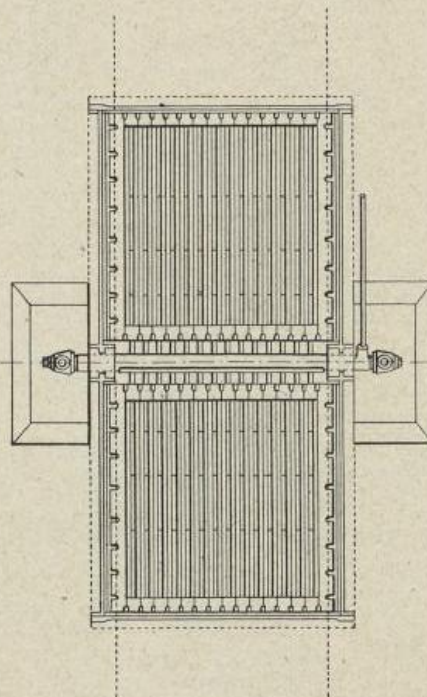
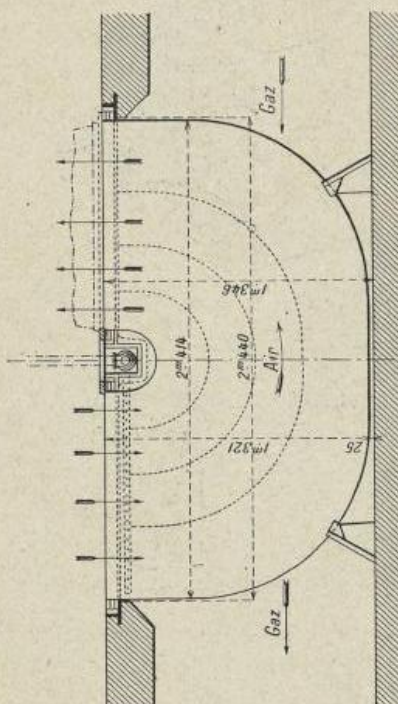


FIG. 172. — Réchauffeur d'air Usco : éléments de 5 m²388 de surface de chauffe chacun. L'air, aspiré par un ventilateur, parcourt chaque élément de tuyères à droite. Une rampe tournante, avec tuyères, assure le nettoyage des éléments par jets de vapeur.



sous un faible volume; offrir peu de résistance à la circulation des gaz chauds et de l'air; se ramoner aisément.

On place ces réchauffeurs dans la cheminée (fig. 170); dans

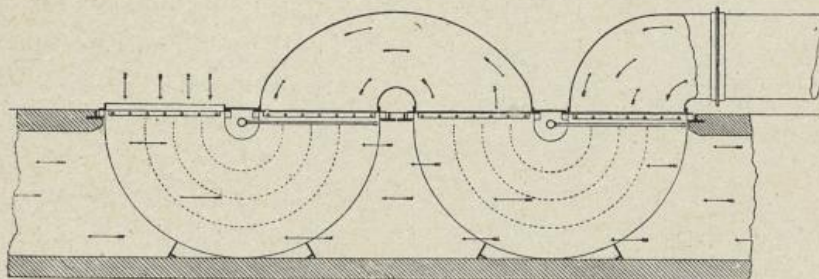


FIG. 173. — Réchauffeurs d'air Usco en tandem.

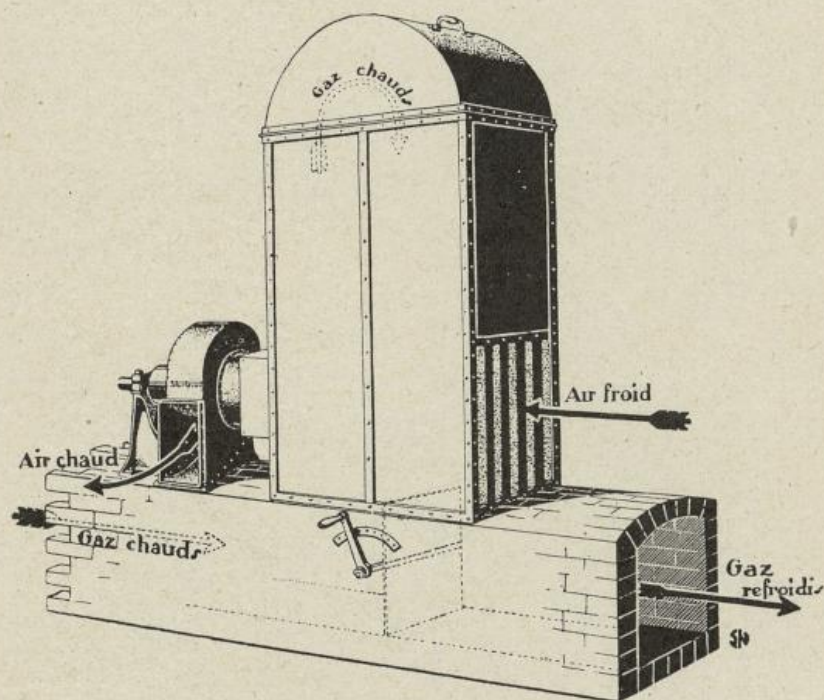


FIG. 174. — Bloc calorigène Sturtevant.

un carneau (fig. 171, 172, 173); au-dessus du carneau (fig. 174); dans tout emplacement disponible entre la chaudière et la cheminée.

Afin d'augmenter les surfaces métalliques en contact avec l'air à chauffer, on met, dans les passages d'air des réchauffeurs

Sturtevant, des tournures ou de la paille de fer, et une cloison centrale dans les éléments du réchauffeur Usco (fig. 175).

La figure 176 représente une chaudière Stirling munie d'un chauffeur Usco.

Le réchauffeur d'air des établissements E. Prat-Daniel est formé de tôles planes trapézoïdales, séparées par des cadres construits en fer en U et en spires d'acier (fig. 177) qui laissent passer les courants gazeux. Tôles et cadres sont serrés ensemble, les cadres intermédiaires servant les uns au passage de l'air, les autres au passage des gaz de la combustion.

La figure 178 représente l'installation d'un tel réchauffeur sur une chaudière à flux direct de la Société Alsacienne de Constructions mécaniques : les gaz chauds parcourent successivement une partie du faisceau tubulaire, un surchauffeur, le reste du faisceau, le réchauffeur d'air et un économiseur Green.

Quelquefois on fait circuler l'air, avant son admission au foyer, autour du massif de la chaudière, en ménageant

dans ce massif de doubles parois en briques ou en tôle. On diminue ainsi la perte par rayonnement extérieur, mais au prix d'une certaine complication.

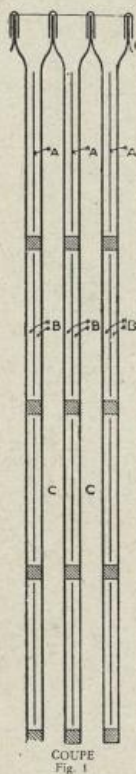


FIG. 175. — Coupe transversale des éléments du réchauffeur d'air Usco, avec tôles intérieures A, destinées à recueillir la chaleur rayonnante et à la communiquer à l'air. B B, passages de l'air à chauffer; C, gaz chauds.

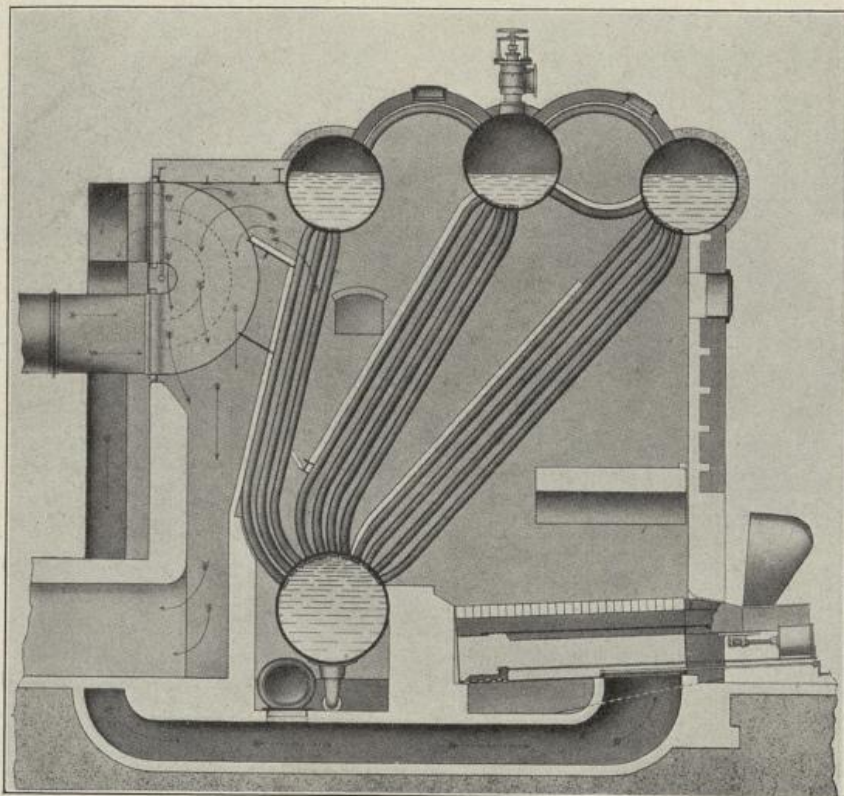


FIG. 176. — Chaudière Stirling, avec réchauffeur d'air Usco et *Underfeed stoker*, à piston. Le ventilateur n'est pas représenté.

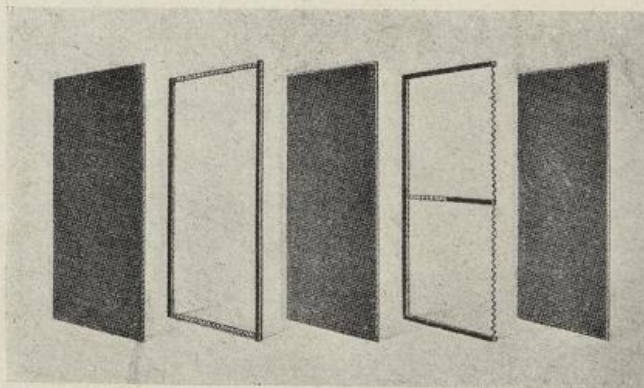


FIG. 177. — Éléments constitutifs du réchauffeur d'air « thermix » de E. Prat-Daniel. Les cadres, composés de petits fers en U et de spires d'acier sont de deux sortes : les uns (cadre de gauche sur la figure) sont traversés de part en part par les gaz de la combustion ; les autres (cadre de droite) sont traversés par l'air à chauffer qui entre et sort sur le même grand côté. Entre les cadres sont des tôles pleines ; l'élasticité des spires d'acier assure de bons contacts, nécessaires pour l'étanchéité.

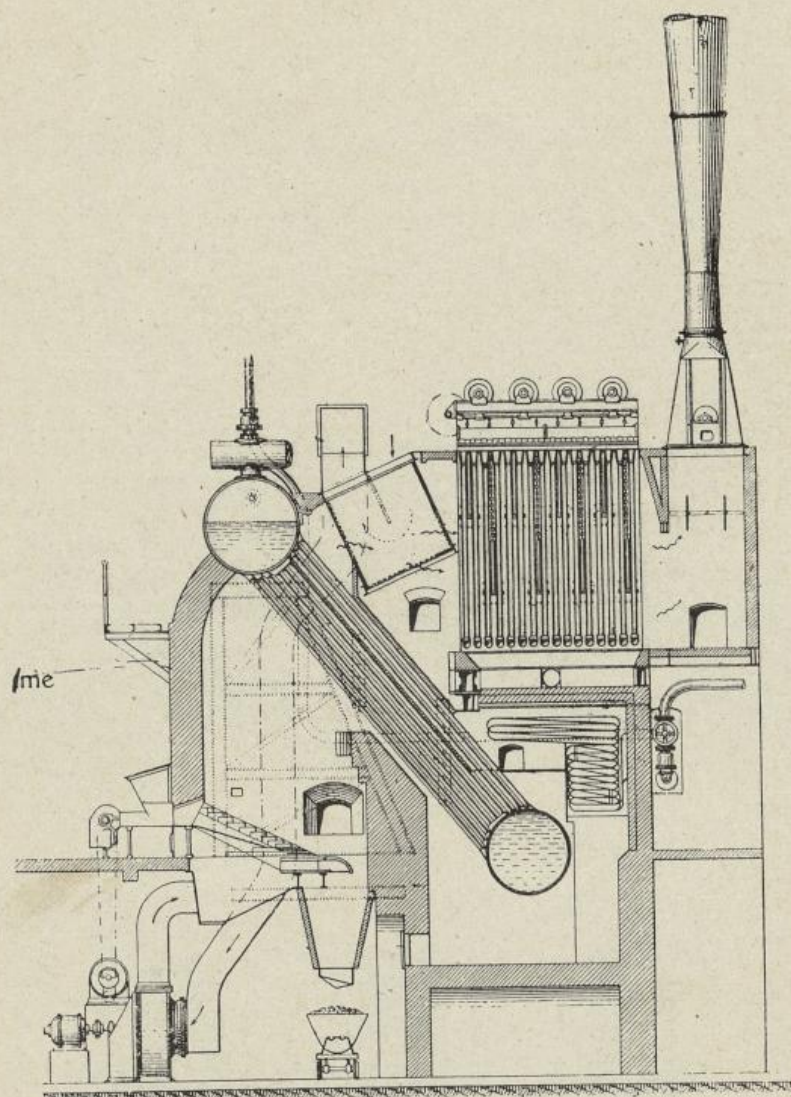


FIG. 178. — Chaudière à flux direct de la Société alsacienne de constructions mécaniques avec réchauffeur d'air des Etablissements E. Prat-Daniel.

CHAPITRE VI

ALIMENTATION

41. **Généralités.** — Le travail théoriquement nécessaire pour refouler un kilogramme d'eau dans une chaudière correspond à une élévation de 10 mètres pour chaque kilogramme par centimètre carré de pression effective, et sera donc de 120 kilogrammètres pour une pression de 12 kilogrammes par centimètre carré. C'est une fraction très faible du travail que peut produire la vapeur (soit 27.000 à 54.000 kilogrammètres par kilogramme de vapeur, dans les bonnes machines).

L'alimentation est continue ou discontinue, la discontinuité ne convenant que pour les chaudières à grande réserve d'eau, avec demande irrégulière de vapeur; l'appareil d'alimentation doit alors être assez puissant pour rétablir rapidement le niveau de l'eau après une forte dépense. Dans tous les cas, d'ailleurs, la puissance doit en être largement calculée.

Il est important de jauger l'eau d'alimentation. L'interposition d'un compteur entre l'appareil d'alimentation et la chaudière présente des difficultés, notamment à cause de l'action sur le compteur des coups de piston des pompes alimentaires. Le plus simple est d'installer le compteur en amont d'une bêche desservant les appareils d'alimentation, à condition que l'eau de cette bêche ne serve à aucun autre usage et qu'aucune fraction n'en soit perdue.

L'alimentation est le plus souvent sous la dépendance du chauffeur ou d'un agent spécial. Parfois cependant, on fait usage d'appareils automatiques, commandés par la variation du niveau dans les chaudières. D'une manière générale, les arguments pour et contre les appareils automatiques sont bien connus : tant qu'ils fonctionnent sûrement, ils mettent à l'abri des

négligences de l'agent qu'ils remplacent; d'autre part, un défaut de fonctionnement non remarqué est dangereux. Dans tous les cas, l'appareil automatique doit être surveillé et bien entretenu, sinon il est inacceptable.

Dans les chaudières à très petit volume d'eau, comme la chau-

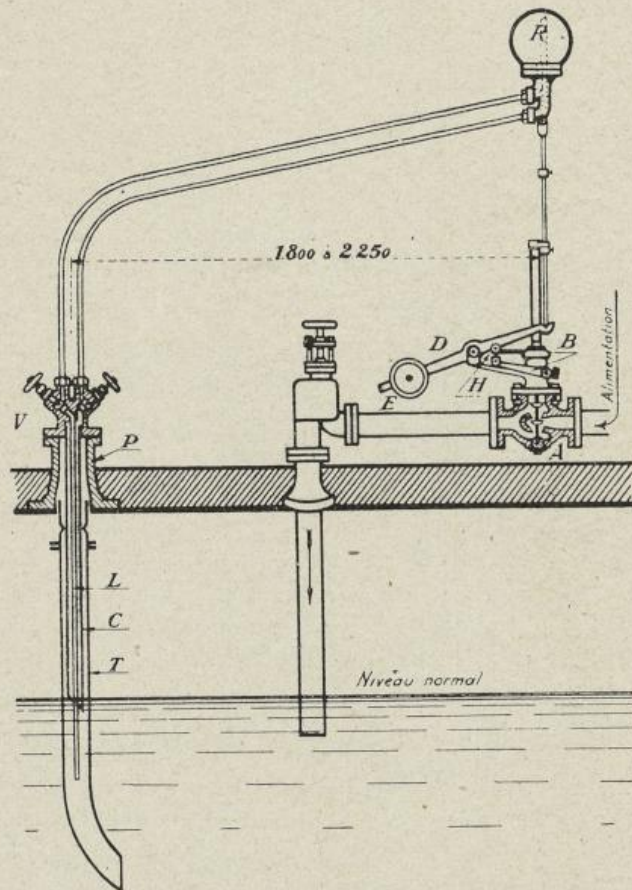


FIG. 179. — Régulateur automatique d'alimentation Genève

A, soupape fermée par le poids du ballon R plein d'eau, ouverte quand il est vide; C et L, tuyaux faisant communiquer le haut du ballon et le niveau normal, et le bas du ballon avec un niveau plus profond.

dière Belleville, l'alimentation automatique est à peu près indispensable.

Le régulateur d'alimentation Genève (fig. 179) consiste en une soupape équilibrée, placée sur l'arrivée d'eau sous pression et commandée par un levier chargé, d'un côté, par un poids fixe

et, de l'autre, par le poids variable d'un ballon vide ou plein d'eau. Lorsque le ballon est vide, la soupape s'ouvre ; elle se referme lorsqu'il est plein. Le ballon communique avec la chaudière par deux tuyaux flexibles, dont l'un plonge assez profondément dans l'eau de la chaudière et aboutit à la partie inférieure du ballon ; l'autre tuyau part du haut du ballon et se termine au niveau normal. Lorsque le niveau s'abaisse, la vapeur pénètre dans le ballon qui se vide d'eau.

L'entrée dans la chaudière de l'eau d'alimentation se fait en dessous ou en dessus du niveau de l'eau. Le second mode, alimentation dans la vapeur, a de sérieux avantages : elle évite l'action de l'eau froide sur les tôles, ainsi que celle de l'oxygène et du gaz carbonique qu'elle tient en dissolution. Il convient de prolonger le contact de l'eau et de la vapeur par l'emploi de plateaux sur lesquels elle s'étale. Ces plateaux recueillent, en partie du moins, les dépôts laissés par l'eau chauffée.

Si pendant longtemps l'alimentation dans la vapeur a été peu employée, c'est sans doute par la crainte, peu justifiée, qu'elle ne rendit la vapeur humide, et surtout à cause des chocs qu'elle produit dans la tuyauterie, si celle-ci n'est pas installée avec des dispositions convenables.

Sur la chaudière est placée, dans tous les cas, une chapelle munie d'une soupape automatique, qui s'oppose à la vidange. Un obturateur, manœuvrable à la main, entre la chaudière et cette soupape, en permet la visite. A l'intérieur de la chaudière, pour alimenter dans la vapeur, un tuyau amène l'eau au point convenable. C'est dans ce tuyau que se produisent des chocs extrêmement intenses, pour peu qu'il contienne, à certains moments, à la fois de l'eau et de la vapeur (1). Pour éviter les chocs, il suffit que le tuyau soit, sur toute sa longueur, à contre-pente dans la chaudière, de manière à rester constamment plein d'eau.

(1) Voir dans les *Annales des Mines*, 9^e série, t. XII, MORITZ, *Note sur les chocs dans les tuyauteries d'alimentation des chaudières*, p. 513, et RAYMOND, *Note au sujet de l'alimentation des chaudières dans la vapeur*, p. 533.

42. **Nature des eaux ; épuration.** — L'eau est nuisible par les dépôts solides qu'elle abandonne dans les chaudières, et par son action corrosive sur les tôles. Les eaux des pays calcaires contiennent en dissolution du bicarbonate de chaux, auquel s'ajoutent, dans certaines régions, du sulfate de chaux et des sels de magnésie. Connaissant le poids du dépôt laissé par un litre, ainsi que la quantité d'eau évaporée, on calculerait aisément le poids total des incrustations, si les extractions n'enlevaient une partie des matières solides. Il n'est d'ailleurs pas difficile d'estimer à quel moment il convient d'arrêter une chaudière pour nettoyage.

On essaye rapidement les eaux au moyen d'une dissolution titrée de savon dans l'alcool, qui ne produit de mousse que lorsque les sels dissous ont été neutralisés par le savon. On mesure ainsi le *degré hydrotimétrique* de l'eau. Pour chaque degré hydrotimétrique, un litre d'eau peut contenir :

Soit 0 g 0057 de chaux ;

Soit 0 g 0114 de chlorure de calcium ;

Soit 0 g 0103 de carbonate de calcium ;

Soit 0 g 0140 de sulfate de calcium ;

Soit 0 g 0090 de chlorure de magnésium ;

Soit 0 g 0120 de chlorure de sodium.

Les eaux très pures, que donnent certaines sources de terrains granitiques, ont un titre hydrotimétrique inférieur à 10° et même à 5°. Dans beaucoup de sources et de rivières, on trouve des titres de 10° à 20° ; le titre des eaux très chargées est compris entre 20° et 30° et dépasse même 30°.

La nature physique des dépôts a une grande importance : bourbeux ou pulvérulents, ils sont facilement extraits des chaudières ; mais souvent ils forment des croûtes dures et cristallines, qui adhèrent aux tôles.

Une épuration préalable diminue le poids des sels dissous ; elle s'impose quand les eaux sont très chargées ; elle est même généralement avantageuse avec des eaux moyennes. De nombreux réactifs sont utilisables à cet effet ; pour l'eau des chaudières, c'est surtout de chaux et de carbonate de soude qu'on fait usage. La chaux transforme le bicarbonate soluble en carbonate

insoluble; comme elle est peu soluble, c'est à l'état de lait de chaux qu'on l'emploie. Le carbonate de soude transforme le sulfate de chaux en carbonate insoluble; il reste en dissolution du

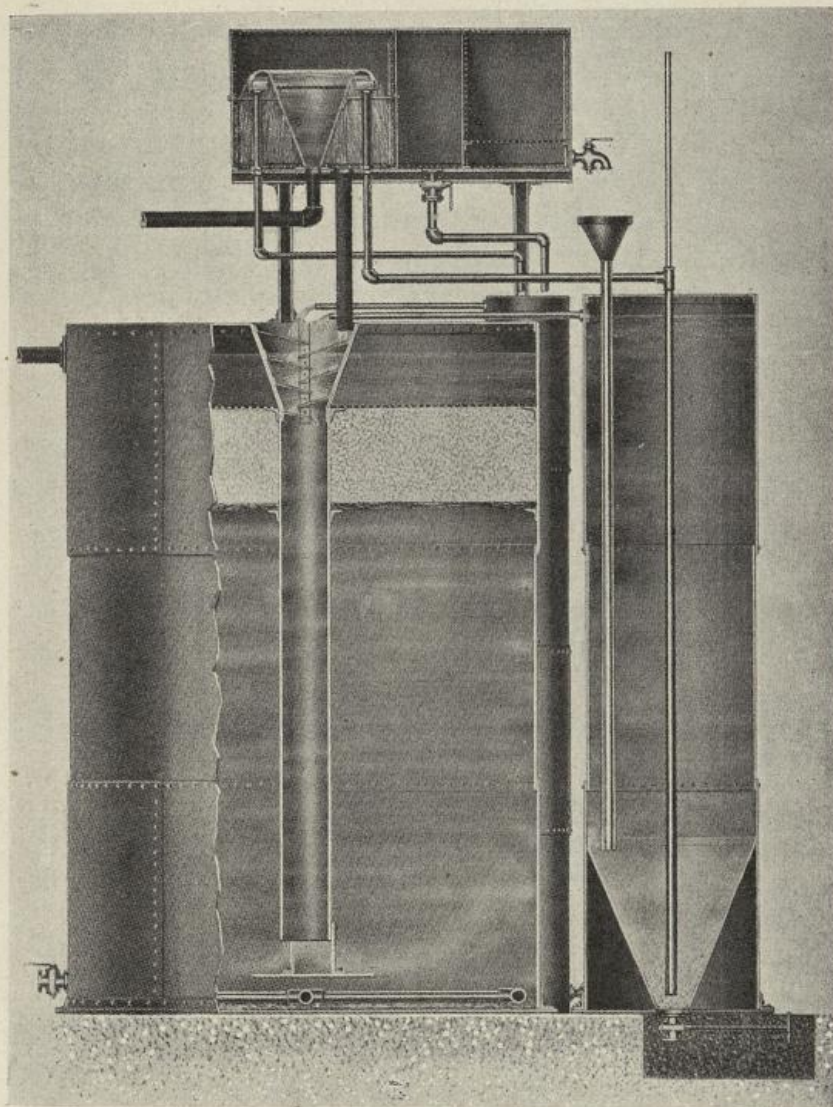


FIG. 180. — Epurateur Usco.

La cuve verticale à droite contient de l'eau de chaux; la petite cuve par derrière, une dissolution de carbonate de soude. L'eau à purifier s'écoule par un déversoir circulaire, sous lequel on prélève les fractions voulues pour déplacer l'eau de chaux et la dissolution de sel de soude. Le précipité se fait dans la grande cuve; l'eau purifiée sort à la partie supérieure, après avoir traversé un filtre.

sulfate de soude, très soluble. Les seules difficultés de la purification sont le dosage des réactifs et la séparation du précipité, par décantation et par filtration.

De nombreux appareils automatiques sont employés à cet effet; à titre d'exemple, dans l'épurateur Usco (fig. 180), l'eau de chaux et la solution de carbonate de soude sont préparées d'avance et approvisionnées dans des cuves verticales; des courants d'eau, réglés à des fractions déterminées du débit total, déplacent ces réactifs et les mélangent à l'eau brute dans une grande cuve, d'où elle ressort en traversant un filtre.

Une réaction intéressante, pour les eaux calcaires et séléniteuses, est celle de l'aluminate de baryte, qui donne un triple précipité insoluble, de sulfate de baryte, de carbonate de baryte et d'aluminate de chaux.

A défaut d'épuration préalable, on fait usage, dans la chaudière même, de *désincrustants* qui ont une action chimique et une action mécanique. L'action chimique est celle du carbonate de soude, qui transforme en carbonate le sulfate de chaux, sel qui donne les incrustations les plus adhérentes; l'action mécanique est celle de matières organiques, féculs, tannin, extraits de bois tinctoriaux, qui rendent les dépôts pulvérulents, et, par suite, d'une extraction facile.

Dans les chaudières déjà entartrées, ces désincrustants sont parfois assez actifs pour détacher les plaquettes de tartre déjà fixées sur les tôles: avec certaines chaudières, il est arrivé que la circulation de l'eau ait accumulé ces plaquettes sur des tôles fortement chauffées, et causé ainsi des avaries.

La composition des désincrustants existant dans le commerce est assez variable; parfois, on y trouve des substances inertes et même nuisibles. Si l'on doit faire usage d'un désincrustant, le mieux est de le préparer avec des substances connues, appropriées à l'eau qu'on emploie.

Les matières grasses, qui peuvent être amenées dans les chaudières par l'eau des condenseurs, sont nuisibles, surtout quand elles sont d'origine végétale ou animale, car elles forment de l'acide oléique et d'autres acides, qui attaquent la tôle. L'huile minérale, aujourd'hui employée au graissage des cylindres, est

moins nuisible, mais l'enduit dont elle recouvre les tôles les expose à la surchauffe; en outre, elle forme à la surface du liquide des écumes qui s'émulsionnent avec la vapeur : cette émulsion donne lieu à des entraînements d'eau. Le même effet peut se produire avec certaines matières visqueuses, qui sont quelquefois refoulées accidentellement dans les chaudières des sucreries, des féculeries, et avec les dissolutions de sel marin, qui se concentrent par l'évaporation.

Les eaux extraites de certaines mines et celles de quelques sources naturelles contiennent de l'acide chlorhydrique ou sulfurique; si on doit les employer à l'alimentation des chaudières, il convient d'en neutraliser l'acide par l'addition d'une base, chaux ou soude.

A la température de l'eau des chaudières, le chlorure de magnésium, qui existe dans les eaux de la mer et de certaines sources, peut se décomposer en magnésie et acide chlorhydrique, qui attaque les tôles.

43. Enlèvement des gaz dissous. — L'attaque des tôles par des acides contenus dans l'eau d'alimentation ou provenant de la décomposition du chlorure de magnésium est exceptionnelle, tandis qu'avec la plupart des eaux, même les plus pures, cette attaque se produit, parfois au bout d'un petit nombre d'années. Cette action est due à la formation d'oxyde de fer. L'oxygène est amené par l'eau, qui en dissout une proportion plus forte que celle qui existe dans l'air, près d'un tiers en volume d'oxygène contre deux tiers d'azote (1). On attribue aussi une action au gaz carbonique, qui faciliterait l'oxydation du fer.

Pendant longtemps, on s'est résigné à supporter cette altération des tôles, qui entraîne des réparations coûteuses, comme un mal inévitable; on se préoccupe aujourd'hui de la combattre en s'attaquant à la cause, c'est-à-dire en employant de l'eau d'alimentation débarrassée des gaz dissous.

(1) D'après le *Recueil des constantes physiques* (publié en 1913), p. 379, 1 centimètre cube de pluie contient 0,023 centimètres cubes de gaz dans la proportion p. 100 de :

Azote, 66,3 ; Oxygène, 31,2 ; Gaz carbonique, 2,5.

L'ébullition amène le dégagement des gaz; mais, pour qu'il soit complet, elle doit être prolongée assez longtemps. De plus, dès que l'eau se refroidit au contact de l'air, elle en reprend très rapidement de l'oxygène et de l'azote.

Dans une chaudière sans réchauffeur, l'ébullition préalable, au moyen de vapeur prise à la chaudière, n'entraîne pas de dépense spéciale de combustible; il n'en est plus de même quand on utilise la chaleur perdue des fumées dans un réchauffeur, disposé à la manière habituelle. Le réchauffeur Neu, décrit au paragraphe 38, permet un dégagement d'air, mais qui ne peut être complet, puisqu'il ne produit pas l'ébullition.

L'action du vide, c'est-à-dire d'une pression très faible, facilite l'extraction des gaz dissous. L'agitation de l'eau, le contact des surfaces sur lesquelles elle frotte, le passage dans des filtres, agissent dans le même sens.

Divers appareils purifient l'eau par l'effet combiné de la chaleur, de l'abaissement de la pression et de l'agitation. Mais l'épuration chimique semble la plus efficace : elle consiste à faire passer l'eau, préalablement chauffée, à travers un lit de tournure de fer, qui s'oxyde aux dépens de l'oxygène dissous dans l'eau. Un filtre à coke empêche l'entraînement des parcelles métalliques. Il est, en effet, logique d'oxyder la tournure plutôt que les tôles de la chaudière.

On a reconnu que certaines qualités de fer étaient beaucoup plus attaquables que d'autres, et convenaient particulièrement pour cette opération de *dégazage*.

L'eau purifiée doit être immédiatement employée, sans passer au contact de l'air, qu'elle redissout avec rapidité.

Il sera très intéressant de suivre le fonctionnement des chaudières alimentées avec de l'eau privée d'air et de voir si elles restent bien exemptes de corrosion, ainsi qu'il paraît fort probable (1).

(1) On trouvera dans *Chaleur et Industrie* des études sur le *dégazage*, par M. DIÉTERLEN (avril 1920, p. 85), par M. G. PARIS (mai 1920, p. 152), et par M. E. PARIS (septembre 1921, p. 580).

44. **Appareils d'alimentation.** — On fait usage, pour l'alimentation, de pompes, d'injecteurs et de bouteilles alimentaires.

Un moteur, placé à proximité de la chaudière qui l'alimente, est fréquemment muni d'une pompe à piston plongeur, qu'il fait constamment fonctionner pendant sa marche. On interrompt l'alimentation par l'ouverture d'un robinet de décharge qui renvoie l'eau à la bêche où on la puise, ou par la fermeture d'un robinet sur l'aspiration. Le fonctionnement de ces pompes ne présente de difficultés que si le moteur tourne très vite, ou si l'eau aspirée est très chaude.

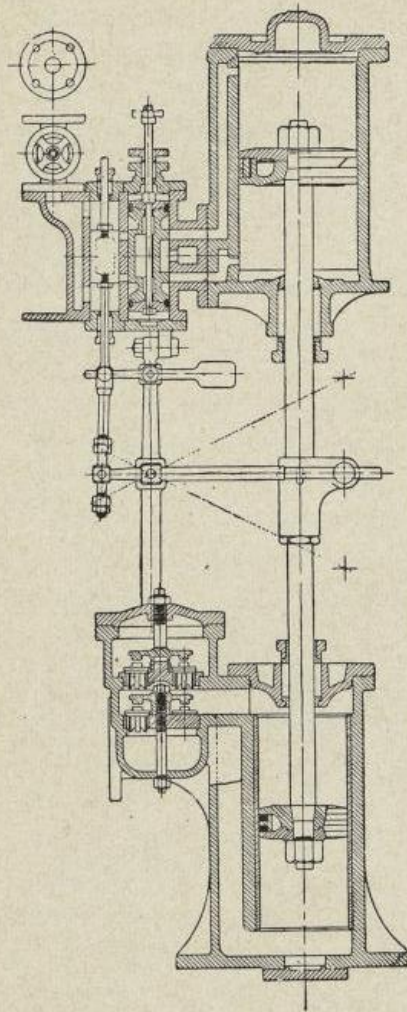
Pour les grandes batteries de chaudières, la pompe est commandée par un moteur spécial; cet ensemble porte le nom de *petit cheval alimentaire*. Le moteur est souvent un simple cylindre à vapeur, monté en tandem avec la pompe; cet appareil dépense beaucoup de vapeur pour un faible travail : il n'est pas rare de trouver des consommations qui dépassent le vingtième de la vapeur produite, au lieu des 0,25 à 0,50 p. 100 nécessaires.

On améliore l'appareil par l'emploi de deux cylindres compound, qui utilisent un peu moins mal la vapeur. A titre d'exemple, les figures 181 et 182 représentent des chevaux alimentaires des deux types.

Au lieu de perdre la vapeur du petit cheval, il est bon de s'en servir pour chauffer l'eau d'alimentation.

On emploie avec avantage le courant électrique pour la commande de pompes alimentaires, du type centrifuge à haute pression et directement calées sur l'arbre du moteur. Ces pompes restent en marche sans débiter quand le refoulement est fermé sur toutes les chaudières.

L'injecteur est un appareil simple et commode, qui ne donne lieu à aucune perte de vapeur, sauf une minime quantité lors de l'amorçage. Le poids de vapeur consommé est souvent de l'ordre du dixième du poids de l'eau refoulée dans la chaudière : cette grande quantité de vapeur chauffe l'eau qui pénètre dans la chaudière à une température voisine de 100°. Lorsqu'on ne fait pas usage de réchauffeurs, l'emploi de l'injecteur est pleinement justifié, puisque dans tous les cas, c'est la vapeur ou l'eau chaude de la chaudière qui chauffe l'eau d'alimentation; peu

FIG. 181. — Pompe alimentaire à action directe Hall, construite par Fryer et C^{ie}.

Dimensions des modèles extrêmes :

DIAMÈTRES		COURSE	NOMBRE	LITRES
Cyl. à vapeur	Pompe		de coups doubles par minute	par heure
mm.	mm.	mm.		
115	75	230	23	2.500
355	265	610	12	45.000

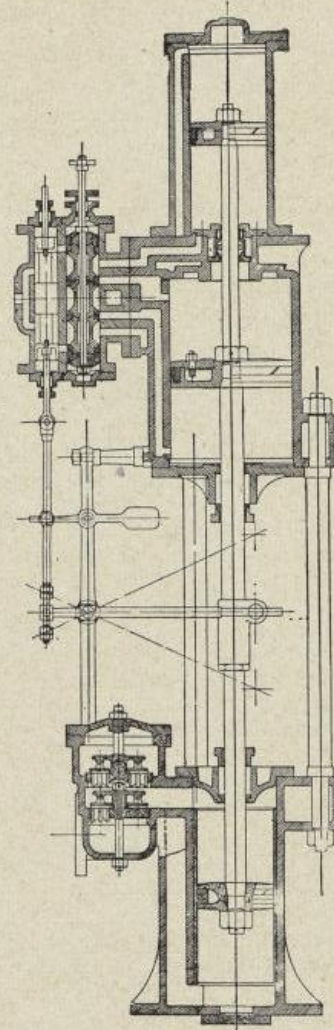


FIG. 182. — Pompe alimentaire compound Hall.

Dimensions des modèles extrêmes :

DIAMÈTRES		COURSE	NOMBRE	LITRES
Cyl. HP	Cyl. BP Pompe		de coups doubles par min.	par heure
mm.	mm.	mm.		
165	240	160	14	10.000
330	510	305	12	70.000

importe, à considérer la dépense, que cet échauffement ait lieu en dehors ou en dedans de la chaudière; mieux vaut, d'ailleurs, pour la conservation des tôles, qu'il ait lieu en dehors.

Mais avec un réchauffeur, où le même effet est produit aux dépens de la chaleur perdue des fumées, l'injecteur est inutilement dispendieux et ne doit être employé que comme appareil de secours. Il a le mérite d'être facile à installer et à manier.

Au point de vue de la dépense de vapeur, le petit cheval alimentaire est assimilable à l'injecteur, quand la vapeur qu'il consomme est condensée dans l'eau d'alimentation.

C'est surtout pour les locomotives que les injecteurs sont utiles.

L'injecteur est aspirant ou non, l'injecteur aspirant étant un peu plus compliqué que l'autre. Sur la locomotive, il est plus commode, parce qu'on le monte à portée de la main du personnel. Dans les installations fixes, quand on dispose d'eau en charge, l'injecteur non aspirant est préférable.

Le numéro, par lequel on désigne habituellement les injecteurs, est le diamètre le plus petit du divergent, en millimètres.

L'injecteur non aspirant construit par M. Lavezzari (fig. 183) est muni d'un tamis sur l'arrivée d'eau. La tuyère à vapeur est entourée d'une seconde tuyère, annulaire (utile pour l'injecteur aspirant); le trop plein est muni d'une soupape qui s'ouvre pour l'échappement de la vapeur et de l'eau lors de l'amorçage, mais s'oppose à l'aspiration de l'air pendant la marche. La soupape 9 permet une entrée supplémentaire d'eau qui est entraînée dans les ouvertures du mélangeur.

M. Lavezzari indique les débits suivants pour ces injecteurs :

NUMÉROS	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Débit par minute pour une pression de 12 kilogrammes par centimètre carré, ou plus élevée, en litres	23	38	60	88	120	165	210	260	300
Diamètre intérieur des tuyaux d'eau, de vapeur et de refoulement, en millimètres	30	30	33	35	37	40	45	50	55

Ces débits s'entendent pour de l'eau froide ; ils diminuent quand la température de l'eau s'élève. La température la plus

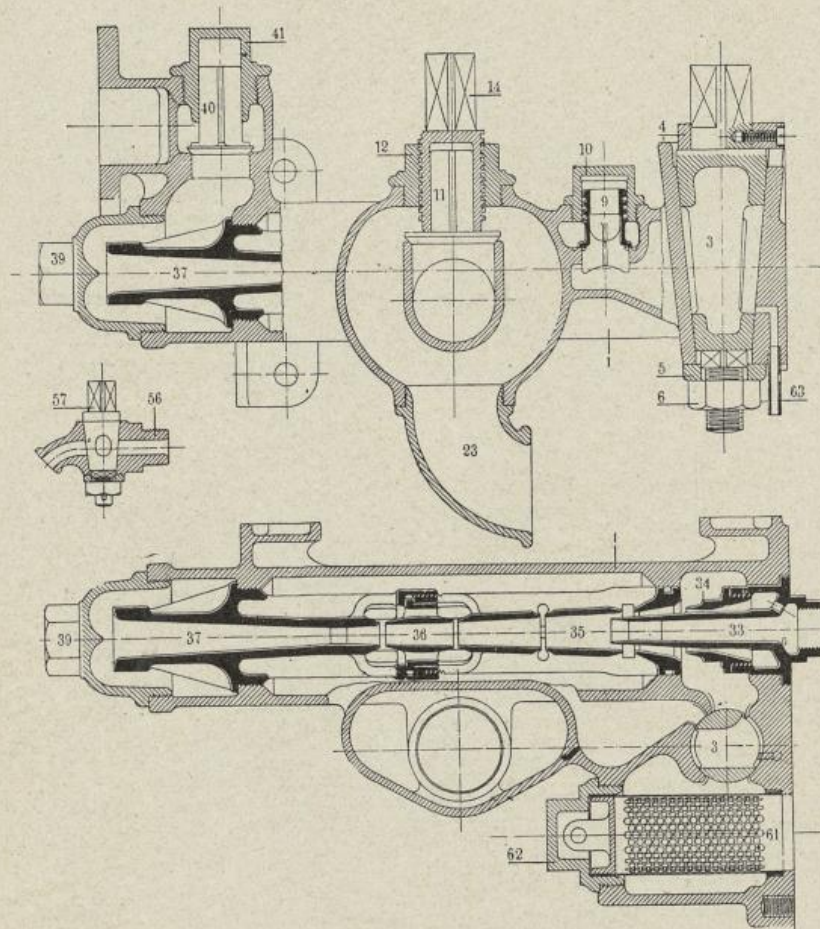


FIG. 183. — Injecteur non aspirant, construit par Lavezzari.

33 et 34, tuyères à vapeur ; 35, 36, mélangeur ; 37, divergent ; 11, soupape de trop-plein ; 9, soupape d'arrivée d'eau supplémentaire.

élevée de l'eau qu'admette l'injecteur dépend de la pression, comme il suit :

Pression de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré..	17	16	15	14	13	12
Température maxima de l'eau	40°	42°	44°	46°	48°	50°

L'injecteur aspirant (fig. 184) permet l'envoi préliminaire de vapeur par la tuyère annulaire, pour l'amorçage : la tige 24 de

la soupape qui ferme la tuyère centrale est prolongée par un téton, de sorte qu'en ouvrant cette soupape, on commence par démasquer les ouvertures qui alimentent la tuyère annulaire; ce

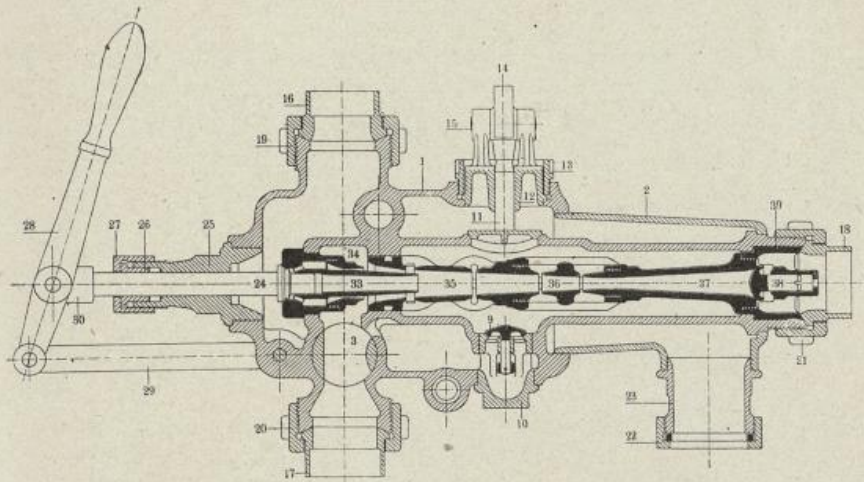


FIG. 184. — Injecteur aspirant, construit par Lavezzari.

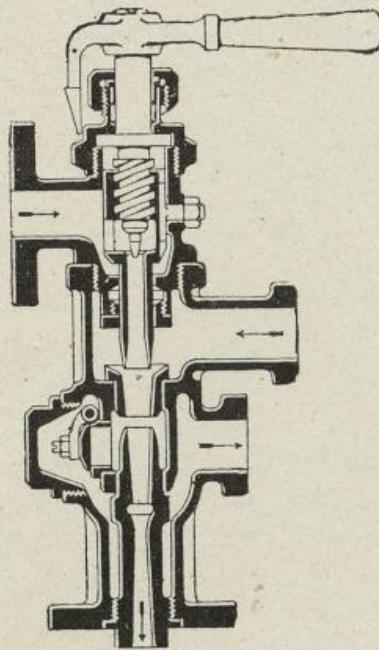


FIG. 185. — Injecteur Lethuillier-Pinel, à mise en marche automatique (c'est-à-dire d'un seul mouvement de la poignée de manœuvre).

sont ces ouvertures qui limitent le débit de vapeur par cette tuyère.

Les températures les plus élevées de l'eau que puisse aspirer cet injecteur sont un peu moindre que pour l'injecteur non aspirant (1).

L'injecteur Lethuillier-Pinel (fig. 185) a ses tuyères à vapeur et à eau réglables simultanément ; une garniture intérieure, autour de la tuyère à vapeur, sépare les arrivées d'eau et de vapeur, comme dans l'injecteur Giffard primitif. Une échelle graduée indique la position normale de la poignée pour les diverses pressions des chaudières. On fait varier le débit en déplaçant la poignée de part et d'autre de sa position normale.

Le constructeur indique pour ces appareils, recevant l'eau en charge, les débits ci-dessous :

Numéros des injecteurs.....	21/2	3	5	8	10	12	14	16
Diamètre des tuyaux en mm.	13	13	25	38	50	50	64	75
Pression : 5 kg par cm ² : litres p. h.	300	700	1900	4800	7500	10800	14700	19100
— 7 — —	350	800	2200	5700	8950	12900	17500	22900
— 10 — —	420	950	2650	6800	10700	15400	20950	27350
— 12 — —	470	1050	2950	7550	11900	16900	23000	30000

Les débits indiqués ci-dessus s'entendent pour injecteurs ayant l'eau en charge. Lorsqu'ils sont montés pour aspirer, le débit diminue en proportion de la hauteur à laquelle ils doivent élever leur eau ; jusqu'à un mètre, il n'y a qu'une différence peu sensible, mais à 1 m. 75, il faut compter environ 5 p. 100 en moins ; à 3 m. 50, environ 10 p. 100 et à 5 m. 50, environ 43 p. 100.

La bouteille alimentaire, d'un usage restreint, est un récipient qu'un jeu de robinets permet de remplir d'eau, puis de vider dans la chaudière placée en contre-bas.

45. Réchauffage par la vapeur. — La vapeur d'échappement des machines sans condenseur peut chauffer l'eau d'alimentation par contact ou à travers une paroi métallique. La première

(1) M. Lavezzari a étudié, pour les locomotives, deux types nouveaux d'injecteurs, qui diffèrent légèrement de ceux qui viennent d'être décrits.

méthode, plus simple, a l'inconvénient de faire pénétrer dans la chaudière des matières grasses avec l'eau : il est difficile de purifier complètement, à l'aide de séparateurs d'huile, la vapeur d'échappement.

L'injecteur à vapeur d'échappement (fig. 186) réalise le chauffage direct, et en même temps refoule l'eau dans la chaudière, pourvu que la pression n'y dépasse pas 5 kilogrammes par centimètre carré. Pour des pressions plus élevées, l'injecteur est

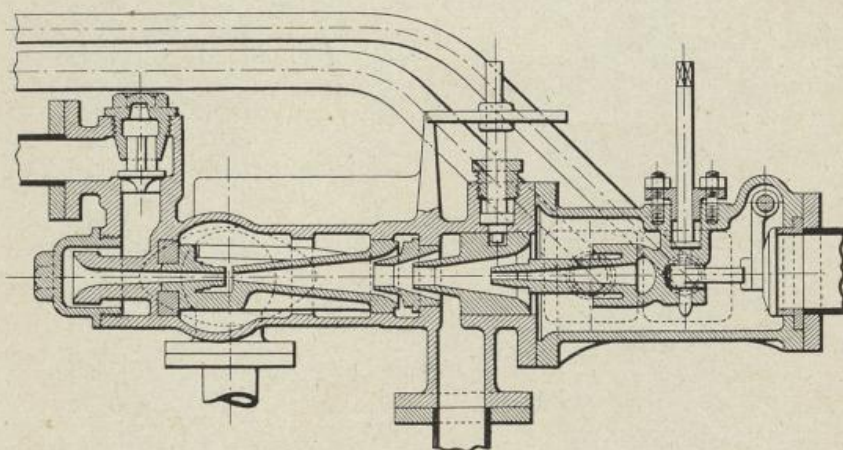


FIG. 186. — Injecteur à vapeur d'échappement, pour locomotives. Une petite tuyère donne de la vapeur prise à la chaudière, qui s'ajoute à la vapeur d'échappement. Une seconde prise de vapeur à la chaudière est prévue en cas d'absence de la vapeur d'échappement, dont l'entrée est alors fermée par une valve automatique.

complété par une tuyère supplémentaire prenant la vapeur dans la chaudière; l'eau n'est donc plus chauffée exclusivement par les calories perdues de la vapeur d'échappement.

Aussi paraît-il plus simple, au moins pour les chaudières fixes, de chauffer l'eau par simple barbotage, en employant une pompe alimentaire capable d'aspirer l'eau très chaude. Toutefois, pour régulariser l'action et éviter les chocs, il est bon d'employer un éjecteur à tuyères concentriques recevant l'eau et la vapeur.

C'est surtout aux locomotives que s'applique l'injecteur à vapeur d'échappement : ces applications commencent à être assez

nombreuses, surtout en Angleterre. Les types les plus récents diffèrent légèrement de celui que représente la figure 186, et

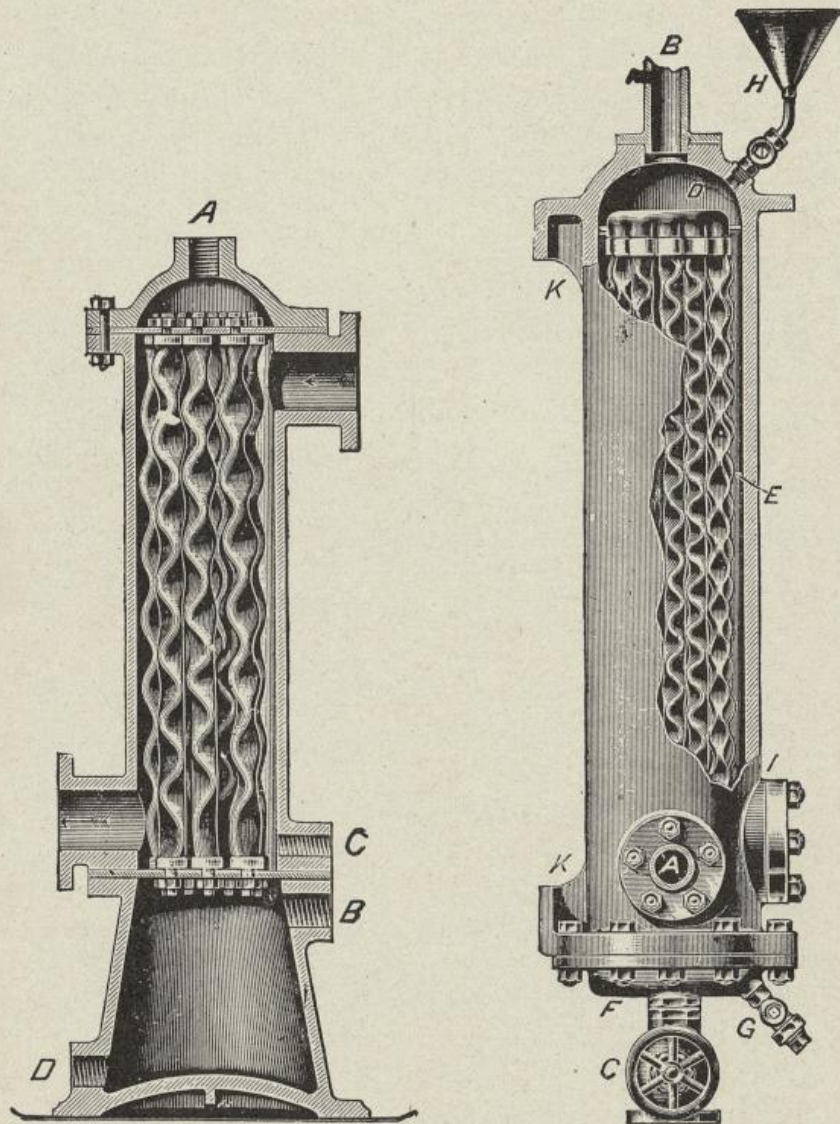


FIG. 187. — Réchauffeurs d'eau d'alimentation par vapeur d'échappement, à tubes ondulés Row, construits par MM. Fryer et C^{ie}. L'eau circule dans les tubes, la vapeur à l'extérieur.

arrivent à alimenter contre des pressions dépassant quelque peu 5 kg. par cm², sans addition de vapeur vive. Les matières grasses

ne paraissent pas exercer d'action nuisible bien marquée sur les chaudières des locomotives munies de ces injecteurs.

La seconde méthode comporte l'emploi d'un réchauffeur tubulaire dont les tubes, parcourus par l'eau, sont entourés de vapeur d'échappement. Le nettoyage doit être prévu à l'extérieur des tubes qui se recouvrent de graisse, et à l'intérieur, où se dépose le tartre. La figure 187 représente un de ces réchauffeurs. Un type analogue sert pour la vapeur vive prise à la chaudière.

Le réchauffeur placé en amont de la pompe alimentaire n'est pas soumis à la pression de la chaudière; par contre, la pompe doit aspirer l'eau chaude.

Plusieurs types de ces réchauffeurs ont été étudiés en vue de leur application aux locomotives.

CHAPITRE VII

APPAREILS DE SURETÉ

46. **Indicateurs de niveau.** — Les appareils indicateurs du niveau de l'eau sont les tubes transparents, les robinets de jauge et les flotteurs.

Le montage du tube transparent comporte deux robinets d'isolement et un robinet de purge. Le principe en est extrêmement simple, mais quelques précautions sont nécessaires dans l'installation et l'emploi. Les communications doivent être courtes et directes, et rester constamment libres : la manœuvre du robinet de purge les vérifie et en empêche l'obstruction. On a signalé le refoulement de la matière plastique de la garniture entre le tube transparent et sa monture métallique (fig. 188).

Quand la vaporisation est active, la surface de l'eau ne reste pas horizontale, et des intumescences peuvent se produire. Une telle intumescence, à l'endroit où se branche la communication inférieure du tube de niveau, en fausse dangereusement les indications. Un défaut de ce genre a été signalé sur certaines locomotives américaines : la voûte en briques du foyer repose sur des tubes à eau longitudinaux montant vers la façade de la chaudière ; la circulation de l'eau dans ces tubes relève le niveau contre la plaque de boîte à feu, qui porte le tube de niveau.

Pour augmenter la résistance du tube de niveau, on le compose d'une pièce métallique munie d'une fenêtre verticale fermée par une glace. En taillant la face interne de cette glace en forme de prismes (fig. 189), on met en jeu un phénomène de réflexion totale, au contact de la vapeur, et la lumière est renvoyée vers l'extérieur. Au contact de l'eau, au contraire, les prismes se laissent traverser par les rayons lumineux, et on aperçoit la

paroi métallique, peinte en noir. La visibilité à distance est très bonne.

Les tubes en verre et les glaces sont exposés à une usure assez rapide au contact de la vapeur à haute pression et, par suite, à température élevée : l'emploi de verres résistant bien dans ces conditions est désirable.

Pour la sécurité du personnel, des protecteurs sont utiles, sur-

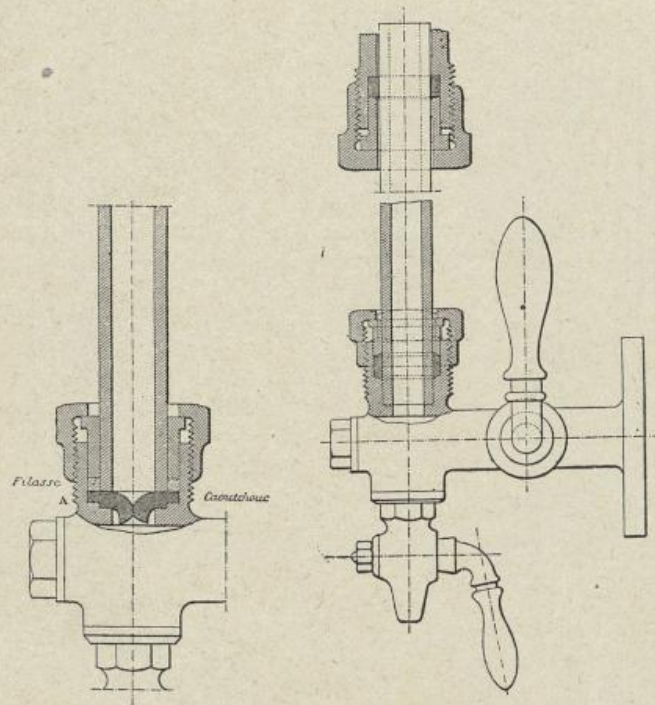


FIG. 188. — Tube de niveau obstrué par sa garniture (d'après Walckenaer).
A droite, monture emprisonnant la garniture et ne lui permettant plus de s'échapper sous le tube.

tout lorsque les indicateurs sont placés dans le voisinage des hommes à leur poste de travail.

Ces protecteurs, tout en étant assez solides pour être efficaces, ne doivent pas rendre trop difficile l'observation du niveau ; le démontage et le remontage, en cas de remplacement d'un tube, doivent être aisés.

On a imaginé divers systèmes de fermeture automatique des

communications, en cas de rupture d'un tube : ces appareils ne sont pas d'un emploi fréquent, parce qu'on craint un fonctionnement intempestif qui risque de donner une indication dange-

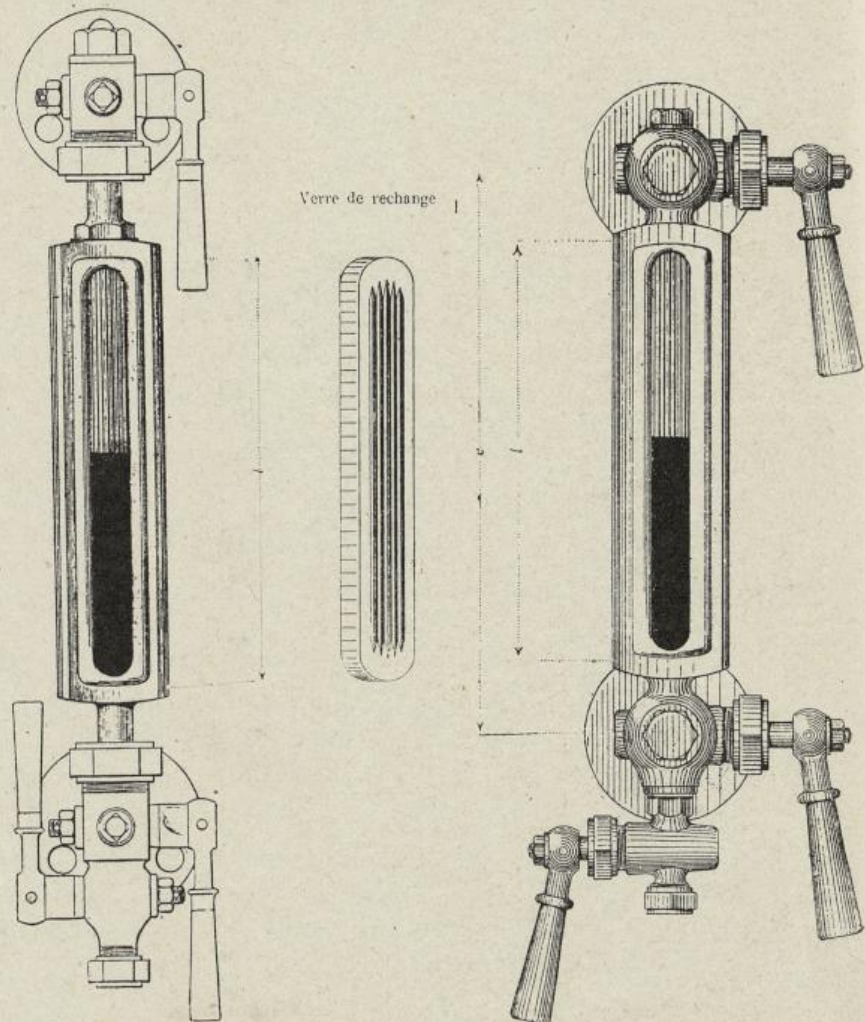


FIG. 189. — Tube de niveau à glace réfractante; à gauche, remplaçant le tube transparent ordinaire; à droite, complet avec ses montures. Au milieu, verre avec saillies prismatiques.

reuse et que, dans bien des cas, ils ne paraissent pas d'une grande utilité. Ce qu'on peut recommander, c'est de disposer la commande des robinets d'isolement pour qu'on les manœuvre facilement à distance.

Les *flotteurs* étaient souvent employés dans les anciennes chaudières, avec une tige transmettant à l'extérieur l'indication

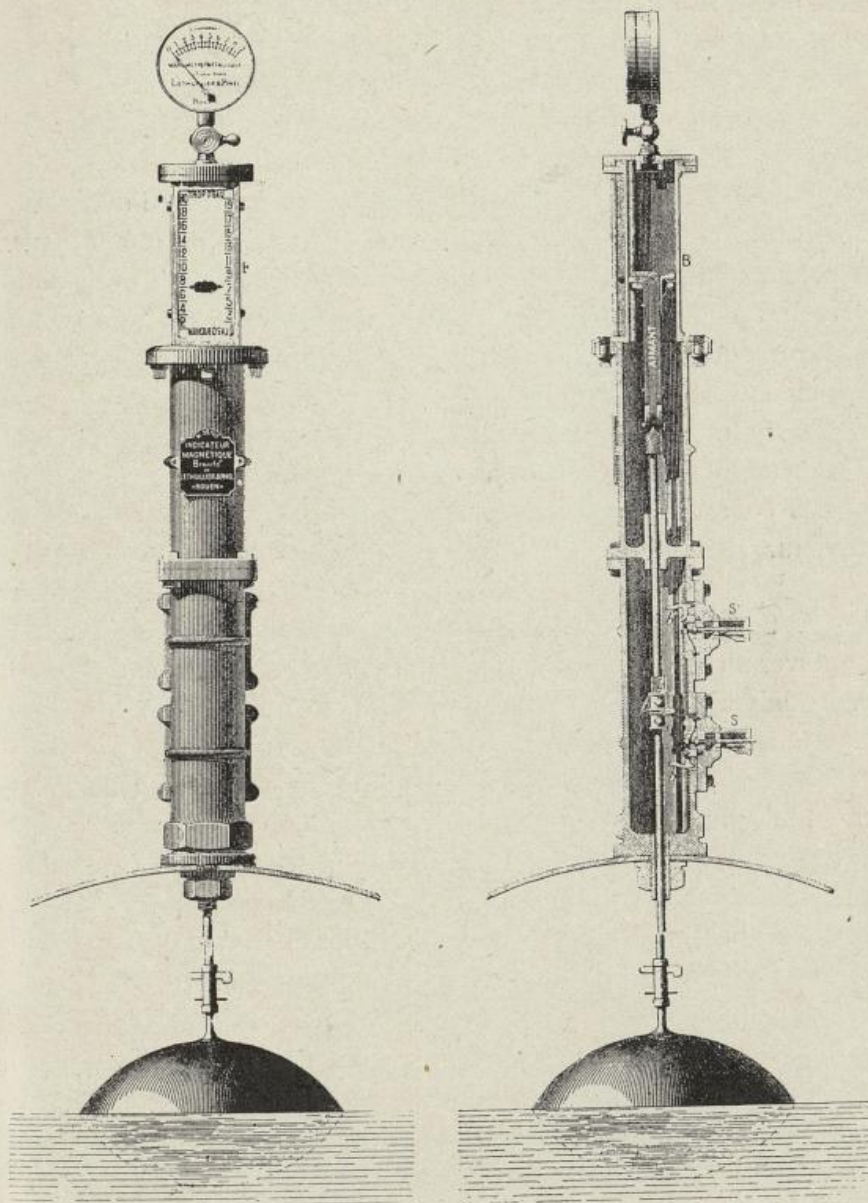


FIG. 190. — Indicateur magnétique de niveau Lethuillier-Pinel, avec sifflets avertisseurs. Un aimant agit, à travers le tube de cuivre B, sur le petit index en fer visible sur l'élévation et placé derrière une glace. Les deux sifflets S indiquent les limites, inférieure et supérieure, du niveau dans la chaudière.

du niveau, à travers une garniture. Avec les fortes pressions actuelles, ou la garniture trop serrée immobilise le flotteur, ou elle laisse fuir la vapeur.

Pour transmettre à l'extérieur l'indication du niveau, sans percer la paroi de la chaudière, Lethuillier-Pinel utilise l'action d'un aimant sur un barreau de fer à travers un tube non magnétique (fig. 190) ; les types courants de ces indicateurs ont des courses de 150, 210 et 300 millimètres. Pour rendre l'indication du niveau visible sur la façade de la chaudière, le même constructeur commande par le flotteur un arbre horizontal tournant, terminé par un aimant qui déplace une aiguille sur un cadran.

Le niveau Chaudré fonctionne en tordant un tube en métal mince suffisamment long.

Le flotteur se prête facilement à la commande de sifflets d'alarme, quand le niveau atteint ses limites.

Les *robinets de jauge* sont les plus simples indicateurs de niveau.

47. Soupapes de sûreté. — Une soupape de sûreté doit se soulever dès qu'une pression déterminée est atteinte. Elle doit alors laisser échapper toute la vapeur produite, quelle que soit l'activité du feu, sans que la pression dépasse la limite fixée par le *timbre* de la chaudière. Comme une augmentation de pression, à partir du moment de l'ouverture, correspond à cet échappement, la soupape doit être réglée pour une valeur un peu inférieure au timbre, pour éviter absolument tout dépassement de la limite réglementaire. Enfin, il convient que la soupape se referme dès que la pression redescend à la valeur d'ouverture.

La soupape est un disque qui repose, par une portée étroite, sur un *siège*, plan ou conique. Elle est guidée perpendiculairement au siège, par des ailettes ou par un téton central, engagé dans une douille faisant corps avec le siège. Ces guides ne doivent donner lieu à aucun frottement appréciable, et surtout ne pas risquer de se coincer.

Lorsque le siège est une pièce en bronze engagée dans la fonte, les dilatations inégales des deux métaux peuvent produire une

contraction du siège de nature à coincer la soupape. C'est à cette cause qu'on a attribué l'explosion d'une chaudière du navire *Thunderer* (1). On a cité aussi le cas d'un siège rapporté pouvant glisser dans son logement et soulevé avec la soupape, sans donner issue à la vapeur.

Plusieurs formules empiriques anciennes donnent le diamètre des soupapes (2). Ce diamètre devrait être fonction de la production de vapeur et de sa pression. La production de vapeur dépend de la quantité de chaleur dégagée dans le foyer, c'est-à-dire de la consommation de combustible. La plupart des formules font dépendre le diamètre d'autres éléments : elles ne s'appliquent donc qu'à certaines catégories de chaudières. On peut critiquer, dans plusieurs d'entre elles, le nombre de décimales superflues des coefficients. En fait, la pratique a permis aux constructeurs de fixer dans chaque cas des diamètres convenables.

La charge de la soupape se calcule en multipliant par la pression effective la surface du cercle qu'elle recouvre. Elle peut être directement chargée par une masse de poids convenable (fig. 191), montage fréquent en Angleterre. On préfère généralement la charge par un poids plus léger suspendu à l'extrémité

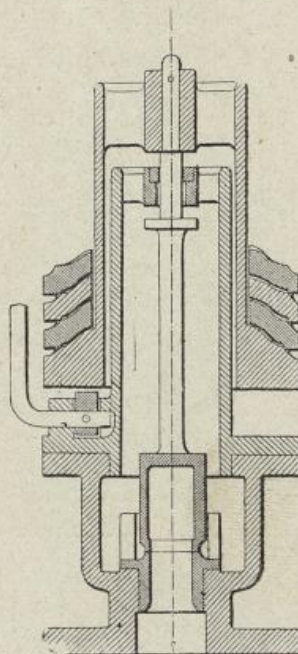


FIG. 191. — Soupape de sûreté à charge directe. A gauche, arbre à levier et excentrique pour soulever à la main la soupape. La forme de cloche est donnée pour maintenir constante la pression sous la soupape pendant l'ouverture.

(1) Le coefficient de dilatation étant 0,00001 pour la fonte et 0,000018 pour le bronze, la contraction du diamètre ne pouvait pas être bien grande, et il fallait que le jeu initial des guides de la soupape fût trop petit.

(2) Consulter un travail de M. SINIGAGLIA, dans la *Revue de mécanique*, mars 1902, p. 211.

d'un levier (fig. 192 et 193). L'articulation de ce levier sur un tourillon ne détermine pas avec une extrême rigueur la longueur des bras, et l'erreur peut être appréciable sur le petit bras. La

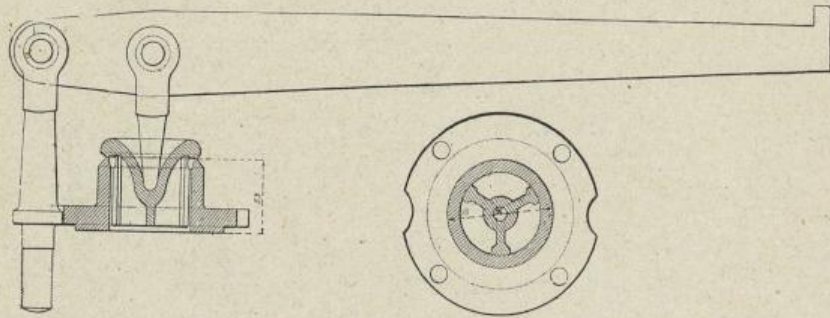


FIG. 192. — Soupape de sûreté à levier.

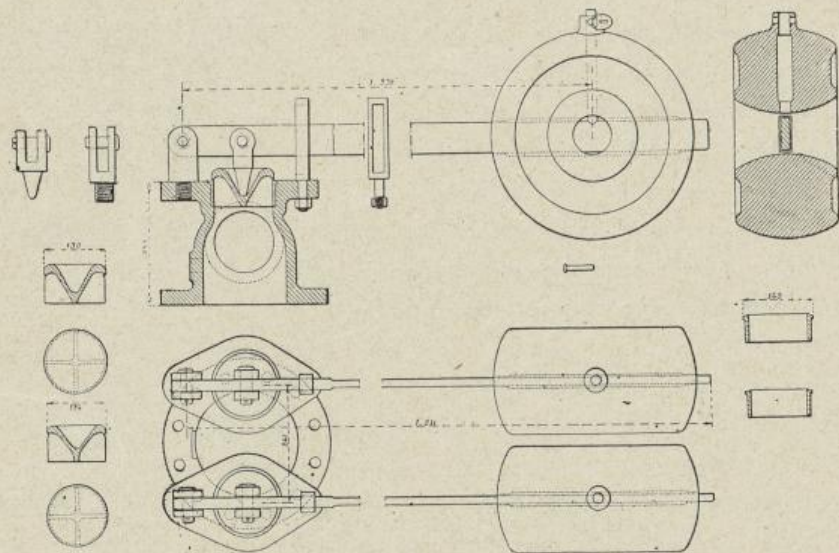


FIG. 193. — Soupape à levier Babcock et Wilcox.

substitution d'un couteau au tourillon (fig. 195) évite cette légère imprécision.

Au poids, on peut substituer un ressort, et cette substitution est nécessaire sur les chaudières mobiles. Comme un ressort peu encombrant remplace un poids très lourd, la course nécessaire étant faible, la charge est généralement directe.

Les surpressions tiennent à la très faible levée des soupapes ordinaires. Cette faible levée s'explique par la réduction de la pression de la vapeur près des bords de la soupape, résultant de l'écoulement. La surpression, pour une même levée de la soupape, est d'autant plus forte que la pression de la vapeur est plus élevée (1).

De nombreux dispositifs ont été imaginés pour corriger ce défaut des soupapes. En éloignant de la zone d'écoulement la partie de la soupape sur laquelle s'exerce la pression qui la soulève, par la disposition en cloche représentée figure 191, on élimine la cause ou au moins l'une des causes qui limitent la levée. Pour obtenir un effet plus intense, on a employé ou proposé des soupapes différentielles à sièges multiples; l'addition d'une petite soupape auxiliaire, dont le soulèvement diminue la charge de la soupape principale; une liaison mécanique de la soupape et de son ressort diminuant la charge; enfin, on fait agir l'échappement de vapeur, par pression ou par entraînement, sur des surfaces supplémentaires.

Les soupapes établies suivant ce dernier principe ne comportent pas d'organe pouvant être cause d'avaries ou de frottements.

La grande levée, obtenue par ces dispositifs, diminue les surpressions pendant le fonctionnement des soupapes et permet de leur donner un moindre diamètre.

La difficulté est d'éviter un trop grand retard à la fermeture. Le réglage est considéré comme satisfaisant lorsque les écarts en plus et en moins de la pression d'ouverture ne dépassent pas un quart de kilogramme par centimètre carré.

La soupape Adams (fig. 194) est fort simple : le réglage doit en être fait avec soin, le profil des gorges étant exactement conservé.

La soupape Dulac (fig. 195) présente un cône entraîné par la vapeur d'échappement.

(1) Consulter à ce sujet une intéressante étude, avec nombreuses expériences, par M. WALCKENAER, dans les *Annales des mines*, 8^e série, t. XVI, p. 124.

La soupape Lethuillier-Pinel (fig. 196) se compose de deux disques, réunis par des ailettes de guidage, guidage complété par des saillies du siège entre lesquelles se meut le disque inférieur.

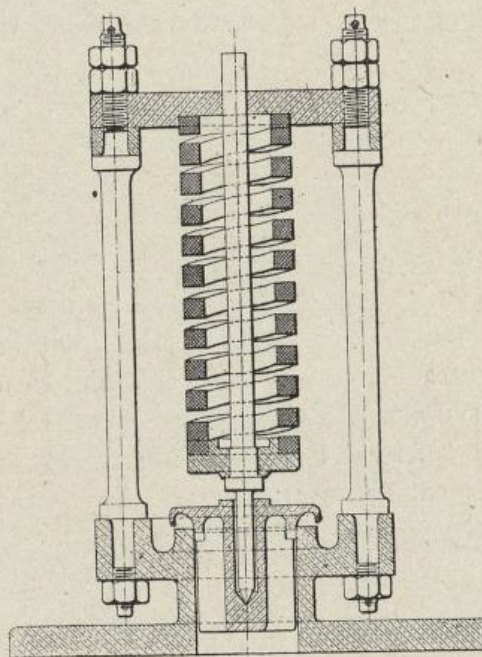


FIG. 194. — Soupape de sûreté Adams, à grande levée.

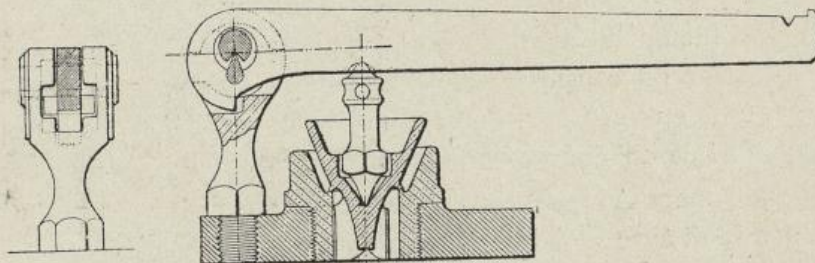


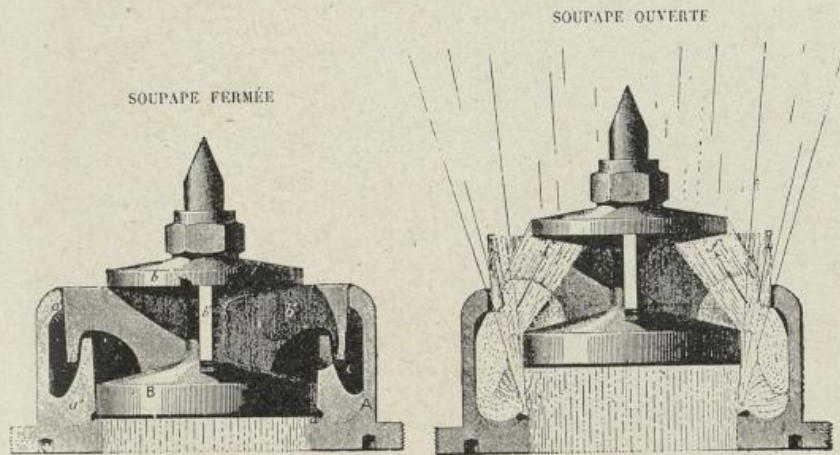
FIG. 195. — Soupape à grande levée Dulac, avec cône d'entraînement et articulation du levier sur couteau.

La vapeur qui s'échappe, lorsque la soupape se lève, est renvoyée par le siège sous le disque supérieur, et le frappe avec une force qui croît avec le débit. Le soulèvement peut atteindre le quart du diamètre.

Le constructeur de ces disques en détermine le diamètre par la formule :

$$D = 1,5 \sqrt{\frac{S}{0,967 T + 0,588}}$$

où D est le diamètre en centimètres, T le timbre et S la surface de chauffe en mètres carrés. Cette formule est dérivée de l'ancienne formule administrative, où le coefficient 2,6 est remplacé



DÉTAILS DE CONSTRUCTION

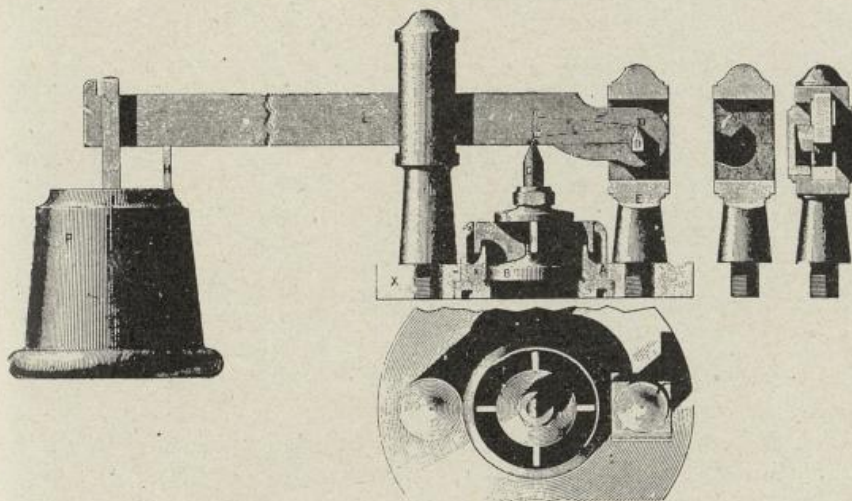


FIG. 196. — Soupape de sûreté Lethuillier-Pinel, à échappement progressif, avec articulation du levier sur couteau.

par 1,5. Etant donné qu'on arrondit les nombres qu'elle donne, on pourrait la réduire à :

$$D = 1,5 \sqrt{\frac{S}{T + 0,5}}$$

ou même

$$D = 1,5 \sqrt{\frac{S}{T}}$$

Avec une surface de 200 mètres carrés et un timbre de 10, les trois formules donnent, pour le diamètre arrondi en nombre entier de millimètres, 66, 65 et 67.

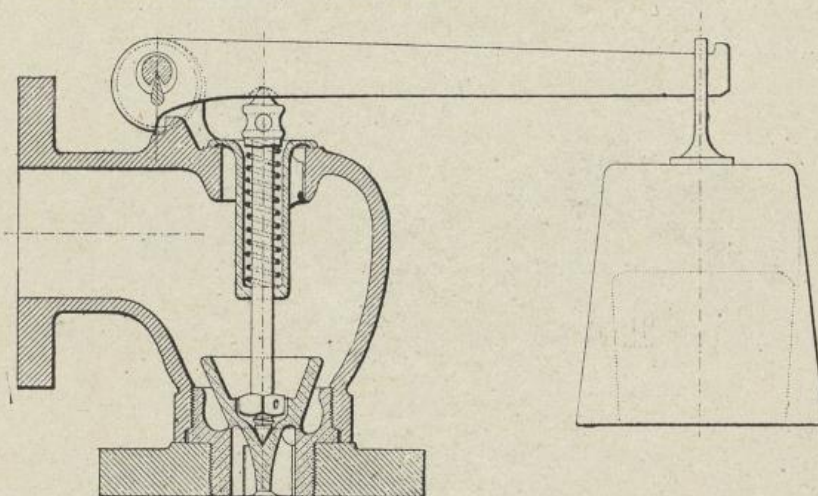


FIG. 197. — Soupape Dulac, avec tubulure pour le dégagement de la vapeur. Un obturateur, chargé par un léger ressort, laisserait échapper la vapeur, en cas d'obstruction du tuyau de dégagement.

Avec une surface de 1.500 mètres carrés et un timbre de 15, les diamètres sont 150, 149 et 150 mm. La dernière formule, qui donne la plus grande valeur du diamètre, est donc pratiquement équivalente à la première.

Il est souvent utile, surtout avec les soupapes à grande levée, de prévoir un tuyau d'évacuation de la vapeur (fig. 197).

48. **Manomètres.** — Le manomètre à tube flexible de Bourdon (fig. 198) est d'un usage général : il est monté de manière à ce que la vapeur ne pénètre pas dans le tube, que la dilatation déformerait comme la pression. La graduation, en kilogrammes

par centimètre carré, donne la pression *effective*, c'est-à-dire en dessus de celle de l'atmosphère. Pour connaître rigoureusement la pression, il faut donc ajouter celle qu'indique le baromètre. En général, il suffira d'ajouter une unité au nombre de kilogrammes par centimètre carré.

Les Anglais comptent les pressions, également effectives pour les chaudières, en livres par pouce carré, dont le nombre est à

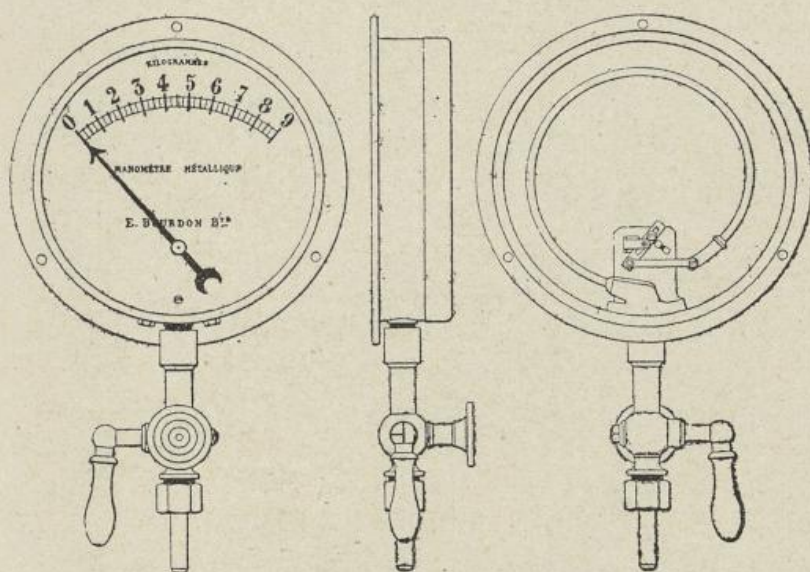


FIG. 198. — Manomètre Bourdon, à tube métallique.

multiplier par 0,0703 pour obtenir l'équivalent en kilogrammes par centimètre carré.

Le petit tableau ci-dessous facilitera les conversions :

10 livres par pouce carré = 0,703 kg. par cm ² .				
20	—	—	1,406	—
30	—	—	2,109	—
40	—	—	2,812	—
50	—	—	3,515	—
60	—	—	4,218	—
70	—	—	4,921	—
80	—	—	5,625	—
90	—	—	6,328	—
100	—	—	7,031	—

Certains manomètres, au lieu du tube flexible, reçoivent la pression sur un diaphragme.

L'emploi d'un manomètre enregistreur est recommandable.

Les manomètres des chaudières doivent être de temps en temps vérifiés à l'aide d'un *manomètre étalon*. Celui-ci doit être contrôlé chez le constructeur, par comparaison avec un manomètre à mercure à air libre.

CHAPITRE VIII

TUYAUTERIES ET ACCESSOIRES

49. **Prises de vapeur.** — La prise de vapeur est généralement une soupape manœuvrée par une vis portant un volant. Sur les locomotives, qui exigent une manœuvre rapide de cet organe, la prise de vapeur est souvent un tiroir, ou une soupape équilibrée. Sur les chaudières fixes, au contraire, il importe que l'ouverture soit lente, pour éviter les chocs, parfois très dangereux, que produit l'entrée de la vapeur dans les conduites renfermant de l'eau. Il est bon de prévoir une ouverture préliminaire de très petite section, pour mettre en charge lentement la tuyauterie, par exemple en munissant la boîte de la soupape d'un petit tuyau qui la contourne, ou *by-pass*, muni d'un robinet.

Malgré cette précaution, les chocs étant toujours à craindre dans la tuyauterie, ces boîtes ne doivent pas être en fonte : l'emploi de ce métal a donné lieu à de dangereuses ruptures.

50. **Arrêts automatiques.** — Lorsque plusieurs chaudières communiquent avec une conduite commune de vapeur, la rupture de l'une des chaudières ou de la conduite donne issue à toute la vapeur de l'ensemble. Il est très important de limiter le dégagement de vapeur, en fermant les communications des chaudières et de la conduite. Pour une chaudière avariée, il suffit d'un clapet s'opposant au retour de la vapeur ; mais en cas de rupture de la conduite, le flux excessif de vapeur doit obturer l'issue de chacune des chaudières.

Ce second genre de fermeture automatique a été rendu obligatoire par décret du 29 juin 1886 (1). Mais, si la fermeture

(1) *Annales des mines*, partie administrative, 8^e série, t. V, p. 199.

contre le retour du courant est simple, celle produite par un courant dépassant une vitesse déterminée est plus difficile à régler : trop sensible, l'appareil donne lieu à des fonctionnements intempestifs, qui peuvent avoir de sérieux inconvénients ; trop peu sensible, il est d'une efficacité douteuse. Aussi, à la

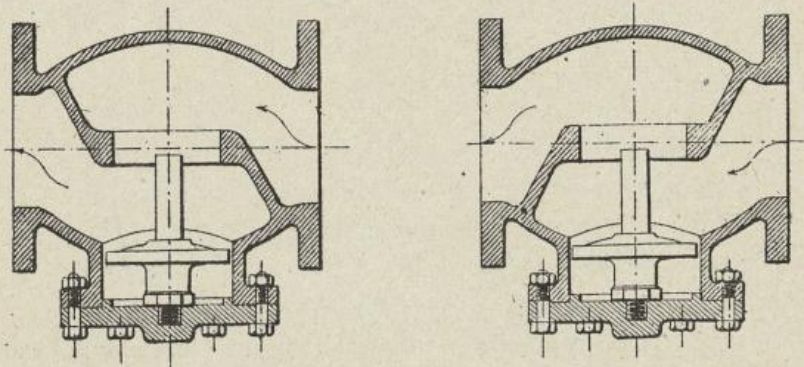


FIG. 199. — Obturateurs automatiques Lethuillier-Pinel, fonctionnant en cas d'inversion du courant de vapeur (partie gauche de la figure) et dans le sens normal du courant (partie droite de la figure).

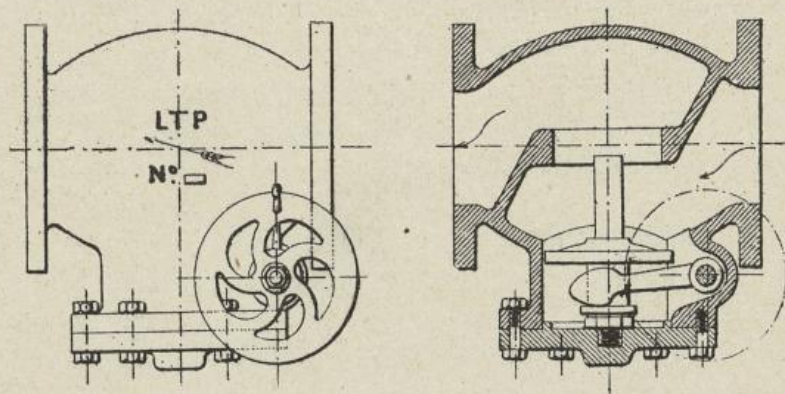


FIG. 200. — Obturateur automatique Lethuillier-Pinel, avec commande extérieure.

suite de quelques incidents dus à l'emploi des clapets de 1886, le décret du 9 octobre 1907 s'est contenté de prescrire l'emploi du clapet de retour. Mais un double appareil, fonctionnant dans les deux sens, n'en reste pas moins intéressant ; il en existe des types nombreux.

L'obturateur Lethuillier-Pinel (fig. 199) fonctionne en cas

d'inversion du courant, ou dans le sens du courant, suivant la manière dont il est monté. Le disque obturateur, monté sur un guide vertical, est placé en dehors du courant de vapeur; il n'en est pas moins entraîné contre son siège, lorsque la vitesse de ce courant devient excessive. Il est percé de petits trous qui, après un fonctionnement, une fois les vannes fermées, rétablissent l'égalité de pression sur ses deux faces, de sorte qu'il retombe spontanément.

L'appareil peut également être muni d'une commande extérieure (fig. 200).

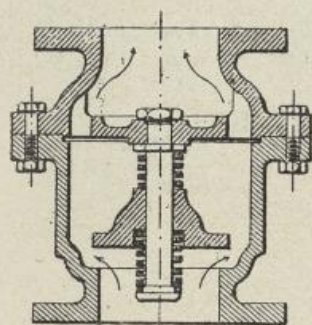


FIG. 201. — Obturateur Lethuillier-Pinel, fonctionnant en cas d'inversion du courant, pour conduite verticale.

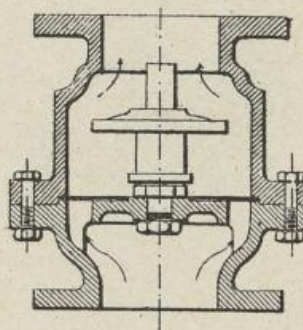


FIG. 202. — Obturateur Lethuillier-Pinel, fonctionnant dans le sens du courant, pour conduite verticale.

Le montage est différent sur une conduite verticale (fig. 201 et 202).

Les deux obturateurs peuvent être combinés en un seul (fig. 203 et 204), fonctionnant pour les deux sens du courant.

Enfin, l'obturateur peut être placé dans la boîte de la soupape de prise de vapeur.

L'obturateur E. L. Bazin (fig. 205) comprend une douille cylindrique B, percée de fenêtres F et F' et un piston P, pouvant glisser tous les deux sur un axe fixe A, la douille des deux côtés de la position normale qu'elle occupe sur la figure, et le piston vers la gauche seulement, côté d'arrivée de la vapeur. Une fourchette, reliée à un levier chargé d'un poids réglable, tend à pous-

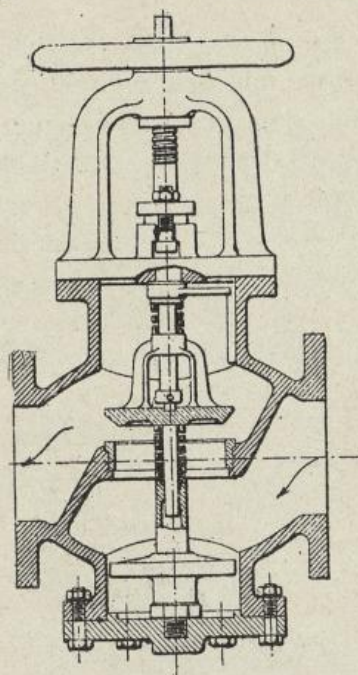


FIG. 203. — Obturateur double Lethuillier-Pinel, pour conduite horizontale.

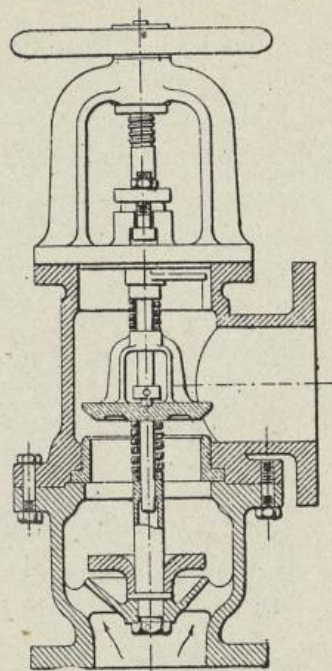


FIG. 204. — Obturateur double Lethuillier-Pinel, pour conduite verticale.

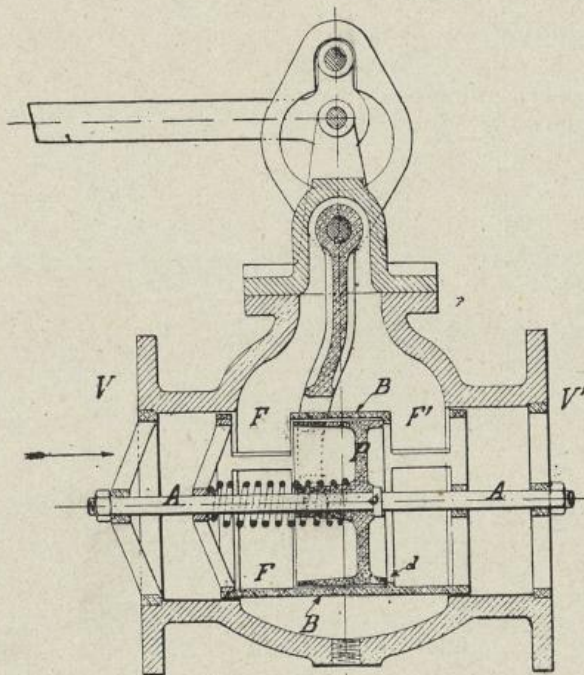


FIG. 205. — Obturateur automatique Bazin, fonctionnant dans les deux sens.

ser la douille vers la droite, tandis qu'un ressort en hélice agit en sens contraire. A ces deux actions s'ajoute celle de la vapeur sur la tranche, qui agit vers la droite et provoque la fermeture, quand le courant dépasse une certaine valeur.

En cas de renversement du courant, la douille et le piston glissent vers la gauche.

L'obturateur de Muller, Roger et Cie (fig. 206) fonctionne dans les deux sens; il est muni d'une commande extérieure.

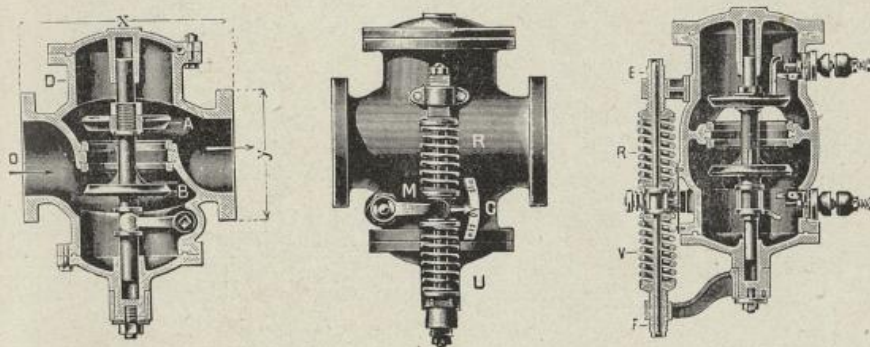


FIG. 206. — Soupape automatique de retenue, agissant dans les deux sens; type de MM. Muller, Roger et Cie; coupe transversale, élévation et coupe longitudinale.

51. Tuyauteries de vapeur. — Dans une tuyauterie de vapeur, les principaux éléments à considérer sont le diamètre, la nature du métal, le tracé général, les précautions contre la dilatation et contre la présence de l'eau.

Pour un débit donné de vapeur, ayant une densité moyenne déterminée, la vitesse d'écoulement est en raison inverse du carré du diamètre; il en résulte une perte de pression par mètre courant qu'on peut estimer, en kilogrammes par mètre carré, par la formule :

$$0,0016 \gamma \frac{w^2}{d}$$

où γ est le poids en kilogrammes du mètre cube, w la vitesse en mètres par seconde, d le diamètre en mètres (1). Pour un débit, à

(1) Voir BOULVIN, *Cours de mécanique appliquée aux machines, générateurs de vapeur*, 2^e édition, p. 241.

l'heure, de 36.000 kilogrammes de vapeur saturée à la pression effective d'environ 15 kilogrammes par centimètre carré (pesant 8 kilogrammes par mètre cube), cette formule donne les valeurs ci-dessous :

DIAMÈTRE EN MÈTRES	PERTE PAR MÈTRE COURANT EN KG PAR M ²
0,2	100
0,3	14
0,4	3
0,5	1
0,6	0,4

Ainsi une conduite longue de 100 mètres, de 0 m. 2 de diamètre, donnerait une perte de pression d'un kilogramme par centimètre carré.

Une autre perte résulte du refroidissement extérieur de la conduite : par mètre courant, elle est proportionnelle à la surface, c'est-à-dire au diamètre.

Pour rapprocher ces deux quantités, on peut mesurer sur le diagramme entropique la perte en calories utilisables correspondant à la chute de pression et chercher le minimum du total.

Ces considérations conduisent à ne pas exagérer le diamètre des conduites, et à y admettre des vitesses assez grandes.

Les anciennes canalisations étaient souvent en cuivre, facile à travailler ; mais la résistance de ce métal est insuffisante aux températures élevées de la vapeur surchauffée, et même saturée à haute pression ; c'est pourquoi on lui a substitué l'acier.

Dans une grande installation, le service ne doit pas être interrompu par une avarie à la canalisation, qui dessert tous les générateurs et tous les moteurs. Quand générateurs et moteurs sont disposés en deux rangées parallèles, le montage *en boucle*, où la conduite forme un circuit continu, avec vannes d'arrêt en nombre suffisant, répond à ce programme. Deux conduites, dont chacune dessert tous les générateurs et tous les moteurs, donnent dans tous les cas une solution satisfaisante. Le diamètre de chaque conduite peut être inférieur au diamètre d'une conduite unique, et, suivant les besoins, on met en service les deux conduites ou une seule.

Un des points les plus importants est que nulle part il ne puisse se former d'accumulation d'eau; la conduite présentera une pente légère dans le sens du mouvement de la vapeur (soit 5 millimètres par mètre), et toutes les parties montantes seront munies d'un séparateur d'eau. Une objection au montage en boucle est que la condition de pente ne peut pas être toujours satisfaite, puisque le mouvement de la vapeur a lieu tantôt dans un sens et tantôt dans un autre.

La présence de l'eau risque en effet de donner lieu à des accidents extrêmement graves. Lorsque la vapeur pénètre dans une conduite contenant de l'eau, il se produit des chocs violents, souvent assez intenses pour causer des ruptures. Cet effet a été bien mis en évidence et par les accidents même qu'il a causés, et par de nombreuses expériences (1).

Avec les fortes surchauffes aujourd'hui en usage, l'allongement par dilatation des conduites en acier peut atteindre 3 millimètres par mètre. Il est nécessaire de prévoir la liberté des mouvements qui en résultent.

Sur une conduite droite, on ménage un emmanchement télescopique, avec garniture étanche. Il faut que des dispositions efficaces s'opposent au déboîtement que tend à produire la pression intérieure; il convient, d'autre part, que l'emmanchement soit libre de glisser dans les deux sens, ce qui exige des amarages fixes aux extrémités des deux tronçons séparés par le joint glissant.

Les coudes en quart de cercle, les lyres, les spires d'hélice mettent en jeu l'élasticité du métal. Lorsque ces parties courbes ne restent pas dans un plan à peu près horizontal, les séparateurs d'eau deviennent nécessaires (2).

On emploie, depuis quelque temps, pour les canalisations de vapeur, des *tubes ondulés*, qui, se prêtant aux dilatations et

(1) Voir une étude de WALCKENAER sur les *chocs causés par l'eau dans les conduites de vapeur et sur les ruptures de valves en fonte*, dans les *Annales des mines*, 9^e série, t. XV, p. 127.

(2) On trouvera de nombreux détails sur les tuyauteries et leurs accessoires dans l'ouvrage de MM. GUILLAUME et TURIN, *la Chaufferie moderne : alimentation des chaudières et tuyauteries de vapeur*.

contractions, remplacent les joints de dilatation. Ces tubes résistent aussi aux effets des vibrations (1). Ils présentent une série d'ondulations circulaires rapprochées, le profil étant analogue à celui des foyers ondulés pour chaudières. Comparés aux tubes lisses, ils ont une élasticité plus grande dans le sens longitudinal, une résistance plus forte à la pression; ils peuvent se courber suivant les profils les plus compliqués, et permettent l'exécution de coudes et lyres de compensation très efficaces.

Certains détails simples des chaudières paraissent d'importance secondaire, tandis que la pratique montre qu'insuffisamment étudiés, ils causent de sérieux accidents. C'est ainsi que les robinets de vidange et leurs canalisations doivent être l'objet de précautions spéciales. Les dangers de ces appareils consistent en ruptures de pièces insuffisamment solides et en fausses manœuvres permettant l'envoi, dans une chaudière en chômage, d'eau chaude provenant d'une chaudière en pression (2).

Certains constructeurs préconisent, pour la vidange, comme particulièrement efficaces, des soupapes donnant rapidement une grande section d'ouverture, au lieu de robinets à clé.

52. Séparateurs d'eau et d'huile. — On sépare de la vapeur l'eau, qu'elle peut entraîner, soit par la simple action de la pesanteur, soit par de brusques changements de direction, soit par la force centrifuge. Un grand nombre d'appareils divers sont employés à cet effet (3). Ils fonctionnent en même temps comme séparateurs d'huile.

Le séparateur Musnicki (fig. 207) se compose de deux tuyaux emboîtés l'un dans l'autre, le tuyau intérieur étant fendu en lames de persiennes. Le courant descendant change de direction dans le séparateur Detroit (fig. 208). Dans le séparateur Mac-

(1) Voir, au sujet de ces tubes, une note de M. Joessel dans le *Génie civil* du 5 août 1922.

(2) M. BONET a donné sur ce sujet une note détaillée dans le *Compte rendu des séances du XXXIX^e Congrès des ingénieurs en chef des Associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, tenu à Mulhouse en 1919, p. 13.

(3) *Revue de mécanique*, sept. 1904, p. 249.

Donald (fig. 209) une surface de vis, à l'intérieur d'un tuyau perforé, imprime un mouvement de rotation au courant de vapeur, et l'eau s'échappe par les perforations.

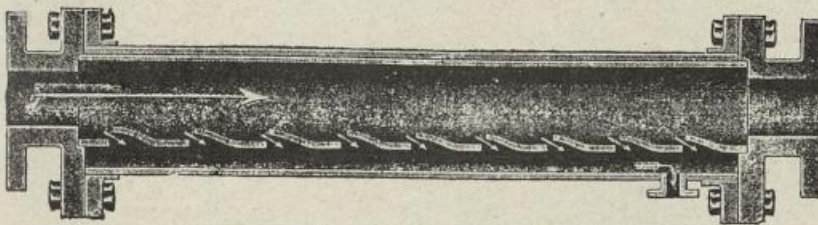


FIG. 207. — Séparateur Musnicki.

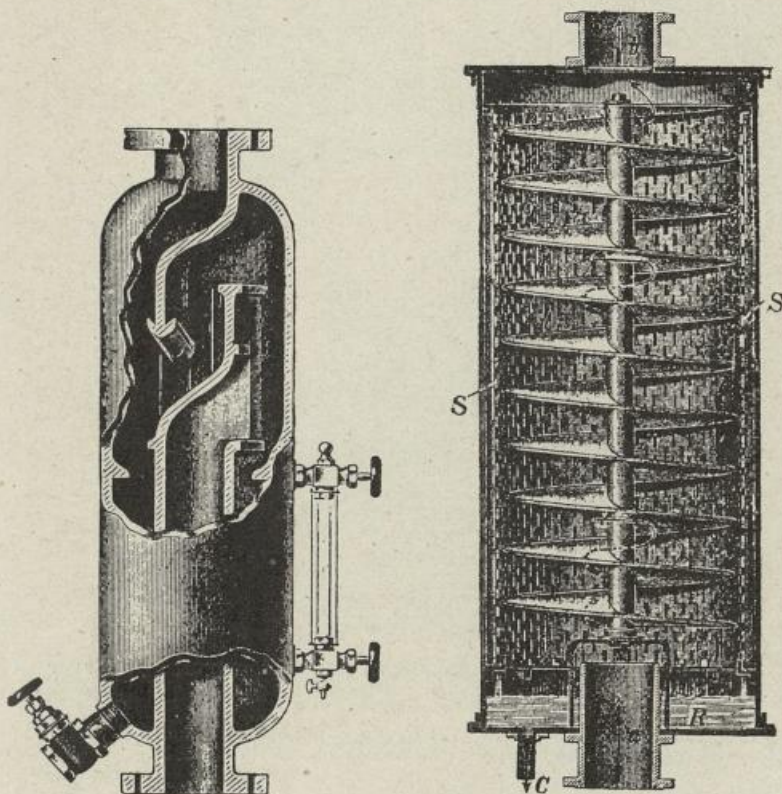


FIG. 208. — Séparateur Déroit. FIG. 209. — Séparateur Mac-Donald.

Le séparateur d'huile Genève est composé d'une série de lames voisines, qui divisent la vapeur en veines minces sans opposer grande résistance au mouvement. L'huile se dépose sur ces lames.

L'eau rassemblée dans les séparateurs est évacuée soit par l'ouverture à la main de robinets de vidange, soit par des purgeurs automatiques. Il est intéressant de ramener aux chaudières l'eau chaude des purges, quand elle n'est pas mélangée d'huile.

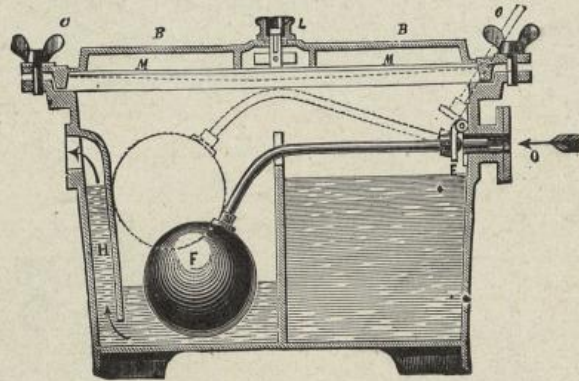


FIG. 210. — Purgeur à syphon, système Royle, construit par Fryer et C^{ie}, communiqué par M. Varinois. Coupe longitudinale et détail du clapet.

E, clapet commandé par le flotteur F; L, soupape d'échappement d'air, fermée par son poids lorsque la dilatation courbe la barre M.

Le purgeur à syphon (fig. 210), système Royle, porte dans son couvercle une petite soupape d'échappement d'air, qu'une barre rectiligne M maintient soulevée tant que l'appareil est froid. Lorsque la vapeur y pénètre, la barre se cintre en se dilatant, et la soupape se ferme par son poids.

53. Enveloppes isolantes. — Un isolement aussi complet que possible de toutes les tuyauteries de vapeur donne une économie appréciable. Malheureusement c'est un de ces détails qui peuvent être négligés sans que l'installation en fonctionne moins bien, et sans qu'on s'en aperçoive, à moins de suivre de très près la consommation des chaufferies.

On peut estimer à 12 calories en moyenne la quantité de chaleur perdue en une heure par un mètre carré d'une surface métallique chauffée par la vapeur, pour chaque degré de différence de température entre la vapeur et l'air. Avec un écart de 300°, la perte horaire sera donc de 3.600 calories, soit en un an, avec un chauffage permanent, 30 millions de calories. Cette perte de chaleur correspond à la condensation d'environ 45.000 kilogrammes de vapeur ou à la combustion de plus de 5 tonnes de houille. Un bon isolant réduira beaucoup cette perte importante.

MM. Boyer-Guillon, Auclair et Lædlein ont exécuté au laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers une série d'expériences sur les isolants (1), d'où sont extraits les nombres qui suivent. Les pertes de chaleur ne sont pas proportionnelles à l'écart des températures entre la vapeur et l'air, mais croissent plus vite que cet écart : c'est ainsi qu'avec un tuyau nu, les nombres des calories perdues, par mètre carré et par heure, sont de :

350	pour un écart de	50°;
870	—	100°;
1.650	—	150°;
2.600	—	200°;
3.700	—	250°.

Avec les divers isolants, les variations sont du même ordre.

Pour un écart de 200°, les pertes par mètre carré et par heure ont été les suivantes :

Tube nu, avec enduit noir, 2.600 calories;

Deux couches d'air de 15 millimètres, emprisonnées par des feuilles de fer-blanc, et par-dessus un boudin de bourre de soie en hélice, 430 calories;

(1) Voir *Bulletin* n° 7 de ce laboratoire.

Boudin de coton minéral dans une toile d'amiante, enroulé en hélice et recouvert d'une toile goudronnée noire, 560 calories;

Une couche en terre d'infusoires (ou Kieselguhr) dans une enveloppe en tôle, 600 calories;

Douelles en liège, avec peinture blanche extérieure, 720 calories;

Matelas d'amiante, 860 calories;

Simple enveloppe d'air, dans un tube en tôle, 1.600 calories;

Enduit de terre d'infusoires et d'amiante, 760 calories.

On sait que l'air est un bon isolant, mais à condition d'être emprisonné dans de petites cavités. Lorsqu'il peut circuler à l'intérieur de l'enveloppe, il transporte par convection de la chaleur sur les parois extérieures.

Outre la propriété essentielle de réduire la déperdition de chaleur, les principales qualités qu'on demande à un isolant, et qui sont plus ou moins importantes suivant les cas, sont l'incombustibilité, la facilité d'application et de démontage, le poids, la durée.

54. Détendeurs. — On profite souvent de la grande résistance qu'il est facile de donner aux chaudières à tubes d'eau pour leur faire produire la vapeur sous une pression supérieure à celle demandée pour les machines, pression qui pourra rester constante malgré les variations dans la chaudière. La quantité de chaleur nécessaire pour augmenter ainsi la pression au-dessus de 12 à 15 kilogrammes par centimètre carré est minime; elle se retrouve d'ailleurs dans la vapeur détendue à la pression d'emploi, qui est asséchée ou surchauffée.

Un *détendeur* est alors nécessaire pour ramener la vapeur à la pression constante voulue. Ces appareils servent aussi pour alimenter des récipients à pression réduite.

Dans un détendeur, la vapeur est laminée par une soupape ou un organe équivalent, qui prend une position d'équilibre entre la pression de la vapeur détendue et un ressort antagoniste : l'ouverture diminue ou augmente suivant que la pression à régler croît ou décroît. Cette soupape n'est pas sensible à la pression, variable, de la vapeur non détendue.

L'organe d'obturation du détendeur Belleville (fig. 211) est une lanterne cylindrique fixée à une tige de piston de gros diamètre, qui sort à travers une garniture. Cet obturateur tend à être soulevé par la pression de la vapeur détendue, s'exerçant

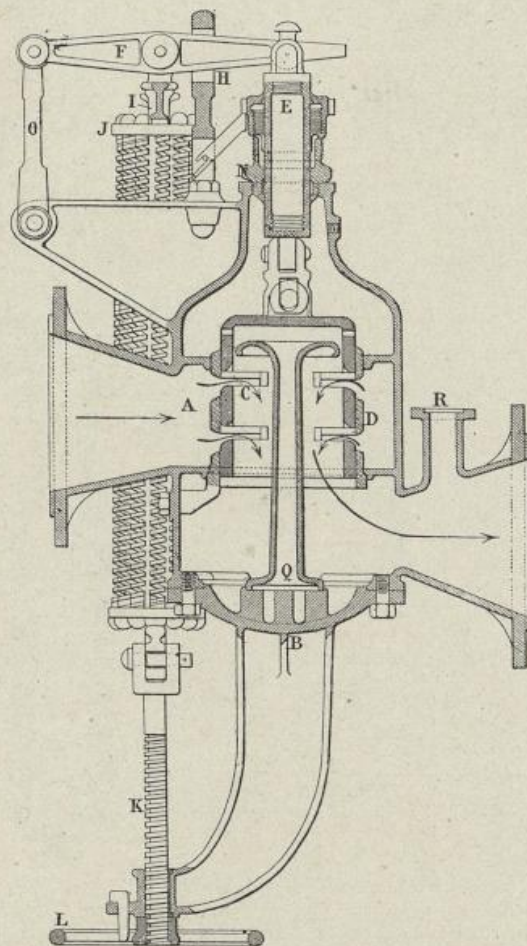


FIG. 211. — Détendeur Belleville.

K, vis de tension des ressorts; Q, brise courant; R, attente de soupape de sûreté.

sur la surface de cette tige. Des ressorts extérieurs agissent en sens inverse.

Le détendeur Royle (fig. 212) porte sur une tige B une soupape A et une cuvette C, qui sont en équilibre sous la pression initiale de la vapeur, arrivant en 1. La garniture étanche de la

tige est formée par un tube de caoutchouc D, entouré d'anneaux, et pouvant s'allonger. Ce tuyau, rempli d'eau de condensation, n'est pas chauffé par la vapeur. Deux ressorts extérieurs, en

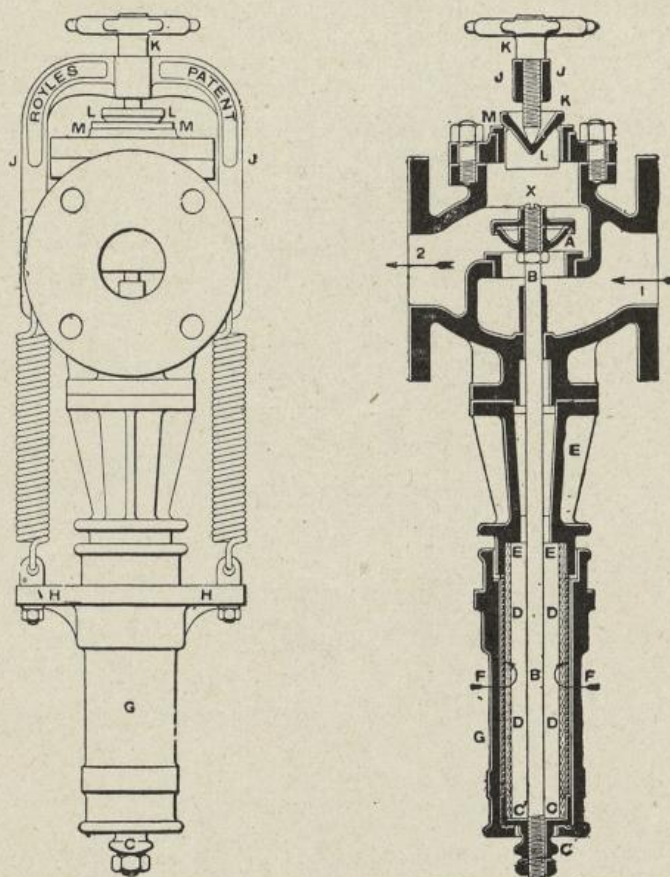


FIG. 212. — Détendeur, système Royle, construit par Fryer et C^{ie},
communiqué par M. Varinois, avec soupape de sûreté.

La soupape A et la cuvette C sont en équilibre sous l'action de la pression initiale de la vapeur en 1, le tube en caoutchouc D formant garniture. La tension des ressorts latéraux s'exerçant en II, équilibre la pression de la vapeur détendue en 2.

hélice, tendent à ouvrir la soupape, mais la pression de la vapeur détendue, en 2, agit en sens inverse.

Les deux ressorts prennent leur appui sur une soupape de sûreté L, un peu plus petite que la soupape A, de sorte qu'elle se soulève si la pression de la vapeur détendue dépasse de 20 p. 100 la pression prévue.

Comme le fonctionnement précis d'un détendeur n'est pas absolument certain, la soupape de sûreté est le plus souvent nécessaire.

55. **Compteurs de vapeur.** — La chute de pression, qui se produit lorsque la vapeur traverse un orifice de section réduite

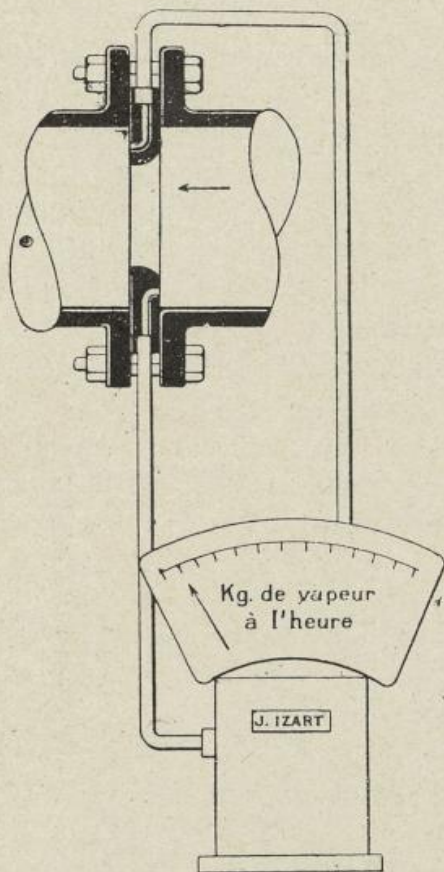


FIG 213. — Indicateur de débit de vapeur Izart, à manomètre différentiel gradué d'après la différence des pressions en amont et en aval de l'orifice.

placé dans le tuyau qui la conduit, permet d'en calculer le débit. Les lois d'écoulement de la vapeur par des orifices sont assez bien établies (1) pour que ce calcul donne des résultats suffisants

(1) Voir notamment les études de M. RATEAU et de M. PARENTY dans les *Annales des mines*, 10^e série, t. I, p. 5, et t. II, p. 403.

pour la pratique courante. Les compteurs de vapeur, placés sur les conduites de départ de vapeur, et munis d'enregistreurs, sont d'une installation facile et donnent des indications fort utiles.

Si l'état de la vapeur à jauger était toujours le même, le débit en poids se déduirait immédiatement de la chute de pression. Mais pour connaître constamment ce débit, il faut tenir compte de l'état initial de la vapeur, ce qui complique l'appareil. C'est ainsi que le compteur Parenty est sensible à l'action d'un manomètre donnant la pression d'amont, et d'un manomètre différentiel indiquant la chute de pression.

Lorsque la pression de la vapeur, ainsi que sa température, quand elle est surchauffée, restent à peu près constantes, le manomètre différentiel peut suffire à lui seul, et l'appareil est alors extrêmement simple (fig. 213); la chute de pression qu'il provoque est d'ailleurs minime.

CHAPITRE IX

ESSAIS ET ENTRETIEN

56. **Essais.** — L'essai des chaudières est utile non seulement lors de la réception, mais périodiquement pendant le service. Tantôt l'essai sera fait avec la plus grande précision possible, tantôt on se contentera de mesures sommaires ne troublant en rien la marche normale. Le contrôle qu'on doit constamment exercer constitue d'ailleurs un essai permanent.

Des mesures efficaces permettraient d'établir, pour chaque générateur, la courbe continue du rendement, c'est-à-dire des calories utilisées. Mais de telles mesures sont difficiles, notamment dans une grande chaufferie, où l'on se contente le plus souvent du rendement de l'ensemble des chaudières.

Pour l'essai, quelques précautions simples sont nécessaires. Le niveau dans la chaudière doit être le même au début et à la fin de l'expérience, la quantité d'eau vaporisée étant déterminée par le jaugeage de l'eau d'alimentation. Cette égalité du niveau s'obtient facilement; il convient même qu'il varie peu pendant toute la durée de l'essai.

Pour la même raison, la grille doit porter le même poids de combustible, et au même état d'ignition, au début et à la fin. La mesure de ces égalités n'est guère possible et on est obligé de se contenter d'une estimation de la quantité et de l'état de la couche de houille. On a soin de commencer et de terminer l'essai immédiatement avant ou après une charge fraîche de combustible, et de le faire durer une dizaine d'heures.

L'état de la vapeur à la sortie de la chaudière doit être exactement déterminé. Quand elle est surchauffée, la température en est mesurée. Cette mesure, très simple en apparence, présente cependant quelque aléa, car les diverses portions du courant de

vapeur ne sont pas exactement à la même température. Quand la vapeur est saturée, on doit s'assurer qu'elle est sèche, sinon on mesurera la proportion d'eau qu'elle entraîne, avec le calorimètre Barrus ou le calorimètre Rateau, ou par quelque autre méthode. Dans ce cas encore, la mesure est incertaine, parce que l'eau peut ne pas être uniformément répartie dans toute la masse de vapeur.

Le calorimètre Barrus donne la température de la vapeur, surchauffée après son écoulement dans l'atmosphère. En désignant, avec les notations usuelles, par q et r , q' et r' la chaleur du liquide et la chaleur de vaporisation sous la pression dans la chaudière et sous celle de l'atmosphère, par x son titre (fraction du kilogramme à l'état de vapeur), par t' la température de la vapeur saturée sous la pression atmosphérique, et par t'' la température observée, on applique la relation :

$$q + rx = q' + r' + 0,5 (t'' - t'),$$

qui donne x , à condition qu'il soit suffisamment voisin de l'unité.

Le calorimètre Rateau donne le titre quel qu'il soit. Une dérivation de la vapeur s'y partage en deux parties égales, dont une est surchauffée à une température assez élevée pour que, mélangée à l'autre moitié, le mélange soit encore surchauffé. Soient t , t' et t'' les températures de saturation et des deux surchauffes. Le titre x est donné par la relation :

$$\frac{q + rx}{2} + \frac{q + r + 0,5 (t' - t)}{2} = q + r + 0,5 (t'' - t),$$

d'où on déduit :

$$x = 1 - \frac{0,5 (t + t') - t''}{r}.$$

Il ne suffit pas de mesurer le rendement d'une chaudière; il convient d'analyser les différentes causes de pertes. Ces pertes tiennent d'une part aux défauts de l'appareil de combustion, qui ne libère pas toutes les calories du combustible, et, d'autre part, à l'utilisation incomplète de la chaleur dégagée.

A l'appareil de combustion sont imputables les pertes de combustible non brûlé, à l'état solide et à l'état gazeux. On doit donc mesurer les imbrûlés dans les cendres, les entraînements de combustible et les gaz combustibles rejetés dans la cheminée.

Pour calculer la quantité de chaleur entraînée par les gaz dans la cheminée, il faut en mesurer le débit et la température. Le débit en volume se déduit de la mesure de la vitesse. On peut aussi estimer le débit d'après la composition des gaz; cette composition fait en effet connaître l'excès d'air employé par rapport à la quantité strictement nécessaire; or cette dernière quantité est déterminée par la nature du charbon et le poids brûlé.

Si le débit de l'air est de 14 kilogrammes pour brûler un kilogramme de houille, on aura près de 15 kilogrammes de gaz chauds. Si la température de ces gaz est de 300° , avec une température initiale de 15° , ces 15 kilogrammes emportent :

$$15 \times 0,24 \times 285 = 1.040 \text{ calories,}$$

en prenant 0,24 pour valeur de la chaleur spécifique à pression constante de l'air, de l'azote et du gaz carbonique (1).

Avec un pouvoir calorifique de 7.500 par kilogramme de houille, c'est une perte de près de 14 p. 100. Chaque kilogramme d'air en excès, rejeté à cette température de 300° , emportera 69 calories, près de 1 p. 100 du pouvoir calorifique.

L'essai fait connaître d'une part le poids de combustible brûlé, d'autre part le poids de l'eau vaporisée; on substitue à ces deux quantités les nombres de calories correspondant au pouvoir calorifique du combustible et à la formation de la vapeur; le rapport du second de ces nombres au premier donne le rendement de la chaudière, c'est-à-dire la proportion de la chaleur utilisée à celle que fournirait une combustion parfaite. Ce rendement, dans les très bonnes installations, est compris entre 0,7 et 0,8; il est dans bien des cas moindre que 0,6.

(1) Valeurs données par REGNAULT :

Air	0,2374
Gaz carbonique.....	0,2169

Ces chaleurs spécifiques augmentent avec la température.

L'utilisation réelle du combustible est inférieure à celle constatée par l'essai, qui prend la chaudière en pression et marchant sous régime uniforme.

En service, au combustible nécessaire pour la marche normale, il faut ajouter celui qu'on brûle pour l'allumage et la mise en pression, pendant les arrêts et après la fin du service.

Pour rapporter à une mesure commune les essais, malgré les différences des températures de l'eau d'alimentation et de la vapeur produite, on calcule parfois ce que serait la production (due au même nombre de calories) si l'eau était prise à 100° et vaporisée à 100°, ou à toutes autres températures déterminées.

La moyenne des essais de 50 chaudières de types divers, rapportés dans le deuxième rapport de la commission d'utilisation du combustible (1) a donné un rendement de 65,7 p. 100, calculé sur le pouvoir calorifique inférieur du combustible.

Le bilan thermique moyen de ces 50 essais s'établit comme il suit :

Calories utilisées	65,7
Perte par la chaleur des fumées.....	18,2
Rayonnement pendant la marche....	3,3
Rayonnement pendant les arrêts.....	3,3
Imbrûlés	3,5
Combustion incomplète	6
Total	100

Sur ces 50 chaudières, 10 ont un rendement inférieur à 60 p. 100, 23 compris entre 60 et 70 p. 100 et 17 supérieur à 70 p. 100. Les plus mauvaises de ces chaudières sont dépourvues de réchauffeurs.

57. Nettoyages. — La suie et les dépôts de cendres sur les tôles ralentissent la transmission de la chaleur. Des nettoyages quotidiens sont nécessaires pour en tenir constamment propres les surfaces, soit par balayage, soit par l'action d'un jet de va-

(1) *Annales des mines*, 11^e série, t. XII, p. 136.

peur. Des ouvertures dans les parois des massifs sont prévues pour ces opérations.

A l'intérieur de la chaudière, les dépôts doivent être enlevés après une certaine durée de service, déterminée pour qu'ils n'atteignent pas une trop forte épaisseur. Ces dépôts sont d'ailleurs partiellement expulsés par les extractions périodiques, nécessaires en outre pour empêcher la concentration de certains sels très solubles. L'extraction continue était en usage pour les anciennes chaudières marines alimentées à l'eau de mer.

L'enlèvement des tartres adhérents exige le piquage de la chaudière, travail souvent gêné par la difficulté d'accès à certaines parties, et qui détériore les tôles s'il n'est pas soigneusement fait.

Pour pénétrer dans les chaudières, on s'éclaire fréquemment avec une lampe électrique avec fils mobiles, dite baladeuse. Or, ces lampes, alimentées par le courant habituel à 110 volts, ont plusieurs fois donné lieu à des accidents mortels : le montage en est sommaire, et il n'est pas rare qu'en les maniant, on touche les conducteurs. Or, si le courant à 110 volts est inoffensif, lorsqu'on est partiellement isolé, il n'en est plus de même quand le corps est en contact avec des surfaces métalliques et de l'eau. Aussi est-il prudent d'interdire dans les chaudières l'emploi des lampes baladeuses.

Pour les tubes d'eau, lorsque le lavage, aidé au besoin par l'action d'un écouvillon métallique, ne suffit pas, on fait usage de grattoirs mécaniques tournants. Le grattoir Babcock et Wilcox se compose d'un arbre muni de quatre bras articulés, longs de 10 à 12 centimètres, et portant à leur extrémité libre de petites rondelles dentées. L'arbre est fixé dans une douille creuse qui reçoit un courant d'eau. Ce courant d'eau agit sur les ailettes d'une petite turbine calée sur l'arbre, et lui donne une vitesse d'environ 2.000 tours par minute (la pression de refoulement de l'eau étant de 6 à 8 kilogrammes par centimètre carré). Sous l'action de la force centrifuge, les bras s'écartent et les rondelles détachent les dépôts, que le courant d'eau entraîne. L'eau motrice peut être remplacée par l'air comprimé.

Quand on ne pénètre pas facilement dans la chaudière, on se

contente de l'action d'un jet d'eau et de raclettes, autant que le permettent les ouvertures prévues. Lorsqu'on est pressé de remettre la chaudière en service, il est à craindre qu'on ne la vide quand l'eau y est encore très chaude ; le lavage à l'eau froide est alors une cause d'avaries pour les tôles. On atténue l'inconvénient de cette hâte en employant de l'eau chaude au lavage, procédé fort usité pour les locomotives.

La vidange à froid d'une chaudière permet l'enlèvement facile des dépôts. Ce procédé a été décrit par feu M. Schmidt, ingénieur en chef de l'Association de propriétaires d'appareils à vapeur de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise (1). Tant qu'ils sont recouverts par l'eau de la chaudière, l'adhérence des dépôts sur les tôles est faible ; mais lorsqu'ils sont mis à sec par la vidange, ils durcissent en moins d'une demi-heure. En laissant refroidir complètement l'eau d'une chaudière, et en procédant au nettoyage dès que les dépôts sont mis à nu par la vidange, on les enlève facilement avec le jet d'eau d'une lance, aidé de raclettes. Pour éviter le durcissement des dépôts, on procède par vidanges partielles.

Outre les dépôts récents, cette opération détache même d'anciennes plaquettes de tartre.

Le refroidissement de la chaudière peut demander huit jours et même davantage surtout si elle est contiguë à d'autres chaudières en feu. On l'accélère en renouvelant l'eau après un premier refroidissement.

Le procédé n'est pas applicable aux chaudières enterrées, qui ne peuvent être vidées que lorsqu'il y règne encore une pression effective, disposition qu'il vaut mieux éviter pour d'autres raisons.

(1) *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, année 1898, p. 94.

CHAPITRE X
ACCIDENTS ET SURVEILLANCE



58. **Causes des accidents.** — Les chaudières donnent lieu à des accidents plus ou moins graves, depuis l'explosion foudroyante jusqu'aux petites déchirures, toujours dangereuses par la gravité des brûlures dues à l'eau bouillante et à la vapeur.

Un fait remarquable est l'explosion simultanée de plusieurs générateurs contigus. C'est ainsi que 27 ont été détruits dans une batterie de 36, à Shamokin (Pensylvanie), le 11 octobre 1894; 22 à Friedenshütte (Silésie), le 25 juillet 1887; 15 à Warrenby (Angleterre), le 14 juin 1875 (1).

Au moment de l'explosion d'une chaudière, l'eau qu'elle renferme sous une pression élevée, et à la température correspondante, se trouve subitement ramenée à la pression atmosphérique; il en résulte la formation très rapide d'une grande quantité de vapeur, qui explique la violence des effets mécaniques. Cette production de vapeur, lors de l'explosion, se calcule aisément : soient 1.000 kilogrammes d'eau à la température de 180°, ayant reçu, depuis la température de 0°, 182.000 calories. Ramenés subitement à la température de 100°, ces 1.000 kilogrammes se transforment en x kilogrammes de vapeur, contenant $637x$ calories, et $(1.000 - x)$ kilogrammes d'eau, en contenant 100 $(1.000 - x)$, de telle sorte que :

$$637 x + 100 (1.000 - x) = 182.000$$

ce qui donne pour x la valeur 152 kilogrammes, occupant 250 mètres cubes.

Certaines précautions atténuent le danger des petites déchi-

(1) *Annales des mines*, 8^e série, t. XV, p. 5.

rures, qui se produisent surtout sur les chaudières à tubes d'eau; portes de foyers et de cendriers à fermeture automatique vers l'extérieur, combinées avec une large *trappe d'expansion* à la partie supérieure du massif, trappe pouvant se soulever et donner issue au flux de vapeur; chaufferies avec sorties faciles aux deux extrémités.

Les causes de la plupart des accidents de chaudières sont simples; on a renoncé à les attribuer à des actions mystérieuses, telles qu'état sphéroïdal de l'eau, électricité, arrivée de l'eau sur des tôles chauffées au rouge, théories fort dangereuses, car elles dissimulaient les causes réelles.

Les accidents se rattachent à trois genres de causes, défauts originels, usure, manœuvres imprudentes.

Les défauts originels consistent en vices d'étude, emploi de mauvais matériaux, exécution défectueuse.

Certaines formes se prêtent à des calculs simples de résistance, notamment les cylindres de révolution, les faces planes entretoisées. Mais il n'en est pas de même pour les dispositions compliquées, avec lesquelles il est difficile de prévoir exactement les efforts en chaque point, d'autant plus qu'aux effets de la pression s'ajoutent ceux des dilatations inégales des diverses parties. Il y a beaucoup d'empirisme dans l'étude des chaudières; aussi faut-il se méfier des formes tourmentées, si elles ne sont pas éprouvées par une longue pratique.

On peut rappeler ici quelques défauts; assez fréquents dans les appareils anciens, têtes de bouilleurs en fonte, tampons non autoclaves maintenus par un boulon, tubes d'eau fixés par simple mandrinage sans bourrelet ou évasement extérieur.

En ce qui concerne les défauts des matériaux employés, c'est surtout la fragilité des tôles qui est à craindre, car la résistance statique en est rarement insuffisante. La fragilité produit, pendant la construction, de petites fissures peu visibles, ou des amorces de fissures, qui s'agrandiront plus tard. Elle est d'ailleurs doublement dangereuse, car, d'une part, elle provoque la rupture, et, d'autre part, dès qu'une cassure se produit, au lieu de rester limitée, comme dans un métal ductile, elle s'étend et se ramifie instantanément.

A l'emploi de mauvaises matières premières s'ajoute l'exécution défectueuse, tôles mal assemblées. trous de rivets ne se correspondant pas et ramenés en regard par le *brochage*, particulièrement dangereux dans les tôles fragiles, cassures d'un trou au voisin ou au bord de la tôle.

Les tôles fines de fer, autrefois employées, présentaient parfois des *pailles* ou dédoubleures invisibles, par manque de soudure de mises superposées. Fortement chauffées, ces pailles donnaient lieu au soulèvement de bosses. L'emploi général du métal fondu a rendu ce défaut très rare.

L'usure, parfois rapide, des appareils est la seconde cause de danger : cette usure se manifeste surtout par la corrosion des tôles, à l'intérieur et à l'extérieur, et par la fissuration.

Les causes des corrosions intérieures ont été mentionnées au § 43 : on a vu qu'indépendamment de l'emploi exceptionnel d'eaux acides, ou chargées de chlorure de magnésium, elles étaient dues généralement à l'action des gaz en dissolution dans l'eau, principalement à celle de l'oxygène. Avec des eaux très pures, produisant peu d'incrustations, cette corrosion est parfois fort rapide et met une chaudière hors de service au bout de quelques années. On a indiqué au § 43 le moyen de les éviter, en dépouillant l'eau des gaz dissous.

La corrosion, qui se développe pendant le service de la chaudière, attaque les parties en contact avec l'eau, les parois de la chambre de vapeur restant indemnes. Cette corrosion se produit aussi pendant le chômage, par l'action de l'air humide. Aussi une chaudière en chômage doit-elle être soigneusement asséchée, à moins qu'on ne la remplisse complètement d'eau : mais il faut avoir soin de la vider avant qu'elle ne soit exposée à la gelée. Encore cette eau devrait-elle être privée d'air (1).

La corrosion débute souvent par des piqûres isolées, ou *pustules*. Des trous se creusent dans la tôle et se remplissent d'oxyde de fer, dont le foisonnement forme la pustule en saillie. Isolés,

(1) M. KAMMERER a donné, dans le *Bulletin des Associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur*, n° 3 (janvier 1921), p. 133, une note détaillée sur la conservation des chaudières en chômage; il n'y recommande pas le remplissage.

ces trous n'ont pas grand inconvénient et sont facilement bouchés s'ils viennent à percer la tôle. Voisins les uns des autres, ils finissent par se réunir et par attaquer une surface étendue.

Ces corrosions se produisent de même sur les tubes à fumée. Elles sont abondantes au voisinage de l'entrée d'eau d'alimentation, lorsque cette entrée ne se fait pas dans la vapeur.

On arrête le développement des pustules en les grattant et les goudronnant.

Les corrosions en sillons allongés sont beaucoup plus à craindre. Ces sillons se développent en général dans les parties des tôles soumises à des efforts répétés de flexion, le long des *pincés*, à l'endroit où une tôle cesse de porter contre la tôle contiguë, et dans les arrondis raccordant les tôles planes et les parties cylindriques. Toutefois, on constate aussi des sillons horizontaux à l'affleurement du niveau moyen de l'eau.

Plus dangereuses encore que les sillons nettement ouverts sont les fentes minces, à cause de la difficulté de les apercevoir. Ces fentes sont dues souvent à des cassures initiales, survenues pendant la construction, qui s'agrandissent sous des efforts répétés de flexion.

Les corrosions extérieures sont produites par les fuites d'eau le long des pincés, autour des rivets, des joints mal faits, fuites qui ne devraient jamais exister en permanence. La corrosion s'étend sur toute la surface de contact d'une maçonnerie, formant, quand il y a fuite, comme un emplâtre constamment humide.

A haute température, le gaz sulfureux, que dégage la combustion des houilles pyriteuses, est sans action sur les tôles. Mais il n'en est plus de même quand ils sont refroidis vers 150° , et chargés de vapeur d'eau : le gaz sulfureux se transforme alors en acide sulfurique. Cette transformation est une cause d'attaque pour les réchauffeurs.

La négligence dans l'emploi des appareils, le défaut d'entretien accélèrent l'usure. Les refroidissements brusques, dus à d'abondantes entrées d'air froid par la porte du foyer, à la vidange à chaud suivie d'un lavage à l'eau froide, altèrent les tôles et provoquent des cassures. L'accumulation de tartre à l'intérieur expose les tôles à une température trop élevée.

Un accident auquel sont exposées les chaudières à tubes d'eau est la surchauffe des tubes inférieurs, surchauffe amenant parfois des ruptures. Elle est due à un défaut de circulation qui peut résulter d'une vaporisation trop active poussée au delà de la limite convenable pour le type d'appareil, ou d'obstructions produites par des entartréments.

Les imprudences pouvant amener un accident sont l'excès de pression et le manque d'eau. La surcharge ou le calage des soupapes de sûreté, exposant à l'excès de pression, est volontaire, ou accidentel quand, par manque d'entretien, les soupapes se collent sur leur siège ou se coincent.

L'abaissement excessif du niveau de l'eau est dangereux, surtout dans les chaudières à foyer intérieur, dont les tôles découvertes prennent en peu de minutes une température à laquelle leur ténacité disparaît. On a vu, dans ce cas, des tôles très ductiles embouties par la pression dans l'intérieur du foyer jusqu'à toucher la grille.

On trouve dans quelques ouvrages anciens une théorie bizarre pour expliquer les accidents dus au manque d'eau, dont la cause réelle est cependant si visible : l'explosion serait due à une grande production de vapeur lorsqu'on rétablit l'alimentation, par suite de l'arrivée de l'eau sur des tôles portées au rouge : on constate souvent encore aujourd'hui la survivance de cette légende. Cependant un calcul élémentaire montre que la quantité de chaleur que peuvent céder à l'eau les tôles chaudes est trop faible pour augmenter notablement la production de vapeur. L'expérience a du reste été faite par l'Association de propriétaires d'appareils à vapeur de Manchester; elle a confirmé l'opinion que l'alimentation sur des tôles chauffées au rouge n'élève pas mais abaisse la pression (1).

Les expériences ont porté sur une chaudière du type Lancashire, à deux foyers intérieurs cylindriques; la longueur était de 8 m. 500, le diamètre de 2 m. 140, le diamètre des foyers de 0 m. 915. Les tuyaux d'alimentation versaient l'eau, divisée en

(1) Les *Annales des mines* (9^e série, t. VI, p. 664) ont donné le compte rendu de ces expériences.

plusieurs filets, droit sur le ciel des foyers, au-dessus des grilles. Les expériences consistaient à abaisser le plan d'eau au-dessous du ciel des foyers, à les laisser s'échauffer jusqu'au rouge, puis à alimenter abondamment. En opérant avec des soupapes calées, cette alimentation produisait au premier instant une certaine élévation de pression, ne dépassant pas trois kilogrammes par centimètre carré, puis la pression retombait rapidement. En opérant pendant que les soupapes soufflaient, on n'a constaté aucune élévation de la pression, qui, au contraire, s'abaissait bientôt. Les tôles des ciels s'altéraient profondément pendant ces essais; elles ont dû être plusieurs fois changées, mais aucune cassure circulaire ou longitudinale n'est résultée de l'application subite de l'eau froide.

Les effets minimes constatés dans ces expériences seraient encore moindres en pratique, vu la position usuelle des tuyaux d'alimentation.

Il semble donc que, lorsqu'on constate un manque d'eau, le mieux est de rétablir le niveau normal le plus tôt possible, à moins que les tôles n'aient déjà beaucoup souffert et ne soient dans un état précaire; il convient alors, et aussi en cas de doute sur cet état, de couvrir ou de jeter le feu.

Il est clair qu'un accident peut être dû à l'action simultanée de causes différentes : l'usure devient rapidement dangereuse si la chaudière est trop faible au début; un excès de pression sera redoutable dans une chaudière fatiguée.

59. Surveillance. — C'est par une surveillance assidue et par des visites minutieuses des chaudières, à l'intérieur et à l'extérieur, qu'on reconnaît l'existence des défauts et qu'on détermine le moment où des réparations ou des remplacements deviennent nécessaires. Dans certains pays, en France notamment, les chaudières sont soumises à une surveillance administrative, mais qui ne peut guère que constater l'observation des prescriptions réglementaires. La surveillance efficace est l'œuvre des agents des associations de propriétaires d'appareils à vapeur, qui, visitant un grand nombre de chaudières, acquièrent une expérience spéciale. Les appareils de même type pré-

sentent en effet les mêmes corrosions, de sorte que devant une chaudière d'un type connu, on peut indiquer presque à coup sûr l'endroit où l'on trouvera une corrosion parfois à peine visible et presque impossible à découvrir sans cette connaissance préalable.

Dans le même ordre d'idées, un accident survenu à une chaudière d'un type et d'une provenance déterminés doit appeler l'attention sur les appareils similaires; si une seconde explosion, due à la même cause, se produit, on peut assurer, presque à coup sûr, que tous les appareils du lot doivent être réparés ou remplacés. Cette précaution a plusieurs fois évité des accidents graves en faisant mettre hors de service des appareils qui étaient à la limite de leur résistance sans qu'on s'en doutât.

60. Épreuves. — L'épreuve sous la pression hydraulique vérifie l'étanchéité et, dans une certaine mesure, la résistance des chaudières; elle est obligatoire dans divers pays, notamment en France. Le point le plus délicat est la fixation de la surcharge d'épreuve : la tendance est à l'emploi de surcharges très modérées, avec lesquelles l'épreuve, ayant lieu à froid, ne peut guère fatiguer la chaudière plus que la marche normale, pendant laquelle l'effet des dilatations, souvent inégales, s'ajoute à celui de la pression.

Très efficace pour vérifier l'étanchéité, l'épreuve à la presse ne donne pas une garantie suffisante de la résistance : on a vu des accidents suivre de près une épreuve réussie. On doit la compléter par un examen minutieux des tôles, à l'extérieur et à l'intérieur, examen qui exige l'enlèvement des enveloppes, et la démolition des massifs de maçonnerie.

Pour que l'épreuve se fasse sans danger, la chaudière doit être entièrement remplie d'eau, sans chambre d'air, qui pourrait donner lieu à la projection de fragments de tôle en cas de rupture (1).

(1) Cette précaution n'est pas suffisante quand l'épreuve hydraulique se fait sous les pressions très élevées, parfois de plusieurs centaines de kilogrammes par centimètre carré, adoptées pour les réipients de gaz comprimés.

Il est intéressant de mesurer les déformations de la chaudière sous l'action de la pression, ainsi que les déformations permanentes qui peuvent subsister après l'essai. Ces mesures, assez délicates, ne se font que rarement (1). Tout type nouveau de chaudière devrait être soumis à ce procédé d'investigation.

61. Réglementation des chaudières en France. — Le décret du 9 octobre 1907 (2) s'applique aux générateurs de vapeur, autres que ceux placés à bord des bateaux, soumis à une réglementation spéciale. Sont toutefois exceptés ceux dont la capacité est inférieure à 25 litres et ceux où des dispositions efficaces empêchent la pression effective de dépasser 0 kg. 3 par centimètre carré.

Une chaudière neuve doit être éprouvée sous la pression hydraulique; il en est de même après des modifications ou des réparations notables. Le renouvellement de l'épreuve peut aussi être exigé quand une chaudière est l'objet d'une nouvelle installation et quand elle est remise en service après un chômage d'un an. L'intervalle entre deux épreuves consécutives ne doit pas être supérieur à dix années. Toutefois, il peut être sursis à la réépreuve décennale quand une association de propriétaires d'appareils à vapeur certifie le bon état de l'appareil.

L'épreuve consiste à soumettre l'appareil à une pression hydraulique, supérieure à la pression effective qui ne doit pas être dépassée en service, inscrite sur le *timbre* que porte l'appareil.

Pour les appareils neufs ou ayant subi de grandes réparations, la surcharge d'épreuve est égale à la pression effective, avec minimum de 0,5, si le timbre n'excède pas 6; à 6, si le timbre est

(1) On trouvera la description d'une mesure de ce genre, par M. Polonceau, à la fin du rapport de MM. MICHEL LÉVY et WALCKENAER sur les épreuves hydrauliques, dans le t. III (p. 415) de la publication de la *Commission des méthodes d'essais des matériaux*, en 1895.

(2) Voir *Annales des mines*, partie administrative, 10^e série, t. VI, p. 417. On consultera avec intérêt la *Réglementation des appareils à vapeur et des autres appareils à pression de vapeur et de gaz*, par WALCKENAER (Paris, 1910).

supérieur à 6, sans excéder 20. Dans les autres cas d'épreuve, la surcharge est réduite à moitié.

Chaque chaudière est munie de soupapes de sûreté, qui doivent s'ouvrir dès que la pression du timbre est atteinte. Chacune de ces soupapes doit suffire à évacuer toute la vapeur, sans que la pression effective dépasse de plus d'un dixième celle du timbre (1).

Toute chaudière est munie d'un manomètre, avec repère indiquant la pression du timbre.

Le niveau de l'eau doit être maintenu toujours à 6 centimètres au moins au-dessus de toutes les parois chauffées (exception faite pour les sécheurs et surchauffeurs, et pour certaines parois peu chauffées).

Chaque chaudière est munie de deux appareils de niveau d'eau dont un, au moins, est un tube de verre, muni d'un protecteur convenable arrêtant les éclats en cas de rupture.

Lorsque deux ou plusieurs générateurs doivent desservir une conduite de plus de 50 centimètres carrés de section, chaque générateur portera un clapet ou soupape de retenue se fermant en cas de renversement du courant de vapeur.

Les diverses portes (foyer, boîte à fumée, etc.) doivent être munies de fermetures solides; en outre, dans les chaudières à tubes d'eau et les surchauffeurs, les portes des foyers et des cendriers sont disposées pour se fermer automatiquement sous l'action d'un flux de vapeur. Ce flux de vapeur doit trouver un écoulement facile vers l'extérieur (trappes d'expansion à la partie supérieure des générateurs).

La chambre de chauffe doit être suffisamment spacieuse, convenablement aérée et éclairée et offrir des issues faciles dans deux directions au moins.

On ne doit mettre une chaudière en service qu'après une déclaration au préfet.

Au point de vue des conditions d'emplacement, les chaudières

(1) Il ne faut pas conclure de cet article qu'il soit permis de laisser la pression dépasser ainsi celle du timbre, qui est une limite absolue. Le décret donne seulement une règle pour l'installation des soupapes.

sont divisées en trois catégories, obtenues en calculant le produit $V(t-100)$, où V est en mètres cubes le volume de la chaudière, et t la température de la vapeur saturée à la pression du timbre. Toutefois, le volume V ne comprend pas la capacité des tubes d'eau n'ayant pas plus de 10 centimètres de diamètre intérieur, et des pièces de jonction qui les réunissent, pourvu que leur section intérieure ne dépasse par un décimètre carré.

Les chaudières locomobiles doivent, en principe, être rééprouvées tous les cinq ans.

Les récipients de vapeur d'une capacité supérieure à 100 litres sont soumis à l'épreuve et assujettis à la déclaration. Si leur timbre est inférieur à celui de la chaudière qui les dessert, ils doivent porter une soupape de sûreté, et même deux, si leur capacité atteint ou dépasse un mètre cube (1).

Certaines dispenses de ces conditions peuvent être accordées par le ministre.

La conduite des chaudières ne doit être confiée qu'à des agents sobres et expérimentés.

Chaque appareil doit être l'objet d'une visite complète à l'extérieur et à l'intérieur par une personne compétente (notamment par les agents des associations de propriétaires d'appareils à vapeur), au moins une fois par an.

En cas d'accident de chaudière ayant causé mort d'homme ou blessures, le chef de l'établissement doit immédiatement prévenir le maire de la commune et l'ingénieur des mines chargé de la surveillance (prévenir l'ingénieur seul si l'accident n'a causé ni mort ni blessures).

Les appareils établis antérieurement au décret du 9 octobre 1907 sont dispensés de quelques-unes des prescriptions de ce décret.

Le tableau ci-après, annexé au décret, donne les températures à considérer pour la détermination de la catégorie d'une chaudière.

(1) Un décret du 25 avril 1910 (*Annales des mines*, partie administrative, 10^e série, t. IX, p. 222) complète un article relatif aux récipients.

*Tableau des valeurs correspondantes de la température
et de la pression effective de la vapeur d'eau saturée*

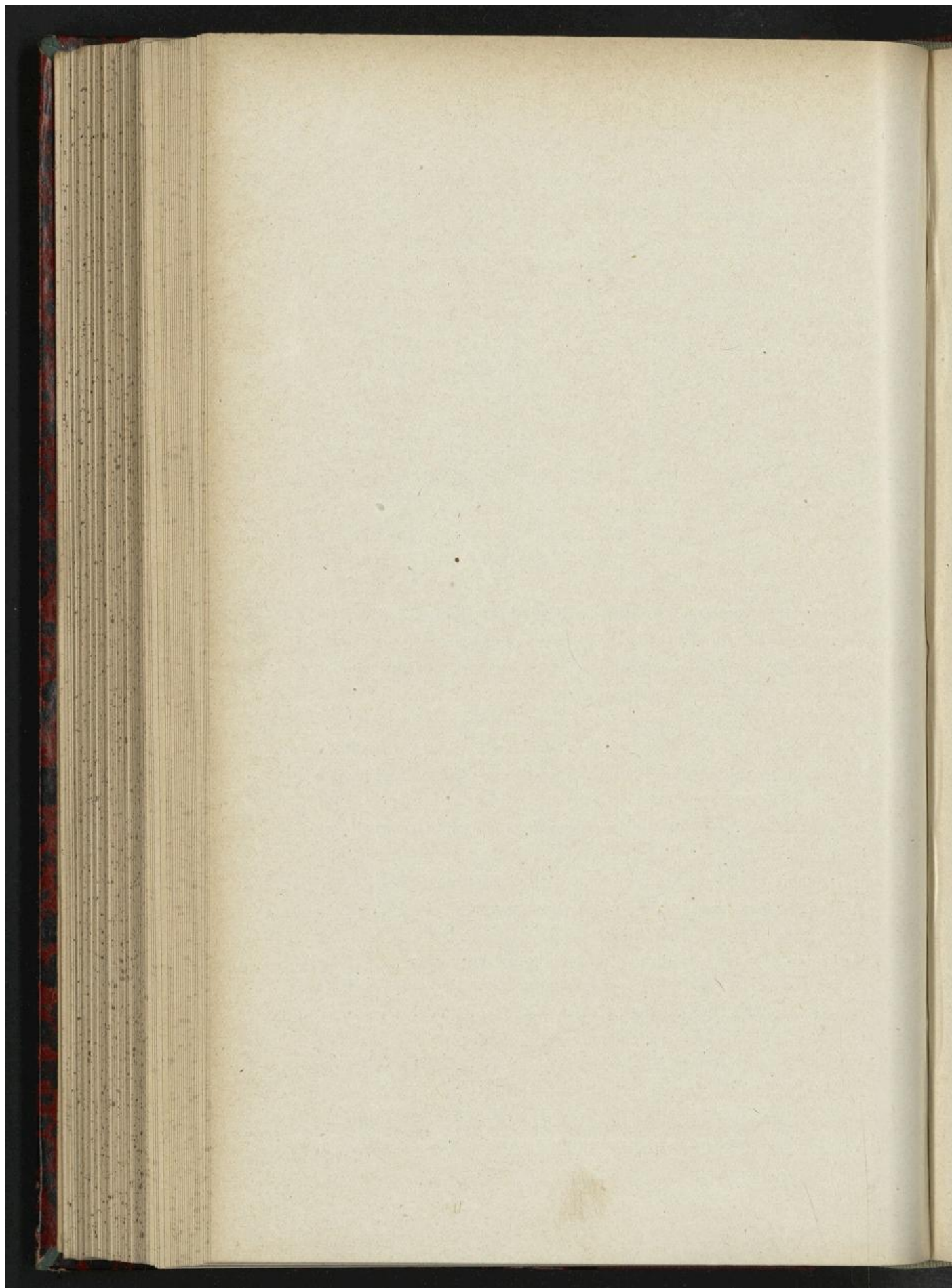
PRESSION EFFECTIVE en kg. par cm ²	TEMPÉRATURE centigrade	PRESSION EFFECTIVE en kg. par cm ²	TEMPÉRATURE centigrade
0,5	111°	10	183°
1	120°	11	187°
1,5	127°	12	191°
2	133°	13	194°
2,5	138°	14	197°
3	143°	15	200°
4	151°	16	203°
5	158°	17	206°
6	164°	18	209°
7	170°	19	211°
8	175°	20	214°
9	179°		

En vertu d'un décret du 23 février 1919 (1), les associations de propriétaires d'appareils à vapeur peuvent être autorisées à procéder aux épreuves hydrauliques réglementaires, à la place des fonctionnaires du service des mines.

A la différence de certains règlements étrangers, le décret du 9 octobre 1907 ne contient aucune spécification relative au choix des matériaux des chaudières. Toutefois l'administration des Travaux Publics a cru devoir appeler l'attention des constructeurs et des exploitants sur la nécessité de l'emploi de matières bien appropriées aux hautes pressions actuelles, matières que les progrès de la métallurgie permettent d'obtenir. C'est ainsi qu'il est recommandé de ne plus employer la fonte de fer, comme on le faisait autrefois, pour les têtes de bouilleurs, pour les boîtes de soupapes d'arrêt et de retenue de vapeur (2).

(1) Voir *Annales des mines*, partie administrative, 11^e série, t. VIII, pp. 144 et 210.

(2) *Annales des mines*, partie administrative, 10^e série, t. X, p. 182.



DEUXIÈME PARTIE

CONDENSATION DE LA VAPEUR

CHAPITRE XI

GÉNÉRALITÉS

62. **Emploi de la condensation.** — La condensation était indispensable aux premières machines, qui recevaient la vapeur à la pression atmosphérique. Elle se faisait par injection d'eau dans le cylindre moteur (fig. 214); l'eau s'écoulait pendant l'admission de vapeur subséquente, par un tuyau vertical plongeant dans une bêche et muni d'une soupape empêchant le retour. L'air, qui pénétrait constamment dans le cylindre, s'échappait, avec de la vapeur, par un *reniflard*, soupape légèrement chargée.

Plus tard, on a ménagé au fond du cylindre, pour la condensation, une cavité dite *pickle-pot* (bocal à cornichons), constamment en communication avec le cylindre, la sortie de l'eau et de l'air se faisant comme précédemment. On évitait ainsi le refroidissement direct des parois du cylindre par l'injection d'eau froide.

Le condenseur séparé de Watt est un nouveau progrès dans la même direction; et l'addition de la pompe à air est un perfectionnement capital.

Avec l'emploi de vapeur sous des pressions supérieures à l'atmosphère, la condensation a cessé d'être indispensable; mais elle reste avantageuse en réduisant la dépense de combustible.

L'abaissement de pression donné par un condenseur est variable : un *vide* médiocre correspond à une pression de

0 kg. 2 par centimètre carré; un bon vide, à 0,1, et un très bon vide à 0 kg. 05 par centimètre carré. Avec les machines à piston, on n'a pas cherché à pousser jusqu'à son extrême limite l'abaissement de la pression.

Soit une machine de ce genre dont l'ordonnée moyenne est de

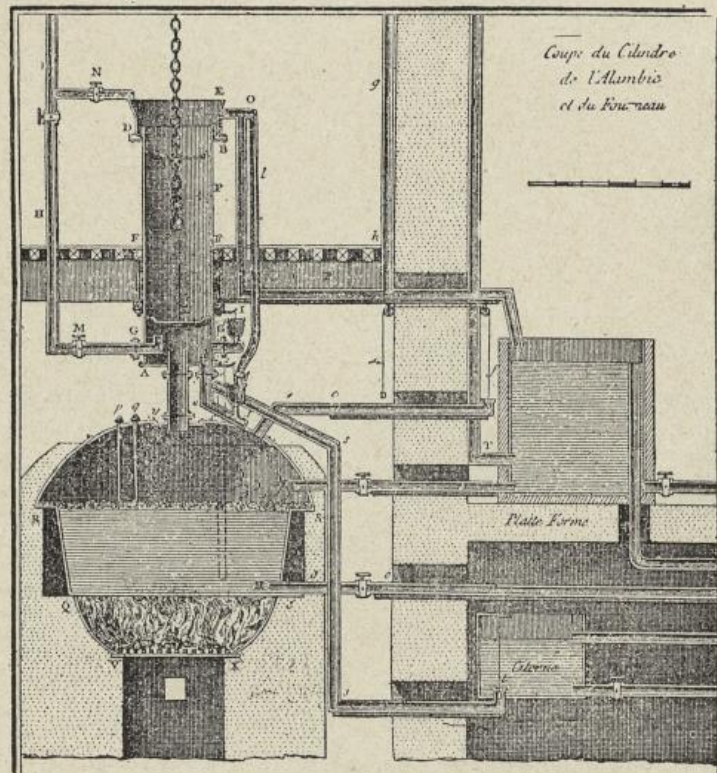


FIG. 214. — Machine de Newcomen, à la mine de Fresnes.

M, robinet d'injection d'eau; s, tuyau d'écoulement d'eau; l, soupape s'opposant au retour d'eau; l, reniflard pour la sortie d'air.

3 kilogrammes par centimètre carré, avec une contre-pression de 0,1; en abaissant cette contre-pression de 0,1 à 0,05, on augmentera le travail indiqué d'un soixantième, augmentation peu sensible, surtout si la puissance dépensée par le condenseur augmente en même temps.

Si la détente de la vapeur pouvait être poussée jusqu'à la pression finale, l'augmentation du travail moteur, représentée

par une surface très longue (fig. 215), serait notable; mais, par suite de l'inévitable limitation de la détente, de cette surface on n'utilise qu'une faible portion.

Avec la turbine à vapeur, l'avantage des très faibles contre-pressions d'échappement s'est manifesté nettement; c'est alors qu'il est devenu utile d'améliorer l'ancien condenseur, très simple, qui suffisait pour les moteurs à piston.

A une machine existante, fonctionnant à l'échappement libre, on peut ajouter un condenseur, soit pour en augmenter la puissance, soit pour économiser la vapeur. Mais, sauf dans le premier cas, cette addition n'est pas sans inconvénients : notam-

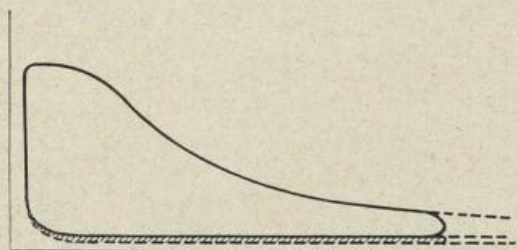


FIG. 215. — Diagramme du travail d'une machine à condensation, quand on améliore le vide. De la surface supplémentaire théoriquement disponible, on n'utilise que la faible portion hachurée.

ment la manœuvre des machines d'extraction et des moteurs de laminoirs se trouve modifiée par la condensation, et l'économie réalisée est d'ailleurs minime. C'est par un autre procédé qu'on tire de la condensation de sérieux avantages : la vapeur d'échappement, à la pression de l'atmosphère, est envoyée dans un accumulateur, qui alimente une turbine à basse pression fonctionnant entre l'accumulateur et le condenseur.

63. Divers modes de condensation. — Le condenseur à *mélange*, ou à *injection*, met la vapeur en contact direct avec l'eau qui la refroidit (fig. 216). Dans le condenseur à *surface*, la vapeur et l'eau de refroidissement sont séparées par des parois métalliques suffisamment étendues, à travers lesquelles se transmet la chaleur (fig. 217). Ce mode de condensation permet la récupération d'eau distillée pour l'alimentation des chaudières,

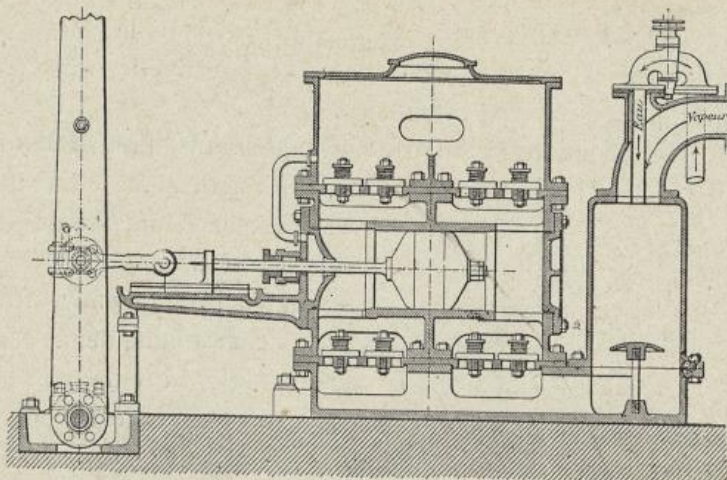


FIG. 216. — Condenseur à mélange avec sa pompe à air à double effet.

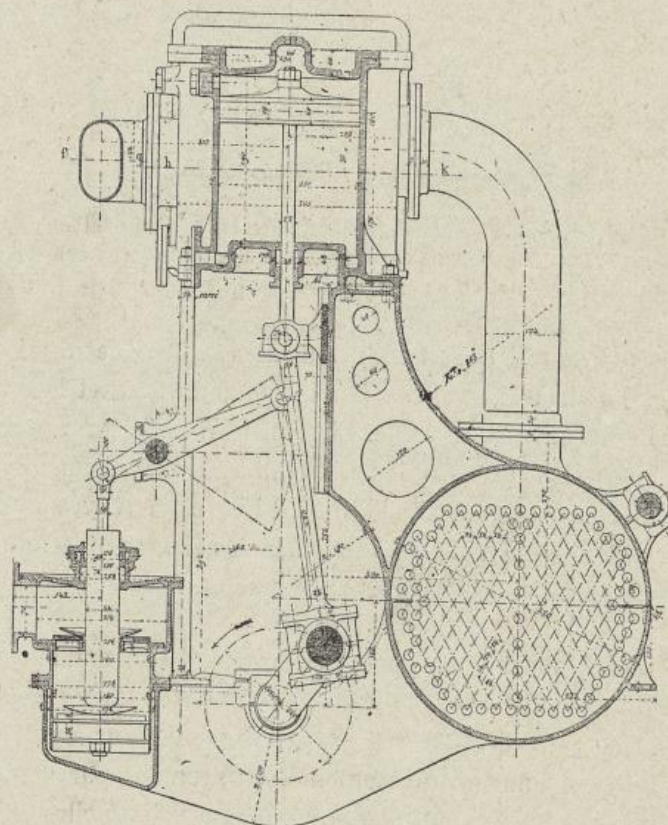


FIG. 217. — Condenseur à surface, avec sa pompe à air, pour machine-pilon de canot, construite en 1886. La pompe de circulation fait passer un courant d'eau dans les tubes.

lorsque l'eau disponible, telle l'eau de mer, ne convient pas pour cet usage. Il est aussi employé comme pouvant donner un très bon vide.

Le condenseur à surface remonte à Watt, qui en a construit,

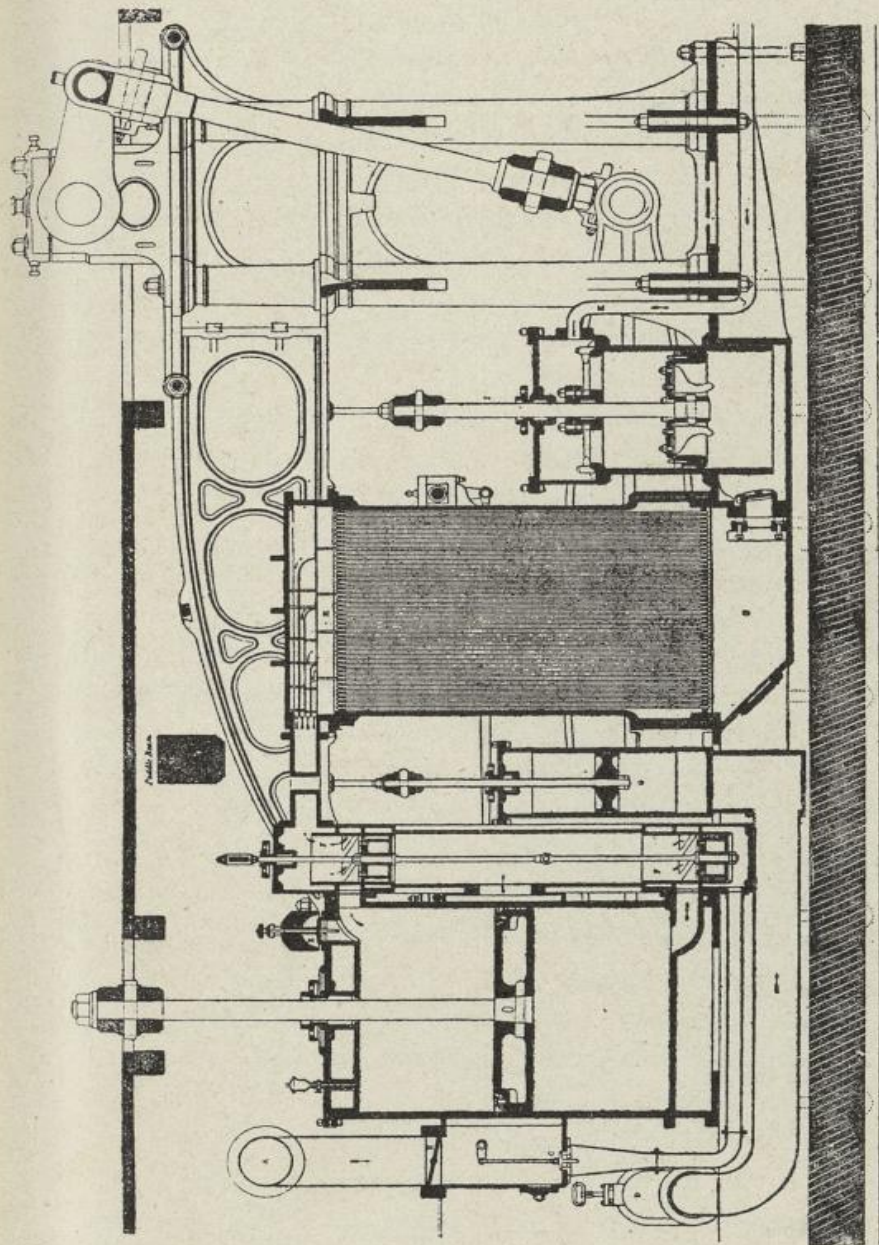


FIG. 218. — Condenseur à surface de Hall, construit en 1837. La vapeur pénètre dans les tubes verticaux du condenseur. A gauche, pompe de circulation; à droite, pompe à air. Machine à balanciers intérieurs, à tiroirs cylindriques avec échappement par les bords extérieurs.

en 1765, un modèle, conservé au *Science Museum* de Londres. Ce modèle, bien complet avec sa pompe à air, comporte 140 tubes, dans lesquels circule l'eau de refroidissement.

L'idée fut reprise par Hall, qui construisit, en 1837, un condenseur pour machine marine (fig. 218). Bien qu'il ressemble aux appareils actuels, devenus indispensables, sauf en ce que c'est la vapeur, et non l'eau de refroidissement, qui circule dans les tubes, le condenseur de Hall ne se répandit pas et demeura longtemps ignoré.

Un fait de ce genre n'est pas unique dans l'histoire des machines. D'une part, certaines difficultés dans la construction ou l'emploi des appareils, en réalité secondaires, sont considérées comme insurmontables; d'autre part, les conditions anciennes de marche ne rendaient pas aussi nécessaires qu'aujourd'hui certains appareils.

Le condenseur à *ruissellement*, variante du condenseur à surface, est formé de tuyaux exposés à l'air et arrosés. Dans l'*aéro-condenseur*, c'est l'air seul qui refroidit les tuyaux : mais l'objet est plutôt de chauffer l'air que d'obtenir une très basse pression de vapeur.

64. **Appareils de mesure.** — *L'indicateur de vide*, dont sont munis les condenseurs, indique la différence de pression, exprimée en millimètres de mercure, entre le condenseur et l'atmosphère. Pour connaître la pression du condenseur, il faut, en outre, lire sur un baromètre la pression atmosphérique. Si l'aiguille indique un vide de 71 centimètres, la pression dans le condenseur sera de 4 ou de 6 centimètres de mercure, suivant que la hauteur barométrique sera de 75 ou de 77 centimètres. Il convient ensuite de transformer cette indication en mesure métrique, kilogrammes par centimètre carré, à raison de 1,033 pour 76 centimètres de mercure. On voit combien cette indication est inutilement compliquée.

La mesure directe de la pression absolue dans le condenseur est préférable : elle est donnée par une colonne barométrique de faible hauteur, qu'il convient de graduer en kilogrammes par

centimètre carré (0 kg. 1 par centimètre carré équivaut à 73 mm. 6).

Un thermomètre indiquant la température de l'eau à la sortie du condenseur est fort utile : on en déduit la pression correspondante de la vapeur, et on voit de combien la pression observée est majorée par la présence de l'air. Il est bon de mesurer également la température de l'eau fournie au condenseur.

Dans le condenseur à surface, des thermomètres doivent être placés à l'entrée et à la sortie de l'eau de circulation : les indications peuvent en être utiles à divers points de vue : sur mer, dans les régions où se trouvent des glaces flottantes, une baisse subite du thermomètre en indique le voisinage.

65. Condenseurs centraux. — Chaque moteur à vapeur peut être muni d'un condenseur individuel, dont il actionne la pompe à air. D'autres fois, le condenseur est indépendant et commandé par un moteur auxiliaire. Ce condenseur indépendant peut alors recevoir les vapeurs d'échappement de plusieurs moteurs. Aux houillères de Ronchamp, un condenseur central est prévu pour 50.000 kilogrammes de vapeur à l'heure (1).

L'installation (fig. 219) comprend un condenseur à surface, avec 827 tubes en laiton, de 77 millimètres de diamètre intérieur, épais de 1 mm. 5, longs de 7 mètres, donnant une surface de 1.400 mètres carrés, soit 1 mètre carré pour 36 kilogrammes de vapeur à l'heure, et un réfrigérant d'eau de condensation. La vapeur à condenser traverse un dégraisseur (fig. 220) ; l'eau condensée est renvoyée aux chaudières par une pompe alimentaire.

Les condenseurs centraux sont rarement employés ; on leur préfère, pour les machines de quelque importance, les condenseurs individuels. Le condenseur central exige de grandes longueurs de tuyaux d'échappement à large section, nécessaire pour éviter des pertes de charge excessives. La tendance est au contraire d'accoler directement le condenseur au moteur desservi, en supprimant toute tuyauterie intermédiaire.

(1) Décrit dans le *Bulletin de la Société de l'industrie minérale*, déc. 1903.

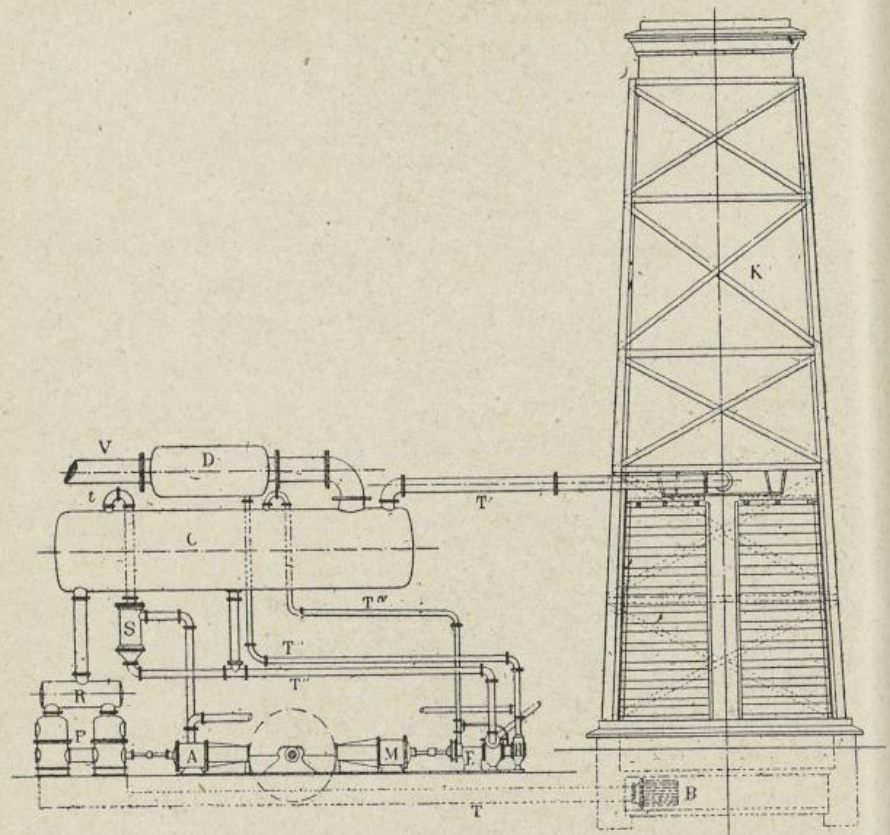


FIG. 219. — Condenseur central aux houillères de Ronchamps.

V, arrivée de vapeur; D, dégraisseur; C, condenseur; t, aspiration d'air dans le condenseur; S, séparateur d'eau; A, pompe à air seul; E, pompe à eau condensée; P, pompe de circulation, avec réservoir d'air R; K, réfrigérant d'eau de circulation; M, moteur

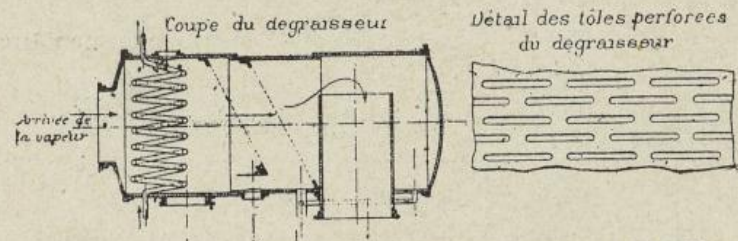


FIG. 220. — Séparateur d'huile du condenseur central des houillères de Ronchamps. Ce séparateur est un cylindre de 2 m. 15 de diamètre, long de 7 mètres. La vapeur rencontre un serpentin à circulation d'eau froide, puis deux tôles perforées.

CHAPITRE XII

CONDENSEURS A MÉLANGE

66. Dispositions générales. — Le condenseur, tel qu'il est depuis longtemps accolé aux machines à piston, est une caisse en fonte placée dans le vide que laissent les massifs de fondation ou en tandem derrière un cylindre horizontal. C'est surtout la

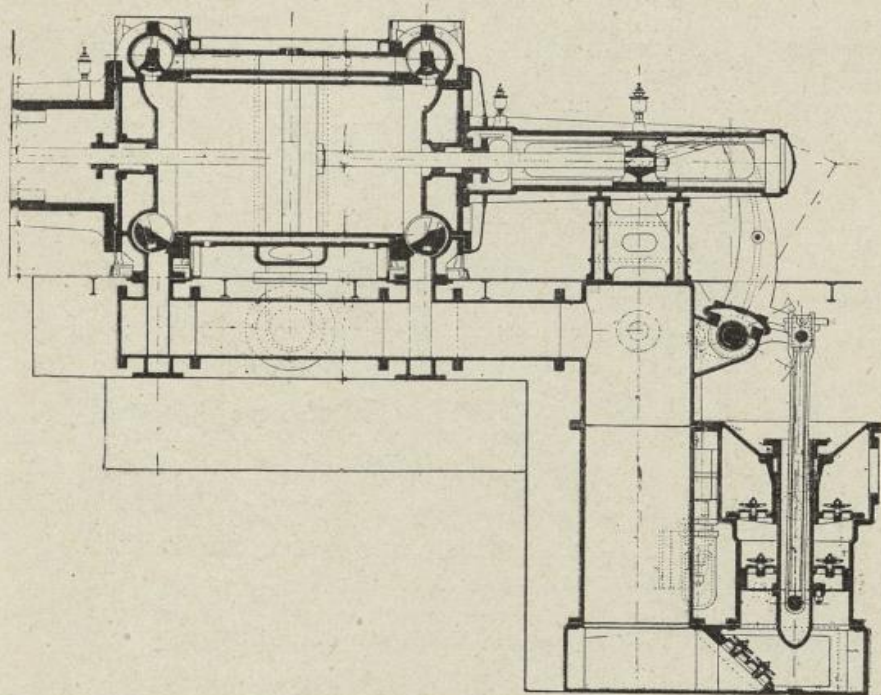


FIG. 221. — Condenseur d'une machine Corliss-Frikart à triple expansion, construite en 1895 par la Société alsacienne de constructions mécaniques, avec sa pompe à air, commandée par la contre-tige du cylindre à basse pression.

commande de la pompe à air qui en détermine l'emplacement. La figure 221 est le condenseur d'une machine construite il y a 25 ans; sur la figure 222, on remarquera comme on a réduit la

distance du cylindre au condenseur. La figure 223 est un condenseur avec moteur indépendant.

Le condenseur peut se réduire à un simple tuyau, parcouru

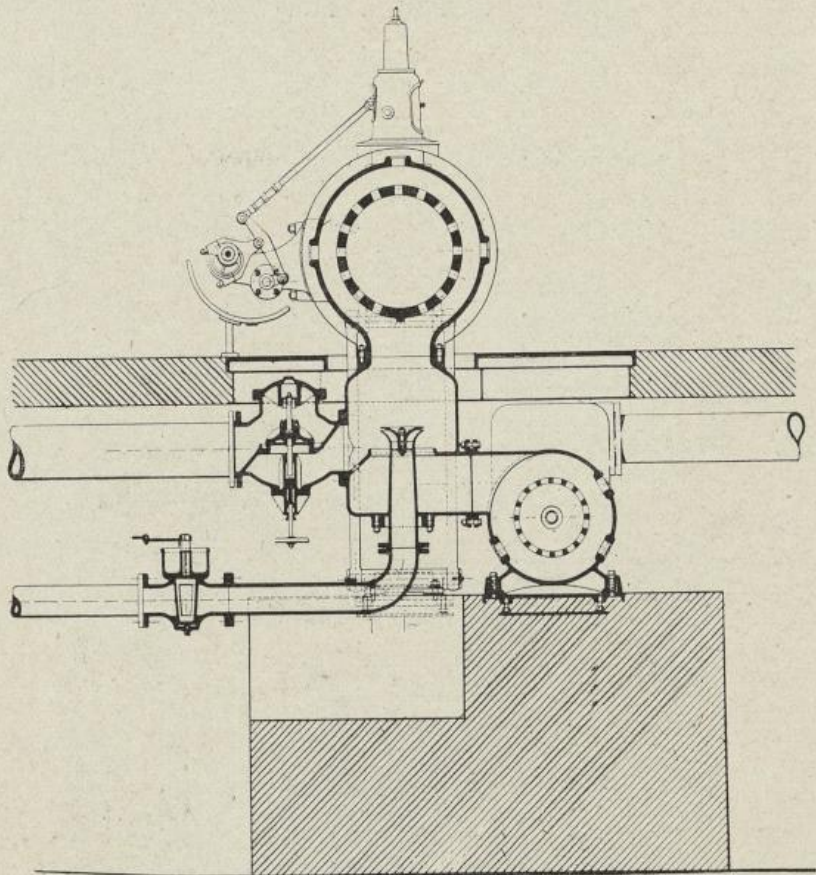


FIG. 222. — Condenseur d'une machine édicourant de la Société alsacienne de constructions mécaniques ; coupe transversale. A gauche, soupape d'échappement dans l'atmosphère ; à droite, pompe à air (Voir fig. 238).

dans le même sens par l'eau et la vapeur et se rapprochant de l'éjecteur.

Il est souvent utile de prévoir un échappement direct dans l'atmosphère, soit en cas de non fonctionnement du condenseur, soit surtout pour la mise en marche et l'arrêt des moteurs. Notamment dans les stations centrales comportant plusieurs groupes composés d'un moteur à piston et d'un alternateur, la

communication avec le condenseur lors de la mise en marche d'un groupe risque de donner lieu à des coups d'eau.

L'échappement direct est ouvert par une soupape, manœuvrée à la main ou automatique (fig. 224). Pour en assurer l'étanchéité, on la dispose au fond d'une cuvette remplie d'eau.

L'eau d'injection pénètre dans le condenseur par des orifices

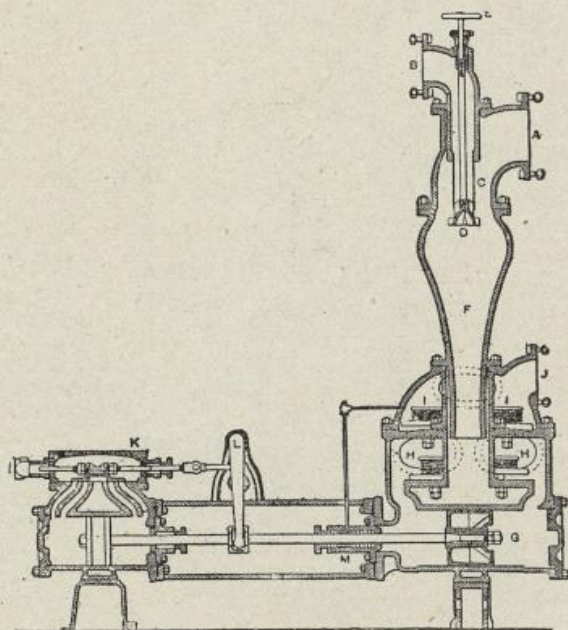


FIG. 223. — Condenseur indépendant Worthington: B, arrivée d'eau, avec soupape de réglage D; A, arrivée de vapeur; G, pompe à air, avec son moteur K.

qui la projettent en jets très divisés, avec débit réglable à la main. De ce débit dépend la température de condensation. Un kilogramme de vapeur, venant de la chaudière, apporte un nombre de calories qui dépend de sa pression et de sa température. Compté à partir de 0° , ce nombre sera généralement compris entre 650 et 750. De ces calories, 10 à 15 p. 100 sont transformées en travail; quelques-unes sont dissipées à l'extérieur, de sorte qu'il en arrive au condenseur, avec chaque kilogramme de vapeur, un nombre voisin de 600. L'eau de condensation disponible étant à la température t_0 , pour obtenir dans le condenseur

la température t , il faudra, par kilogramme de vapeur, x kilogrammes d'eau, de telle sorte que :

$$(x + 1) t = 600 + x t_0,$$

d'où :

$$x = \frac{600 - t}{t - t_0}.$$

Avec $t_0 = 15^\circ$ et $t = 40^\circ$, la formule donne 22 kilogrammes.

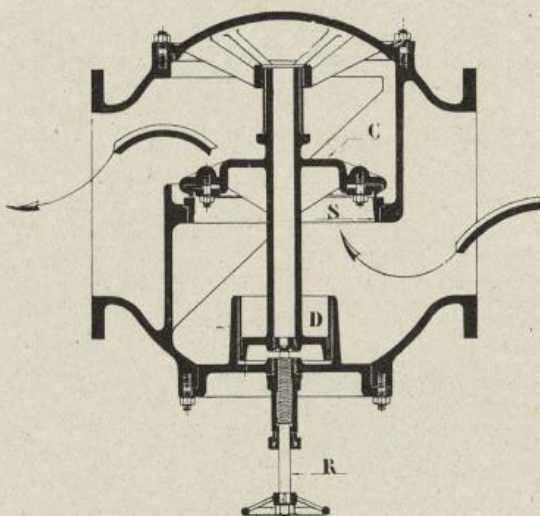


FIG. 224. — Soupape automatique d'échappement à l'air libre de la Société de condensation et d'applications mécaniques. Dès que la pression de la vapeur d'échappement dépasse celle de l'atmosphère, elle soulève la soupape et se dégage vers la gauche. Le dash-pot D empêche les chocs à la fermeture, lorsque la condensation s'établit. La vis R, manœuvrée de l'extérieur, maintient la soupape soulevée et empêche les battements, en cas de marche permanente à l'échappement libre.

d'eau. Ce calcul sert seulement à prévoir le débit nécessaire. En marche, le réglage se fait suivant les besoins.

Aucune règle bien précise ne détermine la capacité du condenseur : il convient qu'il ne se remplisse pas par trop vite en cas d'arrêt ou de ralentissement du moteur qu'il dessert, l'arrivée d'eau dans le cylindre pouvant causer un accident grave. On supprime cette chance d'accident en munissant le condenseur d'une soupape de rentrée d'air dite *casse-vide*, qu'ouvre un

flotteur lorsque l'eau dépasse un certain niveau (fig. 225). L'afflux d'eau s'arrête immédiatement, à moins qu'elle ne pénètre en charge dans le condenseur, ce qu'il est facile d'éviter, l'eau en charge ne devant servir que pour la mise en marche.

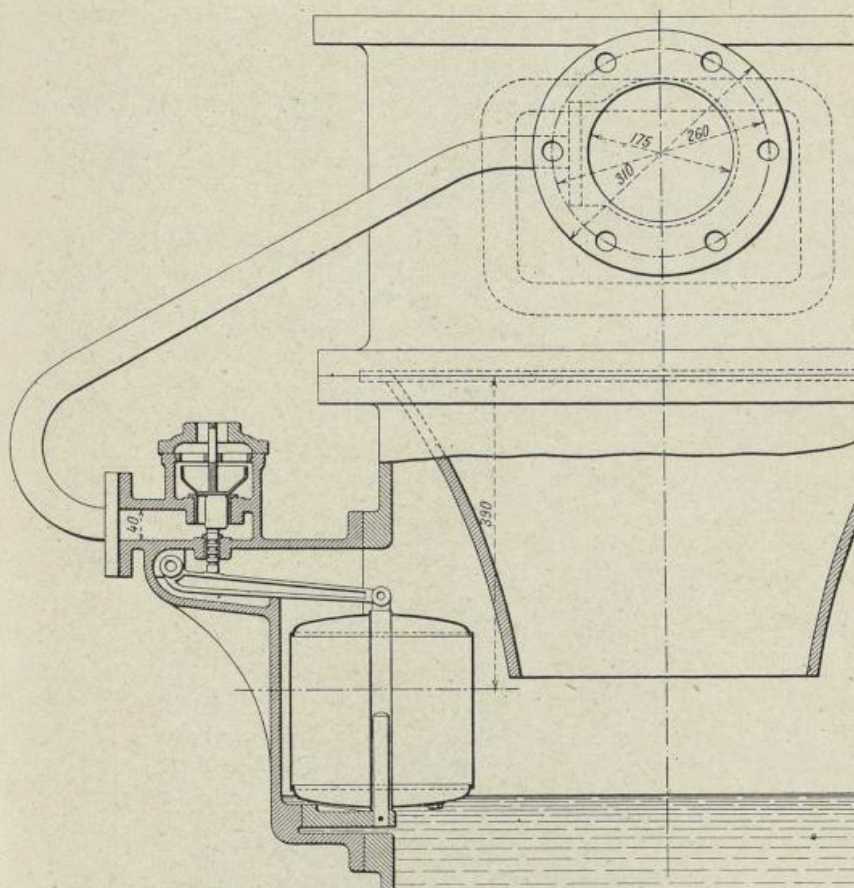


FIG. 225. — Soupape *casse-vide* sur condenseur Westinghouse-Leblanc. L'ouverture de la soupape laisse pénétrer l'air près de l'entrée du tuyau d'injection d'eau.

Certains condenseurs portent, comme les chaudières, un tube de niveau en verre.

Lorsque le condenseur n'est pas au-dessous du moteur qu'il dessert, ou lorsque le tuyau d'échappement présente un point bas, un purgeur devient nécessaire. Le purgeur Ogden (fig. 226),

à bascule, comporte deux chambres qui se remplissent et se vident alternativement. La trompe à eau Westinghouse-Leblanc (fig. 227) reçoit en A l'eau sous pression, aspire en B l'eau de purge, et refoule le mélange dans le condenseur, en C.

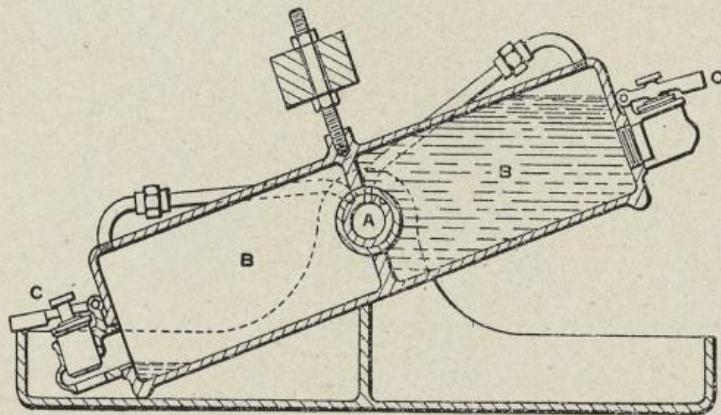


FIG. 226. — Purgeur automatique Ogden, pour tuyau d'échappement au condenseur.

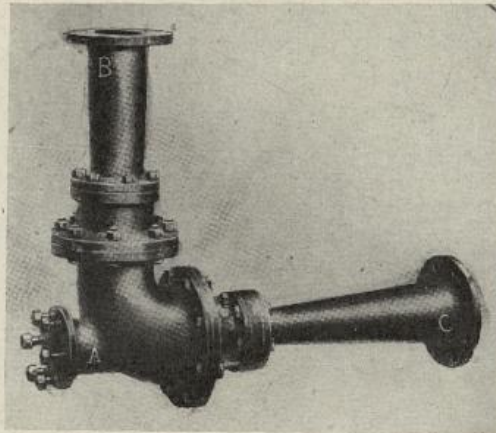


FIG. 227. — Trompe de purge Westinghouse-Leblanc.

Appliquée au condenseur d'une machine marine (fig. 228), cette trompe prend son eau motrice sur le refoulement de la pompe d'extraction d'eau du condenseur. Il en est de même dans le montage sur un condenseur à mélange (fig. 229).

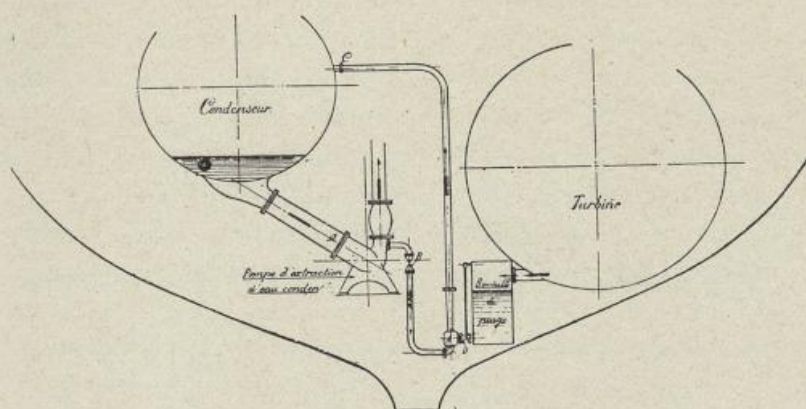


FIG. 228. — Montage de la trompe de purge sur le condenseur à surface d'une machine marine. La trompe A, alimentée par l'eau prise en B sur le refoulement de la pompe d'extraction, aspire l'eau dans la bouteille de purge de la turbine, et la refoule en C dans le condenseur.

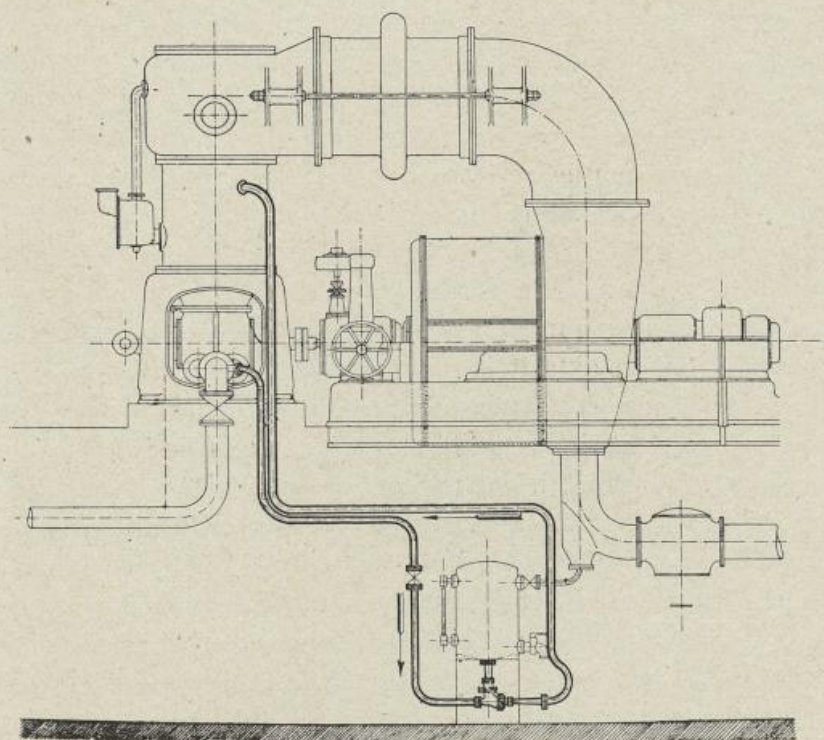


FIG. 229. — Montage de la trompe de purge sur un condenseur à mélange.

67. **Pompe à air.** — La *pompe à air* extrait du condenseur l'eau en même temps que l'air. Le kilogramme de vapeur condensée, avec l'eau d'injection, donne 20 à 30 litres. L'air pénètre constamment dans le condenseur; il provient de l'eau de la chaudière, des fuites aux joints de la conduite d'échappement, et surtout de l'eau d'injection. La pression dans le condenseur, au lieu d'être celle de la vapeur, à la température de condensation (1), est majorée de celle qu'aurait l'air seul. Cette majoration dépend de l'importance des rentrées d'air, ainsi que des dimensions et de la vitesse de la pompe.

L'eau d'injection tient en dissolution une quantité d'air ou plutôt de gaz (on a vu, paragraphe 43, que la proportion de l'oxygène et de l'azote n'y était pas la même que dans l'air), dont le volume, ramené à la pression atmosphérique et à la température de 15°, est souvent estimé au vingtième du volume de l'eau. Par suite de la réduction de pression et de l'élévation de température, cet air se dégage en partie dans le condenseur. Il en résulte qu'en augmentant la proportion d'eau d'injection, si, d'une part, on abaisse la pression de la vapeur, d'autre part, celle de l'air s'élève. Le total des deux passe par un minimum, correspondant à une certaine proportion d'eau; au delà de ce minimum, la pression totale se relève quand le débit d'eau augmente.

L'augmentation de la pression de l'air tient non seulement à ce qu'il en pénètre une plus grande quantité, mais aussi à ce que le volume qu'en extrait la pompe à air va en diminuant par suite de la place croissante qu'y occupe l'eau.

Le volume théorique de la pompe à air, c'est-à-dire le volume engendré par le piston dans sa course, rapporté à la condensation d'un kilogramme de vapeur, doit être suffisant pour l'extraction de l'eau (une trentaine de litres) et de l'air ramené à une pression convenable. Dans chaque cas particulier, on peut estimer ce volume d'air, mais cette estimation est incertaine et

(1) Pression à 25°, 32 g. par cm².

—	30°, 43 g.	—
—	35°, 57 g.	—
—	40°, 75 g.	—

sujette à varier : aussi se contente-t-on de règles empiriques, par exemple en choisissant un volume de 100 litres par kilogramme de vapeur.

On peut estimer comme il suit le travail utile de la pompe : pour la compression isotherme de 70 litres d'air de 0,1 à 1 kilogramme par centimètre carré, et le refoulement, 162 kilogrammètres (en négligeant la pression constante de la vapeur d'eau) ; pour le refoulement de l'eau, 270 ; au total 432 kilogrammètres. Le travail effectif à fournir à la pompe sera d'un millier de kilogrammètres. Dans un très bon moteur, ne dépensant que 8 kilogrammes de vapeur par kilowatt-heure, le kilogramme de vapeur produit environ 46.000 kilogrammètres : la pompe consommera donc 2,2 p. 100 du travail produit. Avec une machine dépensant 16 kilogrammes par kilowatt-heure, la pompe, qui devrait avoir un volume double, prendrait 4,4 p. 100 du travail.

Pour tirer le meilleur effet d'une pompe à air, il convient qu'elle aspire l'air aussi froid que possible, puisqu'à égalité de poids et de volume aspirés, la pression en sera proportionnelle à la température absolue. Aussi le refroidissement de l'air est-il fréquemment appliqué pour améliorer les condenseurs.

Les dispositions des pompes à air sont variées : elles peuvent être verticales ou horizontales, à piston ordinaire, plein ou creux, ou à piston plongeur, à simple ou à double effet. Le type vertical à simple effet, à piston creux, avec trois rangs de clapets (fig. 230) est un des plus employés. Cette disposition équivaut à deux pompes à simple effet en série : pendant la montée, un mélange d'eau, d'air et de vapeur est aspiré sous le piston, tandis que sa face supérieure comprime, puis expulse l'air et l'eau ; pendant la descente, la pression augmente en dessous, diminue en dessus, jusqu'à ce que les clapets du piston s'ouvrent. En fin de course, l'espace libre sous le piston est rempli d'eau, mais toujours émulsionnée d'air : cet air commence à se détendre au début de la course montante, mais pendant une faible portion de la course, parce que sa pression initiale est fort inférieure à la pression atmosphérique. Les diagrammes de la figure 231 mettent en évidence ce fait, et montrent l'avantage des trois rangs de clapets.

Deux rangs de clapets, dont un dans le piston (fig. 232), suffisent d'ailleurs à la rigueur.

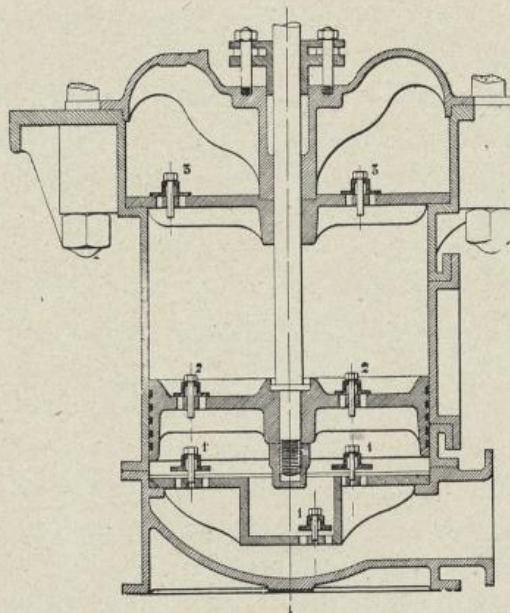


FIG. 230. — Pompe à air verticale, à simple effet, à piston creux, avec trois rangs de clapets.

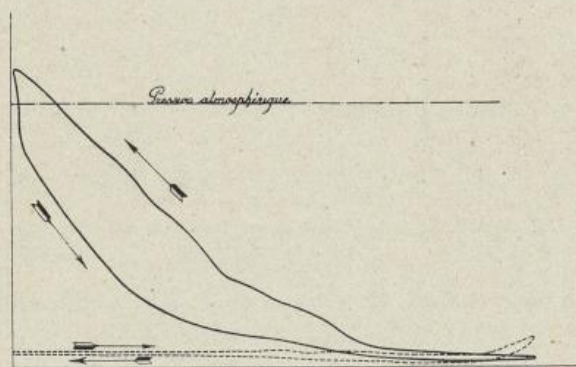


FIG. 231. — Diagrammes relevés sur les deux faces du piston de la figure 230, montrant la détente de l'air comprimé dans l'espace libre. En trait plein, diagramme de la face supérieure; en trait ponctué, de la face inférieure.

Le double effet peut être obtenu par la conjugaison de deux pompes à simple effet (fig. 233).

L'aspiration de la pompe doit se faire au point le plus bas du condenseur, pour qu'il puisse s'assécher.

La disposition horizontale, avec piston plein (fig. 234) se prête bien au double effet.

Le piston plongeur horizontal (fig. 235) est directement commandé par une contre-tige du piston moteur, et peut fonction-

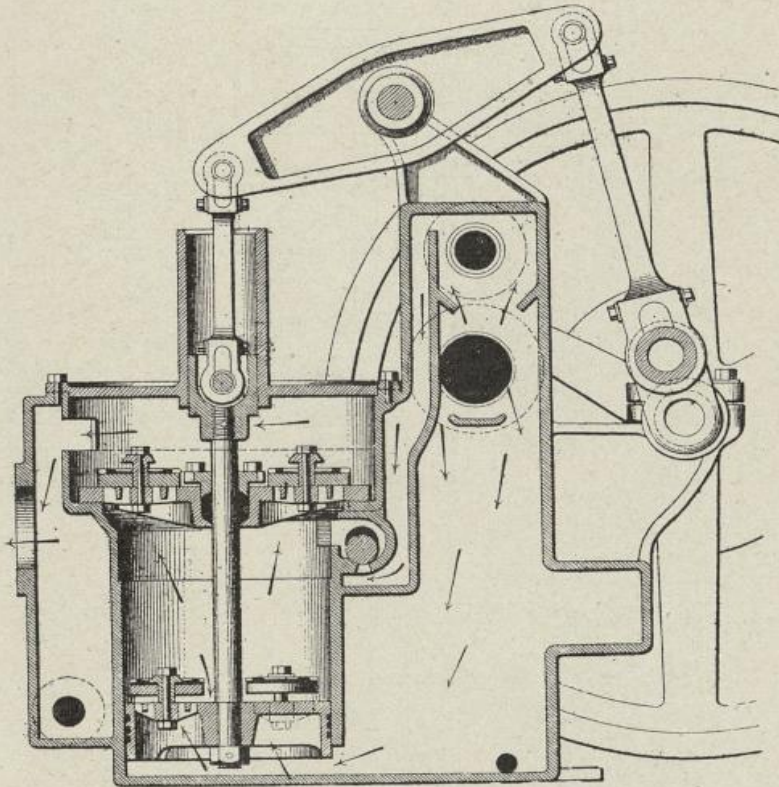


FIG. 232. — Condenseur Nordberg, avec pompe à air verticale à deux rangs de clapets.

ner avec une forte vitesse linéaire. Il se meut dans un corps de pompe de grande capacité par rapport au volume qu'il déplace dans sa course, ayant, par conséquent, un très vaste espace libre. Dans une pompe à eau, la grandeur de l'espace libre n'a pas d'influence, puisqu'il est constamment rempli d'une masse de fluide incompressible. Mais il n'en est pas de même dans une pompe à air de condenseur : l'air est bien expulsé en premier

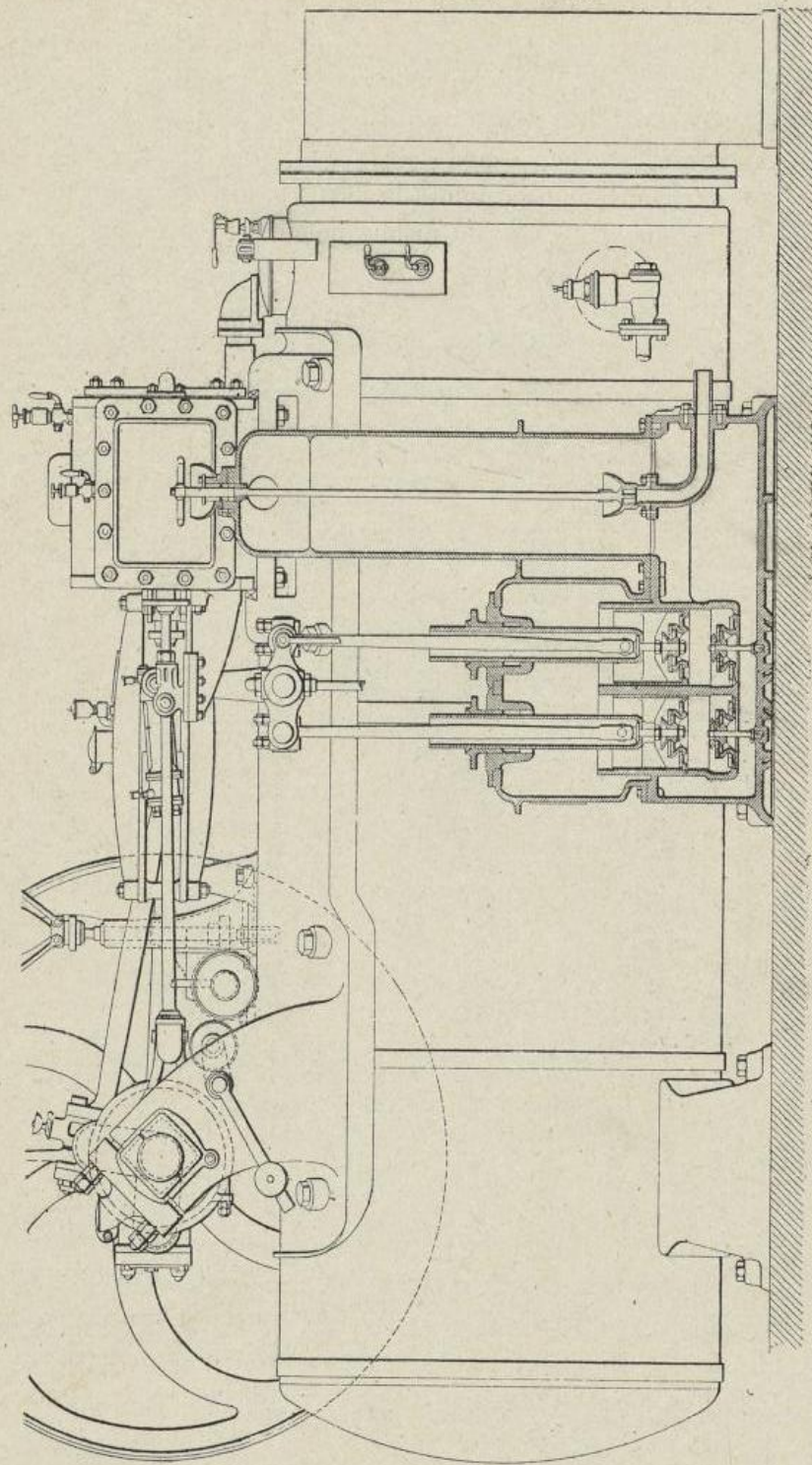


FIG. 233. — Condenseur avec pompes à air conjuguées, pour machine compound deml-fixe, par Weyher et Richemond.

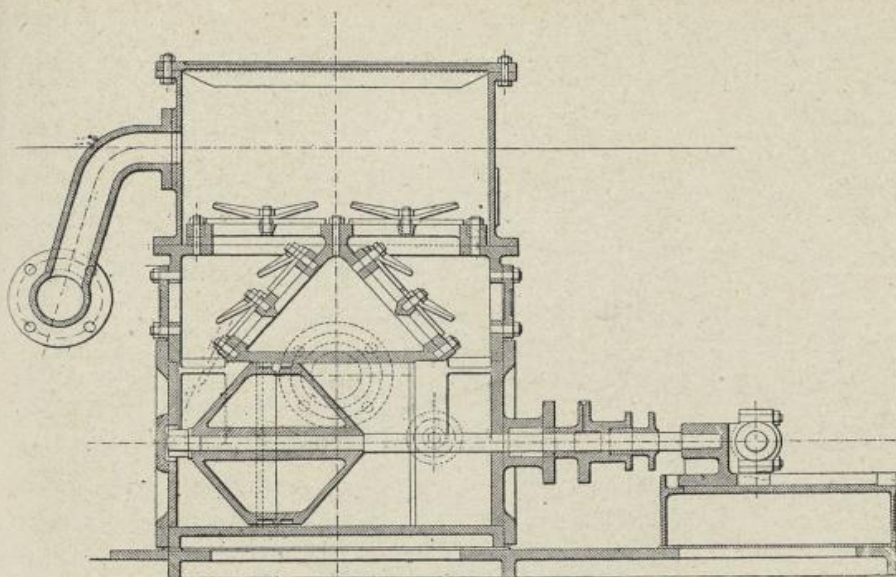


FIG. 234. — Condenseur avec pompe à air horizontale, avec piston plein, à double effet.

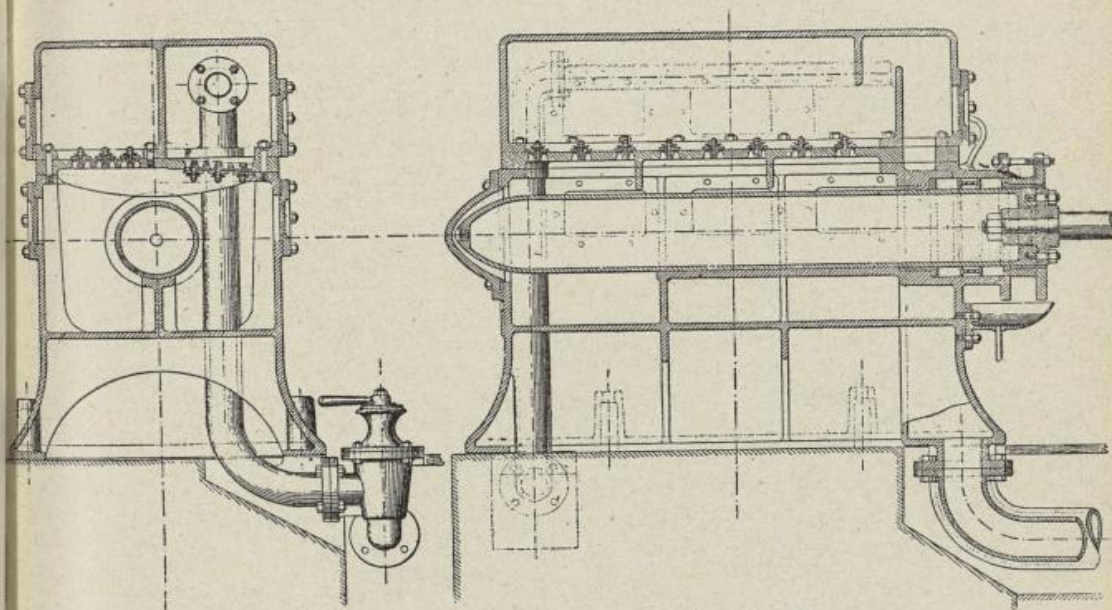


FIG. 235. — Condenseur avec pompe à air, conduite directement par la contre-tige du piston moteur : machine Corliss construite en 1889 par Lecouteux et Garnier. La figure montre en bas, à droite, le tuyau d'évacuation de l'eau, et, par derrière, le tuyau d'arrivée de vapeur; en bas, à gauche de la coupe longitudinale, le tuyau d'arrivée d'eau. Dans la coupe transversale, le condenseur est la chambre placée en haut et à droite; la pompe à air, en dessous, a une bien plus grande capacité.

lieu, de sorte qu'en fin de course du piston, le corps de pompe ne contient plus en apparence que de l'eau; mais, cette eau renferme de l'air en émulsion, ainsi que le montrent les diagrammes de la figure 231.

Les clapets d'aspiration, soumis à de faibles différences de pression, ne fonctionnent pas toujours bien : en restant indue-

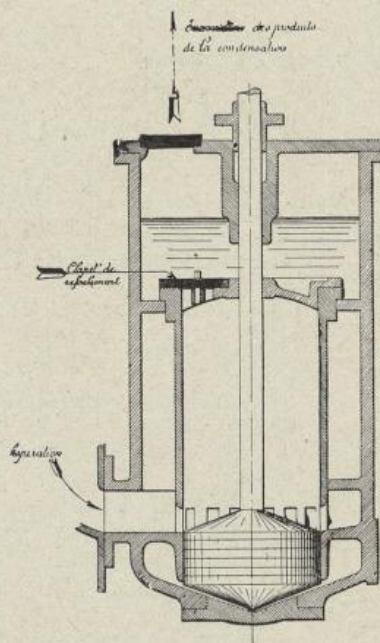


FIG. 236. — Pompe à air Edwards, sans clapets d'aspiration. En descendant, le piston fait le vide dans le corps de pompe, jusqu'à ce qu'il communique avec le condenseur par les ouvertures démasquées en fin de course.

ment ouverts, ils troublent la marche du condenseur. Une solution ingénieuse consiste à supprimer cet organe délicat : il suffit que la communication du condenseur et de la pompe s'établisse en fin de course du piston, par des ouvertures qu'il démasque. Telles sont les pompes Edwards (fig. 236), à simple effet, Eastwood et Smith (fig. 237), à double effet, ainsi que celle de la figure 238, à double effet.

68. **Extraction séparée de l'air et de l'eau.** — Les anciens condenseurs, avec leur pompe unique pour l'air et pour l'eau,

sont simples, mais peu efficaces, à cause de l'addition des pressions de l'air et de la vapeur, et du fonctionnement médiocre de

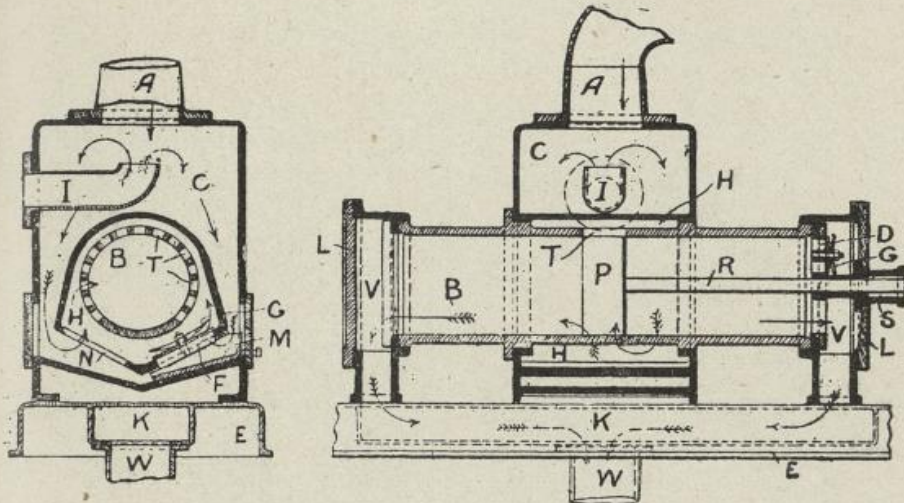


FIG. 237. — Pompe à air Eastwood et Smith, à double effet, sans clapets d'aspiration. L'entrée de l'eau et de l'air dans la pompe se fait par les ouvertures N, la sortie par les clapets placés en V. On n'utilise qu'environ la moitié de la course du piston. En munissant de clapets d'aspiration les orifices N (comme on le voit en F sur la figure), la course entière est utilisée.

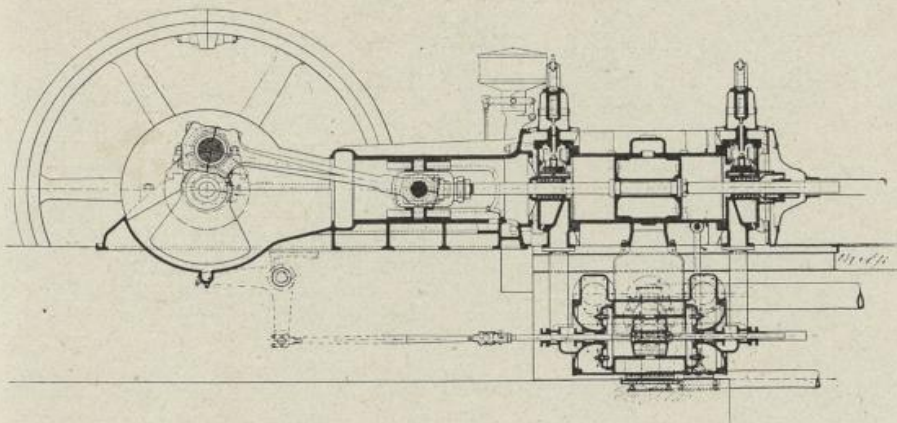


FIG. 238. — Machine à vapeur équicourant, de la Société alsacienne de Constructions mécaniques, avec pompe à air, à double effet, sans clapets d'aspiration (Voir fig. 222).

drique verticale, qui reçoit l'eau à la partie supérieure; l'air est extrait, par une pompe à air seul, en haut de l'appareil, tandis que l'eau s'écoule par le bas. Il résulte de ces dispositions que la température n'est pas la même dans toute l'étendue du conden-

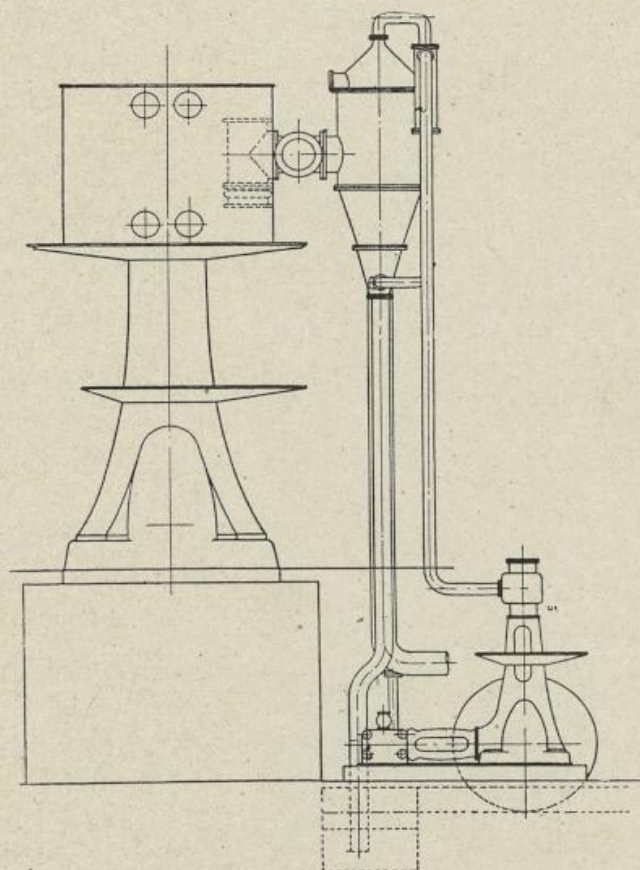


FIG. 240. — Condenseur barométrique Allis-Chalmers, accolé à une machine pilon. La pompe à air seul, verticale pilon, est commandée par un moteur à vapeur horizontal.

seur : à la partie supérieure, elle est voisine de la température initiale de l'eau d'injection, et la pression de vapeur, qui s'ajoute à celle de l'air, est faible. Dans la partie inférieure, où la pression de la vapeur correspond à la température de condensation, il y a peu d'air pour majorer cette pression. La pression commune dans tout le condenseur n'est plus le total des pressions

maxima de la vapeur et de l'air. En outre, le refroidissement de l'air aspiré augmente l'effet utile de la pompe.

Dans ce condenseur barométrique, et c'est de là que vient son nom, l'écoulement de l'eau se fait par un tuyau de 10 mètres de hauteur, plongeant dans une bêche. La pompe d'extraction de l'eau est ainsi supprimée, mais il faut élever l'eau de refroidissement jusqu'au condenseur, le travail d'élévation étant toutefois en partie fourni par l'aspiration de l'appareil. Il faut aussi un tuyau d'échappement assez long pour gagner le condenseur, à moins qu'il ne soit accolé au cylindre d'une machine pilon (fig. 240).

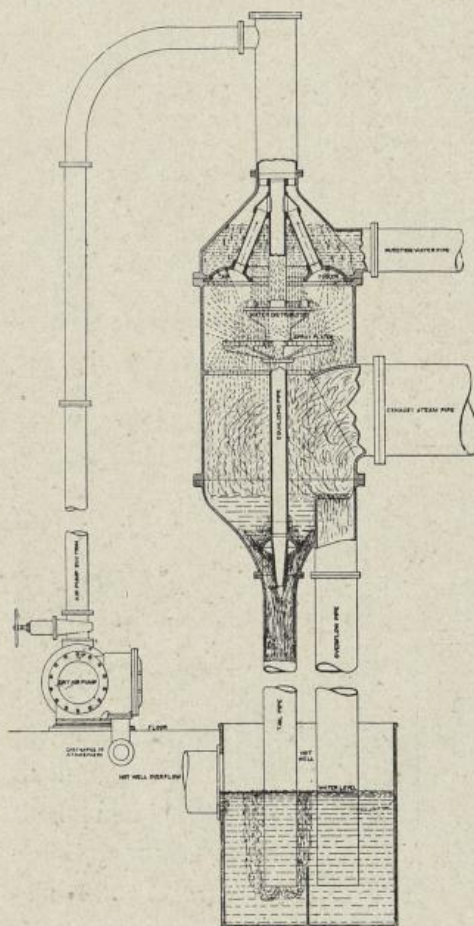


FIG. 241. — Condenseur barométrique Allis-Chalmers. L'air, aspiré par la pompe, est refroidi par l'eau d'injection, qui s'écoule ensuite en nappes dans le condenseur. L'orifice de sortie de l'eau est disposé en éjecteur, pour aspirer l'air par le tuyau central, en cas de non fonctionnement de la pompe. Cette disposition a conduit à un diamètre relativement faible pour le tuyau d'écoulement, afin de réaliser une vitesse suffisante de l'eau; il a fallu par suite prévoir un second tuyau d'écoulement, pour les grands débits.

Le condenseur barométrique a été proposé en 1864, et décrit dans les *Annales des Mines* (6^e série, t. VI, p. 346), par M. Carré, chef d'escadron d'état-major.

La pompe à air, prévue dans ce projet, paraît insuffisante, bien qu'aucune dimension précise n'en soit donnée

Le condenseur Weiss (fig. 239) est disposé pour éviter l'entraînement éventuel d'eau à la pompe à air, qui se produit lorsqu'elle abaisse par trop la pression. Il est muni d'un tuyau d'évacuation de l'eau entraînée, puis, sur l'aspiration de la pompe, d'un robinet d'entrée d'air, dont l'ouverture automatique relève légèrement la pression en cas d'entraînement.

Le condenseur Allis-Chalmers (fig. 241 et 242) est disposé en éjecteur, de manière à aspirer au besoin l'air par le tuyau d'écoulement de l'eau.

La disposition du condenseur barométrique est ingénieuse; la pompe d'extraction d'eau est supprimée, et il offre toutes garanties contre le retour d'eau au moteur. Mais l'installation en est compliquée; il exige de longues tuyauteries : aussi est-il peu employé, du moins en

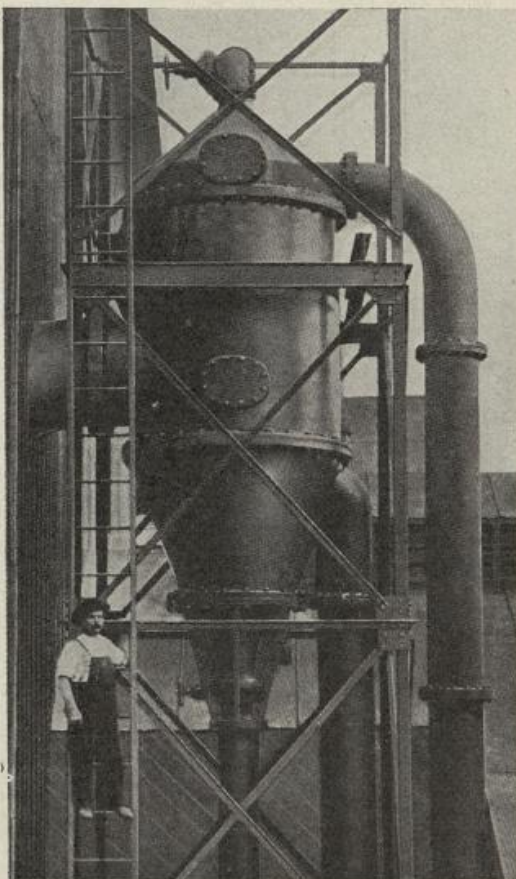


FIG. 242.

Condenseur barométrique Allis-Chalmers.

France. Il est presque toujours plus simple d'extraire l'eau par une pompe, dont le fonctionnement n'offre aucune difficulté sérieuse.

Cette pompe d'extraction est souvent centrifuge (fig. 243); la charge à l'aspiration y est faible, ce qui conduit à donner de larges sections au tuyau d'aspiration et à l'ouïe. L'eau n'est,

d'ailleurs, pas complètement privée d'air, ce qui augmente le volume débité.

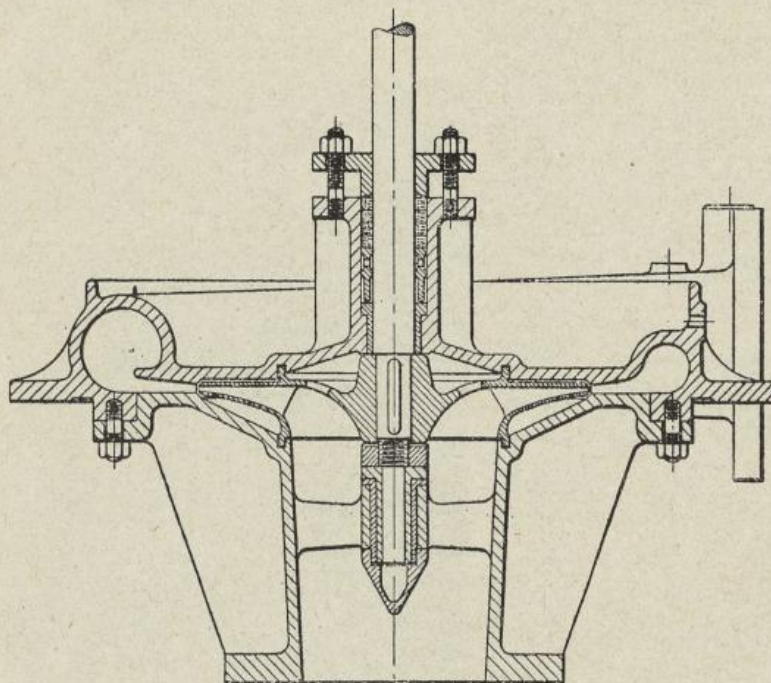


FIG. 243. — Pompe centrifuge pour extraction de l'eau d'un condenseur.

69. Trompes et éjecteurs. — Pour l'extraction de l'air, on substitue avec avantage à la pompe à piston les appareils à entraînement par un fluide, trompes à eau et éjecteurs à vapeur.

La Compagnie Electro-Mécanique emploie, pour l'aspiration de l'air, une trompe (fig. 244), à laquelle l'eau motrice est fournie par une pompe centrifuge, à moins qu'on ne dispose d'eau sous pression suffisante.

Dans la trompe Westinghouse-Leblanc (fig. 245), l'eau est envoyée d'une manière toute spéciale, en nappes minces isolées, afin de faciliter l'entraînement de l'air. Une pompe centrifuge à débit partiel, sur une petite portion de sa circonférence, envoie ces nappes directement dans la trompe. La figure 246 représente, d'après M. M. Leblanc, les compositions des vitesses à l'entrée et à la sortie de la pompe : la vitesse absolue de sortie de l'eau, v_1 , à peu près double de la vitesse d'entraînement V_1 , est voisine de

40 mètres par seconde. En outre, l'eau s'étale sur les aubes de la pompe, et s'écoule en lames minces (fig. 247), dont l'épaisseur n'est que de quelques centièmes de millimètres. L'air à extraire

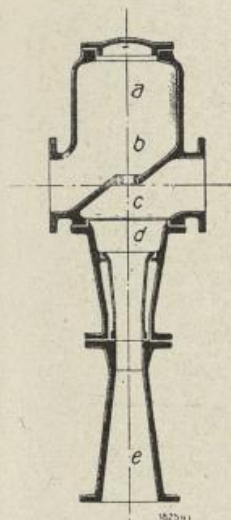


FIG. 244. — Trompe à eau pour extraction de l'air des condenseurs Brown Boveri de la Compagnie Electro-Mécanique.

a, chambre à eau; b, tuyère à eau; c, d, mélangeur; e, divergent.

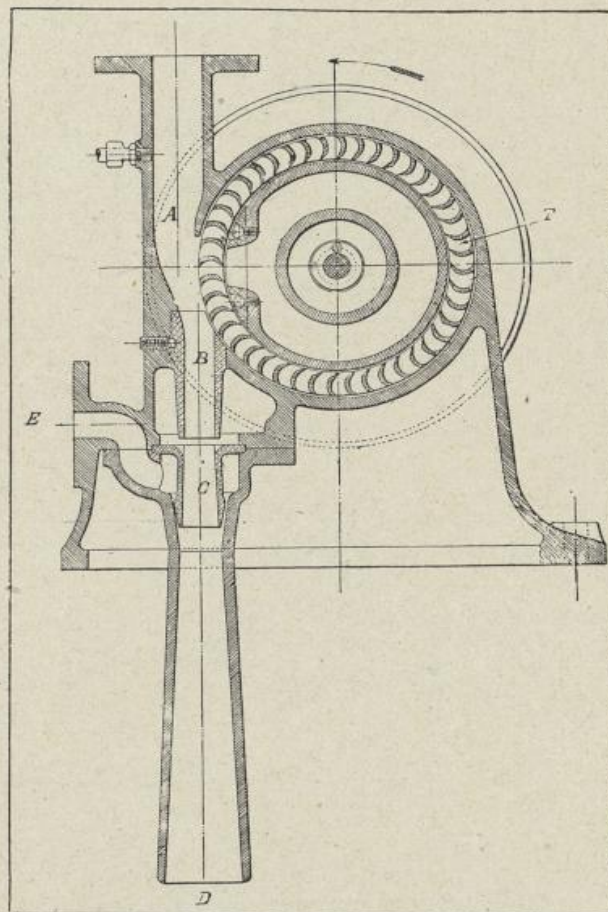


FIG. 245. — Trompe Westinghouse-Leblanc avec pompe centrifuge à débit partiel.

A, aspiration d'air; B, tuyère; D, divergent; E, arrivée de vapeur d'amorçage.

est emprisonné entre ces lames. L'amorçage se fait au moyen d'eau sous pression ou d'un jet de vapeur lancé par un éjecteur annulaire : cette action supplémentaire cesse automatiquement dès que le vide dépasse de 15 à 20 centimètres de mercure celui qui correspond à la hauteur d'aspiration de l'eau d'injection.

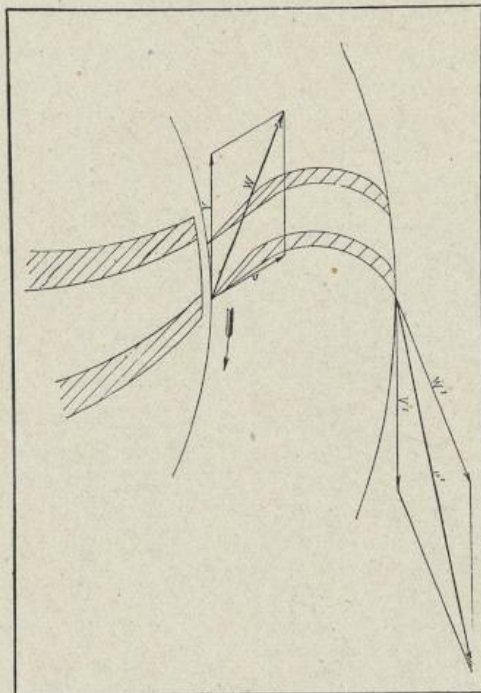


FIG. 246. — Composition des vitesses dans la pompe centrifuge.

v , vitesse absolue de l'eau à l'entrée; W , vitesse relative de l'eau à l'entrée; W_1 , vitesse relative de l'eau à la sortie; V_1 , vitesse d'entraînement; v_1 , vitesse absolue de l'eau à la sortie.

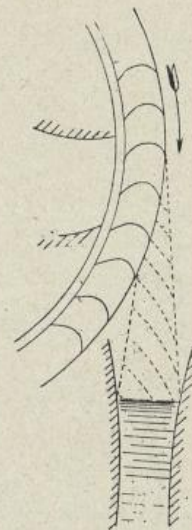


FIG. 247.
Positions schématiques des lames d'eau à la sortie de la pompe.

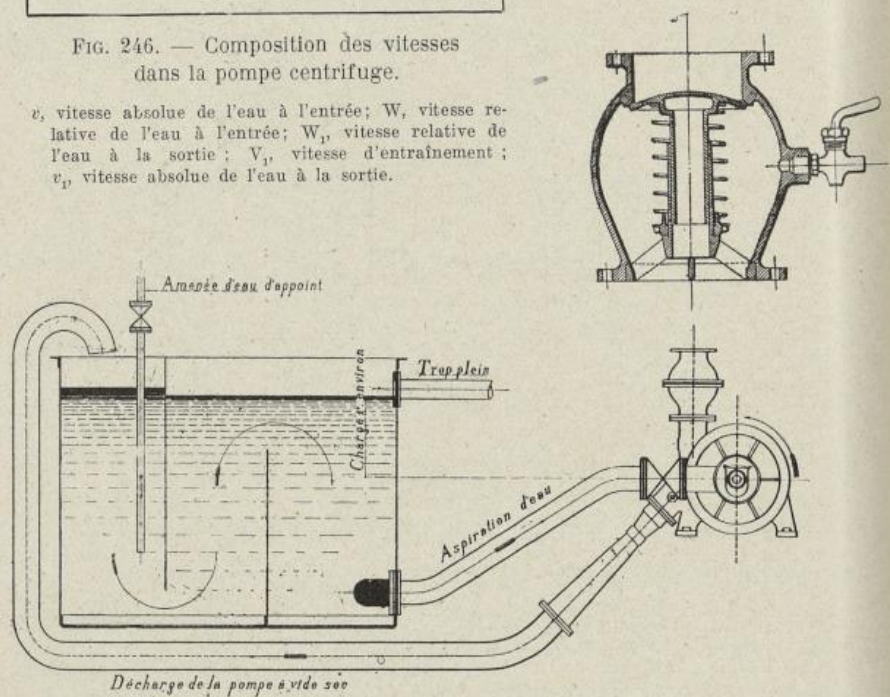


FIG. 248. — Montage en circuit fermé de la pompe de la trompe Westinghouse-Leblanc et soupape d'isolement entre la pompe et le condenseur.

Il est commode d'alimenter la trompe en circuit fermé (fig. 248); un appoint d'eau froide maintient une température constante dans la bêche.

Le condenseur de la Compagnie Electro-Mécanique (fig. 249)

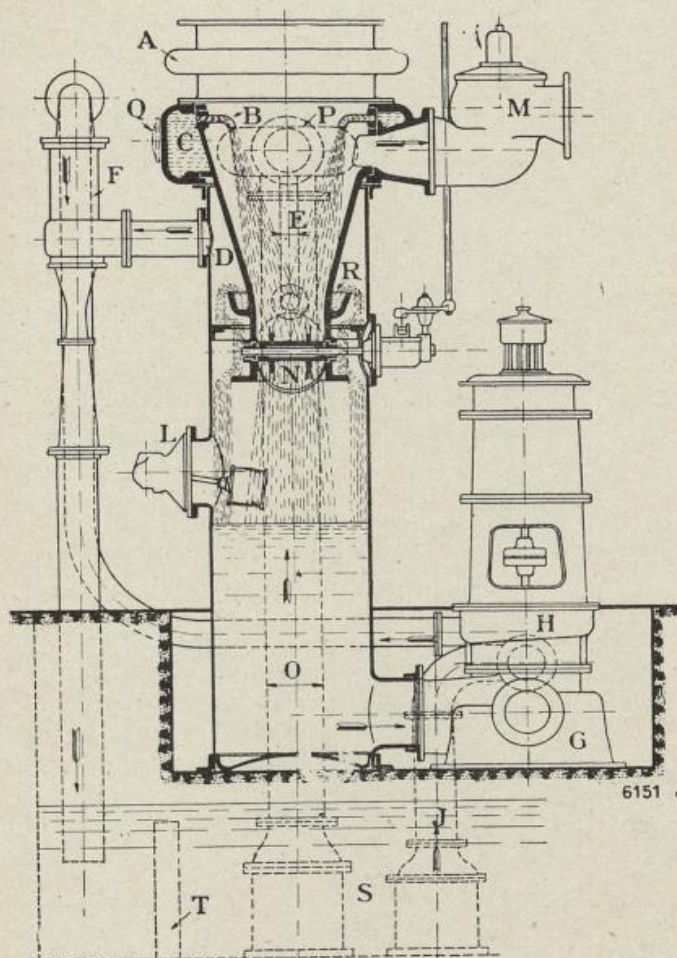


FIG. 249. — Condenseur à mélange de la Compagnie Electro-Mécanique.

O, tuyau d'aspiration d'eau; P, robinet d'injection; B, tuyères d'injection; R, auget, alimenté par le tuyau E; N, papillon; L, casse-vidé; M, soupape d'échappement dans l'atmosphère; T, barrage pour le dégagement de l'air, entraîné par la trompe.

reçoit une double injection d'eau, aspirée dans un réservoir inférieur. L'injection principale se fait par des tuyères qui entourent l'arrivée de vapeur; l'injection secondaire, par un auget circulaire placé auprès de l'aspiration d'air, produite par une trompe

à eau fonctionnant en circuit fermé. Pour la mise en marche, on ferme le papillon N et on aspire l'air par la trompe; on ouvre ensuite le papillon, puis le robinet d'injection. Le flotteur du casse-vidé ouvre d'abord une petite soupape, puis une grande, si l'eau continue à monter.

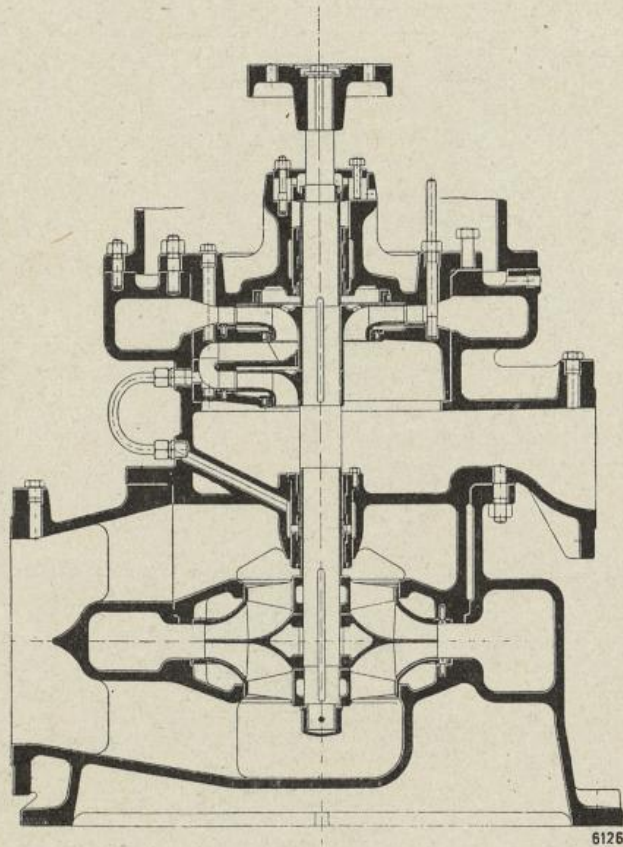


FIG. 250. — Pompes du condenseur à mélange de la Compagnie Electro-Mécanique. En haut, pompe de la trompe d'extraction d'air, à deux étages; en bas, pompe d'extraction de l'eau.

La pompe d'extraction de l'eau et celle de la trompe (fig. 250) sont montées sur le même axe vertical.

Dans le condenseur à mélange Westinghouse-Leblanc (fig. 251 et 251 bis), l'eau est extraite par une pompe centrifuge, généralement calée sur le même arbre que la pompe de la trompe. On remarquera que l'eau et la vapeur à condenser cir-

culent dans le même sens. La circulation *méthodique*, en sens inverse, est peut-être meilleure théoriquement, mais l'avantage,

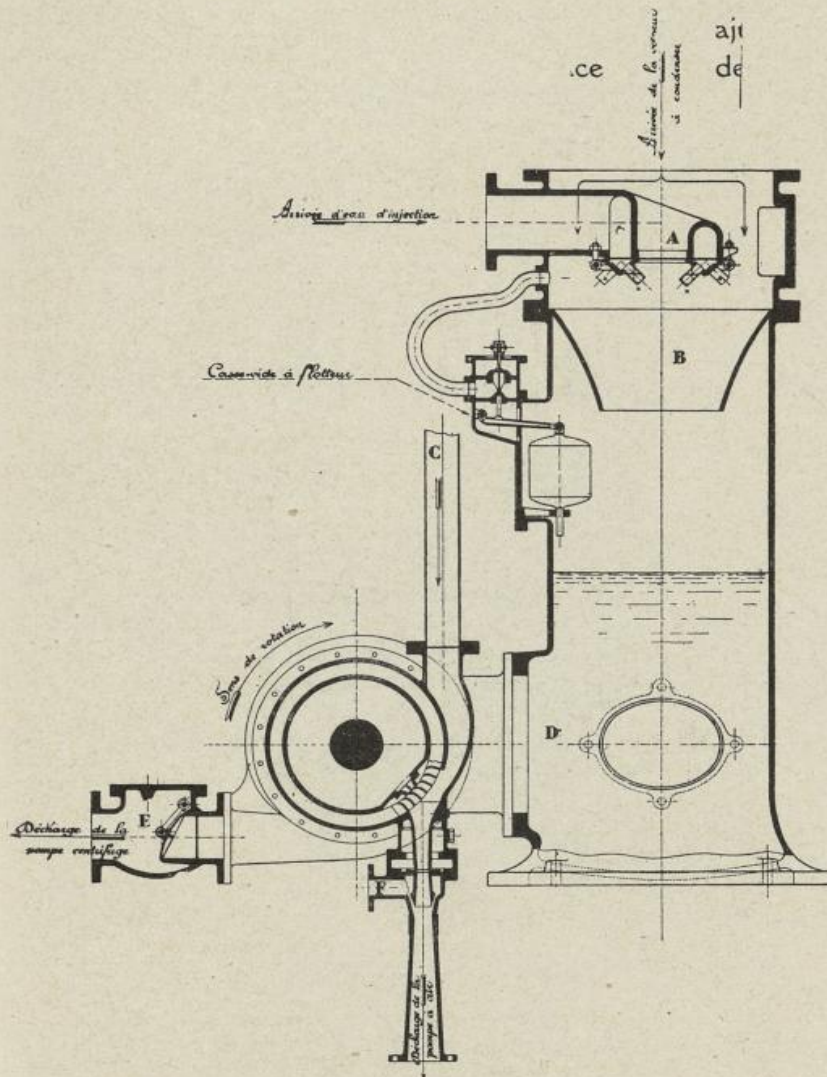


FIG. 251. — Condenseur à mélange Westinghouse-Leblanc; coupe verticale perpendiculaire à l'axe des pompes. L'aspiration d'air, C, se branche sur le condenseur, un peu en dessous de l'attache du cône B.

dans l'espèce, est minime, tandis que la disposition d'ensemble serait moins simple.

L'axe des pompes est parfois disposé verticalement (fig. 252), ce qui peut être commode pour en placer le moteur sur le parquet de la salle des machines, si les inondations sont à craindre.

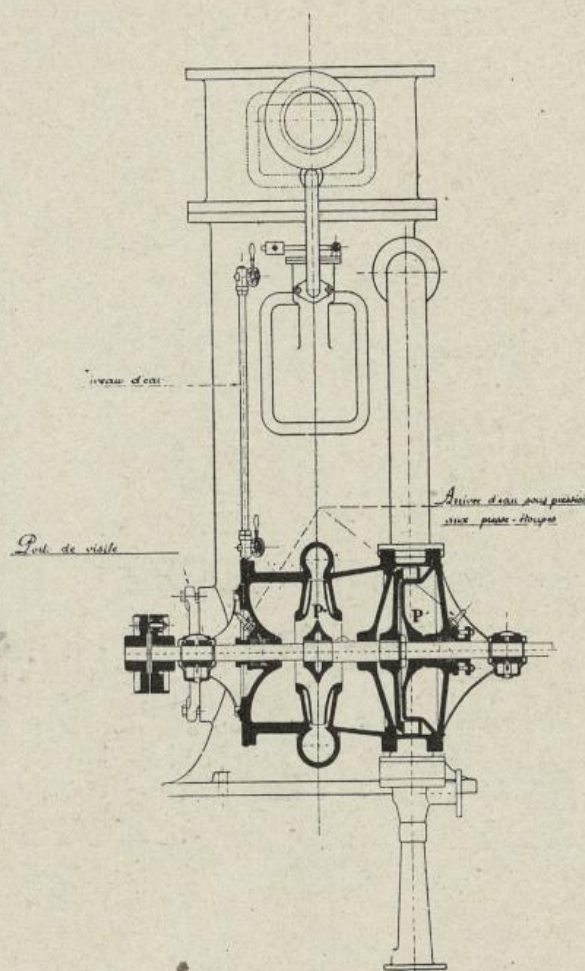


FIG. 251 bis. — Condenseur à mélange Westinghouse-Leblanc; coupe verticale par l'axe des pompes.

La figure 253 représente le montage du condenseur, avec sa tuyauterie. La vanne d'arrêt d'échappement au condenseur, indiquée sur cette figure, n'existe pas toujours. La mise en marche de la machine desservie se fait avec échappement à l'air libre (s'il n'y a pas de vanne d'arrêt, l'échappement a lieu aussi à tra-

vers le condenseur et par le divergent de la trompe); puis on ouvre l'admission d'eau sous pression dans la conduite d'injection et dans la conduite d'amenée à la trompe, conduites munies de clapets de pied; on met les pompes en marche. Dès qu'un vide suffisant est établi, on ferme les admissions d'eau sous pression, l'aspiration se faisant dans le puisard d'eau froide.

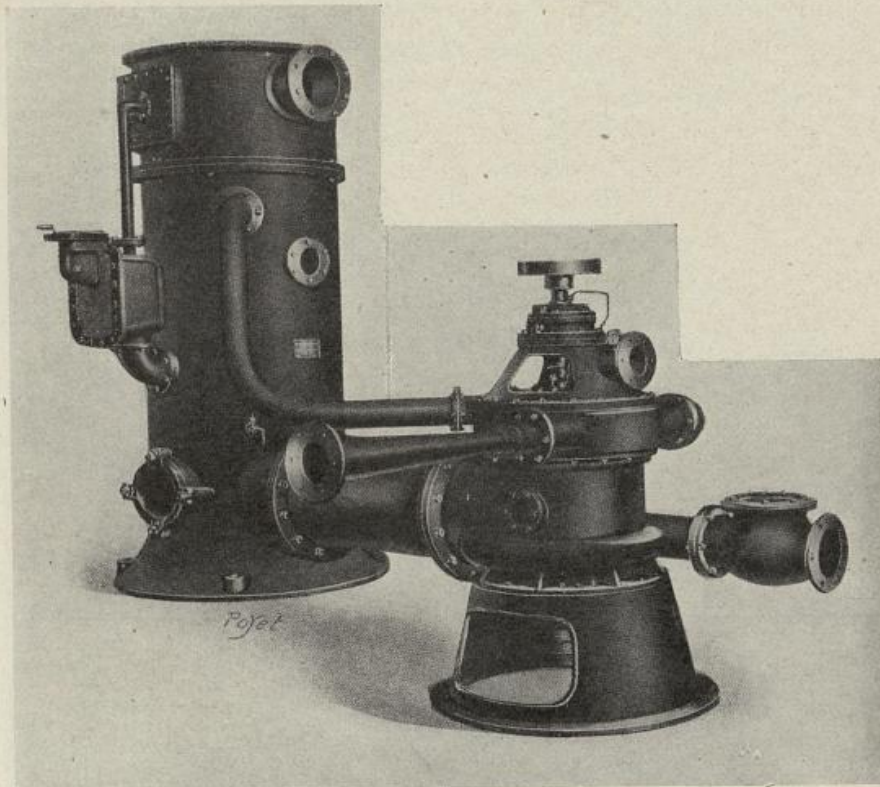


FIG. 252. — Condenseur à mélange Westinghouse-Leblanc, avec axe vertical des pompes.

Les pompes sont commandées par un moteur électrique ou par une turbine à vapeur.

Les trompes à eau exigent presque toujours une pompe spéciale qui les alimente : pour simplifier l'installation, on leur substitue parfois des éjecteurs, alimentés par la vapeur des chaudières. Il faut toutefois remarquer que la pompe de la trompe est commandée par le moteur nécessaire pour d'autres

pompes du condenseur, de sorte que la complication qu'elle entraîne n'est pas bien grande.

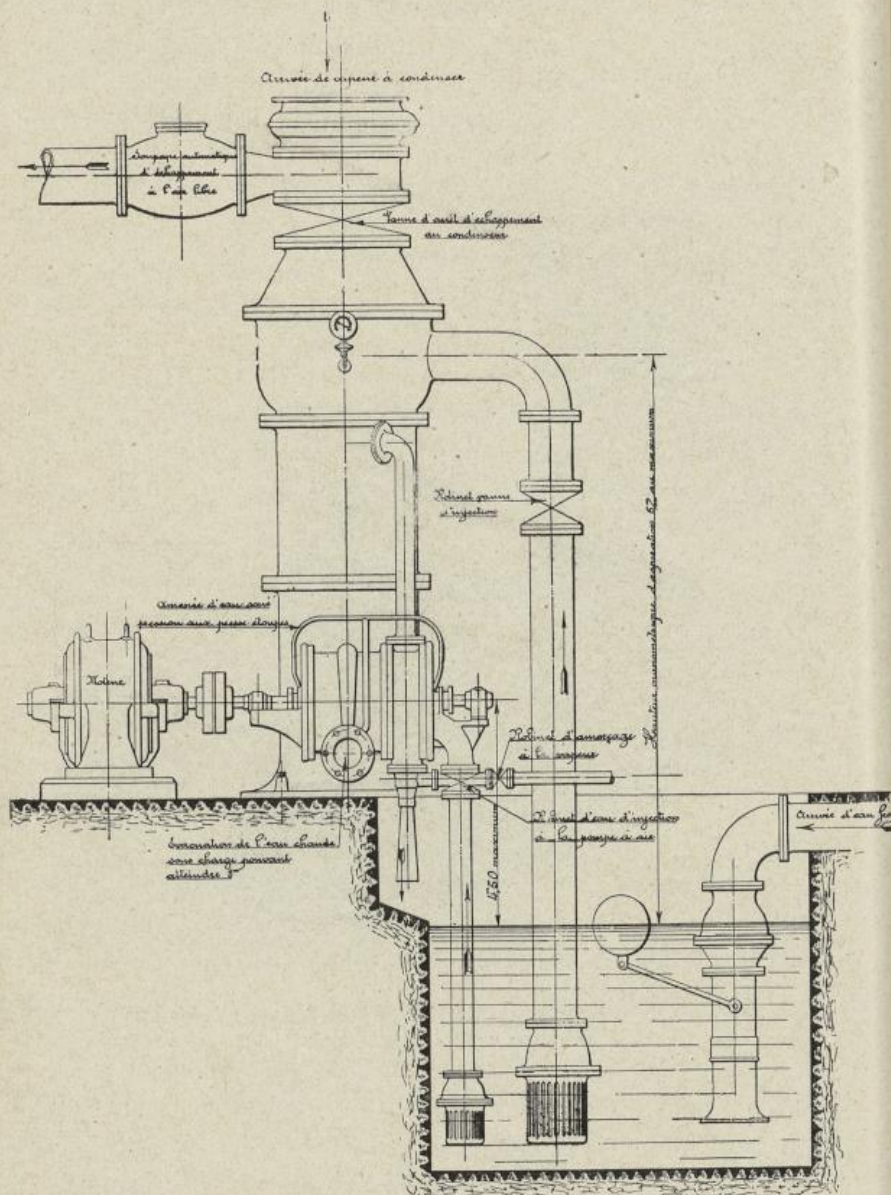


FIG. 253. — Montage d'un condenseur par mélange Westinghouse-Leblanc.

L'emploi de l'éjecteur à vapeur, mais comme simple annexe de la pompe à air ordinaire, est assez ancien : Parsons l'avait

cômbiné, pour un condenseur à surface, avec la pompe à air ordinaire à piston. L'éjecteur *a* (fig. 254) aspire en *k* l'air du condenseur et le refoule dans un condenseur auxiliaire S, où il est repris par la pompe *h*, qui se trouve mieux utilisée parce qu'elle aspire l'air à une pression plus élevée que dans le condenseur principal.

Le fonctionnement de l'éjecteur, comme pompe à air, est d'ailleurs assez délicat : on a éprouvé de grandes difficultés à réaliser des appareils fonctionnant bien au démarrage et en marche courante, avec des proportions d'air variables. Ce n'est qu'à la suite

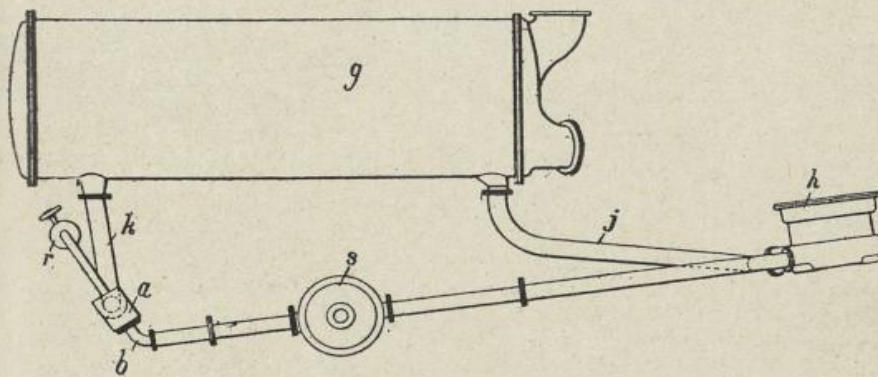


FIG. 254. — Ejecteur et pompe à air Parsons (*vacuum increaser*), sur un condenseur à surface.

g, condenseur; *k*, extraction de l'air; *a*, éjecteur à vapeur; S, condenseur auxiliaire; *h*, pompe à air à piston; *d*, extraction de l'eau.

de longues et minutieuses études qu'on a pu obtenir une marche satisfaisante. La question a été tout particulièrement étudiée par M. Maurice Leblanc (1) et par M. Delaporte (2).

Les appareils réalisés comportent deux éjecteurs en série, avec ou sans condenseur intermédiaire, et avec ou sans rentrée d'air occasionnelle entre les deux éjecteurs.

En employant la vapeur rejetée par le second éjecteur à réchauffer l'eau d'alimentation, on récupère les calories qu'elle contient. Toutefois, si la chaufferie comprend un réchauffeur d'eau d'alimentation, cette récupération peut être illusoire, puis-

(1) *Bulletin de l'Association technique maritime*, session de 1911.

(2) *Bulletin de l'Association technique maritime*, session de 1914.

éjecteur des dimensions convenables. Lors de l'amorçage, le débit est relativement considérable, tandis qu'il diminue en marche normale. Le divergent ayant une section convenable à l'amorçage, n'est plus rempli par la veine fluide en marche normale, d'où résultent des mouvements tourbillonnaires.

Pour faire disparaître ce trouble, M. M. Leblanc a disposé, un peu en amont du col du divergent, une tuyère annulaire communiquant avec l'extérieur : l'aspiration d'air par cette tuyère augmente le débit dans le divergent et fait disparaître les mouvements tourbillonnaires. L'extracteur ainsi construit se montre stable dans toutes les conditions de marche.

La Société de Condensation et d'Applications mécaniques, qui construit cet extracteur, en a également étudié un type avec condenseur intermédiaire (fig. 257) : le second éjecteur n'aspire plus que l'air privé de la plus grande partie de la vapeur du premier. Dans ce condenseur intermédiaire, l'eau de refroidissement, d'une part, la vapeur et l'air, d'autre part, circulent en sens inverses.

L'éjectair Bréguet, établi à la suite des travaux de M. Delaporte, comporte deux éjecteurs, avec condenseur intermédiaire, et rentrée d'air occasionnelle entre les deux éjecteurs.

M. Delaporte a déduit, de ses études, la règle suivante, pour obtenir d'un éjecteur une marche régulière : il est nécessaire que le poids de fluide qu'il débite (vapeur et gaz entraînés sous certaines conditions d'équivalence) ne descende pas en dessous d'un certain minimum. Pour une section d'un centimètre carré au col, avec échappement dans l'atmosphère, ce minimum est de 56 kg. 5 par heure. Il s'ensuit que, pour obtenir un fonctionnement toujours stable, le poids de la vapeur motrice seule doit atteindre cette valeur; même, pour prévoir un abaissement de pression dans la chaudière, qui réduit le débit, il est bon de porter ce poids à 63 ou 70 kilogrammes. Mais l'éjecteur ainsi suralimenté perd son pouvoir d'extraction et ne donne pas un abaissement de pression suffisant.

La solution de M. Delaporte consiste à ménager, entre deux éjecteurs en série, une rentrée d'air occasionnelle, destinée à ramener constamment à la valeur convenable le poids débité

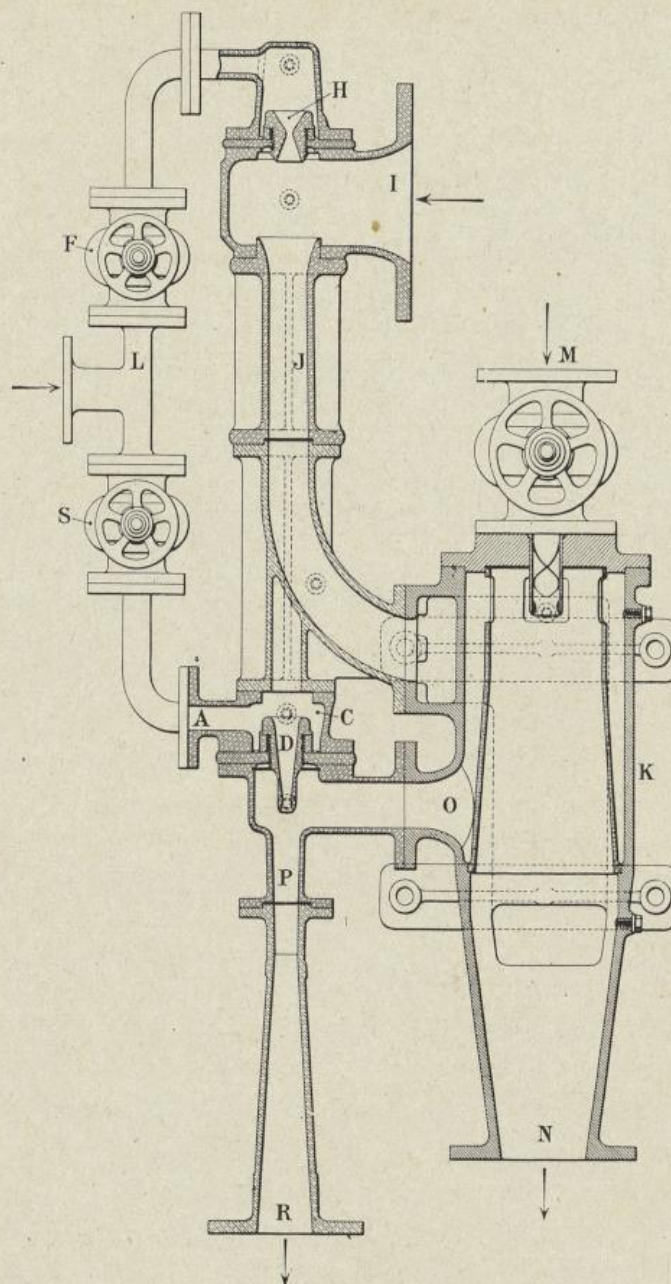


FIG. 257. — Extracteur d'air Westinghouse-Leblanc, avec condenseur intermédiaire, de la Société de Condensation et d'Applications mécaniques.

L, arrivée de vapeur; I, aspiration d'air; H, éjecteur d'amont; M, arrivée d'eau de condensation; K, condenseur; N, sortie d'eau du condenseur; D, éjecteur d'aval.

par le second éjecteur, lorsque la quantité d'air provenant du

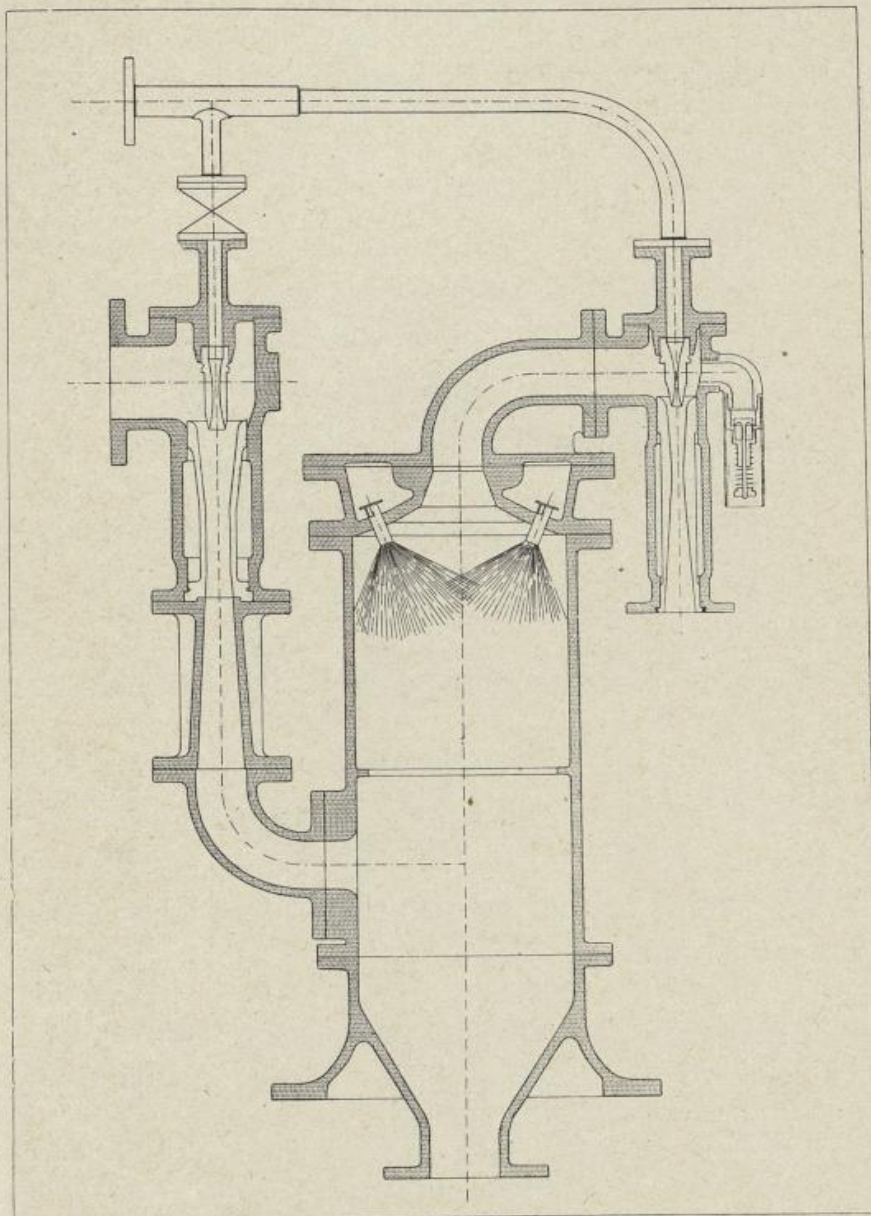


FIG. 258. — Ejectair Bréguet, type *Alpha*.

condenseur n'est pas suffisante. L'*ejectair type Alpha* (fig. 258) comprend un premier éjecteur, qui extrait l'air humide du con-

denseur, un condenseur auxiliaire, le plus souvent à mélange, et un second éjecteur, stabilisé par une addition d'air fournie par un reniflard. Il comprend aussi d'ordinaire un refroidisseur de l'air aspiré. L'eau du condenseur auxiliaire est reprise par la pompe d'extraction. Deux autres types d'appareils fonctionnent sans rentrée d'air :

L'éjectair type *Bêta* (fig. 259) a un condenseur auxiliaire à

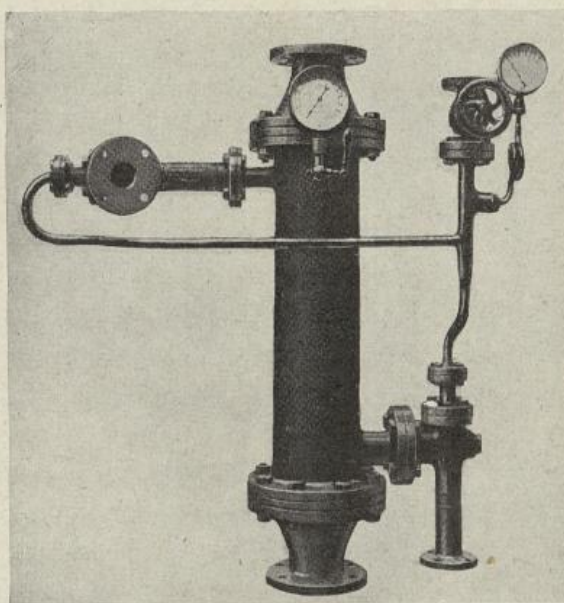


FIG. 259. — Ejectair Bréguet, type *Bêta*, avec condenseur intermédiaire à surface. A gauche, premier éjecteur, horizontal, avec bride recevant le tuyau d'aspiration d'air; à droite, en bas, second éjecteur, vertical.

surface, dont l'eau condensée est extraite par le second éjecteur, en même temps que l'air. Cette petite extraction d'eau a un effet stabilisateur et permet de supprimer l'addition d'air. Ce type *Bêta* dépense un peu plus de vapeur que le précédent. En faisant traverser le condenseur auxiliaire par la totalité de l'eau d'injection du condenseur principal, l'échauffement de cette eau est insignifiant, et les tubes ne s'entartrent pas.

L'éjectair type *Gamma*, beaucoup moins économique que les précédents, ne comporte pas de condenseur auxiliaire. Il ne con-

vient pas pour les condenseurs, mais trouve son emploi pour la formation du vide dans certains récipients.

Le condenseur à mélange Bréguet (fig. 260), avec éjectair type Alpha, est à courants parallèles. Les busettes d'injection, disposées en couronne à la périphérie, envoient l'eau pulvérisée en

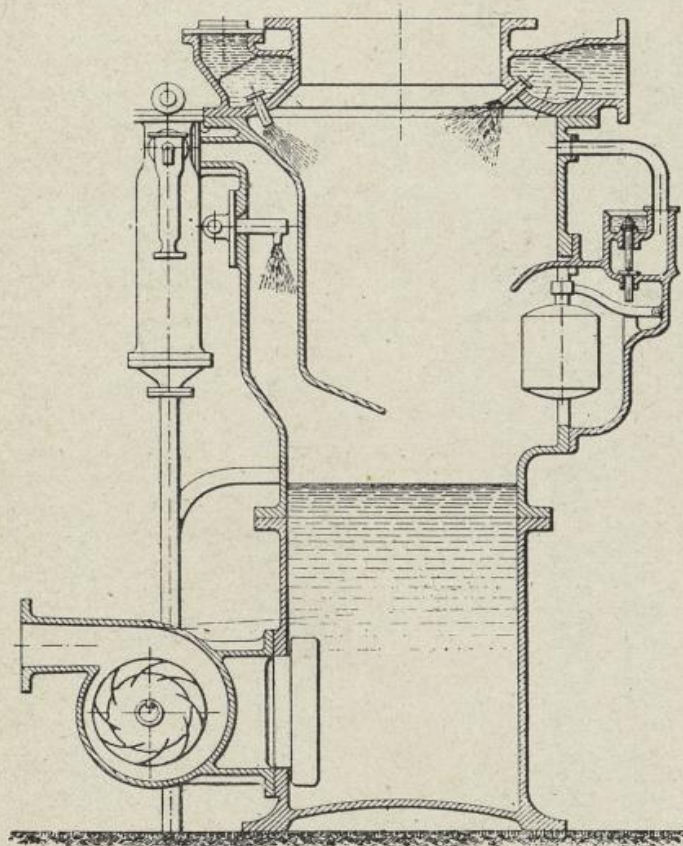


FIG. 260. — Condenseur à mélange Bréguet.

gerbes qui se recoupent dans toute la chambre de condensation. Un refroidisseur, inclus dans le condenseur, contracte l'air aspiré; il est alimenté par une dérivation de l'eau d'injection, ou mieux, d'eau plus froide, dont on dispose dans les installations comportant un réfrigérant, pour réparer les pertes.

La dépense totale de vapeur de l'éjectair est souvent inférieure à 2 p. 100 de la quantité condensée. On peut d'ailleurs se servir

de la vapeur de l'éjecteur d'aval, soit les $\frac{5}{8}$ du total, pour réchauffer l'eau d'alimentation des chaudières.

La pompe d'extraction est du type centrifuge, et le condenseur est muni d'un *casse-vide*.

70. **Ejecto-condenseurs.** — L'éjecto-condenseur est, en principe, analogue à l'injecteur à vapeur d'échappement. C'est un

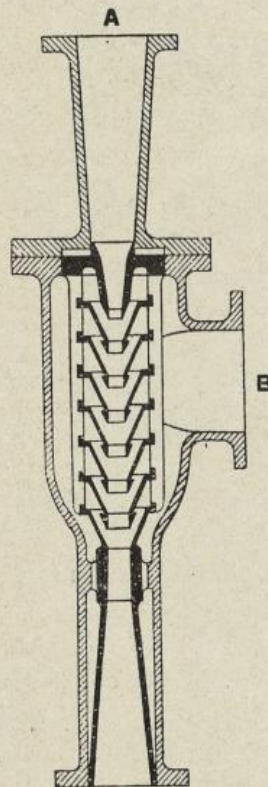


FIG. 261. — Ejecto-condenseur à tuyères multiples.

A, entrée d'eau, sous une charge de 5 m. au moins; B, entrée de vapeur.

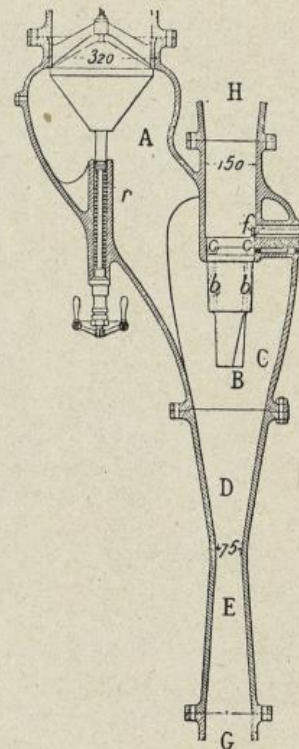


FIG. 262.

Ejecto-condenseur Rateau.

H, arrivée d'eau de condensation; B, tuyère à eau; A, arrivée de vapeur à condenser.

éjecteur qui reçoit la vapeur d'échappement d'un moteur, et, d'autre part, l'eau de condensation, de préférence en charge. La pression dans le mélangeur peut être assez faible; elle se relève, dans le divergent, jusqu'à la pression atmosphérique. L'air du condenseur est entraîné en même temps que la vapeur.

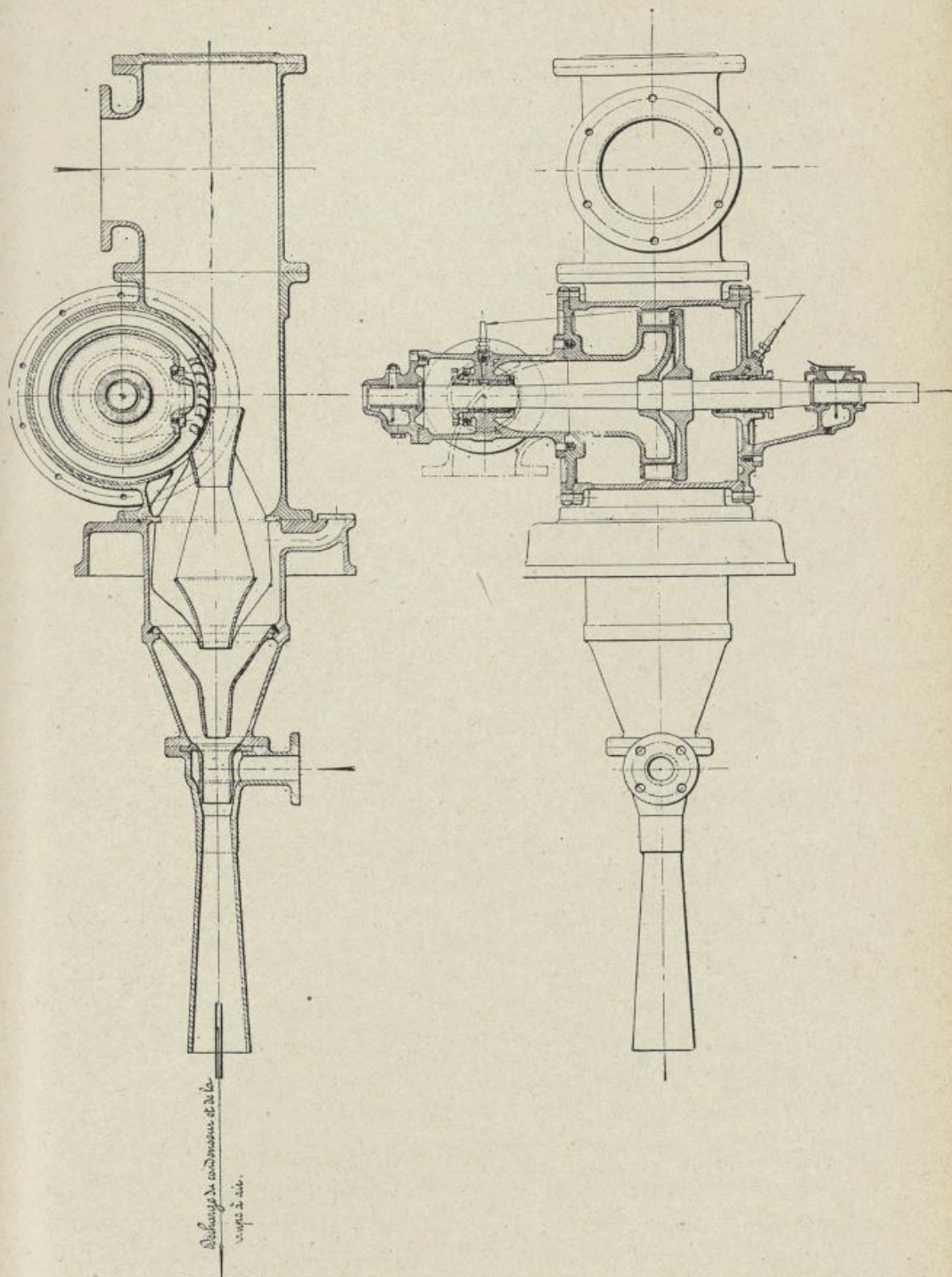


FIG. 263. —Ejecto-condenseur (pour moteur à piston) Westinghouse-Leblanc, de la Société de Condensation et d'Applications mécaniques.

L'éjecto-condenseur de Morton recevait au besoin, par une tuyère centrale, un jet supplémentaire de vapeur empruntée à la chaudière. D'après des expériences de Rankine, en 1868, il ramenait la contre-pression sur le piston d'un moteur à 0 kg. 2

ou 0 kg. 3 par centimètre carré. La figure 261 représente un des meilleurs types anciens d'éjecto-condenseurs.

On améliore le fonctionnement en prolongeant le divergent par un tube vertical d'aspiration, dont la longueur peut atteindre 10 mètres, comme dans le condenseur barométrique (fig. 239).

M. Rateau a perfectionné l'éjecto-condenseur (fig. 262); la tuyère d'injection présente quatre orifices en forme de croix, qui augmentent la surface de la veine liquide; elle porte un dispositif de réglage du débit, automatique ou à la main (1). Ce réglage consiste en addition ou suppression de jets supplémentaires; il permet de proportionner le débit de l'eau au débit de vapeur à condenser. La vapeur arrive par le conduit latéral A, muni d'une soupape de retenue empêchant le retour d'eau

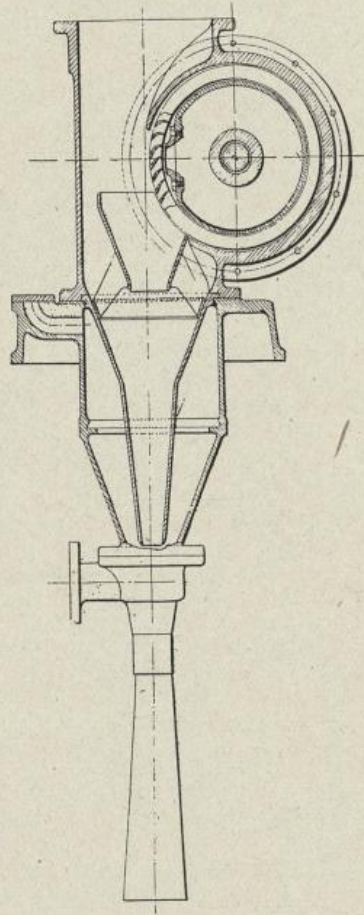


FIG. 264. — Ejecto-condenseur Westinghouse-Leblanc, pour turbine à vapeur.

au moteur. L'eau doit être fournie sous une charge de 5 à 6 mètres, sinon une admission supplémentaire de vapeur vive de la chaudière, par une tuyère spéciale, devient nécessaire. Autant

(1) *Revue de mécanique*, juin 1902, p. 543.

que possible, l'appareil doit être à quelques mètres au-dessus du bassin d'évacuation.

En modifiant la trompe à eau Westinghouse-Leblanc, on la transforme en éjecto-condenseur (fig. 263). Cet appareil se construit pour des débits de 300 à 4.000 kilogrammes de vapeur à l'heure, la vitesse de la pompe variant de 1.440 à 960 tours par

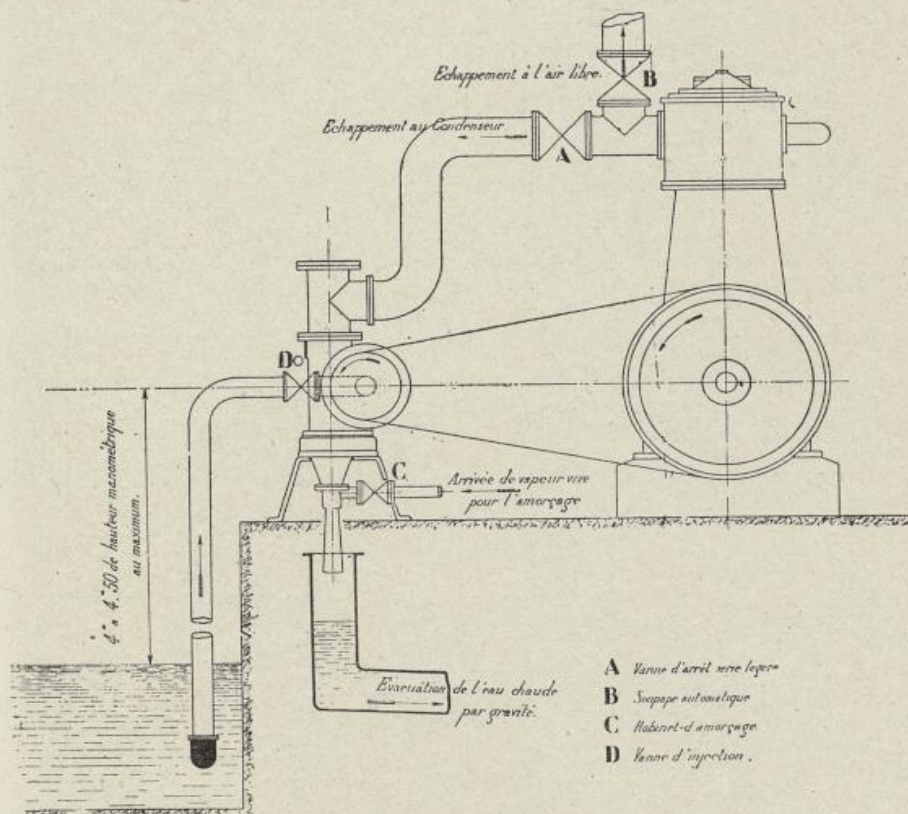


FIG. 265. — Montage de l'éjecto-condenseur Westinghouse-Leblanc sur une machine pilon.

minute. La principale modification consiste en addition de cônes à emboîtages circulaires, dits *stabilisateurs ramasseurs*, dont la disposition est différente suivant que l'appareil dessert un moteur à piston ou une turbine à écoulement continu de vapeur (fig. 264).

L'extrémité du diffuseur doit toujours être à 20 ou 25 centimètres au moins au-dessus du plan d'eau dans le canal de

décharge, de sorte que le vide est détruit par une rentrée d'air à travers le diffuseur, au moment de l'arrêt voulu ou intempestif du condenseur. Toutefois quelques litres d'eau sont projetés à

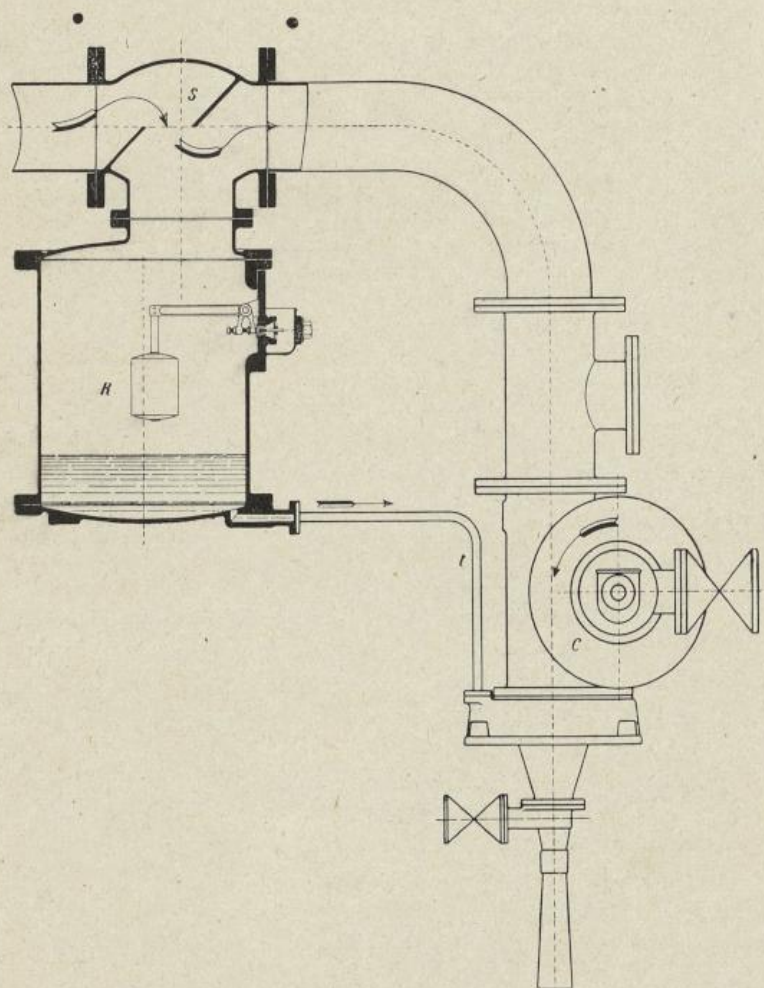


FIG. 266. — Ejecto-condenseur Westinghouse-Leblanc, avec casse-vide.
Dès que le flotteur actionne la soupape de rentrée d'air, l'eau s'écoule.

l'arrière, au moment du désamorçage; pour rendre ce retour inoffensif, il suffit de brancher latéralement l'arrivée de vapeur (fig. 265).

Si on n'a pas l'entière certitude que l'extrémité du diffuseur ne

sera jamais noyée, il est prudent d'insérer un dispositif *casse-vide* dans la tuyauterie d'échappement (fig. 266).

L'eau en charge ne sert que pour l'amorçage; en marche normale, elle est aspirée.

71. Refroidissement de l'eau. — Lorsqu'on ne dispose pas des grands débits nécessaires pour la condensation, on refroidit au contact de l'air l'eau sortant du condenseur pour l'utiliser de nouveau. Le refroidissement tient à deux causes, l'échauffement de l'air et l'évaporation. Si cette seconde cause agissait seule, le poids évaporé serait voisin du poids de la vapeur condensée.

La température initiale de l'eau étant connue, et celle qu'on veut obtenir étant fixée, le nombre maximum de calories que peut prendre un mètre cube d'air dépend de sa température, de son état hygrométrique et de sa pression. Ce nombre est atteint lorsque l'air sort saturé d'humidité à la température initiale de l'eau. Le tableau ci-après fournit les données nécessaires pour ce calcul.

TEMPÉRATURE	POIDS DE VAPEUR dans un m ³ d'air à saturation	PRESSION de la vapeur en kg. par cm ²	CHALEUR LATENTE de vaporisation, calories par kg.
0°	5	0,0063	606
5°	7	0,0089	603
10°	9	0,0125	599
15°	13	0,0173	596
20°	17	0,0236	593
25°	23	0,0320	589
30°	30	0,0429	586
35°	39	0,0569	582
40°	51	0,0747	579
45°	65	0,0971	575
50°	83	0,1251	571
55°	105	0,1597	568

Soit, par exemple, l'eau à refroidir de 45° à 30°, l'air ambiant étant à 10°, avec état hygrométrique 0,5, sous la pression de 760 millimètres de mercure ou de 1,033 kilogrammes par centimètre carré. Cet air quitte le réfrigérant à 45° : la chaleur spéci-

fique de l'air, sous pression constante, étant 0,24, son échauffement exige un nombre de calories égal à son poids, en kilogrammes, multiplié par 35 et par 0,24 (1). Comme la pression de la vapeur, à 10°, est de 0 kg. 0125 par centimètre carré, celle de l'air seul, à l'état hygrométrique 0,5, sera 1,033 — 0,006 = 1 kg. 027 par centimètre carré ; le poids du mètre cube variant proportionnellement à la pression et en raison inverse de la température absolue, ce poids sera :

$$1,293 \times \frac{1,027}{1,033} \times \frac{273}{283} = 1 \text{ kg. } 25.$$

Le mètre cube d'air prend donc :

$$1,25 \times 35 \times 0,24 = 10,5 \text{ calories.}$$

Le volume de l'air augmente, quand il s'échauffe de 10° à 45° ; en outre, comme il est saturé de vapeur, dont la pression, à 45°, est de 0 kg. 097 par centimètre carré, sa pression propre se réduit à :

$$1,033 - 0,097 = 0 \text{ kg. } 936 \text{ par centimètre carré.}$$

Le volume d'une masse d'air variant en raison inverse de la pression et proportionnellement à la température absolue, le mètre cube initial devient :

$$\frac{1,027}{0,936} \times \frac{318}{283} = 1,216.$$

Ce volume, ainsi majoré, est saturé de vapeur, pesant 65 grammes par mètre cube : le poids de la vapeur sera donc : $1,216 \times 65 = 79$ grammes.

La chaleur latente de vaporisation varie légèrement avec la température ; en prenant la valeur moyenne 580 calories par kilogramme, la formation de la vapeur exige : $580 \times 0,079 = 46$ calories.

(1) En réalité, ainsi qu'on le verra un peu plus loin, la pression de l'air ne reste pas rigoureusement constante.

Au total, le mètre cube entrant dans l'appareil enlève $10 + 46 = 56$ calories, et peut refroidir de 15° 3 kg. 7 d'eau à 45° , ou de 25° , 2 kg. 2 d'eau.

On obtient un résultat qui suffira dans bien des cas, en négligeant la proportion initiale de vapeur dans l'air, pourvu que sa température ne dépasse pas 20° , ainsi que l'augmentation de volume. Dans l'exemple choisi, on trouvera que le mètre cube d'air prendra, en s'échauffant, 10 calories, vaporisera 65 grammes d'eau, ce qui exige 38 calories, et pourra, par suite, refroidir de 15° 3 kilogrammes d'eau. Comme les hypothèses du premier calcul ne paraissent pas pouvoir être complètement réalisées, le second calcul sera sans doute plus près de la vérité. Ce n'est d'ailleurs que l'observation des appareils qui peut en faire connaître exactement le rendement.

Le calcul montre qu'à condition d'admettre au besoin une température un peu élevée pour la condensation, 45° , par exemple, le fonctionnement du réfrigérant restera satisfaisant même avec de l'air humide, pourvu qu'il ne soit pas trop chaud. Il deviendrait moins bon avec de l'air très humide à une température de 30° , mais ces conditions se présentent rarement dans les climats tempérés. Dans des conditions favorables, on amènera l'eau de 35° à 20° , sans débits d'air excessifs.

Le réfrigérant pulvérisateur Paul Sée comprend une série de jets d'eau finement divisée au-dessus d'un bassin de réception, sans aucune enveloppe. Ces jets d'eau sont lancés par des tuyères spéciales, branchées sur un réseau de conduites horizontales installées au-dessus du bassin. La surface du bassin est, en moyenne, de $0\text{ m}^2\text{ 6}$ par mètre cube d'eau à l'heure. La tuyère est très ingénieusement établie : c'est une pièce fort simple, percée d'un seul orifice d'écoulement de 13 millimètres de diamètre : la division de l'eau résulte de son arrivée tangentielle dans une boîte cylindrique dont le fond supérieur porte l'orifice d'écoulement, et du mouvement tourbillonnaire qui s'y produit. Cette tuyère débite 1.750 litres à l'heure sous une pression de 0 kg. 75 à 0 kg. 8 par centimètre carré. Cette disposition est préférable aux pommes d'arrosoir à petits trous, qui risquent de s'obstruer.

Les conduites horizontales sont espacées de 2 mètres, et, sur

chaque conduite, les tuyères distantes de 0 m. 50. L'eau s'élève à 1 m. 50 et, couvrant, en retombant, un cercle d'environ 1 m. 50 de rayon, d'une manière à peu près uniforme. La profondeur du bassin est de 0,75 à 1 mètre.

Si l'on admet, d'après le calcul précédent, qu'un mètre cube d'air refroidit 2 à 3 kilogrammes d'eau, le renouvellement horaire de l'air devrait être de 600 à 900 mètres cubes par mètre carré, chaque jet de 1.750 litres correspondant à un mètre carré.

La plupart des autres appareils consistent en une tour de réfrigération, dans laquelle l'eau tombe en pluie et que parcourt un courant d'air provoqué par tirage naturel ou par ventilateur. Des chicanes, des fascines, ralentissent la chute de l'eau.

On apprécie l'intensité du tirage en calculant, à l'aide du tableau de la p. 315, la densité de l'air chaud et humide qui circule dans la partie supérieure de la tour, formant cheminée, et la densité de l'air extérieur. Le poids de l'air sec, dans un mètre cube saturé d'humidité, s'obtient en multipliant 1,293 par le rapport de sa pression (pression totale moins celle de la vapeur) à 1,033 et par le rapport de 273 à sa température absolue. Ainsi, à 45°, ce poids est :

$$1,293 \times \frac{0,936}{1,033} \times \frac{273}{318} = 1 \text{ kg. } 02.$$

poids auquel s'ajoute celui de la vapeur d'eau, 0 kg. 065 ; le poids total du mètre cube est donc 1 kg. 085. La densité est la même que celle de l'air sec à 53°.

Les éléments caractéristiques d'une tour de réfrigération sont la section horizontale, la hauteur totale, la hauteur de chute de l'eau, le débit d'eau et le débit d'air.

L'eau chaude est introduite dans les réfrigérants Hamon, à une hauteur qui varie de 5 à 12 mètres. Elle circule d'abord dans des auges de répartition, puis dans des bacs distributeurs, d'où elle tombe librement, par des ajutages, sur des plateaux dispersés, qui la projettent tangentiellement dans diverses directions. Elle coule ensuite sur des claies, en nappes minces et régulièrement réparties.

Divers perfectionnements ont été apportés à cet appareil pour

améliorer la circulation de l'air, qui ne parvenait que difficilement dans la partie centrale des réfrigérants de grande largeur.

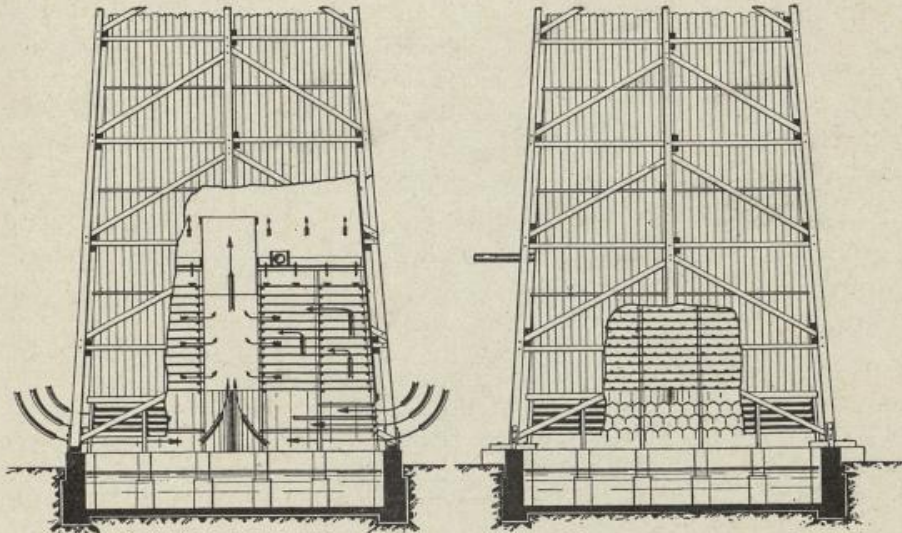


FIG. 267. — Réfrigérant Hamon, avec cheminée d'appel d'air, cloisons directrices et canaux d'air.

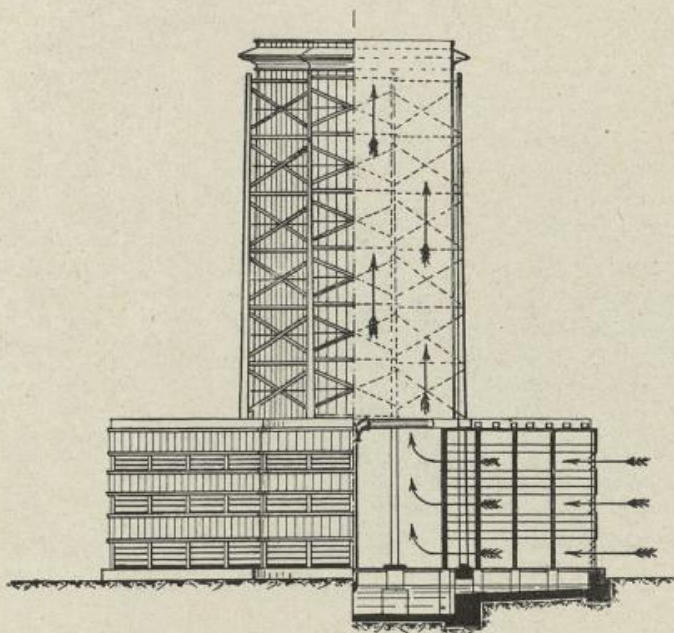


FIG. 268. — Réfrigérant Hamon, à aérage latéral étagé et chambres circulaires de ruissellement; demi-élévation et demi-coupe verticale.

On a d'abord ménagé une cheminée centrale, au milieu des chicanes de dispersion d'eau. Vient ensuite l'addition de canaux

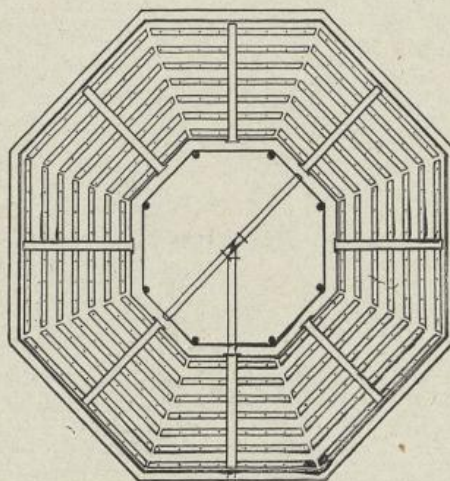


FIG. 269. — Réfrigérant Hamon, à aérage latéral étagé et chambres circulaires de ruissellement; plan.

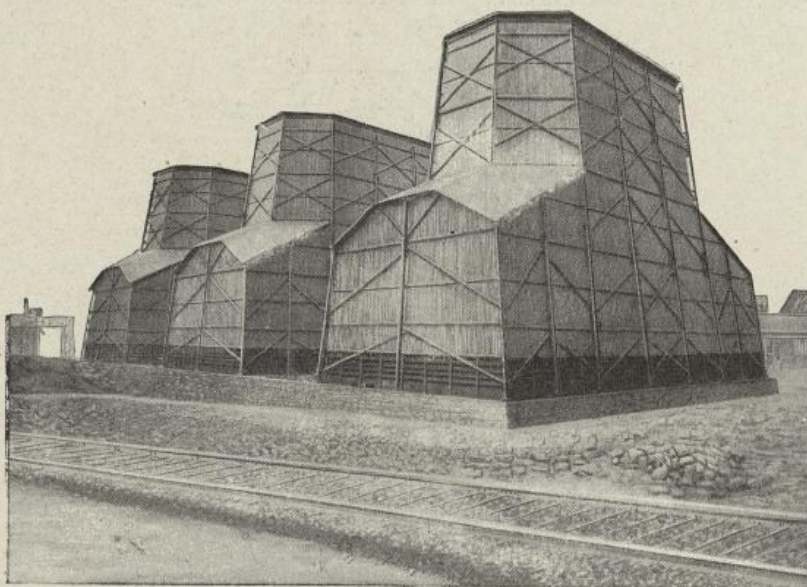


FIG. 270. — Réfrigérants Hamon, en bois, de 2.000 m³ à l'heure chacun.

horizontaux d'entrée d'air (fig. 267) à la base de la tour et de cloisons directrices verticales.

Un dernier perfectionnement a consisté en une série d'entrées d'air superposées (fig. 268 et 269), au lieu de le prendre en totalité à la base de la tour. L'air circule horizontalement jusqu'à la

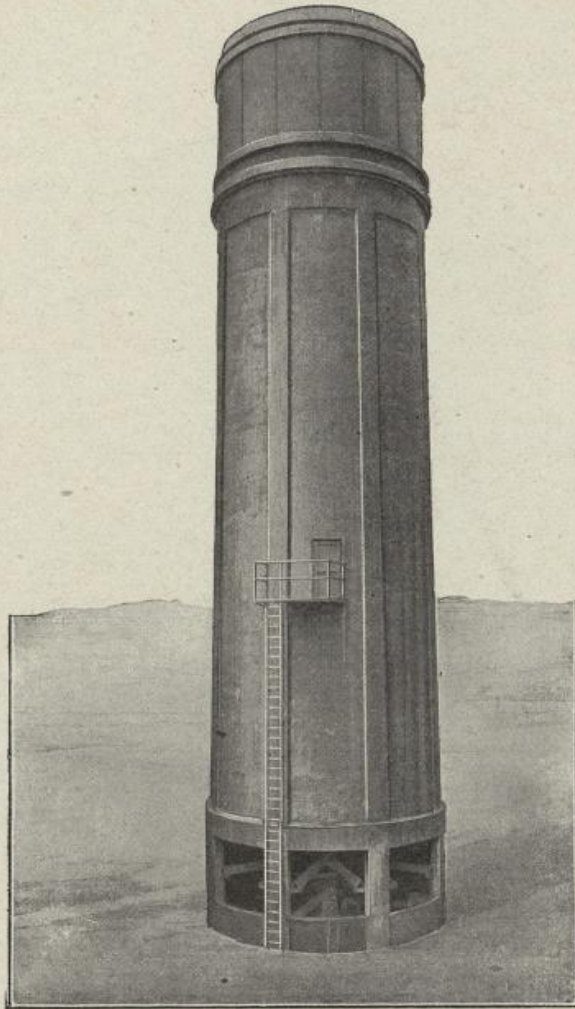


FIG. 271. — Réfrigérant Hamon, en béton armé, de 650 m³ à l'heure.

cheminée centrale, dans une direction perpendiculaire aux filets liquides, qui opposent à son mouvement une moindre résistance que lorsqu'il circule verticalement de bas en haut.

Cet aérage latéral étagé donne une répartition plus uniforme de l'air frais dans toute la masse ruisselante. On peut remarquer

toutefois que les lames d'air inférieures, en contact avec l'eau déjà partiellement refroidie, s'échappent dans la cheminée centrale à une température moindre que les lames supérieures. Ce petit inconvénient est compensé par la bonne répartition de l'air.

Des cloisons verticales divisent le réfrigérant en une série de chambres, chacune avec distribution d'eau indépendante : on

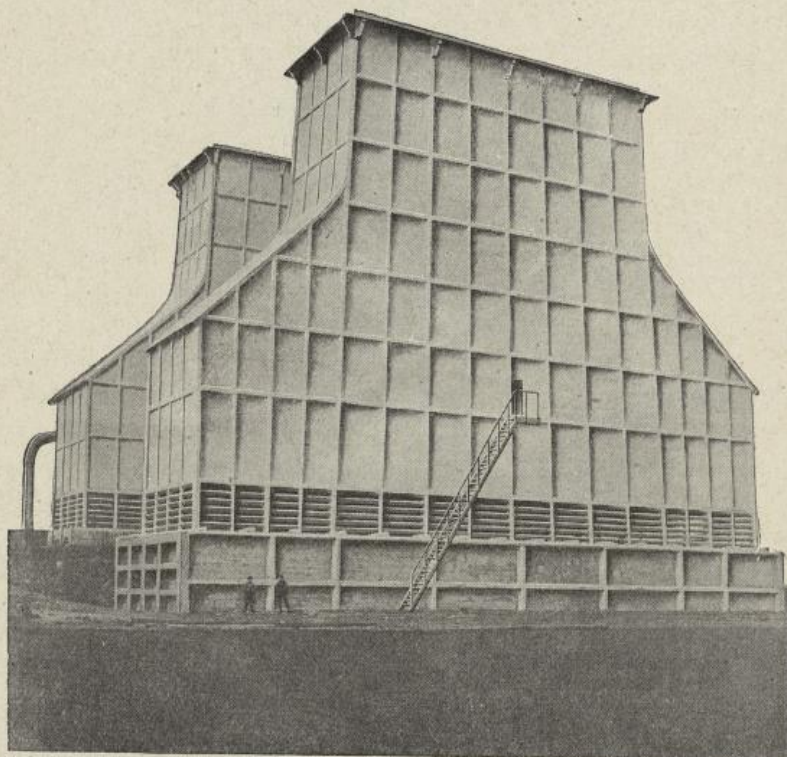


FIG. 272. — Réfrigérants Hamon, en béton armé, de 1.650 m³ à l'heure chacun.

peut mettre une chambre hors de service sans interrompre la marche des autres.

L'enveloppe des réfrigérants Hamon est en bois ou en béton armé (fig. 270, 271 et 272).

L'ancien réfrigérant Chaligny (fig. 273), remarquable par ses petites dimensions, est une caisse remplie de fascines, avec ventilateur (1), ne donnant toutefois qu'un vide médiocre (640 mil-

(1) *Revue de mécanique*, avril 1902, p. 246.

limètres de mercure dans une expérience avec l'installation représentée).

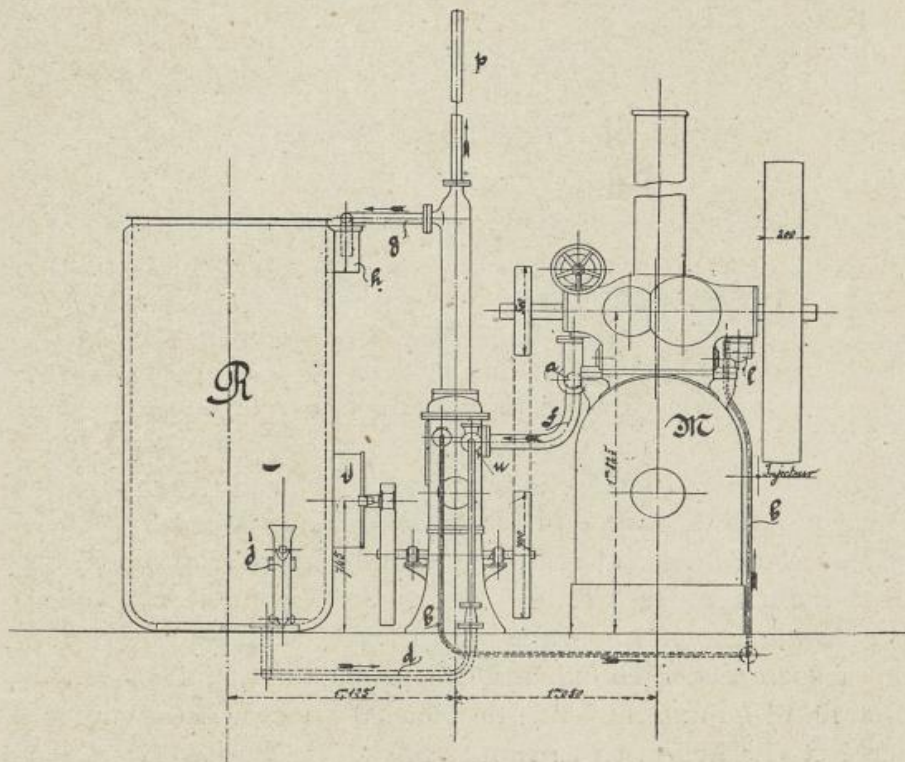


FIG. 273. — Machine demi-fixe Chaligny, avec condenseur et réfrigérant.

a, robinet à trois voies permettant l'échappement libre ou la condensation; *d*, aspiration du condenseur au réfrigérant; *g*, *h*, arrivée d'eau chaude au réfrigérant; *p*, évacuation de l'air; *j*, trop-plein du réfrigérant; *v*, ventilateur.

CHAPITRE XIII

CONDENSEURS A SURFACE

72. **Surface condensante.** — Dans le condenseur à mélange, on calcule immédiatement la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une température donnée de condensation; il n'en est plus de même avec le condenseur à surface, car la température de l'eau de circulation à la sortie, inférieure à celle de condensation, est inconnue *a priori*. Cette température dépend, d'ailleurs, d'un élément caractéristique du condenseur, la surface qui sépare la vapeur à condenser et l'eau de refroidissement. En considérant les valeurs données à cette surface, par exemple, 1 mètre carré pour condenser 40 kilogrammes à l'heure, et en les rapprochant de la surface des chaudières correspondantes, qui souvent ne produisent qu'une moyenne de 15 à 20 kilogrammes par mètre carré et par heure, en se rappelant que la quantité de chaleur reçue par le condenseur est au moins les huit dixièmes de celle fournie par la chaudière, enfin que la différence de température des deux fluides, grande dans la chaudière, est faible dans le condenseur, on voit comme la chaleur traverse plus facilement les parois du condenseur que celles de la chaudière. Aux premiers condenseurs, on avait cru devoir donner une surface égale à celle des chaudières.

Soient Q le nombre de kilogrammes d'eau de circulation pour un kilogramme de vapeur, θ_0 et θ'_0 les températures d'entrée et de sortie de cette eau.

Les coefficients de transmission de la chaleur à travers les parois métalliques du condenseur ne sont pas exactement déterminés. Le métal est en contact, d'un côté avec la vapeur, dont la température est θ_2 , de l'autre avec l'eau, dont la température, θ , varie de θ_0 à θ'_0 . Les deux faces du métal prennent des tempé-

ratures θ' et θ'' . En appelant M le nombre des calories transmises par seconde et par mètre carré, on peut admettre que cette quantité M est égale à $\gamma (\theta_2 - \theta')$, γ étant un coefficient, que diminuent les dépôts graisseux. La même quantité de chaleur traverse le métal, dont l'épaisseur est e ; d'après les lois de la conductibilité, $M = \frac{\gamma'}{e} (\theta' - \theta'')$. Enfin, le métal cède à l'eau la même quantité de chaleur, également proportionnelle à la différence des températures θ'' et θ : $M = \gamma'' (\theta'' - \theta)$.

Le coefficient γ'' varie avec l'état des surfaces et aussi avec la vitesse de circulation de l'eau. Pour une vitesse de 0 m. 40 par seconde, on estime le coefficient γ'' à 0,5; à 1, pour une vitesse de 0 m. 60 et à 1,5 pour une vitesse de 1 m. 1.

En résumé,

$$\frac{M}{\gamma} = \theta_2 - \theta' \quad , \quad \frac{e M}{\gamma'} = \theta' - \theta'' \quad , \quad \frac{M}{\gamma''} = \theta'' - \theta.$$

En ajoutant membre à membre ces trois relations, on élimine θ' et θ'' :

$$M \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{e}{\gamma'} + \frac{1}{\gamma''} \right) = \theta_2 - \theta,$$

ou, en posant :

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\gamma} + \frac{e}{\gamma'} + \frac{1}{\gamma''} \quad , \quad M = \Gamma (\theta_2 - \theta).$$

Les coefficients γ et γ' sont grands, comparés à γ'' ; e est toujours petit; on ne connaît pas avec précision γ et γ'' . Pour toutes ces raisons, on peut admettre que Γ est égal à γ'' , pourvu que γ reste grand, c'est-à-dire pourvu que la surface du condenseur soit nette.

Ces calculs supposent plane la paroi qui transmet la chaleur : en réalité, elle se compose de petits tubes, et la différence entre les surfaces baignées par la vapeur et par l'eau est assez grande. Il est facile de tenir compte de cette différence dans le calcul; mais cette recherche est peu utile, car les valeurs des coefficients sont mal déterminées. Il convient seulement de compter la surface sur la partie en contact avec l'eau, où paraît se trouver la principale résistance au passage de la chaleur.

A ce point de vue, il y aurait avantage à faire circuler l'eau sur la plus grande surface, c'est-à-dire hors des tubes : mais elle est moins bien guidée.

Au débit Q par kilogramme de vapeur correspond un débit par seconde Q' , qu'on déduit de la dépense horaire de vapeur Nk (k kilogrammes par cheval pour une puissance de N chevaux); la dépense de vapeur par seconde étant :

$$\frac{Nk}{3.600}, \quad Q' = Q \frac{Nk}{3.600}.$$

La température de l'eau contre un élément de surface, ds , étant θ , cet élément transmet, par seconde, $\Gamma(\theta_2 - \theta) ds$ calories, qui échauffent les Q' kilogrammes d'eau de circulation d'une quantité $d\theta$: on écrit ainsi l'équation différentielle :

$$\Gamma(\theta_2 - \theta) ds = Q' d\theta \quad \text{ou} \quad \Gamma ds = Q' \frac{d\theta}{\theta_2 - \theta}.$$

En intégrant entre les limites 0 à S pour la surface, θ_0 à θ'_0 pour la température, on a la relation :

$$\Gamma S = Q' \mathcal{L} \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_2 - \theta'_0},$$

($\mathcal{L}$ désignant le logarithme naturel).

On sait, en outre, que chaque kilogramme de vapeur apporte au condenseur une quantité de chaleur m connue, voisine de 600 calories, qu'on retrouve dans l'eau de circulation, qui en emporte $Q(\theta'_0 - \theta_0)$.

On obtient ainsi deux équations entre S , Q et θ'_0 , qui permettent d'éliminer θ'_0 et qui donnent enfin la relation :

$$\Gamma S = Q' \mathcal{L} \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_2 - \theta_0 - \frac{m}{Q}}.$$

Il est vrai que Γ n'est pas un coefficient bien déterminé, mais varie avec la vitesse de circulation.

On peut donc fixer S , et en déduire Q' ou inversement. Toutefois il ne faut pas sortir de certaines limites, de manière à ne pas exagérer le travail de la pompe de circulation. En outre, θ_0 ,

une des données des équations, est en réalité variable, et prend une valeur élevée dans les mers des tropiques. Dans ce cas, il est vrai, on admet pour θ_2 une valeur plus forte.

L'application numérique de cette formule comporte d'ailleurs une grande incertitude, à en juger par les divergences dans la valeur des coefficients proposés par divers auteurs. La figure 274 reproduit un tableau de ces propositions, dressé par M. Orrok (1) : en abscisses sont les vitesses de l'eau, en ordonnées les quantités de chaleur transmises.

Les formules indiquées sur ce tableau, avec le pied comme unité de longueur et la B. T. U. comme unité de quantité de chaleur (la B. T. U. = 0,252 calorie ancienne), deviennent, en mètres et calories :

[U, calories transmises par mètre carré, heure, degré ;
V, vitesse en mètres par seconde.]

1. Ser.....	$U = 3.740 \sqrt[3]{V}$
2. Josse.....	$U = 3.500 \sqrt[3]{V}$
3. Weighton.....	$U = 3.100 \sqrt[3]{V}$
4. Hepburn.....	$U = 3.700 \sqrt[3]{V}$
5. Hagemann.....	$U = 2.490 \sqrt[3]{V}$
6. Stanton.....	$U = 2.450 \sqrt[3]{V}$
7. Joule.....	$U = 1.580 \sqrt[3]{V}$
8. Allen.....	$U = 1.940 \sqrt[3]{V}$
9. Clement et Garland....	$U = 1.950 \sqrt[3]{V}$
10. Orrok.....	$U = 2.720 \sqrt[3]{V}$

Les anciens condenseurs avaient une grande surface, correspondant à 25 à 30 kilogrammes de vapeur par heure et par mètre carré. Mais une grande vitesse de l'eau augmente le coefficient de transmission, et rend l'incrustation des tubes moins rapide. C'est ce qui justifie les valeurs de 40 kilogrammes condensés par heure et par mètre carré, souvent adoptées.

L'eau circulant successivement dans des faisceaux de tubes,

(1) *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, mars 1911, p. 431.

ces faisceaux peuvent ne pas offrir les mêmes sections de passage. On peut en profiter pour augmenter la vitesse dans le dernier faisceau, qui reçoit l'eau la moins froide. Cette disposition existe dans les condenseurs de la Compagnie Electro-Mécanique.

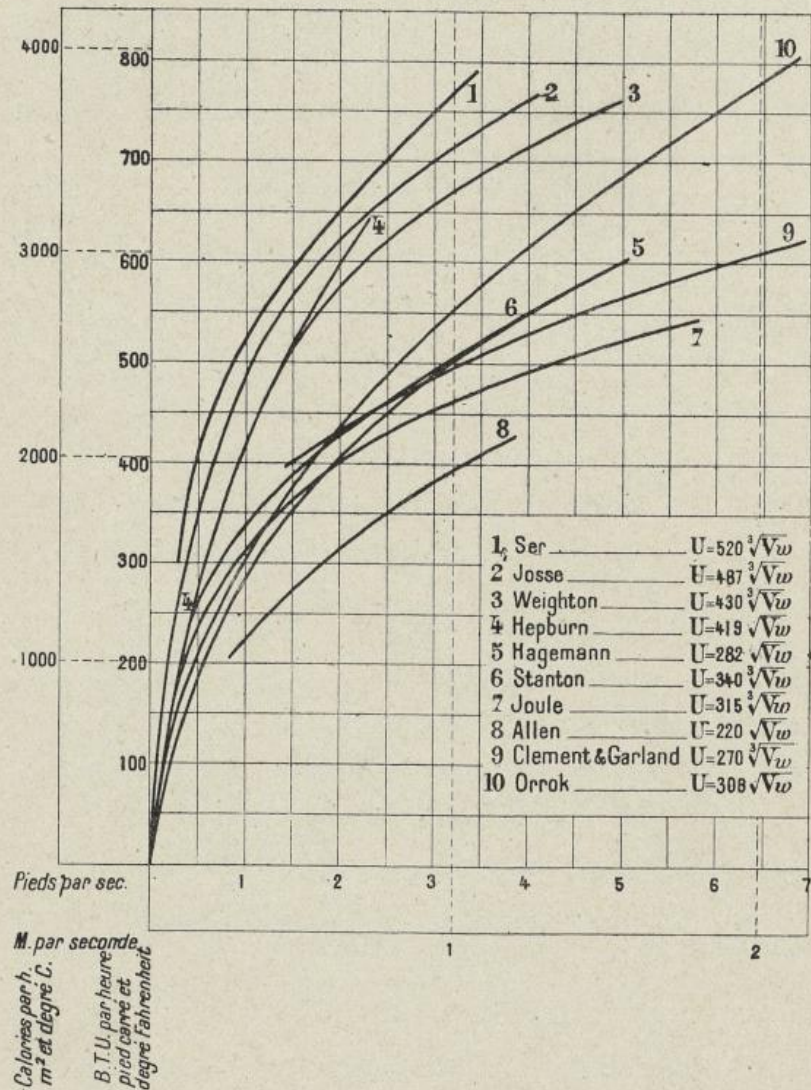


FIG. 274. — Diagrammes de la transmission de la chaleur dans un condenseur à surface, d'après M. Orrok. En ordonnées, quantité de chaleur transmise en une heure par pied carré et degré Fahrenheit d'écart, en B. T. U. (*british thermal unit* = 0,252 calorie), et par m² et degré centigrade; en abscisses, vitesse de l'eau en pieds par seconde et en mètres par seconde. Formules en unités anglaises.

73. Dispositions générales. — Le condenseur à surface comprend :

Un récipient partagé en deux capacités, avec une grande surface d'échange, généralement formée de tubes de petit diamètre, dans lesquels l'eau circule ;

Une pompe à air, pour extraire l'eau condensée et l'air, ou mieux deux pompes séparées pour l'air et pour l'eau. Les quantités d'air et d'eau à extraire du condenseur sont bien moindres que dans le condenseur à mélange équivalent ;

Une pompe de circulation, pour mettre en mouvement l'eau de refroidissement.

Le condenseur est, le plus souvent, un cylindre à axe horizontal (fig. 275), avec coquilles rapportées aux deux extrémités pour la circulation de l'eau ; ces coquilles sont munies de cloisons divisant les tubes en deux ou plusieurs faisceaux, successivement parcourus par l'eau.

Les tubes doivent avoir un joint glissant à l'une de leurs extrémités au moins (fig. 276) : à cet effet, on fait usage d'une garniture plastique avec presse garniture. L'autre extrémité peut être mandrinée. La même figure montre une des entretoises qui empêchent le rapprochement des deux plaques tubulaires, et la figure 277 les joints en caoutchouc des coquilles.

Le diamètre intérieur des tubes est, le plus souvent, compris entre 15 et 33 millimètres, les très petits diamètres étant employés surtout dans les condenseurs marins. Plus le diamètre est petit, plus on peut obtenir de surface dans un volume donné. Lorsque la longueur des tubes dépasse 100 fois leur diamètre, une plaque intermédiaire est utile pour en éviter le fouettement.

Les tubes sont, le plus souvent, en laiton, à 63 p. 100 de cuivre et 37 p. 100 de zinc. On emploie aussi, sur mer, un alliage à 98 p. 100 de cuivre, avec 1,5 p. 100 de zinc et 0,5 p. 100 d'autres éléments, ainsi qu'un laiton à 70 p. 100 de cuivre, 29 p. 100 de zinc et 1 p. 100 d'étain.

Quelquefois on fait usage de tubes en fer, mais ils sont exposés aux corrosions.

On a quelquefois fait circuler l'eau dans des tubes concen-

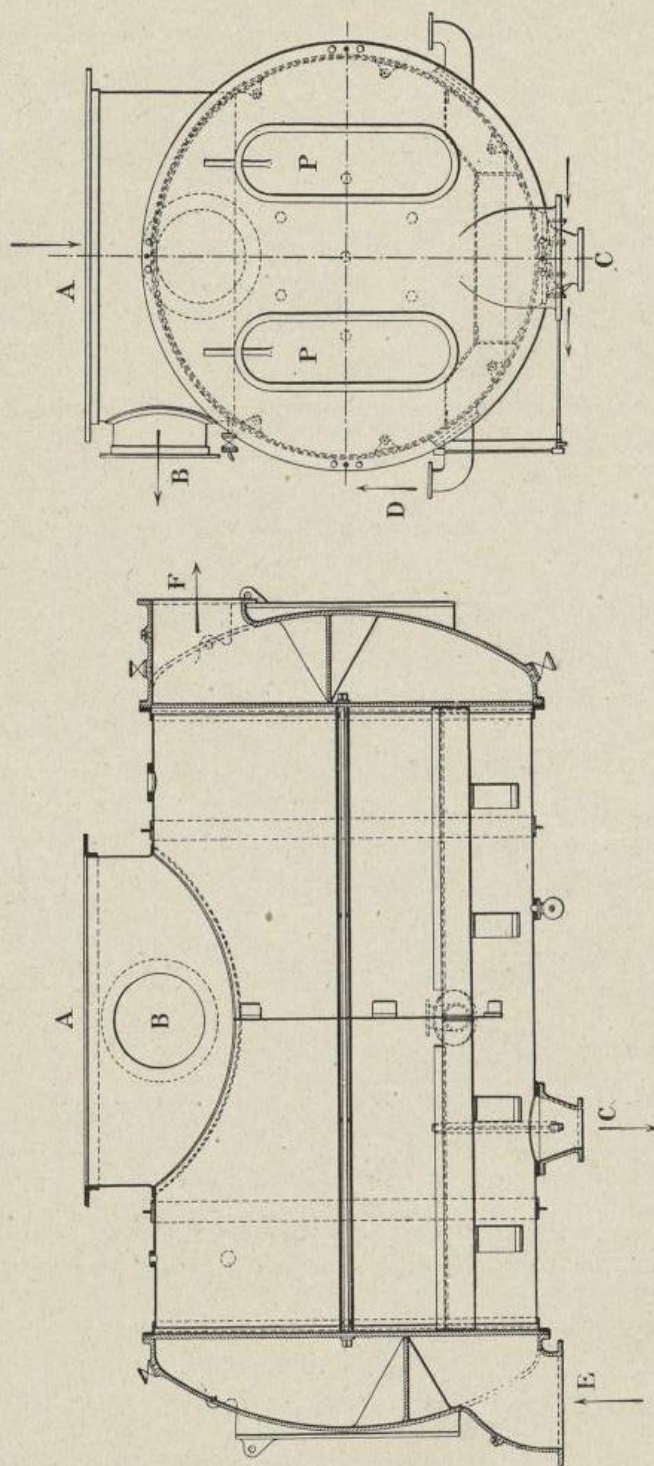


FIG. 275. — Condenseur à surface, de la Société de Condensation et d'Applications mécaniques.

A, arrivée de vapeur; B, échappement à l'air libre; C, extraction d'eau condensée; D, aspiration d'air; E, entrée d'eau de circulation; F, sortie d'eau de circulation. — Le condenseur porte en outre des robinets de vidange, des purgeurs d'air et des éprouvettes pour thermomètres. L'aspiration est garantie par un écran de protection, pour éviter tout entraînement d'eau et de vapeur.

triques (fig. 278) ; il paraît difficile de justifier cette disposition, qui, pour une surface utile donnée, double presque la surface de métal employée.

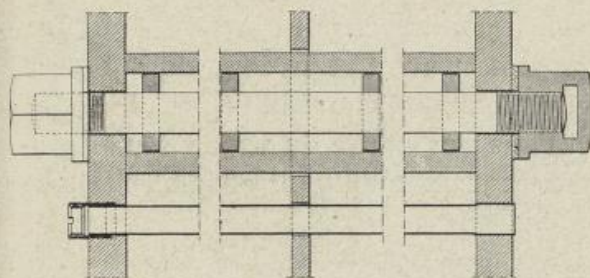


FIG. 276. — Condenseur à surface, de la Société de Condensation et d'Applications mécaniques : montage d'un tube et d'une entretoise. Plaques tubulaires en acier ou en laiton ; plaque intermédiaire en acier. Tube en laiton, avec presse garniture en bronze ou en laiton, à une extrémité seulement ; garniture en cordon d'amiante ou en chanvre, avec enduit de graisse Belleville. Tube entretoise en acier ou en fonte, avec tirant en acier, muni de bagues de guidage emmanchées à chaud ; écrous en bronze, avec rondelles en cuivre rouge.

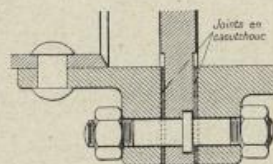


FIG. 277.
Condenseur à surface, de la Société de Condensation et d'Applications mécaniques ; joint en caoutchouc des coquilles.

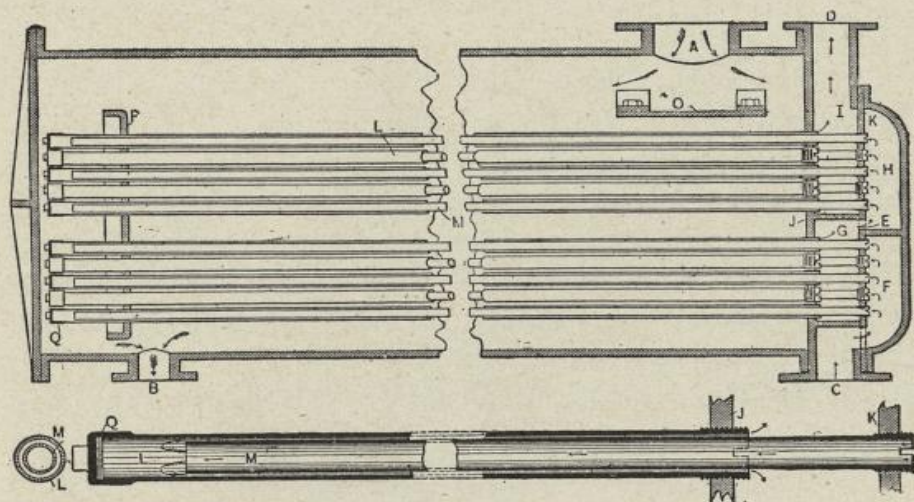


FIG. 278. — Condenseur à surface Wheeler, avec tubes de circulation concentriques.

La circulation de la vapeur et de l'eau peut se faire par courants parallèles ou opposés. L'eau est bien guidée dans tout son

parcours, la vapeur l'est beaucoup moins : la circulation par courants parallèles comporte l'entrée de vapeur sur les tubes les plus froids; c'est l'inverse avec les courants opposés. Les différences de température de la vapeur à l'intérieur du condenseur sont d'ailleurs minimales; de sorte qu'en ce qui concerne le nombre des calories transmises, il ne peut y avoir de grandes différences d'un système à l'autre. Comme il convient de prendre l'air aussi froid que possible et dans une partie du condenseur éloignée de l'arrivée de vapeur, ces deux conditions conduisent à la circulation à contre-courants.

Il importe surtout de bien assurer l'accès de la vapeur sur tous les tubes : c'est pourquoi aux anciennes tubulures très serrées, donnant le maximum de surface dans un volume donné, on préfère aujourd'hui les tubulures avec passages pour l'accès de la vapeur, obtenus en supprimant quelques tubes.

Afin d'assurer une bonne circulation de la vapeur, il convient que la longueur du condenseur ne soit pas trop grande par rapport à son diamètre, sinon la vapeur, amenée au milieu de la longueur, n'accède pas librement aux extrémités des tubes. On peut corriger le défaut d'une trop grande longueur en bifurquant le tuyau d'amenée de vapeur (fig. 279).

La figure 280 est la coupe d'un type ancien de condenseur, entièrement garni de tubes, tandis que des vides entre les tubes sont ménagés dans le condenseur de la figure 281. Le courant de vapeur, et, dans la partie inférieure du condenseur, l'aspiration de la pompe à air, empêchent des accumulations d'air de se produire sur certains tubes. La présence d'une couche d'air adhérente au métal gêne, en effet, la transmission de la chaleur, et diverses dispositions ont été employées pour l'éviter. La section ovoïde (fig. 282) de certains condenseurs est destinée à conserver la vitesse de la vapeur dans tout son parcours.

L'élargissement des passages de vapeur est très grand dans le condenseur OV (fig. 283) de la Compagnie Electro-Mécanique. Le nombre des tubes s'en trouve notablement réduit ; mais le constructeur estime que cette diminution de surface condensante est largement compensée par la meilleure circulation de la vapeur. La disposition des faisceaux permet d'ailleurs de réduire

un peu l'écartement des tubes, ce qui compense partiellement la réduction de leur nombre.

L'eau passe successivement dans trois faisceaux de tubes

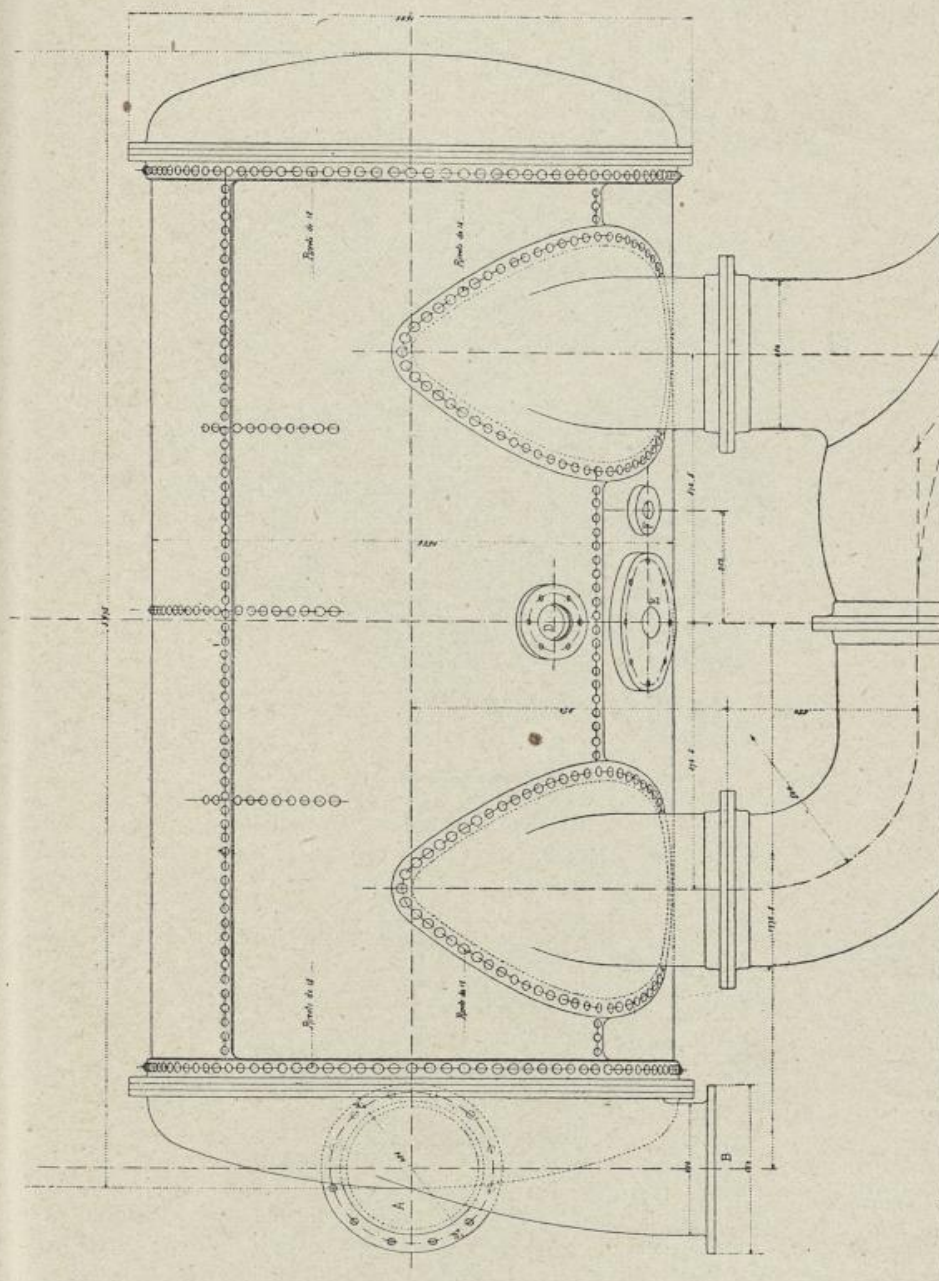


Fig. 279. — Condenseur avec tuyau d'arrivée de vapeur bifurqué.

(fig. 284 et 285). Au lieu d'être, comme d'habitude, superposés, ces trois faisceaux forment des tranches contiguës presque verticales. Cette disposition évite le refroidissement inutile de l'eau de condensation. Une fois la vapeur condensée à une certaine température, il est inutile d'abaisser davantage la température de l'eau, qui sert à l'alimentation des chaudières. Or, ce refroidissement de l'eau se produit avec la disposition usuelle, puisqu'elle tombe sur les tubes inférieurs, parcourus par l'eau la plus

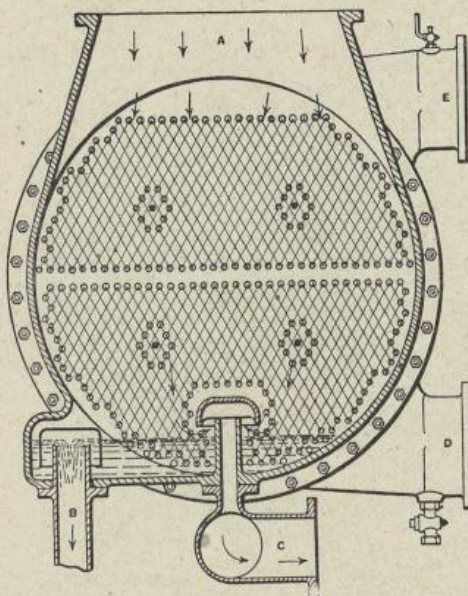


FIG. 280. — Type ancien de condenseur à surface, entièrement garni de tubes.

D, arrivée d'eau de circulation; E, sortie d'eau de circulation.

froide. On constate cet inconvénient surtout lorsque le condenseur ne travaille pas à pleine charge. D'autre part, ce refroidissement de l'eau de condensation chauffe inutilement l'eau de circulation. Avec la disposition verticale des faisceaux, l'eau reste en contact avec des tubes ayant tous à peu près la même température.

Dans les anciens condenseurs, avec pompe unique à air et à eau, ce refroidissement de l'eau de condensation permettait l'extraction de l'air à une température plus basse. On maintenait

même, au fond de certains condenseurs, une couche d'eau traversée par les tubes inférieurs.

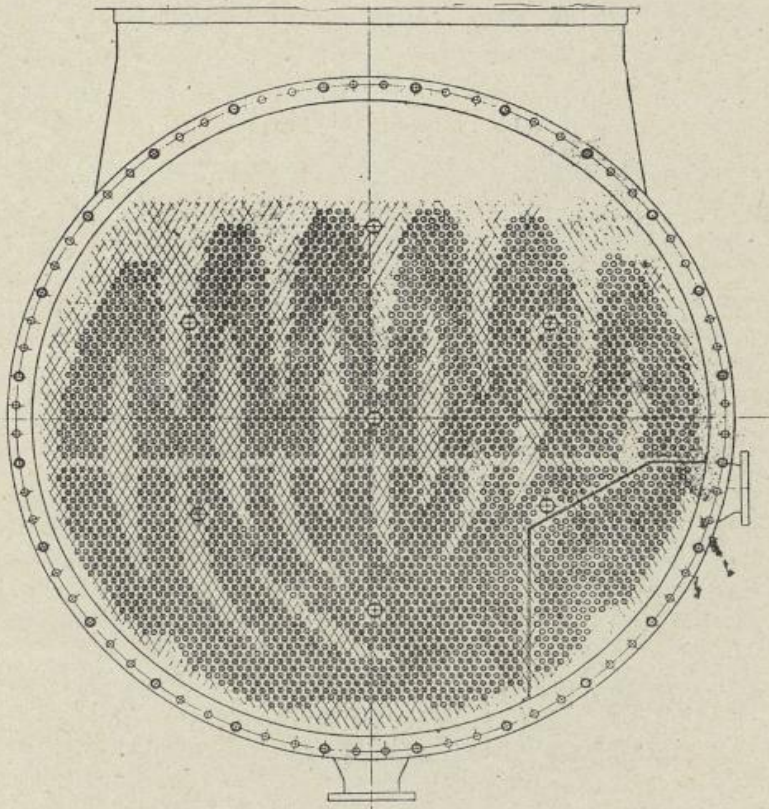


FIG. 281. — Condenseur à surface Bréguet, avec passages pour la vapeur entre les tubes.

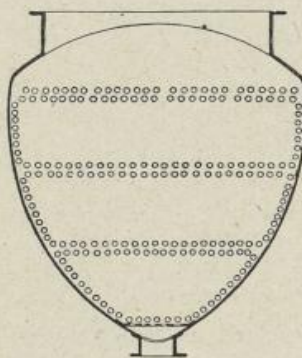


FIG. 282. — Condenseur à section ovoïde.

Inversement, on s'est depuis longtemps préoccupé d'éviter le refroidissement inutile de l'eau de condensation. Les tubes du condenseur *dripless* (fig. 286) forment gouttière à leur partie supérieure et sont en pente légère. Des chicanes en tôle (fig. 287

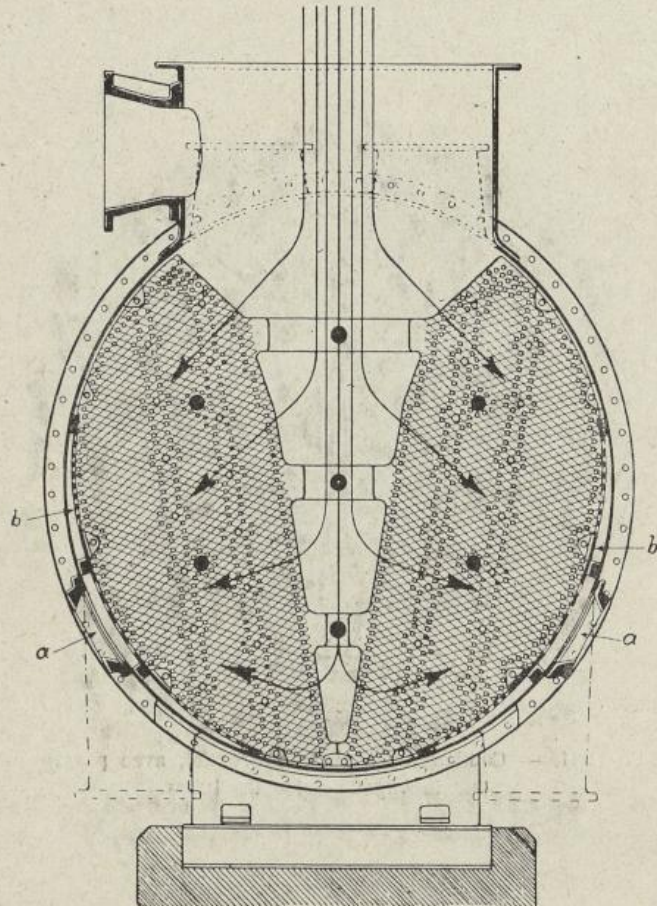


FIG. 283. — Condenseur OV, de la Compagnie Electro-Mécanique; trajet de la vapeur. L'air est aspiré par les ouvertures latérales *a*, protégées par des tôles perforées *b*.

et 288) isolent les faisceaux de tubes et recueillent l'eau condensée. En même temps, elles augmentent la vitesse de la vapeur, mais en lui opposant une résistance notable.

Les deux surfaces des tubes doivent être maintenues constamment propres. A l'intérieur, l'eau dépose des boues et du tartre;

à l'extérieur, la vapeur d'échappement des moteurs à piston amène une couche d'huile. Le nettoyage intérieur des tubes se fait avec des brosses et des raclettes, parfois avec une solution à 3 p. 100 d'acide chlorhydrique, agissant pendant quelques heures. A l'extérieur, une injection de vapeur fait fondre les dépôts graisseux.

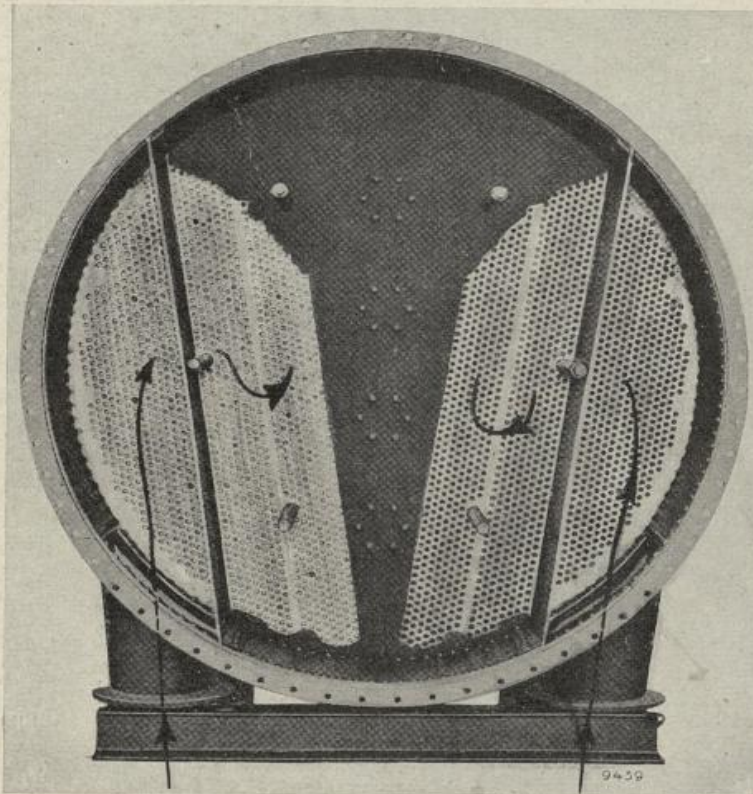


FIG. 284. — Condenseur OV de la Compagnie Electro-Mécanique : coquille d'entrée de l'eau, montrant la circulation.

Un défaut d'étanchéité des tubes de condenseur donne lieu à un mélange d'eau de circulation à l'eau de condensation, mélange très nuisible quand c'est de l'eau de mer qui pénètre ainsi dans le condenseur. Il est facile de reconnaître la présence du chlorure de sodium dans l'eau de condensation, à l'aide d'une dissolution d'un sel d'argent. Le *salinomètre* met en jeu les dif-

férences de résistance électrique de l'eau distillée et de l'eau salée.

Lorsqu'on applique un réfrigérant à l'eau de circulation d'un

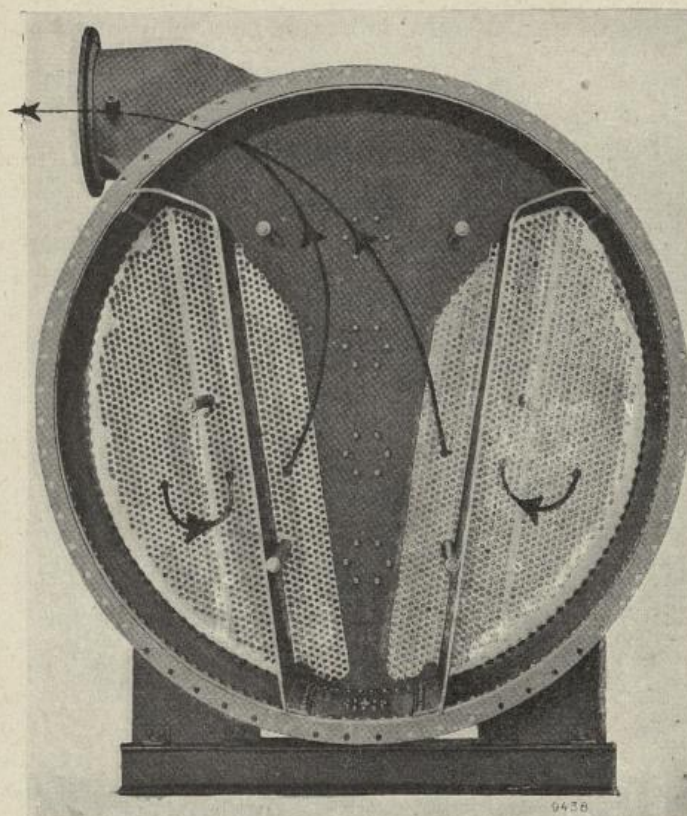


FIG. 285. — Condenseur OV, de la Compagnie Electro-Mécanique : coquille de sortie de l'eau.

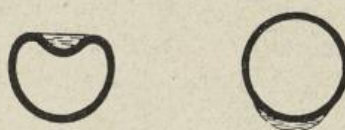


FIG. 286. — Sections de tubes, du condenseur *driptless* et des condenseurs ordinaires.

condenseur à surface, il est nécessaire de réparer les pertes, dues à l'évaporation, par un appoint d'eau nouvelle. Il en résulte que la quantité de sels dissous dans la masse d'eau totale augmente constamment, de même que dans une chaudière; l'incrustation

des tubes du condenseur ne tarde pas à se produire. Le procédé Balcke, dit *de vaccination*, exploité par la Société de Condensa-

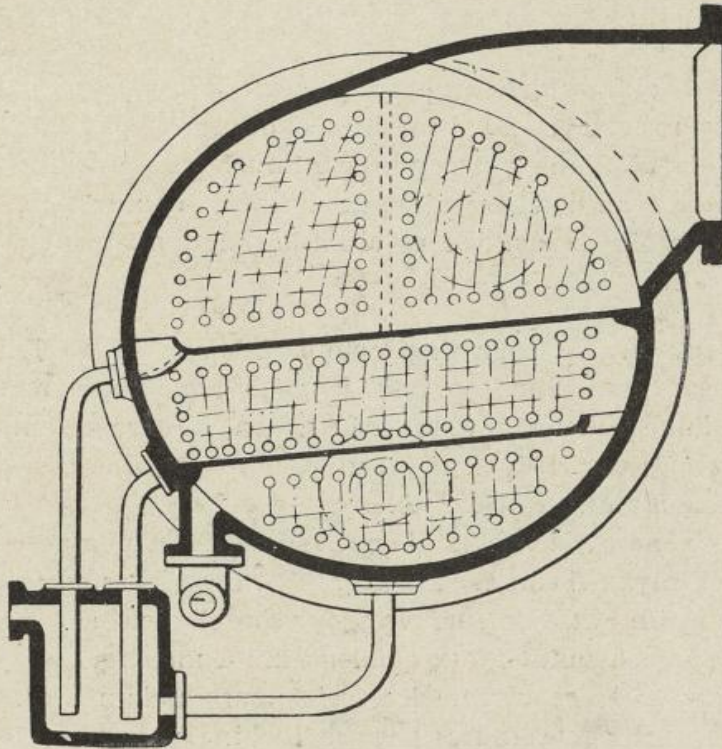


FIG. 287. — Condenseur avec chicanes en tôle.

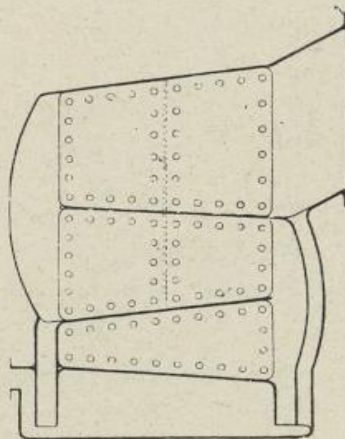


FIG. 288. — Condenseur avec chicanes en tôle.

tion et d'Applications mécaniques, fait disparaître cet inconvénient.

L'eau contient en dissolution des bicarbonates et parfois des sulfates de chaux et de magnésie. Le procédé consiste à transformer en chlorures les bicarbonates de l'eau d'appoint, par une addition d'acide chlorhydrique : cette eau ne renferme plus que des chlorures extrêmement solubles, et des sulfates, un peu solubles; il suffit d'une extraction continue, enlevant une petite fraction de l'eau de circulation, pour éviter la saturation.

Des appareils de contrôle assurent le fonctionnement régulier de l'opération (1).

74. Pompes. — Pour l'extraction de l'eau et de l'air, les pompes sont les mêmes que pour le condenseur à mélange, sous réserve d'une dimension réduite. La pompe de circulation est, le plus souvent, centrifuge : il est utile, dans certains cas, qu'elle puisse fournir un débit variable.

Les anciens condenseurs étaient munis de la pompe à air à piston, extrayant l'eau et l'air (fig. 289). Les divers systèmes de trompes à eau et d'éjecteurs à vapeur s'appliquent aux condenseurs à surface comme aux condenseurs à mélange.

La figure 290 représente les trois pompes d'un condenseur Brown-Boveri, commandées par une turbine à vapeur. L'échappement de cette turbine se fait dans un étage de la turbine principale. Toutefois, dans la marche à faible charge, cet échappement de vapeur, qui n'est pas soumis au contrôle du régulateur, pourrait augmenter la vitesse de la turbine principale : aussi est-il automatiquement supprimé lorsque la charge en tombe au quart de sa valeur normale.

La régularisation de la vitesse de la turbine commandant les pompes se fait au moyen d'un régulateur à eau sous pression (fig. 291). La soupape équilibrée B, qui lamine plus ou moins la vapeur admise à la turbine, est commandée par le piston A, sou-

(1) Ce procédé de vaccination est décrit dans le *Génie civil* du 12 février 1924, p. 153. M. G. PARIS a donné, dans *Chaleur et Industrie* (octobre 1924, p. 634), une étude sur le *Traitement thermique des eaux servant à la réfrigération des condenseurs*.

mis, sur sa face inférieure, à l'action d'un ressort, et, sur sa face supérieure, à la pression de l'eau refoulée par la pompe de la

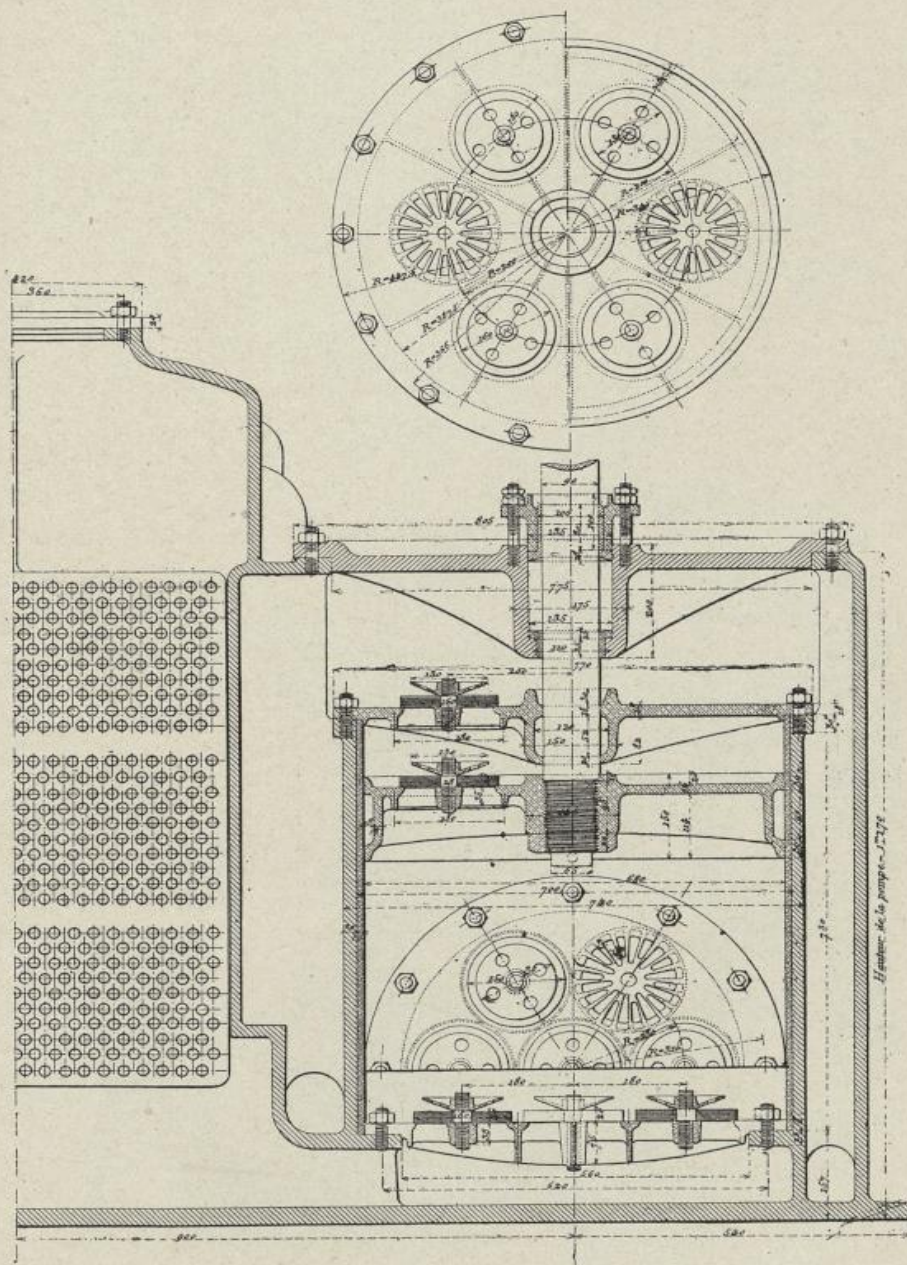


FIG. 289. — Pompe à air d'ancien condenseur à surface de machine marine.

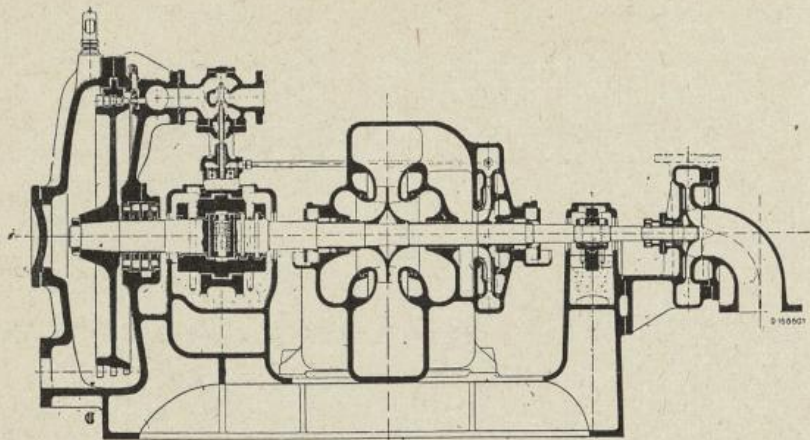


FIG. 290. — Pompes de condenseur à surface Brown-Boveri, avec commande par turbine à vapeur. Au milieu de l'arbre, pompe de circulation, puis, à droite, pompe de la trompe. En bout d'arbre, à droite, pompe d'extraction de l'eau.

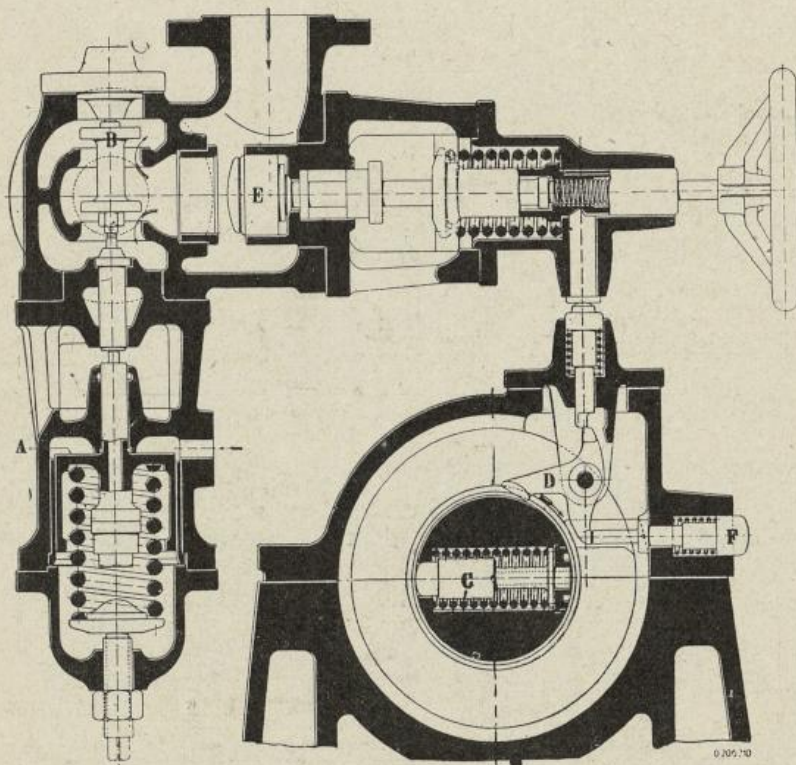


FIG. 291. — Régulateur de la turbine à vapeur des pompes de condenseur Brown-Boveri.

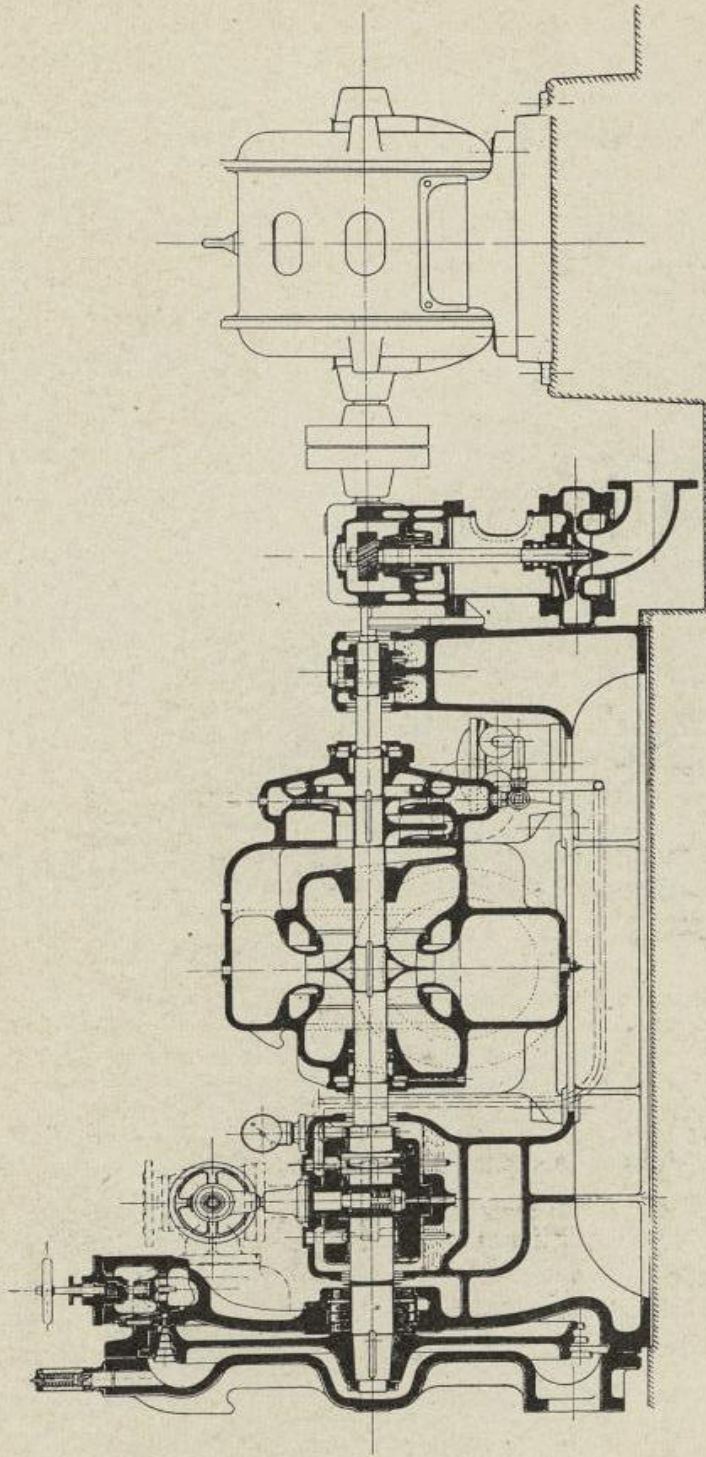


FIG. 292. — Pompes de condenseur à surface Brown-Boveri, avec double commande. La pompe d'extraction de l'eau est à l'extrémité inférieure d'un arbre vertical.

trompe. L'arbre porte, en outre, un régulateur de sûreté C, qui agit sur le doigt D et provoque la fermeture de la soupape E, dès que la vitesse dépasse le maximum prévu. On obtient aussi l'arrêt en frappant le poussoir F.

La commande des pompes se fait aussi par moteur électrique; on prévoit même les deux modes de commande (fig. 292). Sur cette figure, la pompe d'extraction d'eau, à axe vertical, est pla-

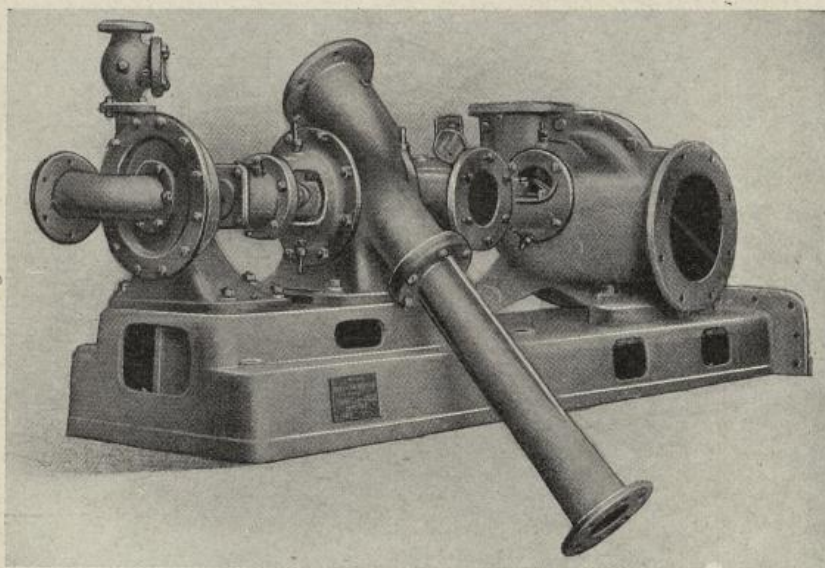


FIG. 293. — Groupe de trois pompes, pour condenseur à surface, de la Société de Condensation et d'Applications mécaniques. De gauche à droite, pompe d'extraction, pompe de trompe à vide, pompe de circulation. Commande par moteur électrique ou par turbine à vapeur (2.200 tours par minute; condensation de 10.500 kilogrammes à l'heure).

cée en dessous des autres. Cette disposition est adoptée quand l'axe horizontal commun ne peut être monté à 0 m. 8 ou 1 mètre en contre-bas du condenseur.

Les trois pompes du condenseur Westinghouse-Leblanc sont de même montées sur un arbre unique (fig. 293), dont l'axe doit être à 0 m. 5 au moins au-dessous de la génératrice inférieure du condenseur.

Cette combinaison suppose que la même vitesse angulaire convient pour les trois pompes, condition qu'il peut être difficile

de réaliser, notamment quand la pompe de circulation n'a pas à élever l'eau et n'a que les pertes de charge à surmonter. La commande séparée pourrait alors être recommandable pour obtenir le meilleur rendement des pompes.

La figure 294 représente l'application d'un éjecteur type Alpha au condenseur d'une machine marine. La dépense de vapeur de l'éjecteur, moindre que pour un condenseur à mélange, est environ 1 p. 100 de la consommation de la machine desservie, pour des puissances de 6.000 kilowatts, et même inférieure pour des puissances plus grandes.

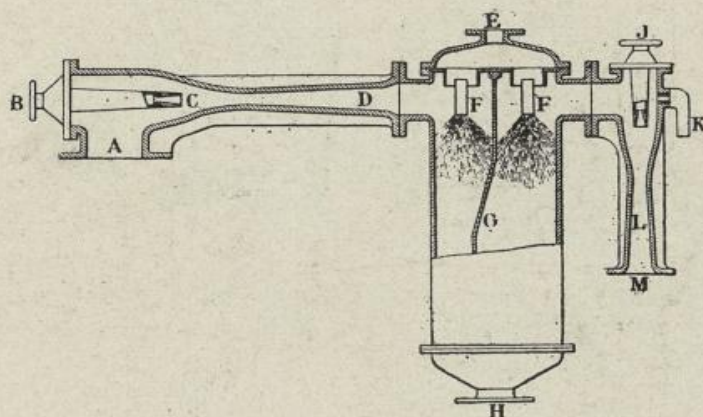


FIG. 294. — Ejecteur, type Alpha, appliqué à un condenseur à surface de machine marine.

A, aspiration d'air au condenseur; B, arrivée de vapeur à l'éjecteur d'amont, C D; F, busettes d'injection du condenseur intermédiaire; H, sortie d'eau du condenseur intermédiaire; J, L, éjecteur d'aval; K, reniflard; M, décharge à la bache d'alimentation.

75. Types de condenseurs.—La figure 295 représente un condenseur à surface, avec extraction séparée de l'eau et de l'air, et division des tubes en deux faisceaux parcourus successivement. Un essai de ce condenseur, d'une surface de 287 mètres carrés, a donné une condensation de 45 kg. 6 par mètre carré et par heure, avec une pression de 27 millimètres de mercure et une température de 20° de l'eau condensée. L'eau de circulation était à 5°.

Le condenseur Brown-Boveri (fig. 296) est divisé en deux moitiés, dont chacune reçoit une circulation d'eau indépendante. On peut démonter, pour le nettoyage, les plateaux d'une des

moitiés, sans interrompre le service de l'autre. Il n'en résulte qu'une légère augmentation de la contre-pression, par suite de

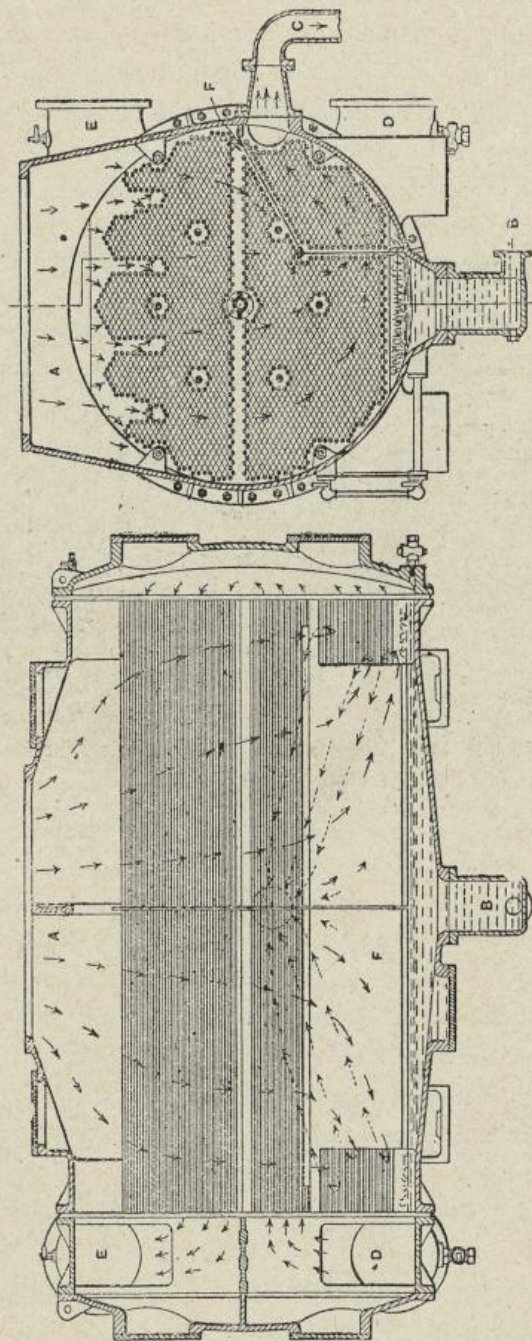


FIG. 295. — Condenseur à surface.

D, entrée de l'eau de circulation; C, sortie; F, cloison pour séparer l'air de la vapeur; C, aspiration de l'air.

la réduction de la surface condensante. L'intérieur du condenseur, où afflue la vapeur, n'est pas divisé : le nettoyage n'en est pas gêné.

La figure 297 représente un condenseur à surface Westinghouse-Leblanc, avec ses trois pompes et un séparateur d'huile, dont la purge est assurée par la trompe à vide.

A titre d'exemple, les nombres qui suivent sont extraits du

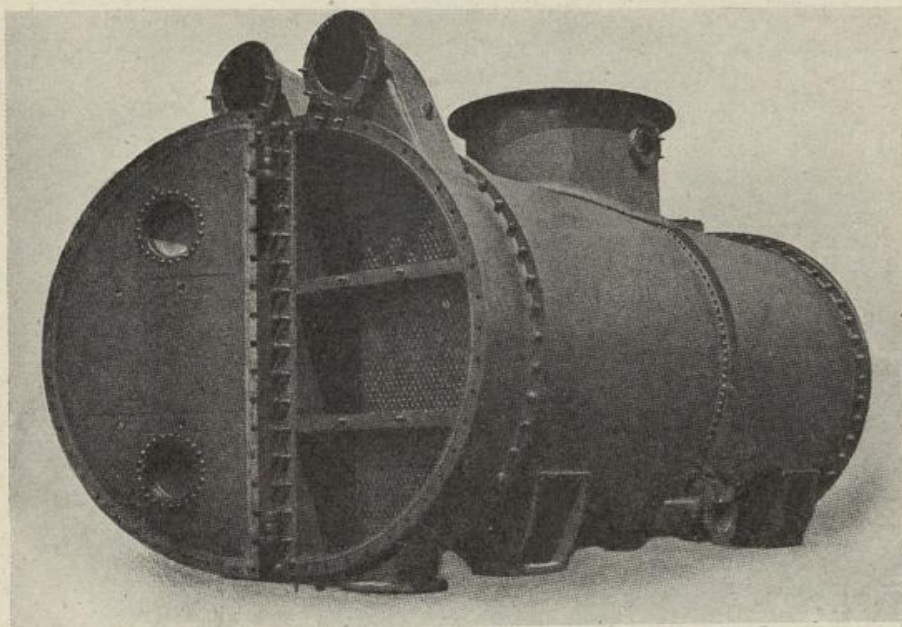


FIG. 296. — Condenseur à surface Brown-Boveri, en deux moitiés, ouvert d'un côté, pour turbine à vapeur de 6.000 chevaux. L'eau de circulation entre par la section inférieure de tubes (circulation de l'eau et de la vapeur à contre-courants).

compte rendu des essais d'un condenseur à surface Westinghouse-Leblanc.

Surface condensante	200 m ²
Vapeur condensée à l'heure par mètre carré :	
en marche normale	22 kg. 57
en surcharge	26 kg. 85
Nombre de calories correspondantes.....	13.361 et 15.868
Eau de circulation par heure.....	262 m ³

Températures à l'entrée et à la sortie :

en marche normale	8°,6 et 18°,8
en surcharge	8°,5 et 20°,5

Vide au condenseur en millimètres de mercure

17 et 19

Température de la vapeur au condenseur..

19°,6 et 21°,2

— de l'eau condensée

17°,5 et 19°,2

Puissance prise par les trois pompes.....

17 kilowatts

En fraction de la puissance de la turbine

desservie 2,4 et 1,95 p. 100

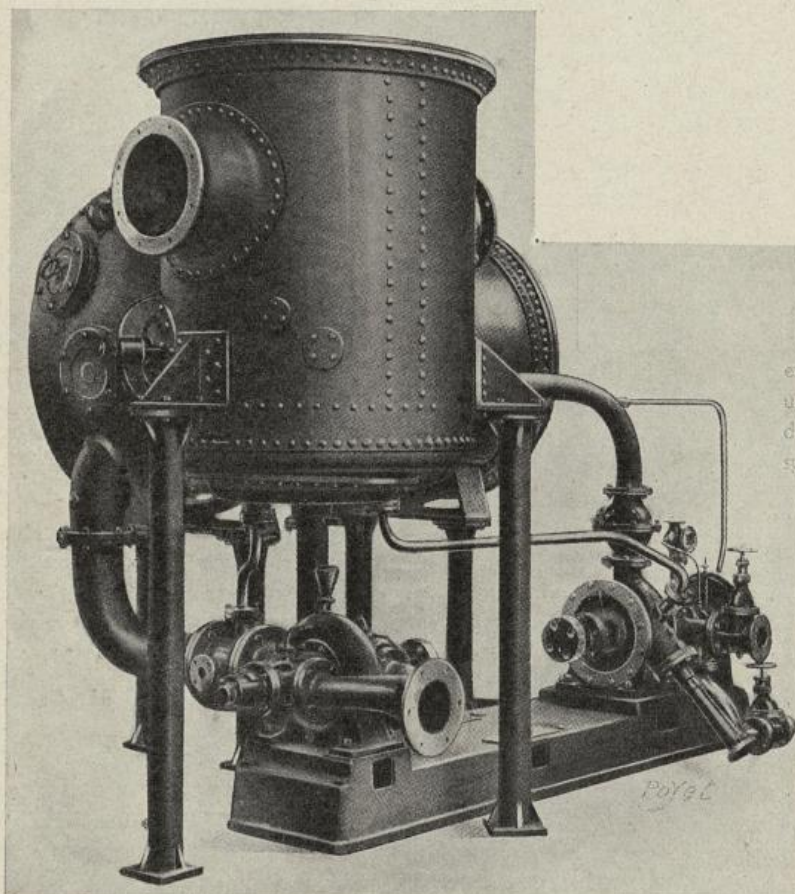


FIG. 297. — Condenseur à surface Westinghouse-Leblanc, avec ses trois pompes et un séparateur d'huile (cylindre vertical placé en avant).

Un condenseur à surface, du même constructeur, a donné les résultats suivant à l'usine de la Société Lyonnaise des Forces motrices du Rhône. Surface réfrigérante, 550 mètres carrés.

CHARGE en kilowatts	KG. DE VAPEUR à l'heure	PRESSION au condenseur en mm. de mercure	TEMPÉRATURE de la vapeur à l'entrée dans le condenseur	TEMPÉRATURE de l'eau condensée à la sortie
1.560	9.468	16	16°	12°,7
3.160	17.650	18,5	20°,5	17°,5
3.575	20.686	21	24°	20°,7

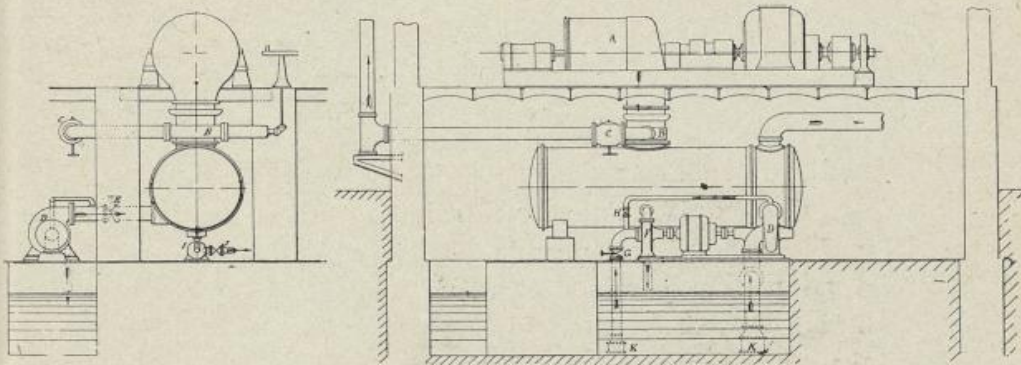


FIG. 298. — Montage de condenseur Westinghouse-Leblanc, sous une turbine à vapeur. C, vanne d'échappement libre; B, vanne d'arrêt de condenseur. Sur les condenseurs d'une capacité de 12.000 kilogrammes de vapeur à l'heure, cette vanne B est supprimée, à cause de ses dimensions excessives : en cas de marche permanente à échappement libre le condenseur doit être rempli d'eau.

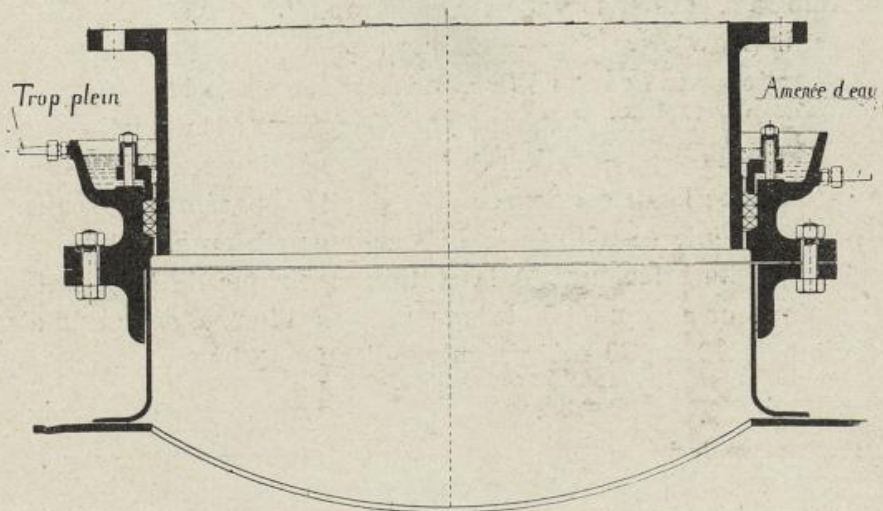


FIG. 299. — Joint glissant entre moteur et condenseur.

Le poids condensé, sans être encore très fort, est supérieur à ce qu'il était dans les essais précédents, puisqu'il atteint 38 kilogrammes par mètre carré et par heure.

Le condenseur doit être monté aussi près que possible de la turbine qu'il dessert (fig. 298). Entre les deux appareils, est un joint glissant (fig. 299). Parfois la liaison est rigide, le condenseur étant monté sur ressorts, mais cette disposition complique le montage des tuyauteries.

76. Condenseurs à ruissellement. — Les condenseurs à ruissellement réunissent en un seul appareil un condenseur à surface et un refroidisseur d'eau de condensation (1). Ils consistent en une série de tubes verticaux ou horizontaux, arrosés extérieurement et exposés à l'air. Le refroidissement de la vapeur à condenser se produit, en grande partie, par l'évaporation de l'eau d'arrosage. On ajoute souvent un ventilateur pour activer la circulation de l'air.

Les tubes sont cannelés ou ondulés, afin de présenter une plus grande surface. A l'extérieur, des saillies ralentissent l'écoulement de l'eau.

La figure 300 représente quelques dispositions de ces tubes : fil en hélice extérieur (Thiesen), treillis extérieur (Wright), petits entonnoirs (Fraser), servant aussi de raclettes, tubes cannelés, et emboutis (Row).

Le condenseur Ledward (fig. 301) est formé de tubes en fonte nervurés. La vapeur d'échappement pénètre à la partie supérieure des tubes; l'aspiration de la pompe à air s'exerce à la partie inférieure; l'eau condensée est extraite séparément. L'eau de refroidissement, distribuée à la partie supérieure, est reprise dans la bêche inférieure. A la station électrique de Kensington, ce condenseur a reçu 9.000 kilogrammes à l'heure, avec une circulation de 90 à 136 mètres cubes d'eau par heure, la surface

(1) Ces condenseurs ont été l'objet d'un mémoire important de M. OLDHAM, publié dans les *Proceedings of the institution of mechanical engineers* (avril 1899), et analysé dans la *Revue de mécanique*, mai 1899, p. 524.

condensante étant de 1.800 mètres carrés. Le vide variait de 580 à 680 millimètres de mercure, suivant la température.

Le condenseur Fraser (fig. 302) est à tubes verticaux, avec ventilateur.

Les données relatives au fonctionnement de ces condenseurs

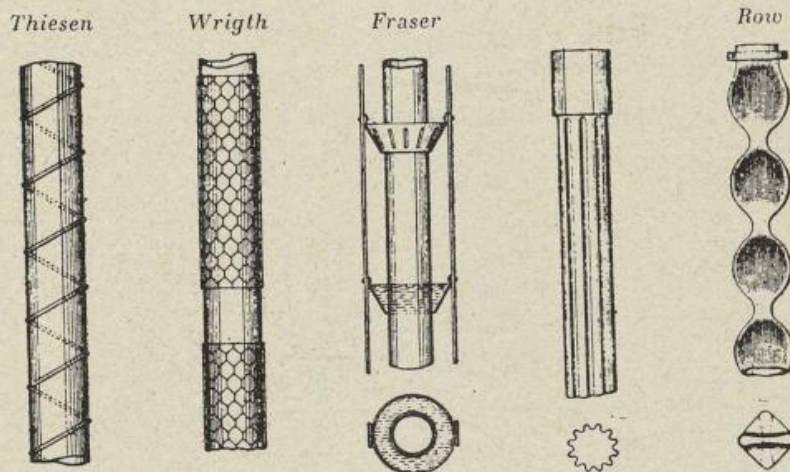


FIG. 300. — Tubes pour condenseurs à ruissellement.

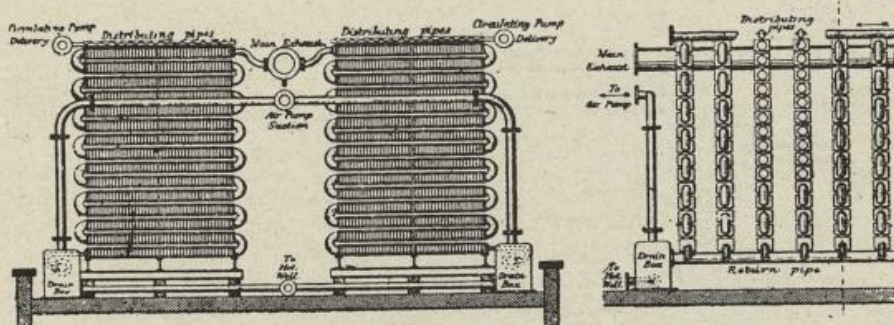


FIG. 301. — Condenseur à ruissellement Ledward.

sont assez incertaines; d'ailleurs, la surface à leur donner dépend des conditions atmosphériques, variables, et du degré de vide qu'on veut obtenir. Il est clair qu'on ne peut espérer un très grand abaissement de pression. Le résultat indiqué plus haut, 5 kilogrammes condensés par mètre carré est par heure, peut servir à une estimation de la surface nécessaire.

De même que dans les autres condenseurs, on améliore le

fonctionnement en extrayant l'air aussi froid que possible : tel est l'objet du rafraîchisseur tubulaire interposé entre le condenseur Thiesen (fig. 303) et sa pompe à air.

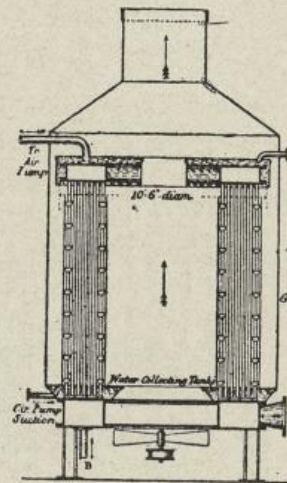


FIG. 302. — Condenseur à ruissellement Fraser.

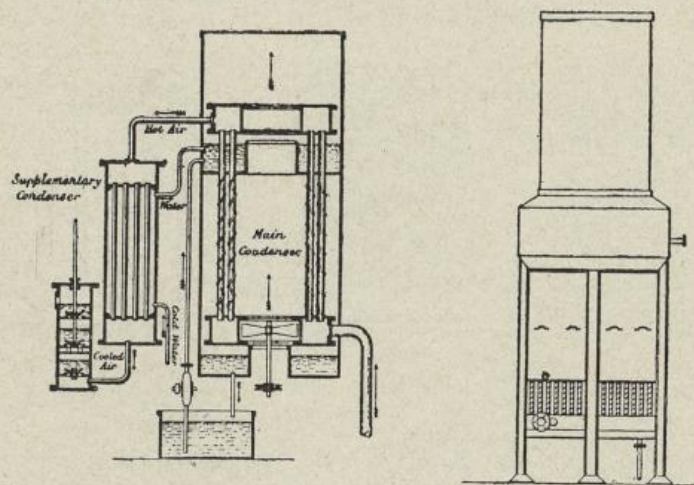


FIG. 303. — Condenseur à ruissellement Thiesen, avec ventilateur et refroidisseur d'air. La pompe d'extraction d'eau n'est pas représentée.

77. **Aéro-condenseurs.** — M. Fouché, dans son aéro-condenseur, a remplacé l'eau de condensation par le courant d'air, envoyé par un ventilateur sur une batterie de plaques creuses

ondulées, constituant un condenseur à surface. L'air chaud obtenu peut servir au chauffage d'ateliers, ou à la dessiccation de matières élaborées.

D'après M. Fouché, l'aéro-condenseur exige en moyenne 80 mètres cubes d'air, à 10°, pour condenser 1 kilogramme de vapeur, et peut donner un vide de 65 centimètres de mercure. Le vide est moindre quand la température initiale de l'air est plus élevée, ou quand on veut l'obtenir très chaud.

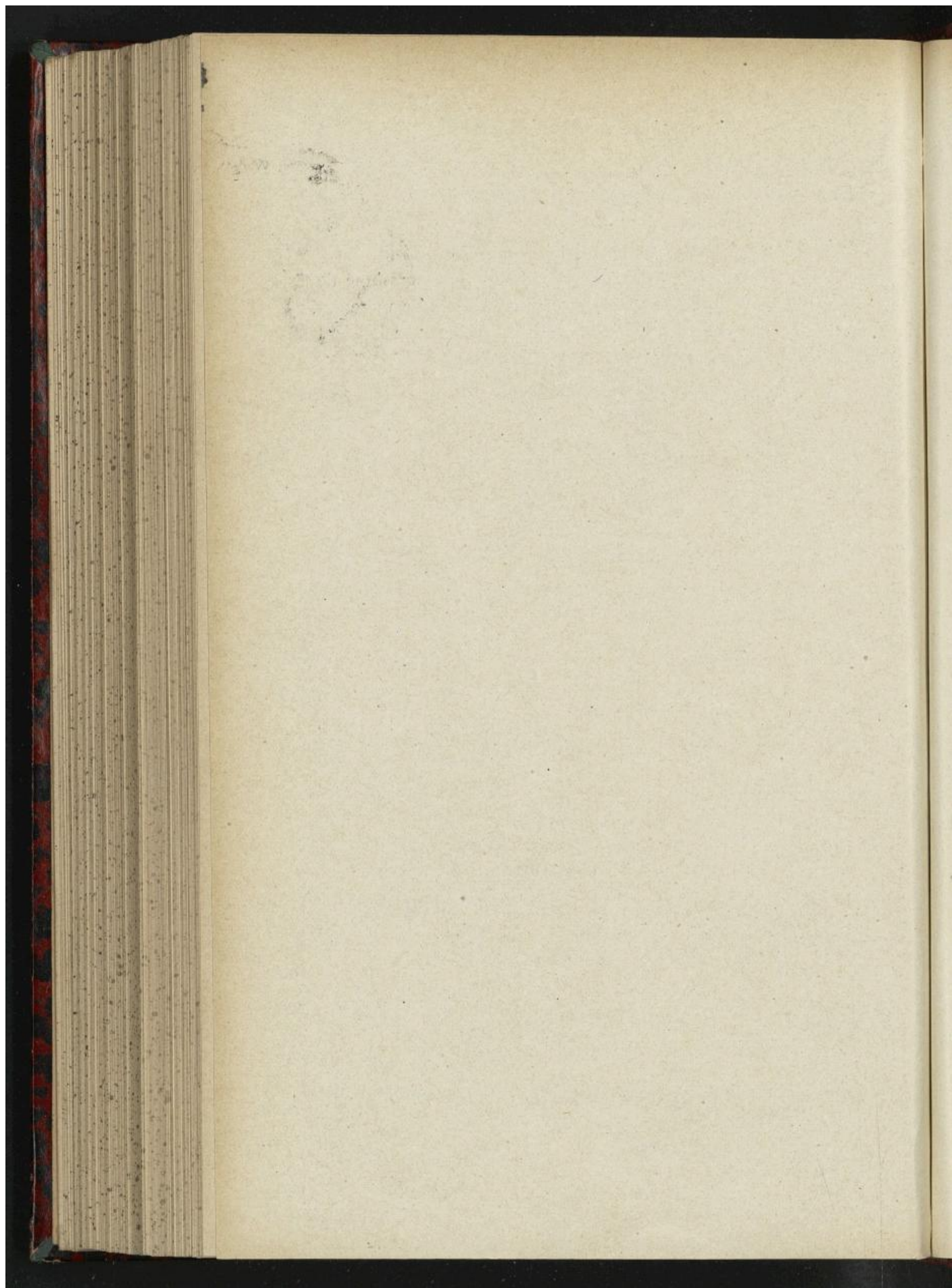


TABLE ALPHABÉTIQUE



A

Accidents, causes	255	Babcock et Wilcox, grat-	253
Acide sulfurique	258	toir	
Adams, soupape de sûreté.	227	Babcock et Wilcox, grille	
Adamson, collerettes	110	à chaîne	48
Ados, appareil	81	Babcock et Wilcox, sou-	
Aéro-condenseur	352	pape de sûreté.....	226
Air dans le condenseur...	282	Babcock et Wilcox, sur-	
Air dissous dans l'eau. 209,	282	chauffeurs	187, 197
Alimentation	203	Babcock et Wilcox, trans-	
Alimentation automatique.	203	porteurs	16
Alimentation dans la va-		Bagasse (foyers à).....	29
peur	205	Balcke (vaccination)	339
Allis-Chalmers, condenseur	293	Barlow, chaudières tubu-	
Aluminate de baryte.....	208	lares	105
Ambitubulaire (chaudière).	170	Barreaux de grille.....	25
Appareils d'alimentation..	211	Barrus, calorimètre	250
Appareils de mesure.....	272	Bazin, obturateur	235
Appareils de sûreté	220	Bellens, circulation	94
Appareils d'observation du		Belleville, chaudière.....	124
courant gazeux	78	Belleville, détendeur.....	245
Arrêts automatiques	233	Bérendorf, tubes	121
Assemblages des tubes		Bilan thermique d'essais..	252
d'eau	124	Bloc calorigène Sturtevant.	199
Associations de proprié-		Bois (combustible).....	12
taires	260	Bone (procédé)	66

B

Babcock et Wilcox, chau-		Boswell, chaudières de	
dières	139	Lancashire	110
Babcock et Wilcox, chau-		Bouilleurs	106
dières à flammes perdues	176	Bourdon, manomètre.....	231
Babcock et Wilcox, enlève-		Bouteille alimentaire	216
ment pneumatique des		Boyer-Guillon, isolants...	243
cendres	84	Bréguet, condenseur. 309,	335
		Bréguet, éjectair	305
		Brillié, circulation	94
		Briques silico-calcaires...	87
		Briquettes	13

Brochage	257
Brouhon, chaudière	148
Brown-Boveri, condenseur.	340, 345
Brûleurs pour combustible liquide	60
Brüll, expériences sur la circulation	97
By-pass	233

C

Calage des soupapes.....	259	Chaudré, indicateur de ni- veau	224
Calorie, définitions	7	Chauffage de l'air.....	103
Calorimètres Barrus, Ra- teau	250	Chauffage électrique	13
Cardiff (houille de).....	12	Chauffage méthodique....	99
Carneaux	105	Cheminées	70
Carré, condenseur baromé- trique	292	Chicanes de condenseurs..	336
Casse-vide	278	Chlorure de magnésium..	209
Catégories de chaudières..	264	Chocs dans les conduites..	239
Catharomètre	82	Chocs dans les tuyaux d'a- limentation	205
Chaleur latente	8	Chômage des chaudières..	257
Chaleur rayonnante	90	Chopin, dosage CO ²	82
Chaleur spécifique de l'air.	251	Circulation de l'eau.....	92
Chaligny, réfrigérant	322	Circulation limitée	124
Chambre de combustion..	24	Clarinettes Niclausse	164
Charbon pulvérisé... 56,	159	Classement des houilles...	12
Charge directe des soupa- pes	225	Classification des chaudiè- res	105
Chargement des foyers...	26	Coke	13
Chaudière à bouilleurs....	106	Collecteurs de chaudières.	136
Chaudière à flammes per- dues	172	Combustibles	12
Chaudière à grands corps.	106	Combustibles gazeux. 13,	66
Chaudière à tubes d'eau..	123	Combustibles liquides. 13,	60
Chaudière à tube de fumée	113	Combustibles pulvérisés...	56
Chaudière de Cornouailles.	110	Combustion	23
Chaudière de Lancashire..	110	Combustion spontanée ...	15
Chaudière écossaise	116	Comparaison des grilles...	52
Chaudière express	165	Compteurs de vapeur.....	247
Chaudière Galloway.....	110	Concours de chauffeurs...	27
Chaudière marine	116	Condensation, emploi.....	267
Chaudières multibouilleurs	109	Condenseur à mélange.	269, 275
Chaudières semi-tubulai- res	116	Condenseur à ruisselle- ment	272, 350
		Condenseur à surface. 269,	324
		Condenseur barométrique.	290
		Condenseurs centraux.....	273
		Conduite de la chauffe...	28
		Conservation de la houille.	15
		Consommation par m ²	69
		Constructeurs cités	6
		Convection	89
		Convoyeurs	19
		Cornouailles (chaudière de)	110
		Corrosions	257
		Cuissards	105

D

Dalby, transmission de la chaleur	89
Décrassage des grilles....	26
Défecteur Montupet.....	93
Dégazage des eaux.....	210
Dégraisseur	274
Degré hydrotimétrique....	206
Delaporte, éjecteur..	303, 305
Densité de l'eau.....	10
Déprimomètre Morin.....	79
Désincrustants	208
Détendeurs	244
Détroit, séparateur	241
Diamètre des soupapes de sûreté	225
Diéterlen, dégazage	210
Diéterlen, transmission de la chaleur	90
Donneley, grille	33
Dosage du gaz carbonique.	80
Doseur d'air Izart.....	78
Double spire (élément à).	127
Dripless (condenseur)....	336
Dubiau, émulseur	96
Duchesne, vapeur sur-chauffée	41
Dudgeon	116, 138
Dulac, grille	33
Dulac, soupape de sûreté..	227
Duméry, grille	38
Duquenne, chaudière....	157
Duquenne, surchauffeurs.	180, 197
Duquenne, vapeur sur-chauffée	103

E

Eastwood et Smith, pompe à air	288
Eau d'injection	277
Eaux acides	209
Echappement direct	276
Eckley B. Cox, grille....	46
Economiseurs	177
Edwards, pompe à air....	288

Ejectair	305, 345
Ejecteur	302
Ejecto-condenseurs	310
Electricité (chauffage) ...	13
Emulseur Dubiau	96
Enlèvement des résidus...	83
Epreuves	261
Epurateur Usco	208
Epuration des eaux.....	206
Erith-Riley, grille	40
Equicourant (machine)....	276
Espace libre de pompe à air	283
Essais des chaudières....	249
Essais des combustibles..	13
Essais de vaporisation. 154,	171
Explosions, production de vapeur	255
Explosions simultanées....	255
Extracteur d'air W. L....	304
Extractions	253
Extraction séparée de l'air.	288

F

Fama, foyer	40
Féry, pyromètre	82
Field, chaudière	161
Field, tube	160
Flotteurs	223
Flux direct (générateur à).	150
Forney, grille oscillante...	27
Fouché, aéro-condenseur..	352
Fournier, pyromètre.....	82
Foyers amovibles	116
Foyers extérieurs	106
Foyers intérieurs	109
Foyers ondulés	110
Fragilité des tôles.....	256
Fraîsil	83
Fraser, condenseur	351
Fryer et Cie, réchauffeur.	218
Fusibilité des métaux....	82

G

Galloway, chaudière	110
Galloway, surchauffeur...	187

Gaz carbonique	23
Gaz dissous	209
Gazogènes	66
Génevet, barreau	25
Génevet, brûleurs	61
Génevet, régulateur d'alimentation	204
Génevet, séparateur d'huile	241
Gradins (grille à).....	28
Grattoirs pour tubes.....	253
Green, économiseur	177
Grille à gradins.....	28
Grille, chaudière	131
Grilles	24
Grilles à chaîne.....	44
Grilles inclinées	28
Grilles mécaniques	33

H

Hall, condenseur	272
Hall, pompe alimentaire..	212
Hamon, réfrigérants	318
Hawley, grille	36
Humidité dans la houille.	13
Hydro-déjecteur	144
Hydrotimétrie	206

I

Incinération	14
Indicateur de vide	272
Indicateurs de niveau....	220
Inexplosibles (chaudières).	123
Injecteur à vapeur d'échappement	217
Injecteurs	211
Izart, abaque de combustion	70
Izart, indicateur de débit de vapeur	247
Izart, manomètre enregistreur	78
Izart, tirage	70

J

Joessel, tubes ondulés....	240
Joint glissant (condenseur).	350
Joya, chaudière	172
Junkers, calorimètre	14

K

Kammerer, chaudières en chômage	257
Kammerer, économiseur...	177
Kammerer; transmission de la chaleur	90
Knoblauch et Jacob, vapeur surchauffée	11

L

Lagosse et Bouché, chaudière	147
Lampes baladeuses	253
Lancashire (chaudière de).	110
Lanet, chaudières	172
Lavezzari, injecteurs	213
Leblanc, éjecteur	303
Lecouteux et Garnier, condenseur	287
Ledward, condenseur	350
Leprince - Ringuet, transmission de la chaleur..	90
Lethuillier - Pinel, indicateur magnétique	224
Lethuillier - Pinel, injecteur	216
Lethuillier - Pinel, obturateurs	234
Lethuillier - Pinel, soupape de sûreté	228
Levier des soupapes	227
Locomobiles, chaudières...	116
Locomotives, chaudières...	114

M

Mac Donald, séparateur...	241
Mac Nicol, chaudière.....	173
Machefers	26

Mahler, pouvoir calorifique	14
Manchester, expériences...	259
Manomètre étalon	232
Manomètres	230
Manomètres à eau	78
Manque d'eau	259
Manutention des combustibles	15
Marc Séguin, chaudière tubulaire	113
Marchis, vapeur surchauffée	103
Margo, grille	29
Matières grasses dans les chaudières	208
Mazout	13
Mesure des pressions.....	231
Mix, tirage	74
Montage en boucle des tuyaux	238
Montupet, circulation.....	93
Montupet, déflecteur.....	95
Montupet, tube Field modifié	161
Morin, déprimomètre	79
Moritz, chocs dans les tuyauteries d'alimentation	205
Morton, éjecto-condenseur.	312
Muller, Roger et Cie, obturateur	237
Multibouilleurs (chaudières)	109
Musnicki, séparateur	240

N

Nature des eaux.....	206
Négligences dans l'emploi.	258
Nettoyages	252
Neu, réchauffeur	180
Newcomen, machine de...	268
Niclausse, chaudière	162
Niclausse, grille	36
Nordberg, condenseur	285

O

Obus Mahler	14
Oldham, condenseurs	350
Obturateur Bazin	235
Obturateur Lethuillier-Pinel	234
Obturateur Müller, Roger et Cie	237
Ogden, purgeur	279
Orrok, transmission de la chaleur	327
Orsat, appareil	80

P

Pailles	257
Parenty, écoulement de la vapeur	248
Parsons, condenseur	303
Perdrizet, chambres de combustion	24
Petit cheval alimentaire...	211
Pickle pot	267
Pièze	8
Plaques de garde (Bérendorf)	123
Poids de vapeur dans l'air.	345
Poids du mètre cube d'eau.	10
Polonceau, épreuve	262
Pompe à air.....	282
Pompes alimentaires	211
Pompes centrifuges (condenseurs)	293
Pompes de condenseurs.	282, 298
Portes automatiques	65
Portes de foyer, fermeture.	256
Pouvoir calorifique	14
Prat - Daniel, réchauffeur d'air	200
Prat, tirage	74
Pression effective	8, 231
Pression, mesures anglaises	231
Pression, unités	8
Prises de vapeur.....	233

Proctor, foyer	34
Production de la chaleur..	23
Propriétés de la vapeur d'eau	7
Protecteurs de tubes de ni- veau	221
Purgeur de condenseur...	279
Purgeur Royle	243
Pustules	257
Pyromètres	82

Q

Quantité d'eau d'injection.	277, 324
Quigley-France, combusti- ble pulvérisé	58

R

Rateau, calorimètre	250
Rateau, écoulement de la vapeur	248
Rateau, éjecto-condenseur.	312
Raymond, alimentation dans la vapeur.....	205
Réchauffage de l'eau d'ali- mentation	99
Réchauffage par la vapeur.	216
Réchauffeurs	99, 177
Réchauffeurs d'air	197
Réchauffeurs tubulaires...	180
Récipients	264
Réfrigérants	317
Refroidissement de l'eau..	315
Registre	73
Registre automatique. 73,	127
Réglementation	262
Règles de la chauffe.....	28
Régnauld, chaleurs spécifi- ques	251
Régnauld, tables	7
Régulateurs d'alimentation.	126
Rendement des chaudières.	251
Reniflard	267
Résidus de combustion...	82
Robinets de jauge.....	224
Robinets de vidange.....	240

Romanet, grille rotative...	52
Ronchamp, condenseur....	273
Roser, chaudière ...	144, 170
Roser, surchauffeur..	191, 197
Royle, détenteur	246
Royle, séparateur	243
Row, réchauffeur	218
Ruissellement (condenseur à)	272

S

Salinomètre	337
Schmidt, lavage des chau- dières	254
Schmidt, surchauffeur	180
Schwøerer, surchauffeur...	180
Sée, réfrigérant	317
Séguin, chaudière	113
Séparateurs d'eau, d'huile.	240
Ser, transmission de la chaleur	88
Serve, tubes à ailettes....	120
Sifflets d'alarme	224
Sillons	258
Silos	19
Sinigaglia, soupapes de sû- reté	225
Société Alsacienne, chau- dière	150, 170
Solignac, tuyères	131
Soufre, action	258
Soupapes à grande levée..	227
Soupapes d'échappement direct	276
Soupapes de sûreté	224
Stabilisateurs ramasseurs.	313
Stein, charbon pulvérisé..	56
Stérose, dosage de CO ²	82
Sthène	8
Stirling, chaudière	148
Sturtevant, réchauffeur d'air	199
Surcharge des soupapes...	259
Surchauffe de la vapeur..	100
Surchauffeurs	180
Surface combustion	67
Surface condensante	324

Surfaces de chauffe..... 88
Surveillance 260

T

Table pour la vapeur d'eau. 9
Tailfer, grille 40
Tampons autoclaves 138
Thermix (réchauffeur d'air) 201
Thermoscope 81
Thiesen, condenseur 350
Thunderer (explosion) ... 225
Timbre 262
Tirage 68
Tirage combiné Prat..... 77
Tirage équilibré 76
Tirage forcé 73
Tirage naturel 69
Tischbein, chaudière 116
Transmission de la chaleur 88
Transporteurs de cendres. 83
Transporteurs de houille.. 16
Trappes d'expansion 256
Travail d'alimentation ... 203
Trompe Westinghouse-Leblanc 280, 294
Trompes pour condenseurs. 294
Tubes d'eau 105
Tubes de fumée..... 105
Tubes de niveau 220
Tubes de niveau à glace réfractante 220
Tubes, diamètres 120
Tubes en laiton..... 119
Tubes Field 160
Tubes ondulés 239
Turbines à vapeur d'échappement 269
Tuyauteries de vapeur. 233, 237

U

Underfeed Stoker 38
Underfeed Stoker, grille à chaîne 51
Underfeed Stoker, transporteur de cendres..... 83

Unographe 82
Usco, épurateur 208
Usco, manomètre 78
Usco, réchauffeurs d'air... 198
Usco, transporteur de cendres 83
Utilisation de la chaleur.. 88

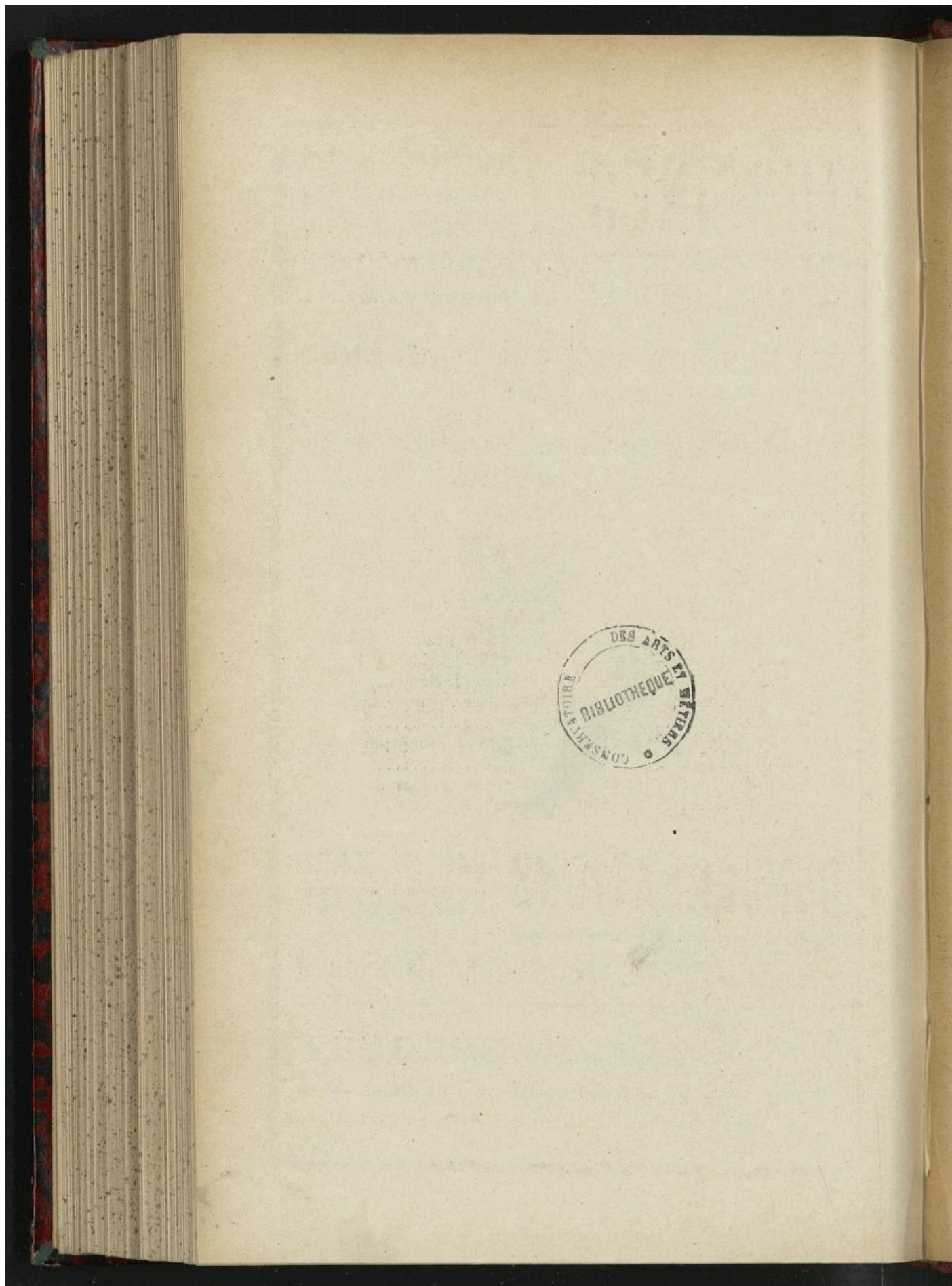
V

Vaccination de l'eau..... 339
Vacuum increaser 303
Valve mélangeuse 195
Vapeur d'eau (table)..... 9
Vapeur surechauffée 11
Vidange à froid..... 254
Viroles des tubes..... 119

W

Walckenaer, assemblages des tubes d'eau..... 124
Walckenaer, chocs dans les conduites 239
Walckenaer, circulation .. 94
Walckenaer, réglementation 262
Walckenaer, soupapes de sûreté 227
Walckenaer, tubes de niveau 221
Watt, condenseur 267
Weiss, condenseur barométrique 293
Weyher et Richemond, chaudière 116
Weyher et Richemond, condenseur 286
Westinghouse - Leblanc, condenseur 299, 347
Westinghouse - Leblanc, éjecto-condenseur 313
Westinghouse, trompe, 280, 294
Wheeler, condenseur 331
Worthington, condenseur.. 277
Wright, condenseur 350





TURBINES

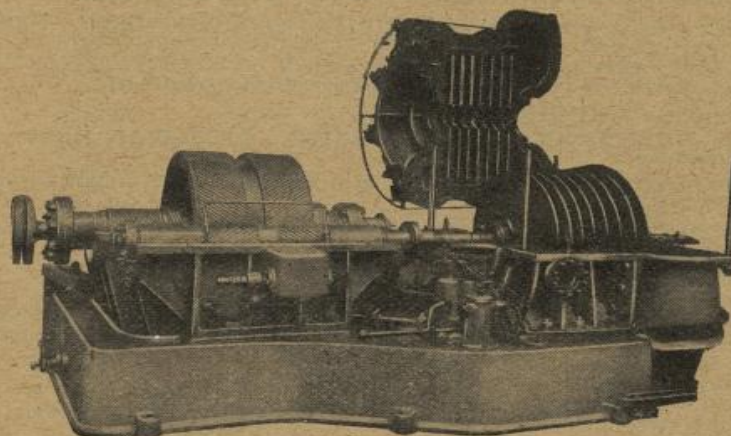
A VAPEUR

A HAUTE PRESSION
A BASSE PRESSION
A CONTRE-PRESSION
A CONDENSATION
A PRÉLÈVEMENT

GROUPES TURBO-ÉLECTROGÈNES
DE 10 A 1.800 Kw.

AVEC

TURBINES MULTICELLULAIRES
A RÉDUCTEURS



CONDENSATIONS

PAR MÉLANGE
PAR SURFACE

avec **L'ÉJECTAIR BREGUET-DELAPOORTE**

USINES
à
PARIS
DOUAI
DÉVILLE-LES-ROUEN

MAISON BREGUET

□—□ Siège Social, 19, rue Didot □—□
Service Commercial, 34, r. de Châteaudun

1^{re} JOURNÉE INDUSTRIELLE

est le véritable journal officiel de l'industrie et du commerce

les INDUSTRIELS

les COMMERÇANTS

les TECHNICIENS y trouvent:

Un résumé des **FAITS** politiques et divers, qui les met rapidement au courant de la situation générale;

des Articles sur l'**ACTUALITÉ** ÉCONOMIQUE, INDUSTRIELLE ET COMMERCIALE;

des **ÉCHOS** vivants et variés (la vie scientifique et technique; les arts appliqués; sports mécaniques et tourisme);

des **INFORMATIONS** précises et contrôlées sur la **vie des industries** et des **entreprises commerciales**, classées par industrie: Mines et Combustibles, Métallurgie, Mécanique, Électricité, Gaz et Eau, Transports, Textiles, Chimie Industrielle, Bâtiment, Matériaux, Bois, Cuir, Papier, Caoutchouc, Alimentation, Art et Luxe, Entreprises coloniales, etc. (FRANCE, DÉPARTEMENTS, ÉTRANGER);

des **NOTES** scientifiques et techniques de vulgarisation, rédigées par les techniciens les plus qualifiés;

les **DOCUMENTS OFFICIELS** intéressant l'Industrie et le Commerce;

les Avis relatifs aux **ADJUDICATIONS, Concours, Fournitures et Ventes**, ainsi que les résultats. Cette rubrique est LA PLUS COMPLÈTE DANS TOUTE LA PRESSE;

une rubrique **EXPANSION-EXPORTATION** (débouchés, situation des marchés et, en général, tout ce qui peut aider à faire des affaires à l'extérieur);

des rubriques très complètes consacrées

au **MOUVEMENT PROFESSIONNEL ET SOCIAL** (activité syndicale, conflits, etc.);

aux **TRANSPORTS** (chemins de fer, transports maritimes et fluviaux, marchés des frets, etc.);

à l'activité des **CHAMBRES DE COMMERCE, Syndicats, Associations, Groupements divers**;

aux **MARCHÉS FINANCIERS** (COURS COMPLETS DES CHANGES), etc.

"la Cote Commerciale"

seule rubrique, dans la presse, donnant pour les matières premières et produits principaux, des **COURS QUOTIDIENS COMPLETS ET EXACTS** et, notamment, en dernière heure, les **COURS DE CLÔTURE DES MARCHÉS ANGLAIS ET AMÉRICAINS** (métaux, matières grasses, essences, pétroles, cotons, laines, jute, chanvre, céréales, cafés, sucres, etc.)

Cette rubrique est tenue à jour avec un soin minutieux par des rédacteurs spécialistes et grâce aux dépêches, câblogrammes et communications téléphoniques de nombreux correspondants. En la suivant chaque jour, on connaît les mouvements en temps utile et avec trois ou quatre semaines d'avance sur les lecteurs des revues périodiques.

PRINCIPALES DIVISIONS

de la Cote Commerciale :

(Cours et situation des marchés français et étrangers).

Métaux autres que le fer.

Fontes, fers, aciers, quincaillerie.

Vieux métaux.

Matériaux de construction, bois.

Textiles, (cotons, laines, jute, chanvre, lin, soie)

Papiers, chiffons.

Cuir, peaux, os, cornes.

Matières grasses, pétroles, essences, résines.

Caoutchoucs, vieux caoutchoucs.

Produits chimiques, engrais.

Produits agricoles et alimentaires (céréales, féculents, cafés, sucres, vins, alcools, bestiaux, etc.)

Produits divers.

Les cours quotidiens sont complétés par des *revues hebdomadaires* des grands marchés.

"la Cote Commerciale" est plus nécessaire à l'industriel, au commerçant, au technicien, que la *Cote de la Bourse* au possesseur de valeurs mobilières.

Directeur: **Ét. BERNARD-PRÉCY**

Rédacteur en Chef: **Lucien ROMIER**

ADMINISTRATION & RÉDACTION

7, rue Geoffroy-Marie — PARIS (IX^e)

En vente dans les gares et principaux kiosques de Paris et des départements. — Spécimen sur demande.

ABONNEMENTS

	UN AN	6 MOIS	3 MOIS
France, Sarre	45 fr.	25 fr.	14 fr.
Belgique, Luxembourg	60 fr.	33 fr.	18 fr.
Union postale	85 fr.	46 fr.	26 fr.

Chèques postaux: 3824-PARIS

Le Numéro: 15 CENTIMES

43^e Année

LE

43^e Année

GÉNIE CIVIL

REVUE GÉNÉRALE HEBDOMADAIRE
DES
INDUSTRIES FRANÇAISES ET ÉTRANGÈRES

PRIX DE L'ABONNEMENT PAR AN :
France et Colonies, 70 francs ; Étranger, 85 francs

Le Numéro : 2 Francs

Depuis plus de 42 ans qu'il existe, le **GÉNIE CIVIL** occupe une des premières places parmi les grandes publications techniques de la France et de l'Étranger.

Cette importante revue *hebdomadaire*, fondée en 1880, constitue une vaste encyclopédie où l'on trouve traitées toutes les questions qui peuvent intéresser les Ingénieurs et les Industriels; elle s'adresse également à toutes les personnes désireuses de se tenir au courant des découvertes modernes et des applications nouvelles de la science.

Le **GÉNIE CIVIL** paraît tous les *samedis*; chacun de ses numéros comporte de 20 à 28 pages de texte, illustrées de nombreux dessins et photographies; il est très fréquemment accompagné d'une ou plusieurs planches hors texte.

La publication forme, chaque année, deux beaux volumes grand in-4° jésus d'environ 700 pages chacun, y compris une table des matières rendant très facile la recherche des articles contenus dans chaque volume.

Cette revue, s'adressant spécialement aux Ingénieurs et aux Industriels, est un excellent organe de publicité; aussi ses annonces, bien que toujours complètement séparées du texte proprement dit, sont-elles très appréciées.

ADMINISTRATION ET RÉDACTION :
6, Rue de la Chaussée-d'Antin, PARIS (9^e)

Téléph. : GUTENBERG 15-98

Chèque Postal : 365-21

Le Tirage Prat

Le Tirage PRAT a été adopté depuis de nombreuses années dans toutes les Industries. Appliqué d'une manière rationnelle par une firme spécialisée comme la nôtre, il a toujours donné des rendements des plus satisfaisants.

Les questions de tirage et de chaufferie en général nous étant très familières, il nous est facile de vous proposer pour chacun des cas qui vous intéressent le type d'appareil qui peut le mieux convenir suivant le genre de Tirage qui vous est nécessaire :

**TIRAGE INDUIT
TIRAGE ASPIRÉ
TIRAGE INDUIT-ASPIRÉ
TIRAGE COMBINÉ
TIRAGE FORCÉ**

Nous tenons à votre disposition les plus hautes références, ainsi que la nomenclature des derniers perfectionnements.

**Société des Cheminées LOUIS PRAT
A TIRAGE INDUIT
144-146, Champs-Élysées, PARIS**

Téléph. Elysées 01-77, 21-95
Adr. Télégr. Tiragpra-Paris



TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

PRODUCTION DE LA VAPEUR

CHAPITRE PREMIER

Généralités

Remarques préliminaires	5
Propriétés de la vapeur d'eau	7

CHAPITRE II

Combustibles

Combustibles servant à la production de la vapeur	12
Essais des combustibles	13
Conservation du charbon	15
Manutention	15

CHAPITRE III

Production de la chaleur

Combustion	23
Grilles	24
Grilles inclinées	28
Grilles mécaniques	33
Combustibles pulvérisés	56
Combustibles liquides	60
Combustibles gazeux	66
Tirage	68
Tirage naturel	69
Tirage forcé	73
Tirage équilibré	76
Appareils d'observation du courant gazeux	78
Résidus solides de la combustion	82

CHAPITRE IV

Utilisation de la chaleur

Surfaces de chauffe.....	88
Transmission de la chaleur.....	88
Circulation de l'eau	92
Réchauffage de l'eau d'alimentation.....	99
Surchauffe de la vapeur.....	100
Chauffage de l'air.....	103

CHAPITRE V

Principaux types de chaudières

Classification	105
Chaudières à grands corps, avec foyers extérieurs.....	106
Chaudières à grands corps avec foyers intérieurs.....	109
Chaudières à tubes de fumée.....	113
Chaudières à tubes d'eau	123
Chaudières à tubes d'eau, à circulation limitée.....	124
Chaudières à tubes d'eau peu inclinés.....	136
Chaudières à tubes d'eau voisins de la verticale.....	148
Chaudières à tubes d'eau concentriques.....	160
Chaudières à tubes d'eau de petit diamètre.....	165
Chaudières mixtes	165
Chaudières à flammes perdues.....	172
Réchauffeurs d'eau	177
Surchauffeurs	180
Réchauffeurs d'air	197

CHAPITRE VI

Alimentation

Généralités	203
Nature des eaux; épuration.....	206
Enlèvement des gaz dissous.....	209
Appareils d'alimentation	211
Réchauffage par la vapeur.....	216

CHAPITRE VII

Appareils de sûreté

Indicateurs de niveau.....	220
Soupapes de sûreté.....	224
Manomètres	230

CHAPITRE VIII

Tuyauterie et accessoires

Prises de vapeur.....	233
Arrêts automatiques	233
Tuyauteries de vapeur.....	237
Séparateurs d'eau et d'huile.....	240
Enveloppes isolantes	243
Détendeurs	244
Compteurs de vapeur.....	247

CHAPITRE IX

Essais et entretien

Essais	249
Nettoyages	252

CHAPITRE X

Accidents et surveillance

Causes des accidents	255
Surveillance	260
Epreuves	261
Réglementation des chaudières en France.....	262

DEUXIÈME PARTIE

CONDENSATION DE LA VAPEUR

CHAPITRE XI

Généralités

Emploi de la condensation.....	267
Divers modes de condensation.....	269
Appareils de mesure	272
Condenseurs centraux.....	273

CHAPITRE XII

Condenseurs à mélange

Dispositions générales	275
Pompe à air.....	282

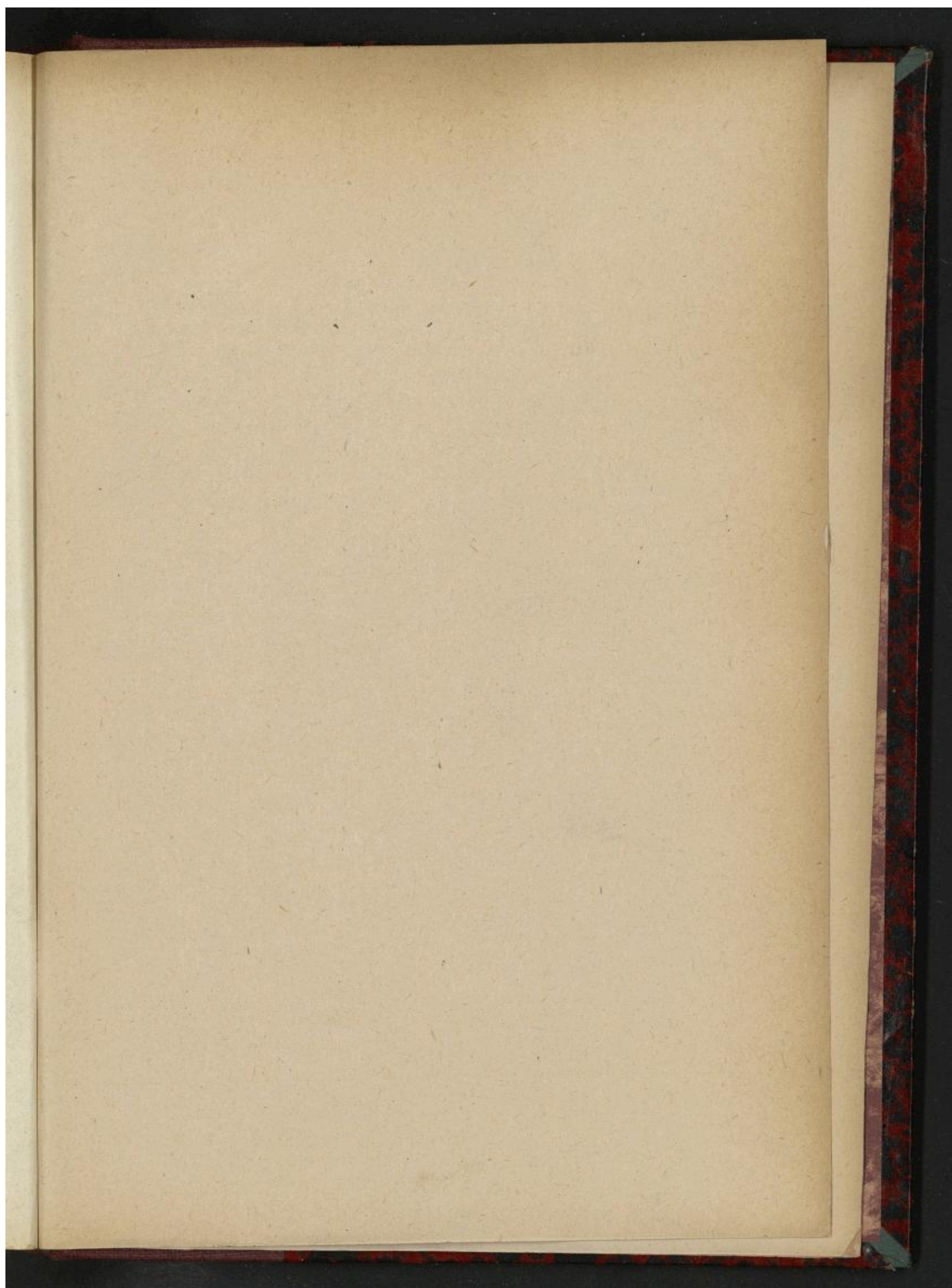
Extraction séparée de l'air et de l'eau.....	288
Trompes et éjecteurs	294
Ejecto-condenseurs	310
Refroidissement de l'eau.....	315

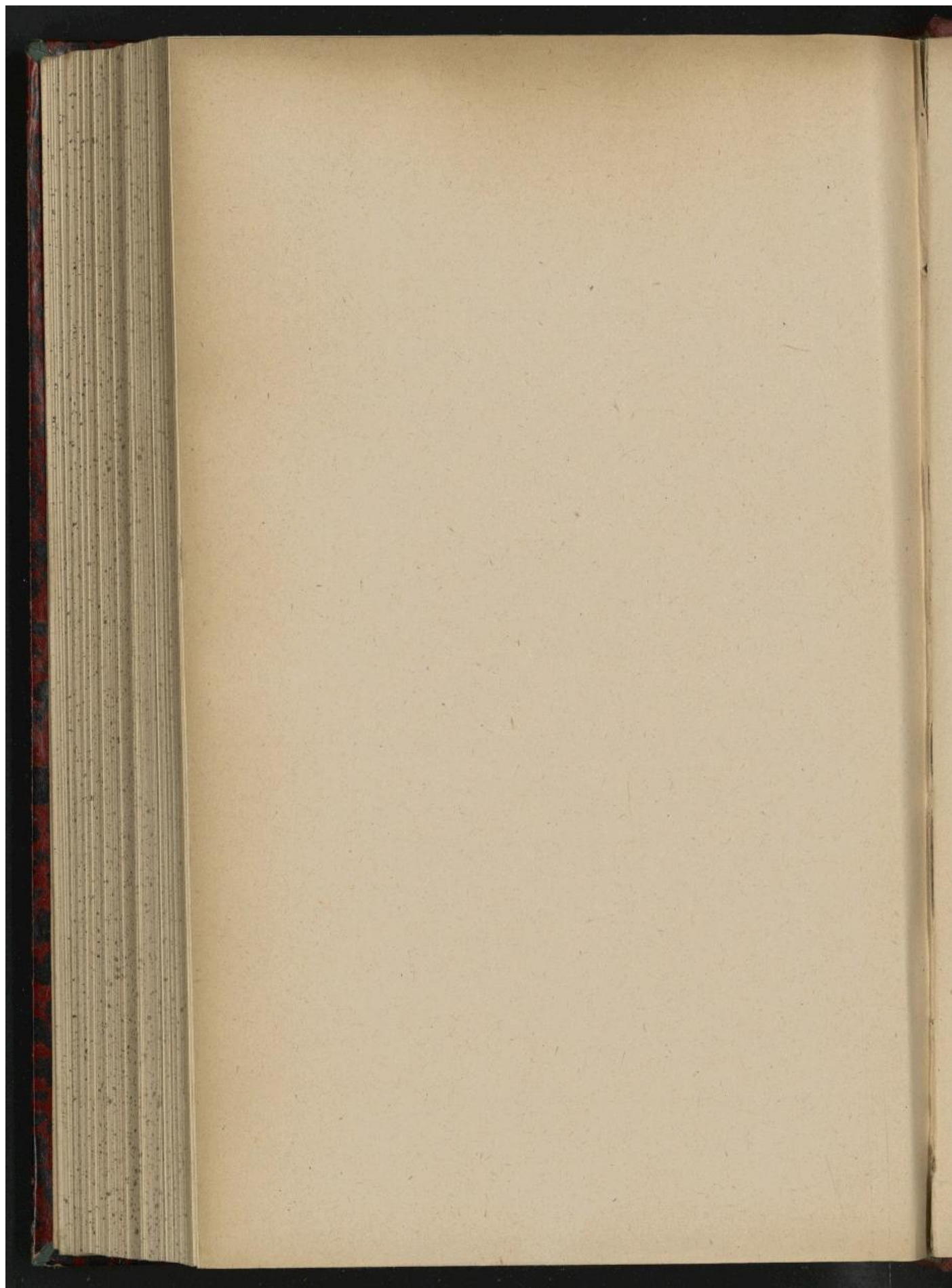
CHAPITRE XIII

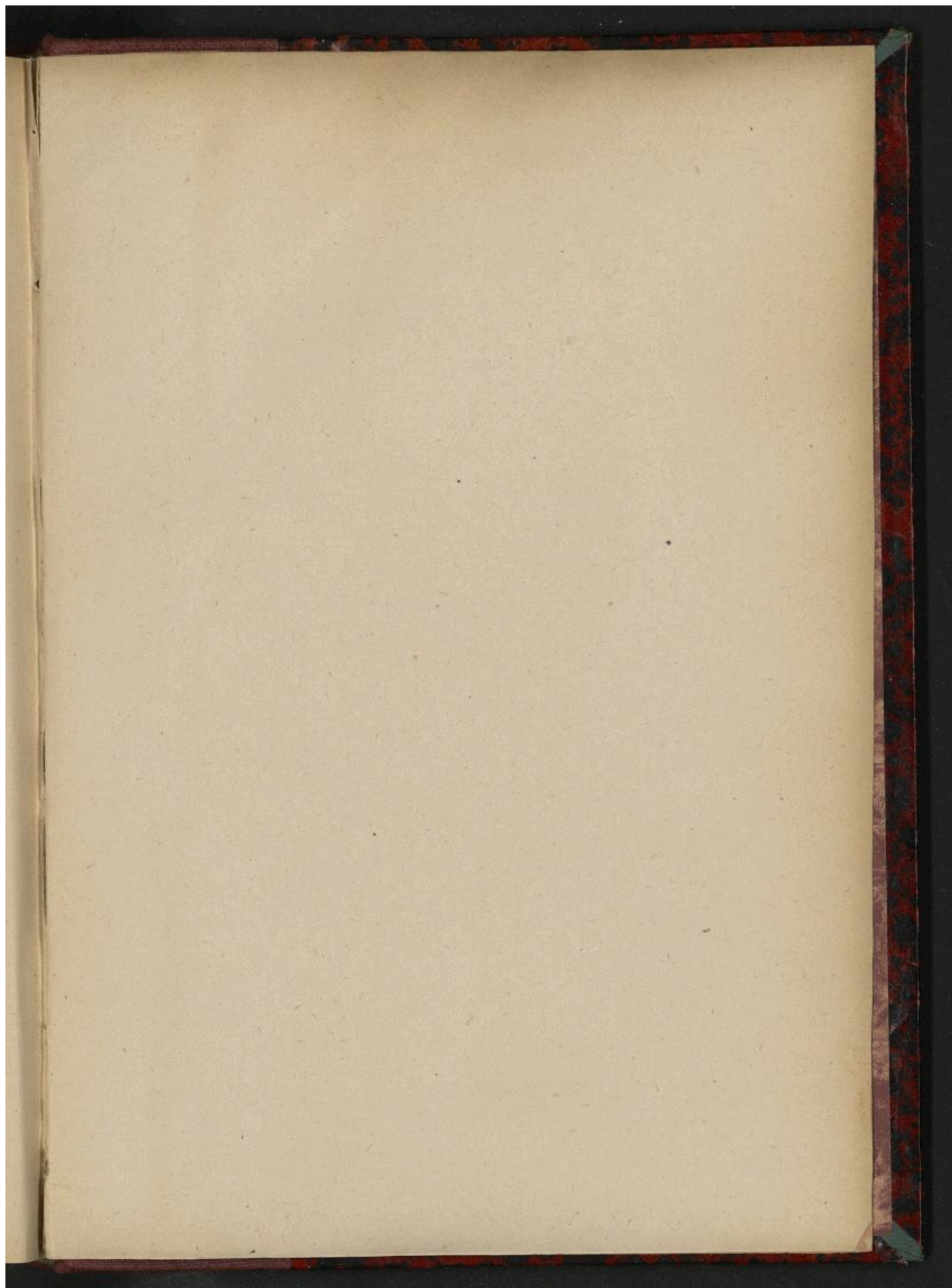
Condenseurs à surface

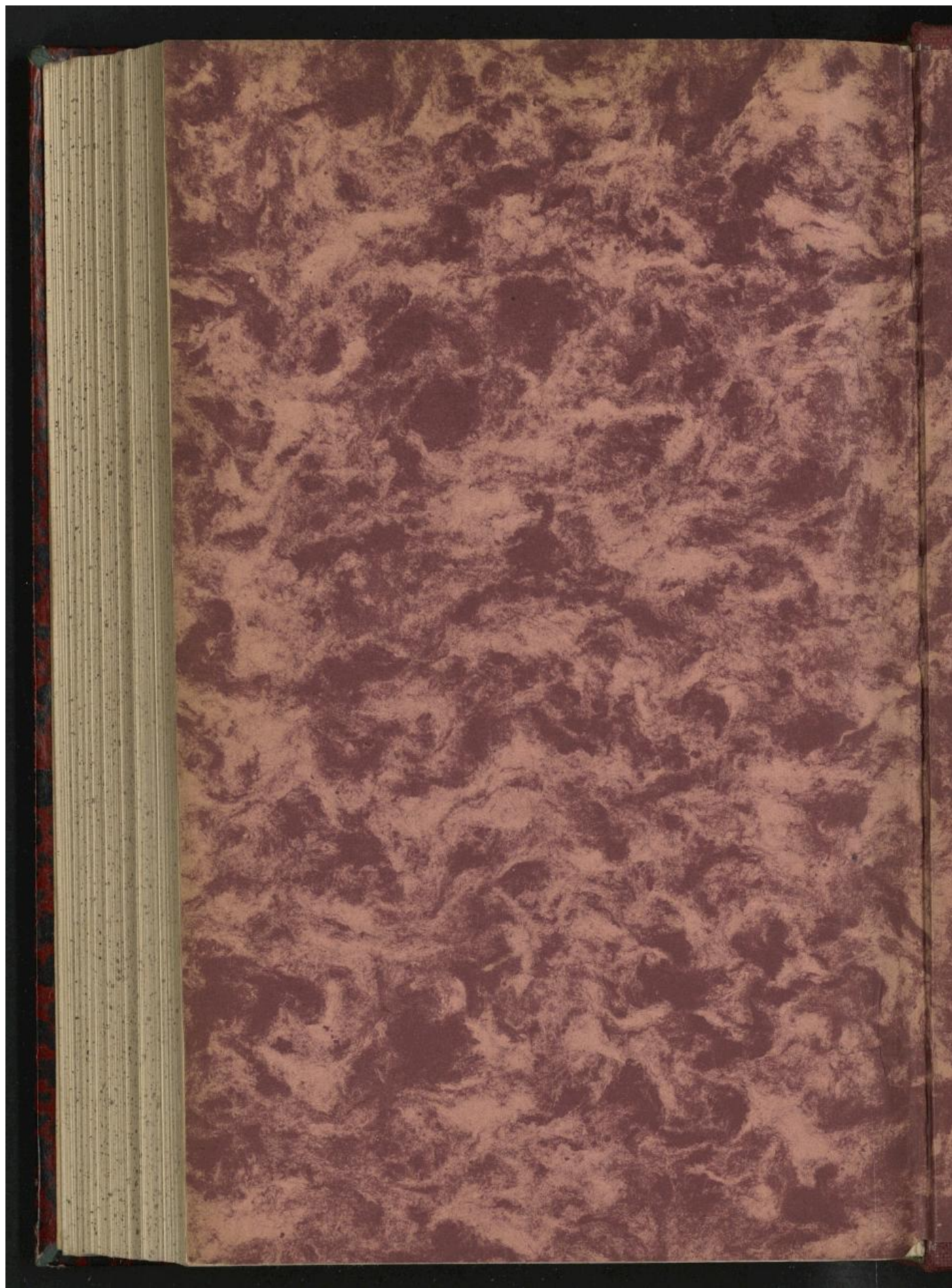
Surface condensante	324
Dispositions générales	329
Pompes	340
Types de condenseurs.....	345
Condenseurs à ruissellement.....	350
Aéro-condenseurs	352
TABLE ALPHABÉTIQUE	355
TABLE DES MATIÈRES	363



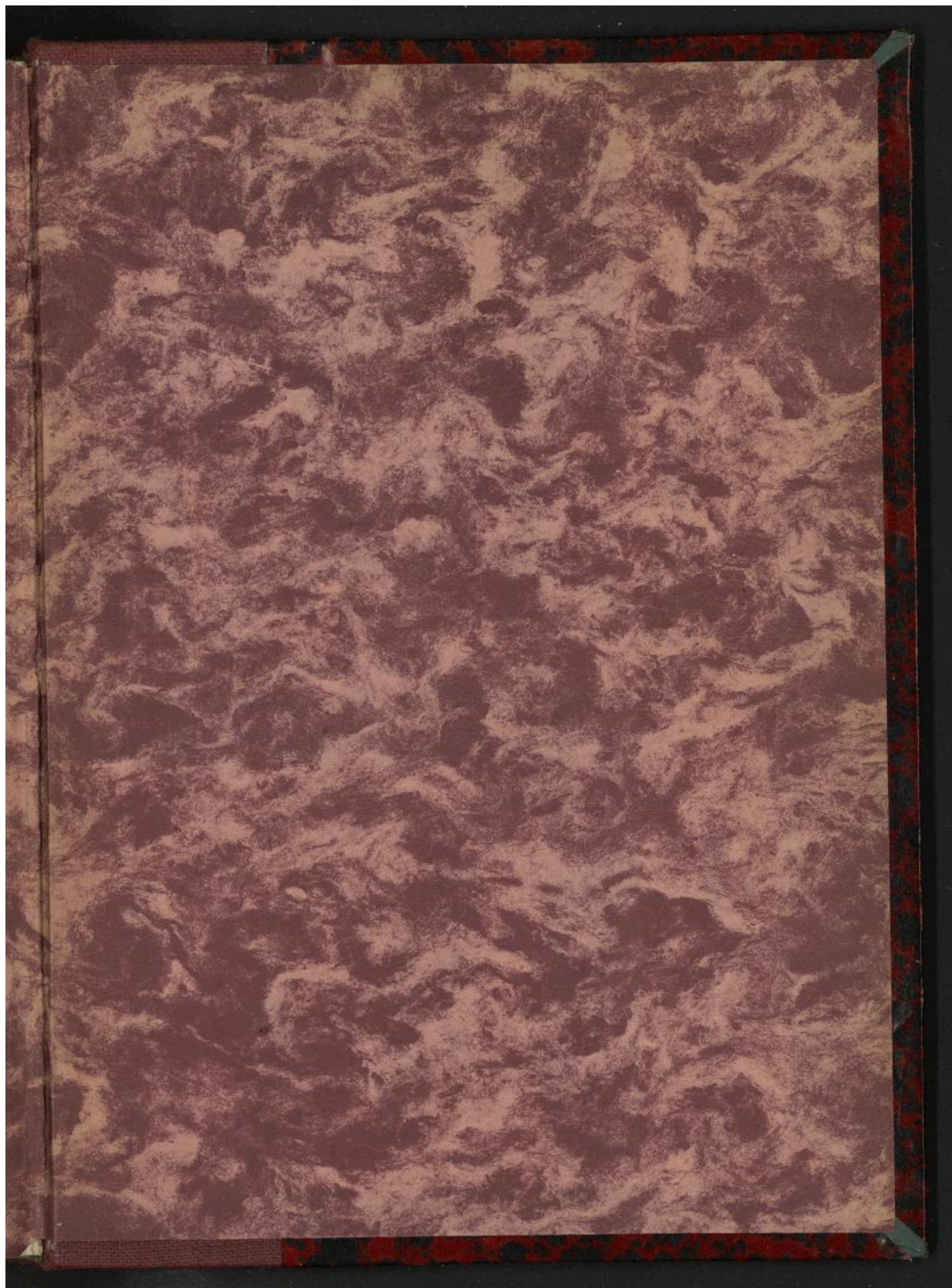








Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires