

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.

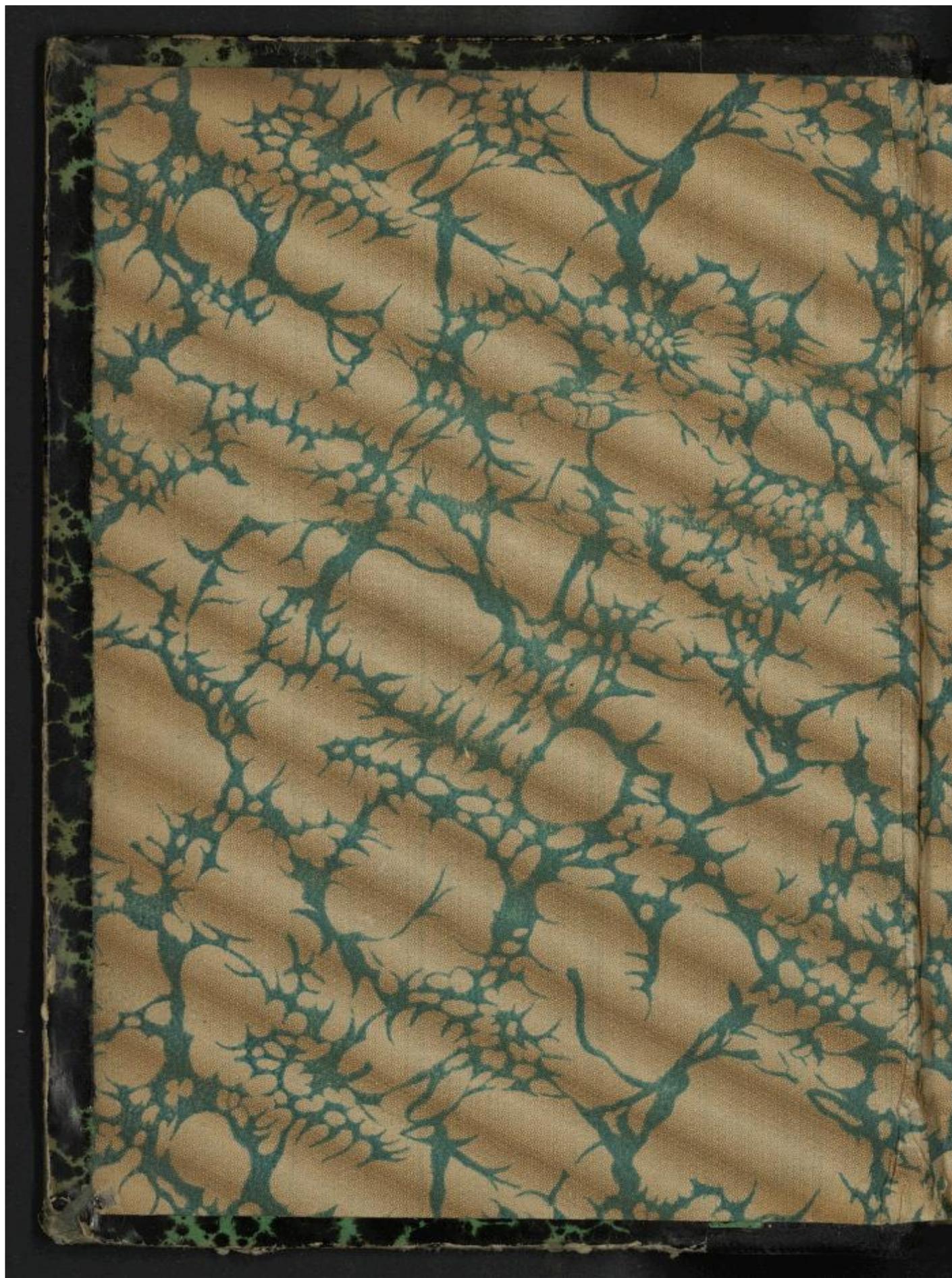
4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

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.

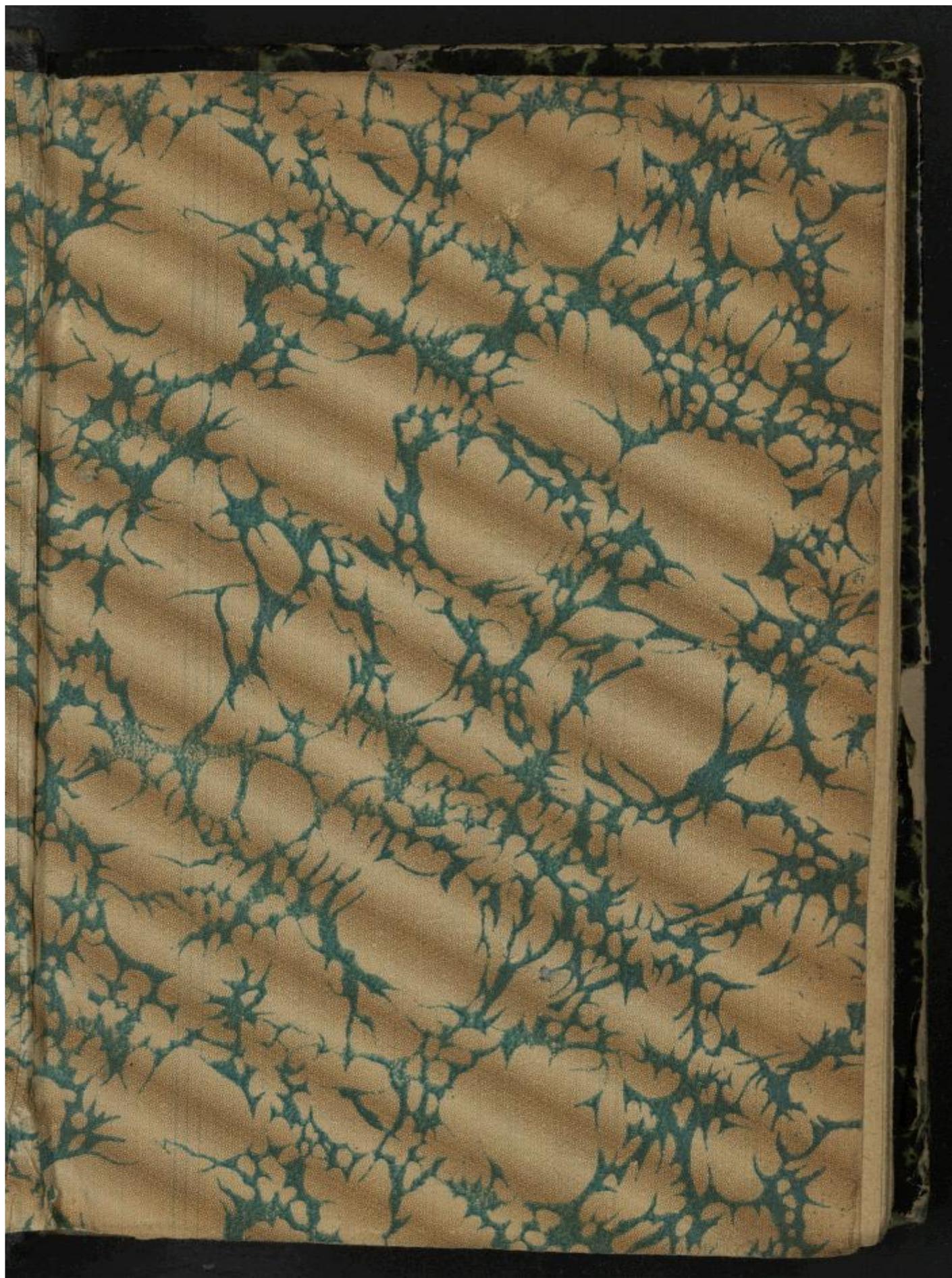
6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

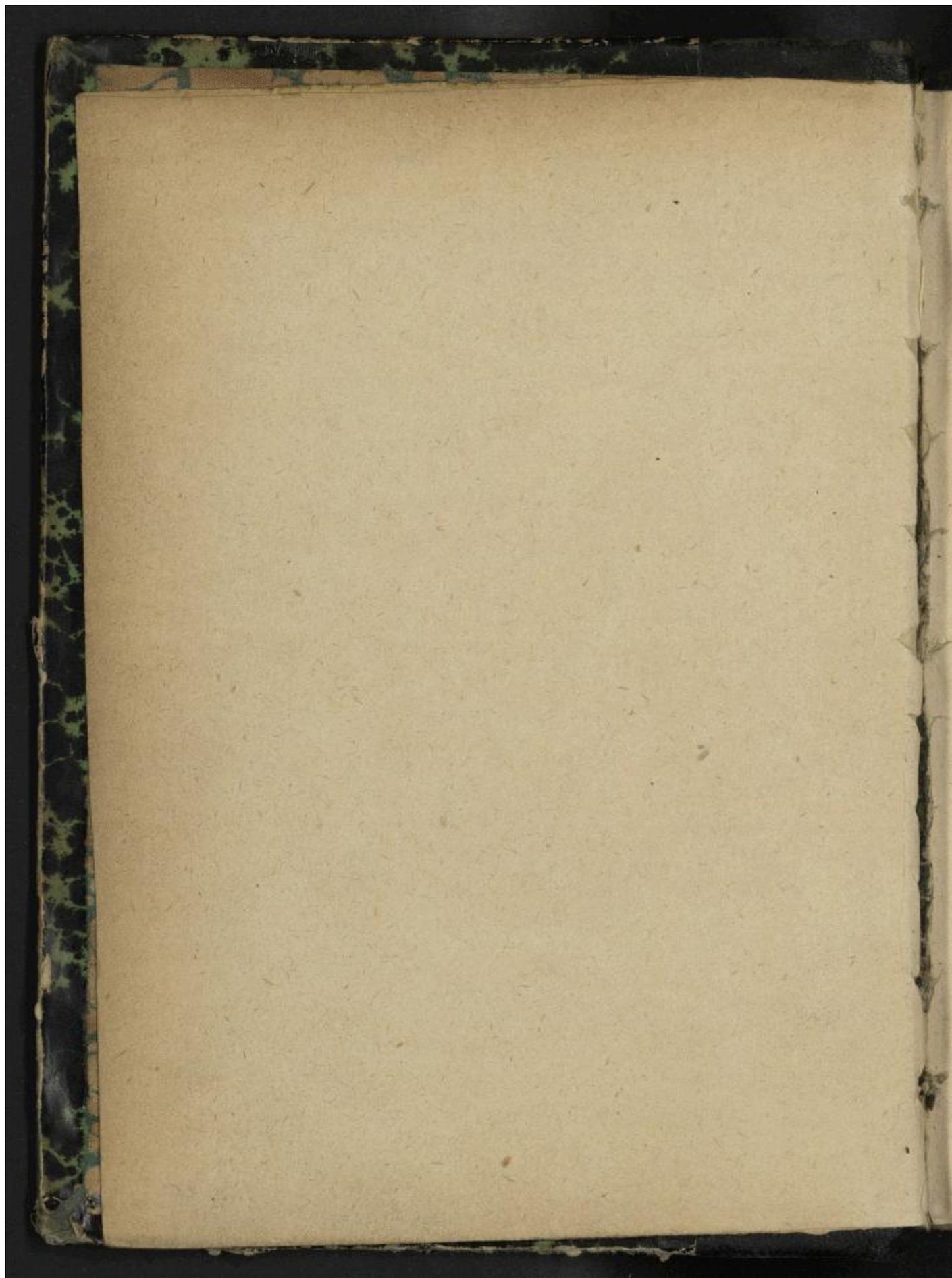
Auteur(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Titre	Manuel de la machine à vapeur : guide pratique décrivant le fonctionnement et les organes des machines et des chaudières à vapeur à l'usage des mécaniciens, chauffeurs, dessinateurs, étudiants, propriétaires d'appareils à vapeur
Adresse	Paris ; Liège : Librairie polytechnique Ch. Béranger, 1924
Collation	1 vol. (IX-424 p.) : ill. ; 20 cm
Nombre d'images	450
Cote	CNAM-BIB 12 De 49 (4)
Sujet(s)	Chaudières à vapeur Machines à vapeur
Thématique(s)	Énergie Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	20/05/2021
Date de génération du PDF	20/05/2021
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?12DE49.4



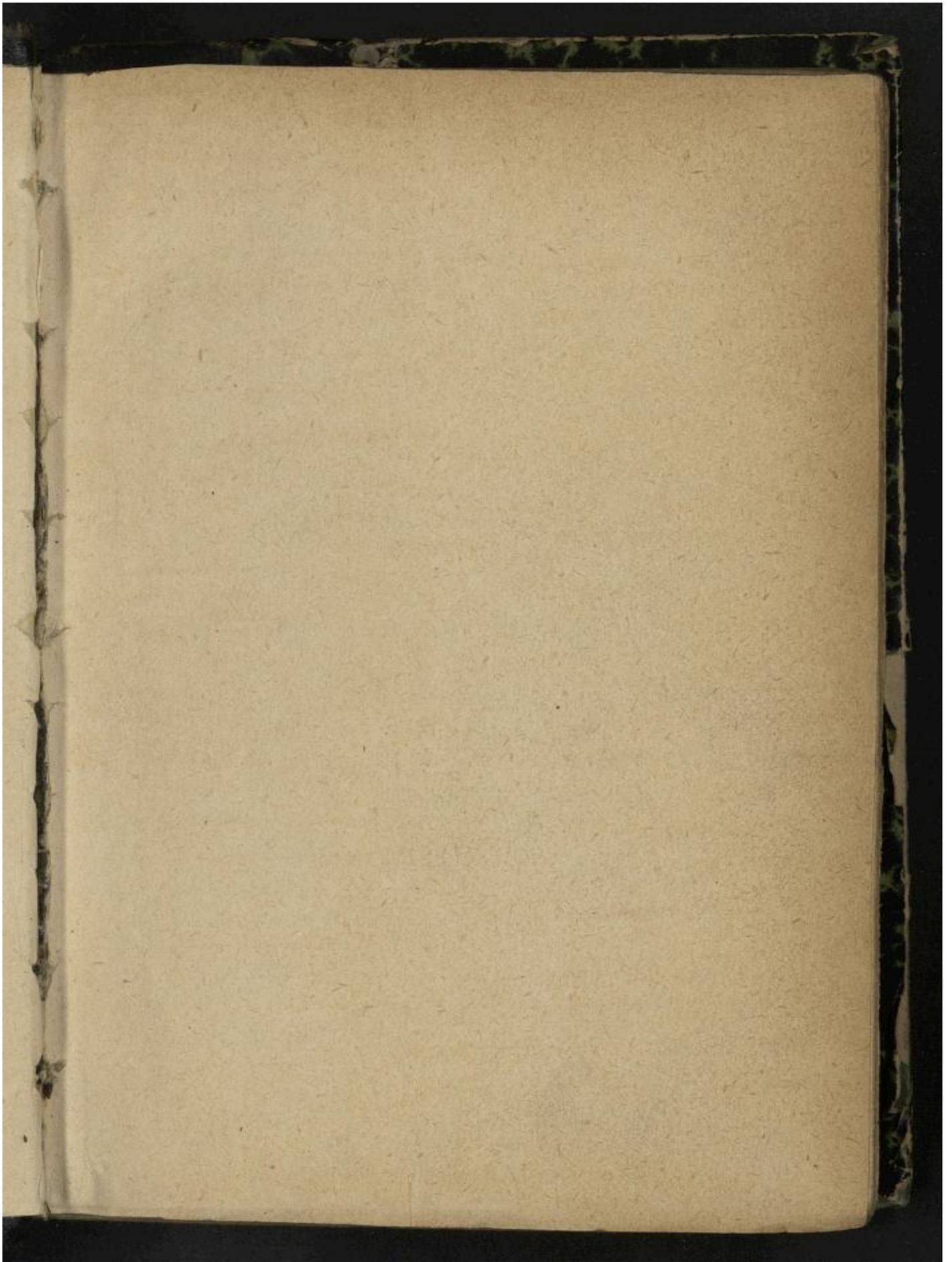
Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



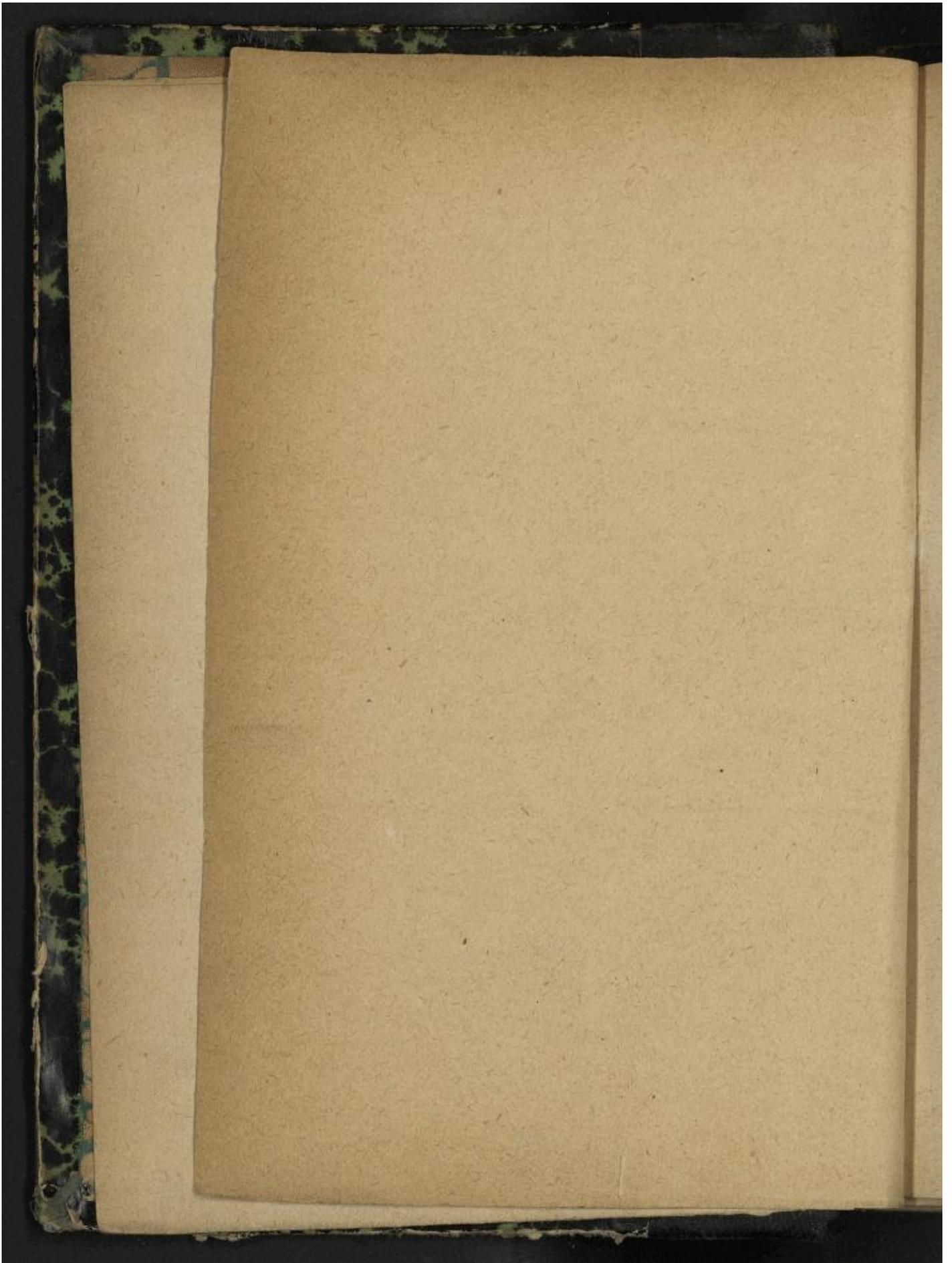
Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



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

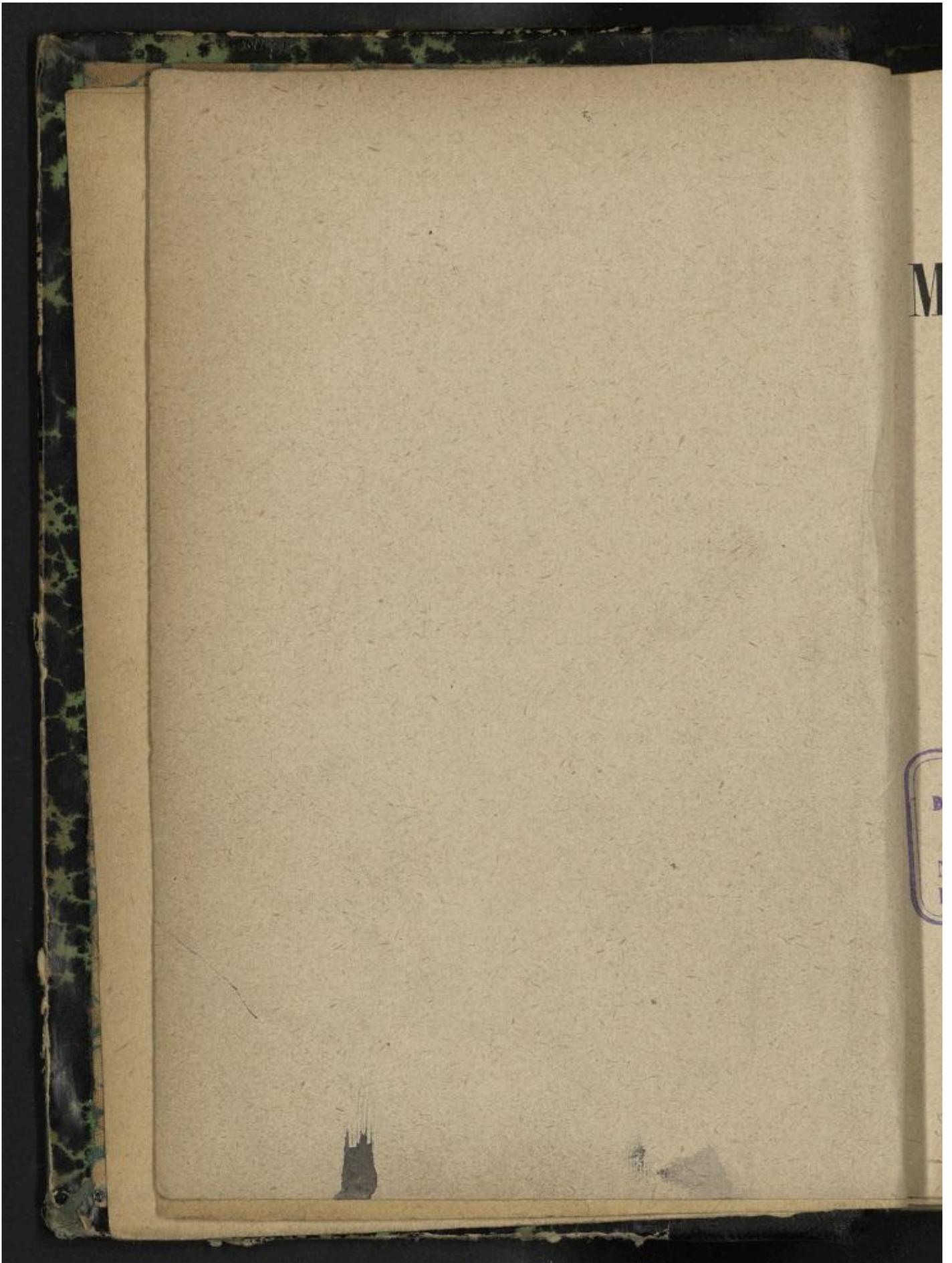


Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



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

MANUEL
DE LA
MACHINE A VAPEUR



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

12° De. 49⁸⁴
MANUEL

DE LA

MACHINE A VAPEUR

GUIDE PRATIQUE

DÉCRIVANT LE FONCTIONNEMENT ET LES ORGANES
DES MACHINES ET DES CHAUDIÈRES A VAPEUR

A L'USAGE

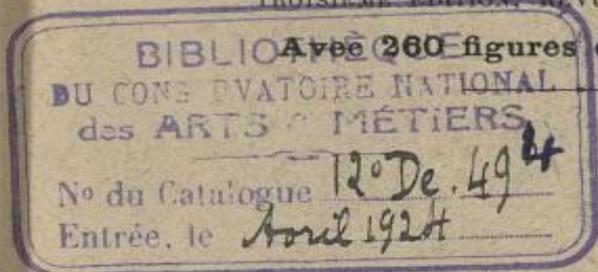
*Des Mécaniciens, Chauffeurs,
Dessinateurs, Étudiants, Propriétaires d'appareils à vapeur*

PAR

ÉDOUARD SAUVAGE

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

TROISIÈME ÉDITION, REVUE ET AUGMENTÉE



PARIS ET LIÈGE

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER

PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES. 15

LIÈGE, 8, RUE DES DOMINICAINS 8

1924

Tous droits réservés

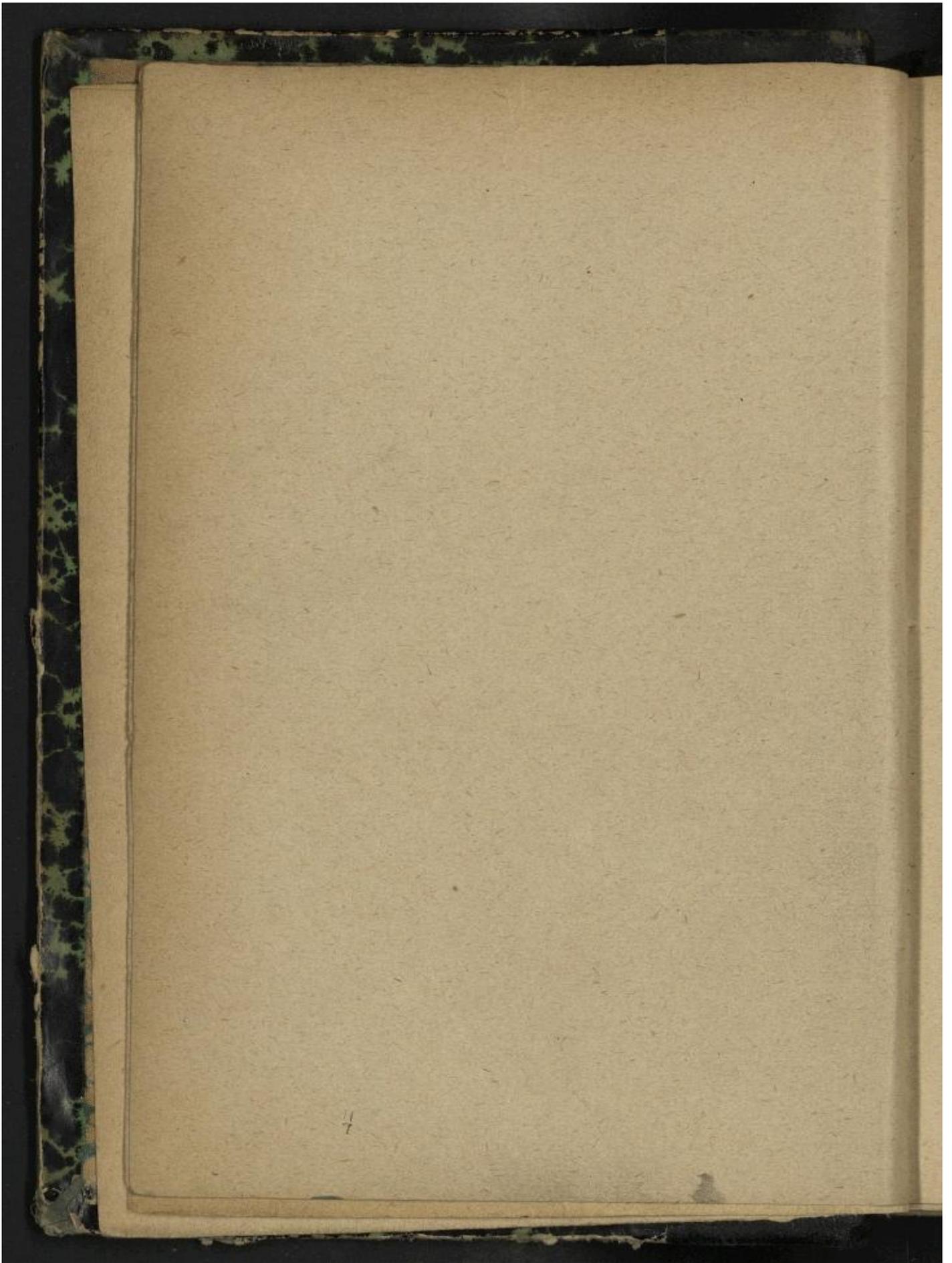


TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	VII
------------------------	-----

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE

1. Histoire de la machine à vapeur	1
2. Newcomen	1
3. Watt	6
4. Machines à cylindres successifs	6
5. Turbines à vapeur.	9
6. Condenseurs	11

CHAPITRE II

DONNÉES PHYSIQUES

7. Force, travail, puissance.	12
8. Pressions	13
9. Mesure des pressions.	14
10. Température.	15
11. Chaleur	16
12. Diagrammes figurant les états d'un fluide	18
13. Propriétés des vapeurs	19

CHAPITRE III

CONSTITUTION GÉNÉRALE

14. Modes d'action de la vapeur	24
15. Cylindres et pistons	24
16. Transmission du mouvement du piston.	25

CHAPITRE IV

TRAVAIL DE LA VAPEUR DANS LES CYLINDRES

17. Indicateurs	29
18. Dynamomètres	36
19. Machines à un cylindre	43
20. Cycle théorique de la machine monocylindrique	44
21. Réduction du rendement	49
22. Détente incomplète	50
23. Espace libre	51
24. Action des parois	54
25. Enveloppes de vapeur	57
26. Humidité de la vapeur	60
27. Vapeur surchauffée	61
28. Laminage	62
29. Fuites	65
30. Pertes de chaleur	65
31. Transformation du travail indiqué	66
32. Dimensions des cylindres	67
33. Machines compound	69
34. Machines de Woolf	77
35. Triple et quadruple expansion	79
36. Vapeurs combinées	84
37. Essais des machines	86

CHAPITRE V

DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

38. Phases de la distribution	92
39. Tiroir et excentrique	94
40. Formes diverses de tiroirs	111
41. Coulisse de Stephenson	118
42. Systèmes divers de coulisses	129
43. Commande de l'arbre de relevage	138
44. Mécanismes divers de changement de marche	140
45. Distributions à deux tiroirs	141
46. Distributions Corliss	148
47. Distributeurs oscillants sans déclic	161
48. Distributions à soupapes	163
49. Machines équicourant	174
50. Machines sans mouvement de rotation	178
51. Contre-vapeur	181
52. Démarrage	183
53. Comparaison des systèmes de distribution	187

CHAPITRE VI

RÉGULARISATION DU MOUVEMENT

54. Pièces à mouvement alternatif	189
55. Volants	191
56. Action des régulateurs.	195
57. Régulateurs de Watt et de Porter	197
58. Types divers de régulateurs.	202
59. Régulateurs agissant sur l'excentrique	206
60. Régulateurs à inertie.	209

CHAPITRE VII

PRINCIPAUX ORGANES DES MACHINES A PISTON

61. Bâti et fondations.	211
62. Cylindres	215
63. Pistons et garnitures.	217
64. Bielles	223
65. Arbres et manivelles.	225
66. Graissage des mécanismes.	226
67. Graissage des pistons et des distributeurs de vapeur.	231

CHAPITRE VIII

DISPOSITIONS D'ENSEMBLE DES MACHINES A PISTON

68. Classification.	234
69. Moteurs fixes à vitesse modérée	235
70. Moteurs fixes à grande vitesse.	236
71. Locomobiles et machines demi-fixes.	240
72. Elevations d'eau	242
73. Machines d'extraction	243
74. Machines soufflantes, compresseurs, machines de laminoirs.	244
75. Locomotives.	245
76. Machines de bateaux	245
77. Applications diverses.	248
78. Machines rotatives.	249

CHAPITRE IX

TURBINES A VAPEUR

79. Écoulement de la vapeur.	250
80. Utilisation du jet de vapeur	252

81. Dispositions des turbines.	254
82. Pertes de rendement.	259
83. Types de turbines.	261
84. Régularisation	268
85. Détails de construction.	269
86. Applications	273
87. Turbines à vapeur d'échappement.	275

CHAPITRE X

TROMPES A VAPEUR, PULSOMÈTRES

88. Principe des trompes	278
89. Injecteurs	278
90. Ejecteurs.	284
91. Pulsomètres	284

CHAPITRE XI

CONDENSATION

92. Divers modes de condensation.	288
93. Condensation par mélange.	288
94. Condenseurs à mélange	291
95. Ejecto-condenseurs.	296
96. Condenseurs à vide élevé	297
97. Condenseur à surface	304
98. Refroidissement de l'eau de condensation	313

CHAPITRE XII

PRODUCTION DE LA VAPEUR

99. Généralités	314
100. Combustibles	314
101. Combustion	318
102. Grilles.	321
103. Grilles spéciales.	323
104. Appareils divers de combustion.	331
105. Combustibles spéciaux.	333
106. Combustibles liquides.	333
107. Tirage	336
108. Utilisation de la chaleur.	341
109. Classification des chaudières	345
110. Grands corps et foyers extérieurs	346
111. Grands corps et foyers intérieurs.	349

TABLE DES MATIÈRES

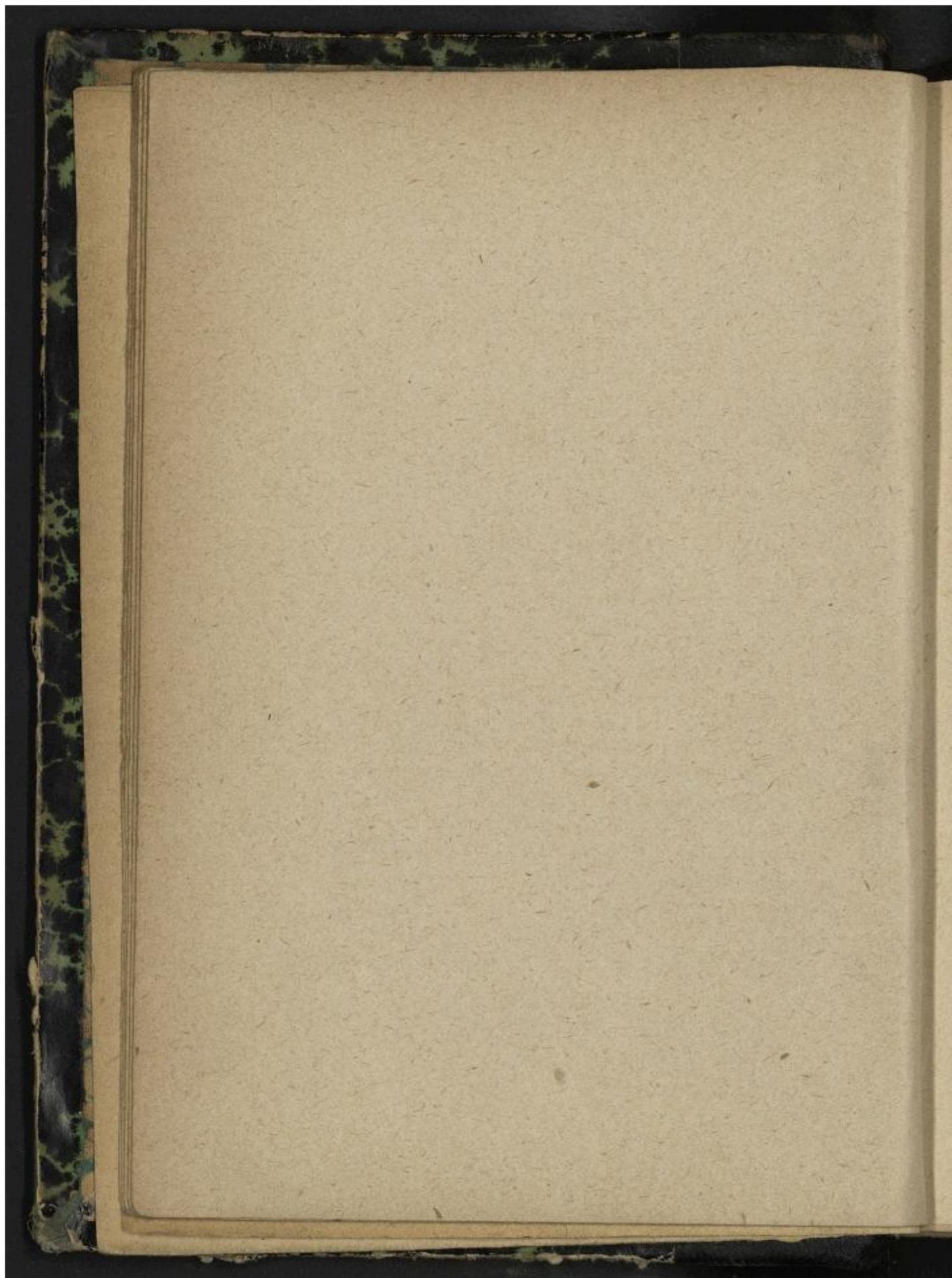
V

112. Chaudières à tubes de fumée	352
113. Tubes de fumée	358
114. Chaudières à tubes d'eau	361
115. Chaudières mixtes	373
116. Réchauffeurs	374
117. Surchauffeurs	377
118. Essais de chaudières	380
119. Comparaison des générateurs	382
120. Alimentation	382
121. Epuration des eaux; désincrustants	384
122. Indicateurs de niveau	388
123. Soupapes de sûreté	391
124. Tuyauterie	395
125. Prises de vapeur	396
126. Isolants	397
127. Accidents	398
128. Epreuves et surveillance	405
129. Conduite des chaudières	406

CHAPITRE XIII

EMPLOI DES MACHINES

130. Services demandés	410
131. Prix de revient	412
TABLE ALPHABÉTIQUE	417



INTRODUCTION

Une première édition du présent manuel remonte à 1905. Depuis lors, les turbines à vapeur, de plus en plus puissantes, se sont multipliées; l'emploi de la vapeur surchauffée s'est étendu; de nouvelles dispositions ont été adoptées pour les appareils de condensation. La seconde édition, publiée en 1913, tenait déjà compte de cette évolution. La présente édition a été complétée par la description de machines récentes, notamment celles dites équicourant. Le chapitre des turbines à vapeur a reçu d'importantes modifications. Des types nouveaux de régulateurs, de chaudières, de condenseurs ont été ajoutés. Toutes les parties du manuel ont d'ailleurs été revues; pour éviter de l'allonger inutilement, on a supprimé la mention de certains appareils qui ont perdu toute importance pratique. Quarante et une figures sont nouvelles. Afin de faciliter l'inscription de l'ouvrage sur les fiches de catalogues, on a imprimé en tête du volume la mention à coller sur ces fiches.

Les unités métriques sont désignées par les abréviations du Comité international des poids et mesures, dont le tableau est donné ci-après.

MESURES DE LONGUEUR		MESURES DE SUPERFICIE	
Mètre	<i>m</i>	Mètre carré	<i>m</i> ²
Décimètre	<i>dm</i>	Décimètre carré	<i>dm</i> ²
Centimètre	<i>cm</i>	Centimètre carré	<i>cm</i> ²
Millimètre	<i>mm</i>	Millimètre carré	<i>mm</i> ²
Micron (0 ^{mm} ,001)	μ		

MESURES DE VOLUME		MESURES DE POIDS	
Mètre cube	m^3	Tonne	t
Décimètre cube	dm^3	Quintal métrique	q
Centimètre cube	cm^3	Kilogramme	kg
Millimètre cube	mm^3	Gramme	g
		Décigramme	dg
		Centigramme	cg
		Milligramme	mg

La combinaison des symboles *kg* et *m*, *kgm*, désigne le *kilogramme*, unité usuelle de travail. Cette abréviation est souvent employée dans le présent manuel et l'attention du lecteur est appelée sur ce point, afin d'éviter toute fausse interprétation.

Une loi, du 2 avril 1919, sur les unités de mesure ¹, a établi, comme unité de force, le *sthène* (*sn*), qui, en une seconde, communique à une masse égale à une tonne un accroissement de vitesse d'un mètre par seconde. Un sthène est égal approximativement à 102 kilogrammes.

Le *kilojoule* (*kJ*) est le travail produit par un sthène dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force; équivalent, 102 kilogrammètres.

Comme unité de pression, cette loi institue la *pièce* (*pz*), pression uniforme qui, répartie sur une surface d'un mètre carré, produit un effort total d'un sthène. Un kilogramme par centimètre carré équivaut à 102 pièces.

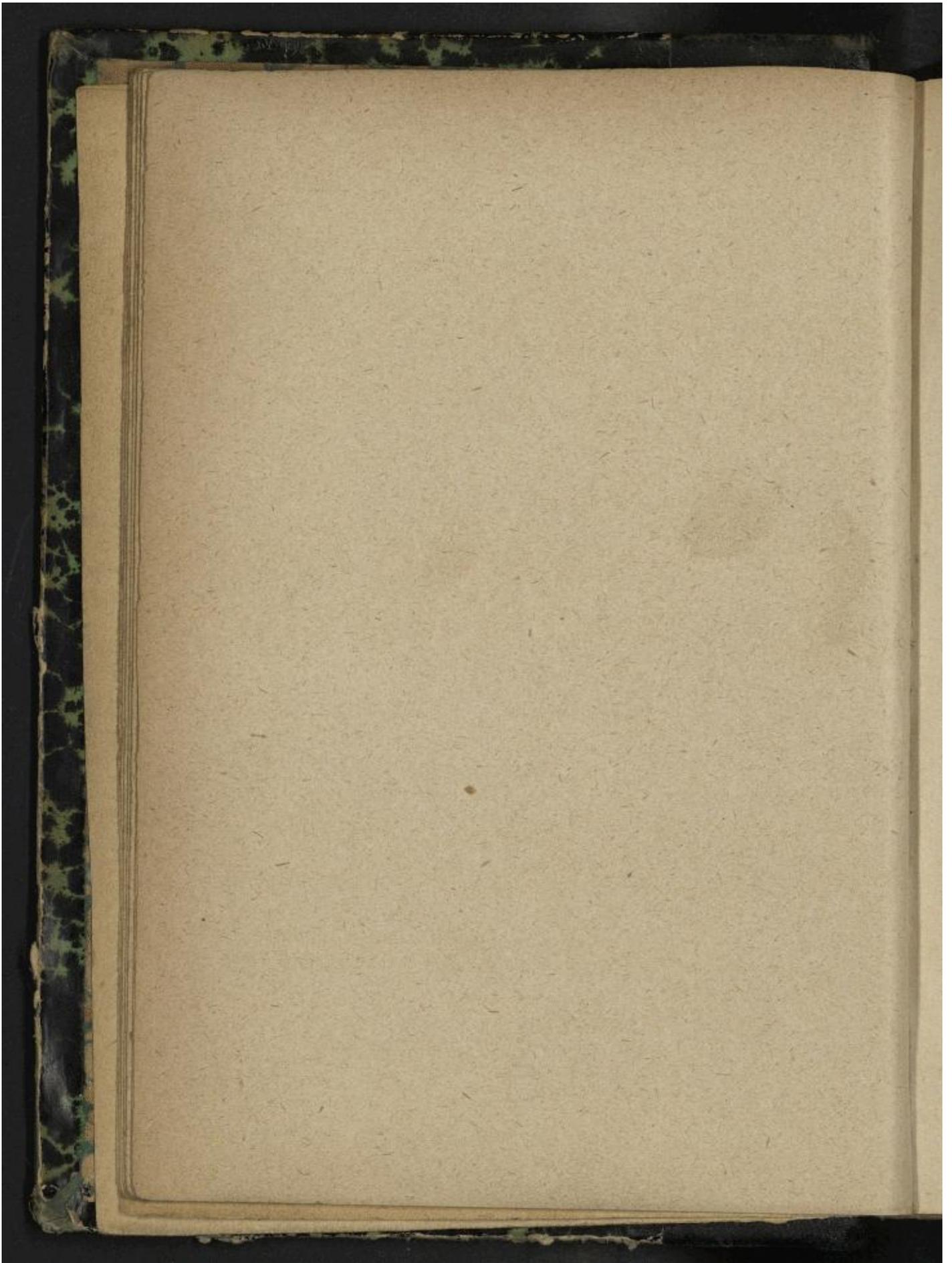
L'hectopièce est employée, sous le nom de *bar*, pour la mesure des pressions barométriques.

Dans le présent manuel, on a profité de la latitude laissée par la loi, qui autorise, à titre transitoire, l'usage des anciennes unités métriques. Toutefois le *kilowatt* (*kW*), puissance qui produit un kilojoule par seconde, est substitué au *cheval-vapeur* de 75 *kgm* par seconde.

1. Voir *Journal officiel* du 5 août 1919.

La *calorie* est, d'après la définition actuelle, la quantité de chaleur qui, incorporée dans la masse d'un kilogramme d'eau prise à la température moyenne de 15° , en élève la température de 1° , soit de $14^{\circ},5$ à $15^{\circ},5$.

Pour Regnault, la calorie échauffait le kilogramme d'eau de 0° à 1° . La nouvelle calorie est plus petite que l'ancienne, qui vaut environ 1,008 calorie nouvelle. On continue toutefois à employer fréquemment l'ancienne calorie, notamment en conservant le nombre 426 pour son équivalent en kilogrammètres, tandis que ce nombre devient environ 423 avec la nouvelle unité. On utilise aussi constamment les tables de la vapeur d'eau établies en calories anciennes.

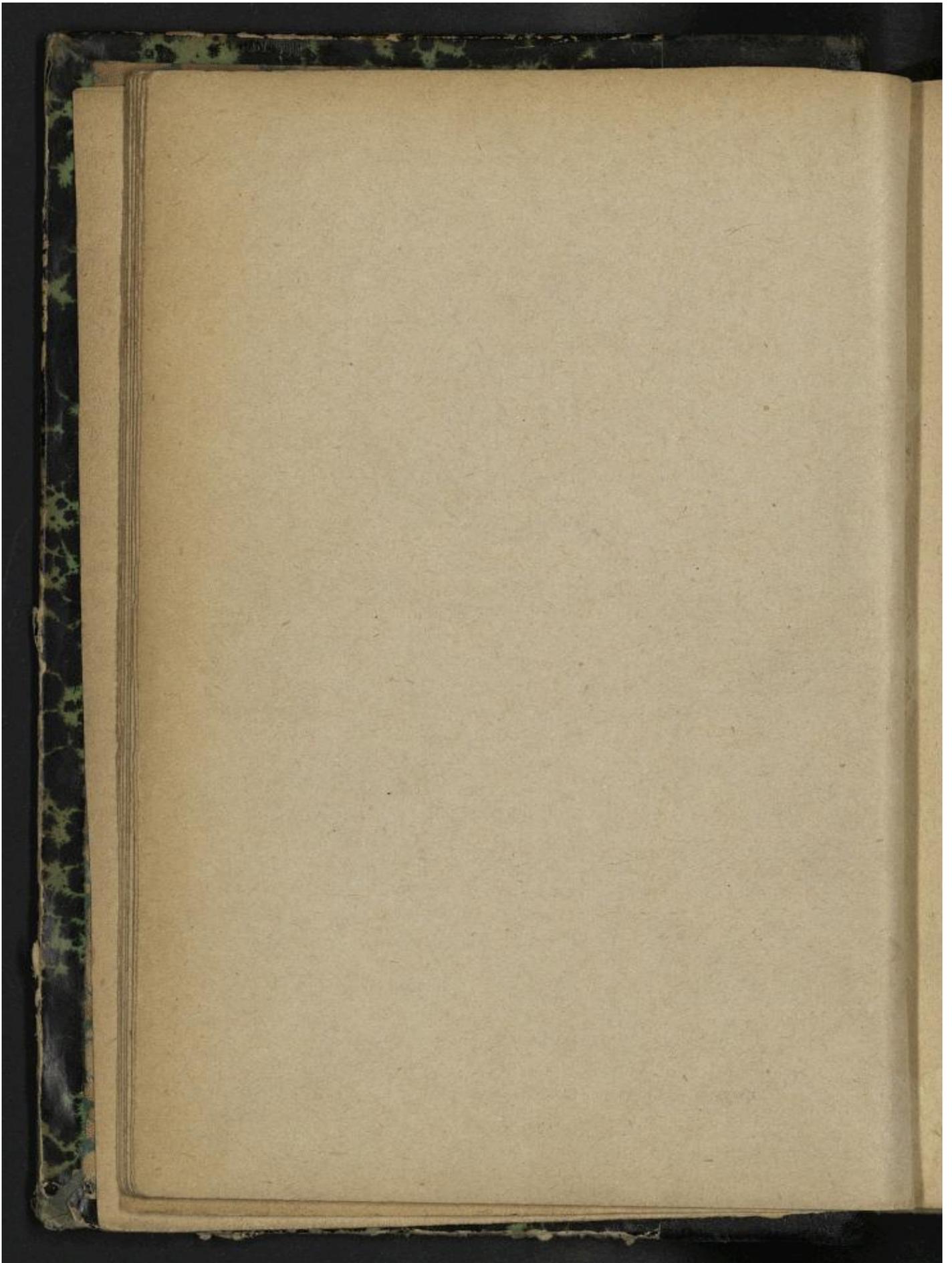


Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

ERRATUM

Page 191, note, ligne 3 en remontant. *lire* :
« par un arc de longueur égale à son rayon ».

SAUVAGE. — Machine à vapeur, 3^e édit.



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

MANUEL

DE LA

MACHINE A VAPEUR

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE

1. Histoire de la machine à vapeur. — Le présent chapitre ne donne que quelques indications sommaires sur des dispositions essentielles. Pour plus de détails, on consultera avec intérêt la *Notice historique sur les machines à vapeur* publiée par F. Arago en 1829 et réimprimée ultérieurement; l'*Histoire de la machine à vapeur*, par R.-H. Thurston, traduite par J. Hirsch, l'ouvrage allemand de Matschoss, *die Entwicklung der Dampfmaschine*, publié en 1908; les études que M. Mallet a données dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils* (août et septembre 1908, août et septembre 1910), études remarquables par l'abondance et la précision de la documentation.

Les *Proceedings of the institution of mechanical engineers* ont publié en 1903 (p. 655), une intéressante étude de M. H. Davey sur les machines de Newcomen.

2. Newcomen. — La découverte du poids de l'atmosphère, et de la pression qui en résulte, remonte à la première moitié du xvii^e siècle. L'idée de faire agir cette pression dans un moteur est assez naturelle; mais, pour cela, il fallait trouver le moyen de la faire disparaître et de la rétablir à

volonté. Papin y réussit, en remplaçant, sous un piston, l'air par la vapeur d'eau, puis en condensant la vapeur. La première application pratique paraît être celle de Savery, qui, supprimant le piston, fit agir la vapeur directement sur

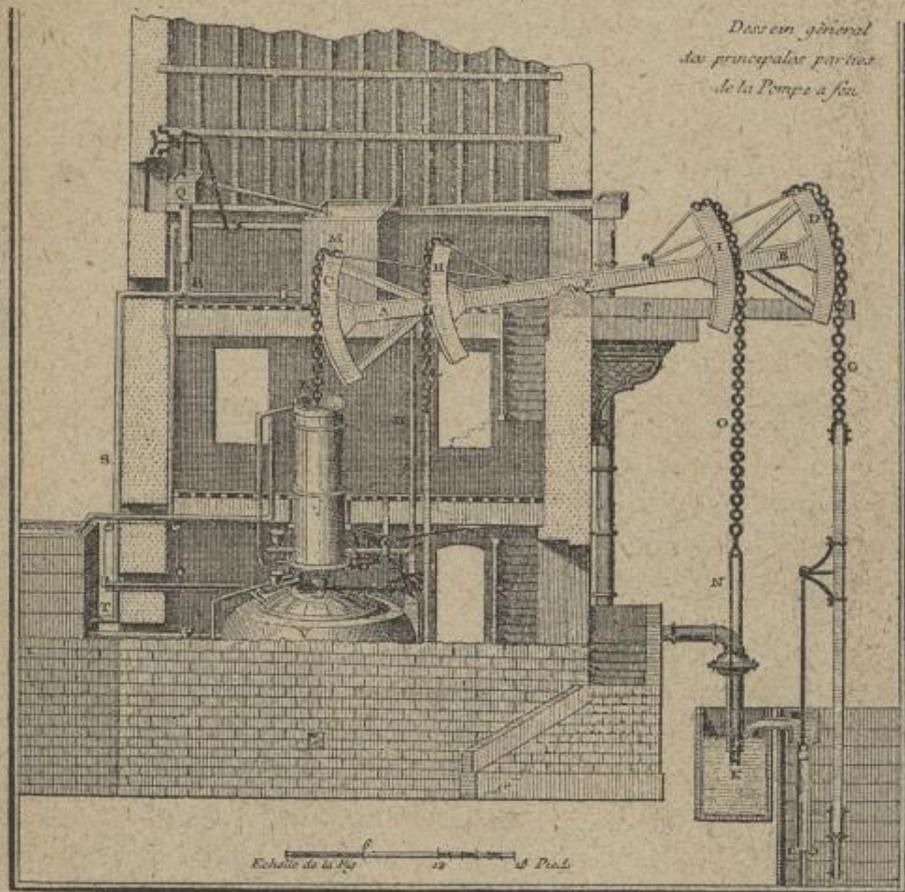


Fig. 1. — Machine de Newcomen installée en 1732 à Fresnes, d'après l'*Architecture hydraulique* de Bélidor.

l'eau contenue dans un récipient clos; la vapeur refoulait l'eau, et l'aspiration dans le récipient résultait de sa condensation ultérieure. C'est le principe du pulsomètre actuellement en usage. La première machine à piston qui se soit répandue dans l'industrie est celle de Newcomen, appliquée

à l'épuisement de l'eau des mines. C'était aussi un des usages de la machine de Savery, mais une hauteur de refoulement un peu grande exigeait une pression dangereuse pour les chaudières qu'on pouvait construire à cette époque.

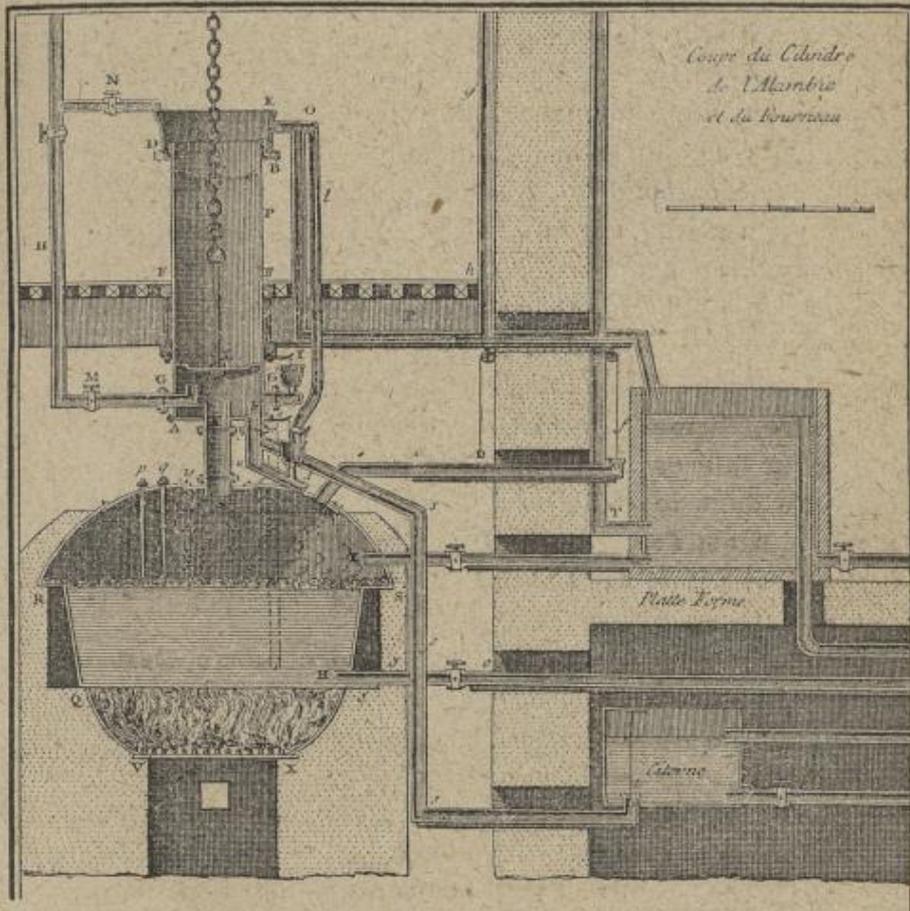


Fig. 2. — Machine de Newcomen à Fresnes, d'après Bélidor.

L'action motrice de la machine de Newcomen (fig. 1 et 2) consistait à soulever la *maîtresse tige*, installée dans le puits de mine : le poids de cette tige, pendant sa descente, mettait en mouvement des pompes foulantes. La maîtresse tige était attachée à l'extrémité d'un balancier, dont l'autre extrémité était reliée à un piston se mouvant dans un

cylindre. Voici comment Bélidor décrit le fonctionnement de cette machine :

« L'eau qui bout dans l'alambic produit une *vapeur*, qui passe dans le cylindre, dont elle remplit la capacité à mesure que le piston s'élève par le contrepoids du balancier. Dès que le piston est parvenu à son plus haut terme, l'effet d'un certain mouvement interrompt, par le moyen d'un diaphragme nommé *régulateur*, la communication de la chaudière et du cylindre, dans lequel il survient subitement une *injection* d'eau froide, qui, venant jaillir contre le dessous du piston, retombe en pluie, et condense la vapeur dont la force s'anéantit; ce qui fait naître un *vide* qui donne lieu à la *colonne d'air* de chasser le piston de haut en bas pour le ramener d'où il était parti. Aussitôt le mouvement dont nous venons de faire mention, agissant d'un sens contraire, ferme le *robinet d'injection*, et ouvre le régulateur pour laisser à la vapeur la liberté de s'introduire de nouveau dans le cylindre, et recommencer la même manœuvre. Ainsi *l'on voit que le jeu de cette machine dépend de l'effet alternatif de l'eau chaude et de l'eau froide, joint à l'action de l'atmosphère.* »

Cette injection d'eau dans le cylindre même était déjà un progrès pratique : on avait commencé par condenser la vapeur en refroidissant l'extérieur du cylindre, et la marche de l'appareil était fort lente, tandis que la machine décrite par Bélidor donnait quinze coups par minute.

Pendant la course effectivement motrice, c'est la pression de l'atmosphère qui fait descendre le piston : mais l'atmosphère agit comme un *contrepoids*, que la vapeur soulève pendant la course montante; pendant la descente, ce contrepoids restitue le travail qu'il a reçu. Ainsi la pression atmosphérique ne joue réellement qu'un rôle secondaire et n'accomplit au total aucun travail moteur dans une évolution complète de l'appareil.

Dans le cours du XVIII^e siècle, on installa de nombreuses machines de Newcomen, sans grandes modifications, pour

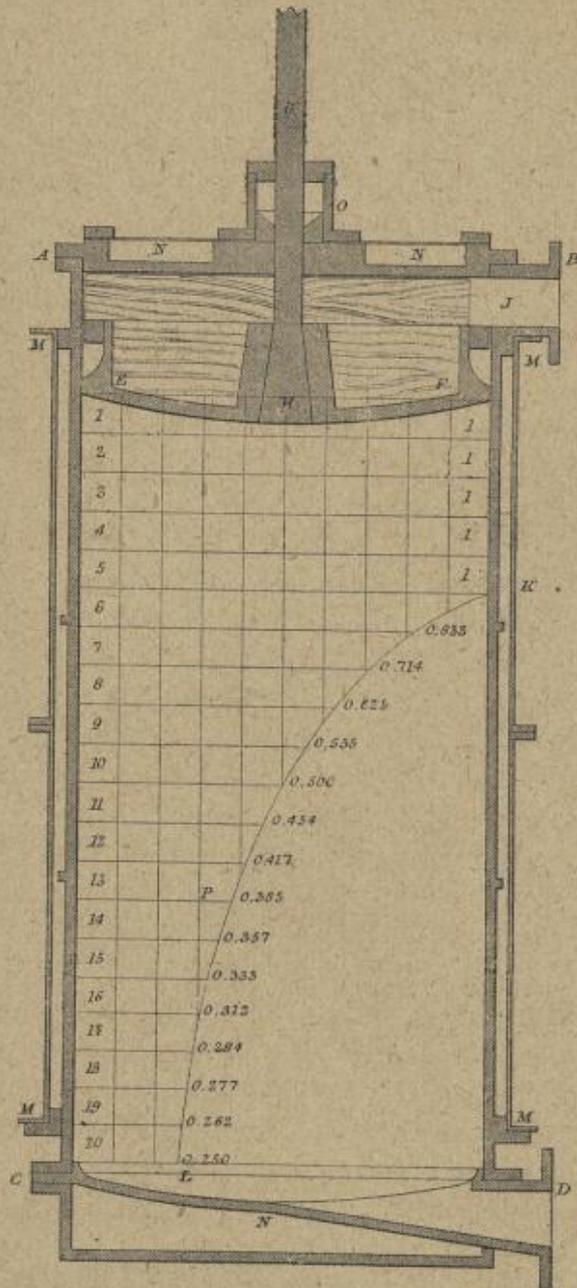


Fig. 3. — Diagramme du travail de la vapeur, pendant l'admission et pendant la détente (d'après Watt). Les nombres inscrits à droite des traits horizontaux indiquent la pression de la vapeur agissant sur la face supérieure du piston.

l'épuisement des mines; on s'en servit aussi pour produire un mouvement de rotation, mais fort irrégulier. Pour obtenir les rotations uniformes nécessaires dans certaines manufactures, on eut parfois recours à la combinaison d'une machine de Newcomen actionnant une pompe et d'une roue à augets alimentée par l'eau de cette pompe.

3. **Watt.** — L'envoi de l'eau froide dans le cylindre de la machine de Newcomen, pour condenser la vapeur, en refroidissait beaucoup les parois et augmentait ainsi la dépense de vapeur, qui devait ensuite réchauffer ces parois à chaque course motrice du piston. Le *condenseur séparé* de Watt atténua, sans la supprimer complètement, l'action nuisible des parois alternativement chauffées et refroidies. Viennent ensuite *l'enveloppe de vapeur*, qui entoure le cylindre; le *double effet*, ou l'action de la vapeur sur les deux faces du piston dans un cylindre entièrement clos; l'emploi de la *détente*, qui augmente le travail donné par la vapeur; Watt a donné un diagramme très clair qui représente l'action de la vapeur travaillant avec détente (fig. 3). Par la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement de rotation continu, la machine à vapeur n'est plus limitée à la commande des pompes. Tous ces progrès étaient réalisés en 1781. En même temps, on éleva la pression de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique. Pour la transformation du mouvement du piston en rotation, Watt conserva, et on conserva longtemps après lui, le balancier; l'extrémité de la tige du piston, reliée par une courte bielle à une extrémité du balancier, est guidée en ligne droite par le mécanisme ingénieux, mais compliqué, du *parallélogramme*; à l'autre extrémité du balancier s'articule une grande bielle qui commande la *manivelle* calée sur *l'arbre tournant* (fig. 4). La *connexion directe* (§ 16) est plus simple.

4. **Machines à cylindres successifs.** — Au lieu de faire travailler la vapeur dans un seul cylindre, Hornblower, dès 1776,

employa deux cylindres successifs (fig. 5). Le principe de cette machine reparut en 1804 sous le nom de Woolf : la vapeur, sortant de la chaudière, pénètre dans un premier

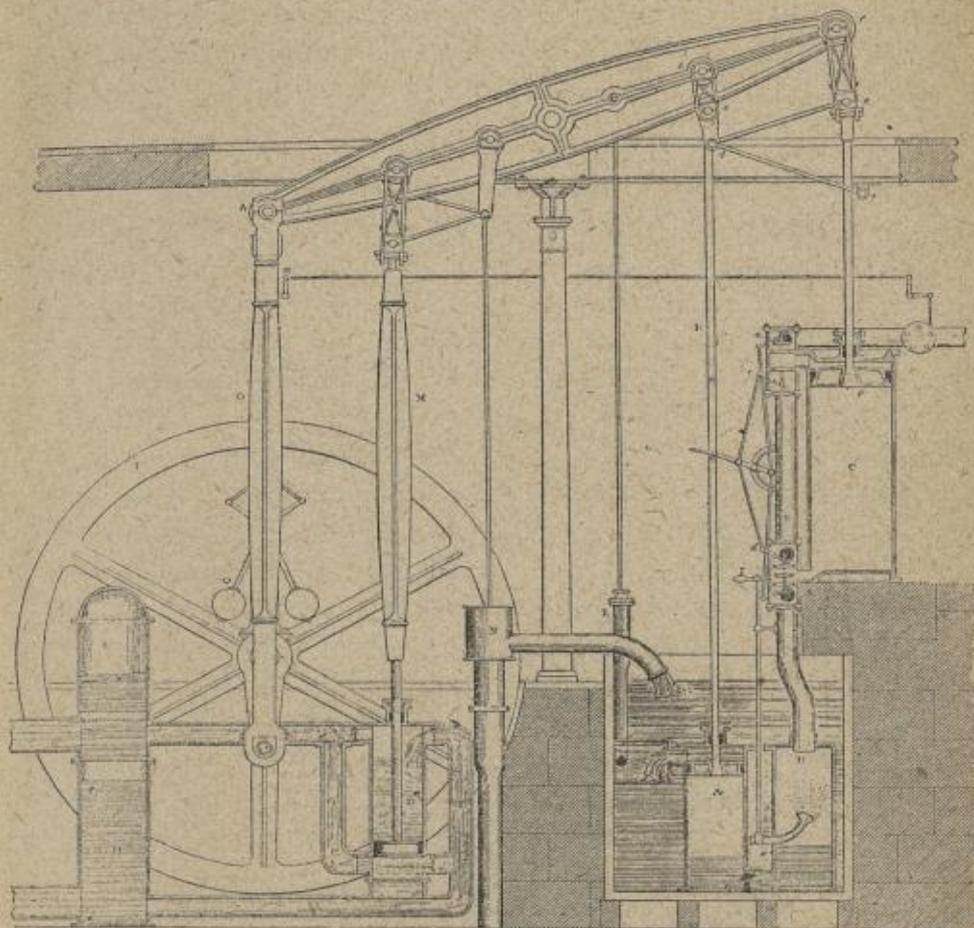


Fig. 4. — Machine à balancier, actionnant une pompe par la bielle M.

E est le cylindre, B le condenseur, A la pompe à air du condenseur, N la pompe amenant l'eau de condensation, L la pompe alimentaire du générateur.

cylindre, puis, pendant le retour du piston de ce cylindre, elle se détend en se transvasant dans un second cylindre, plus grand (fig. 6).

On préfère aujourd'hui une forme dérivée de la machine de Woolf, la machine *compound*, où un *réservoir intermédiaire*

de vapeur sépare les deux cylindres successifs. Cette machine

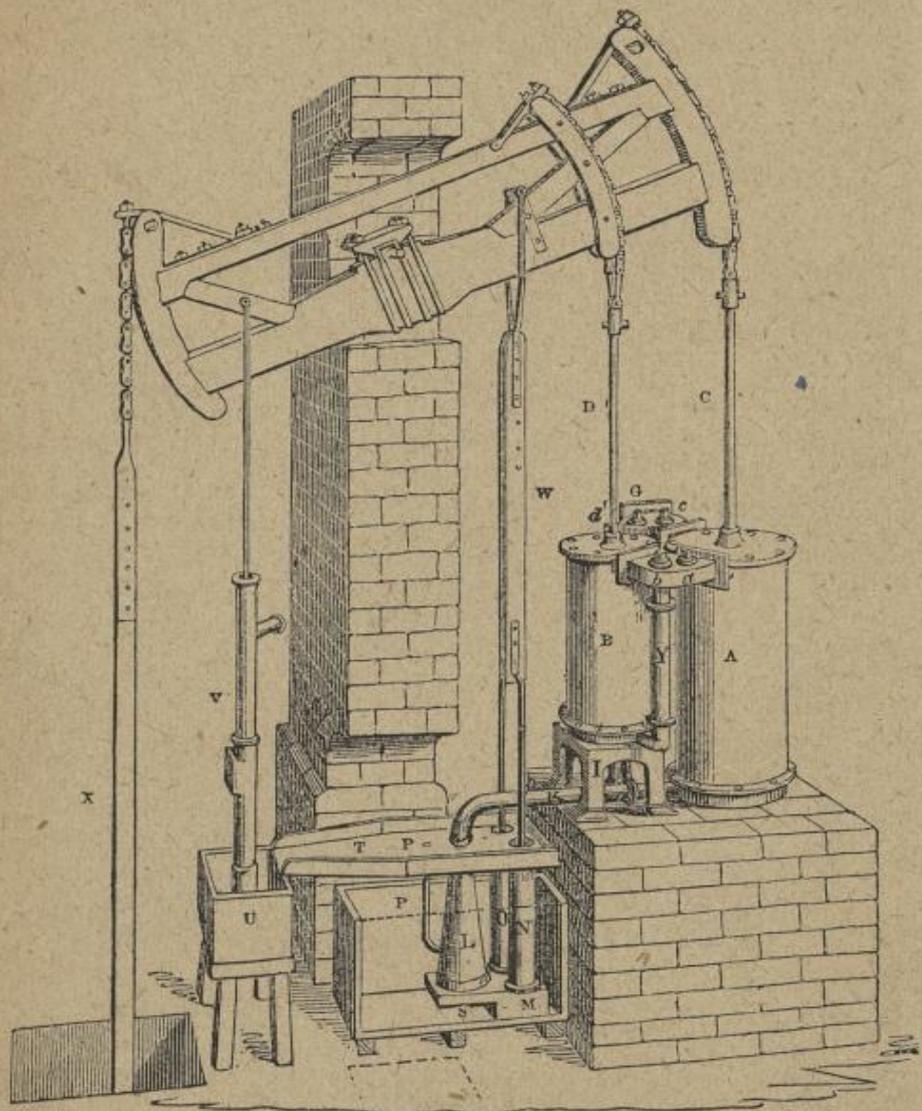


Fig. 5. — Machine à deux cylindres successifs de Hornblower.

G, tuyau d'arrivée de vapeur; a et b, robinets de distribution.

fut d'abord employée à la navigation, vers le milieu du XIX^e siècle. En 1871 parut la machine à *triple expansion*, à trois

cylindres successifs de dimensions croissantes, séparés par deux réservoirs intermédiaires. On est même allé jusqu'à la *quadruple expansion*, dans quatre cylindres successifs.

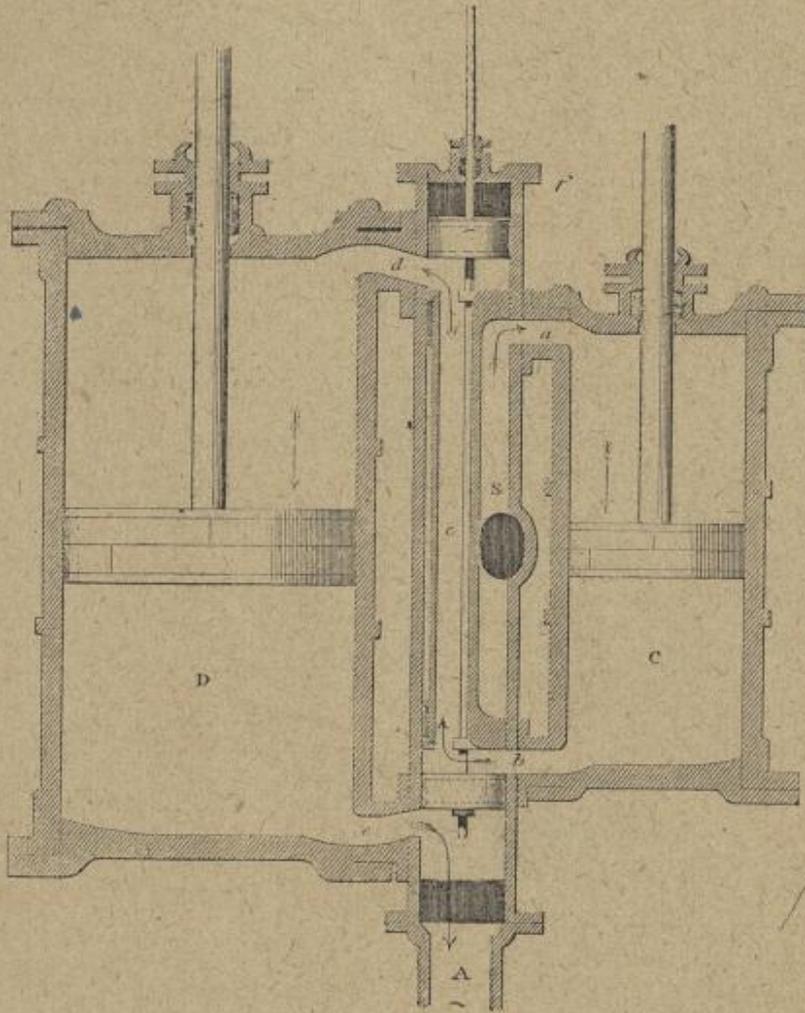


Fig. 6. — Cylindres de la machine de Woolf.

La vapeur arrive en *a* dans le petit cylindre; elle passe du petit dans le grand par *b* et *d*; elle s'échappe du grand cylindre par *c*. Pendant la course montante des pistons, il y a admission en *b*, transvasement par *ac*, et échappement en *d*.

5. Turbines à vapeur. — Au lieu de faire agir la vapeur par pression sur un piston, on peut la laisser s'écouler de

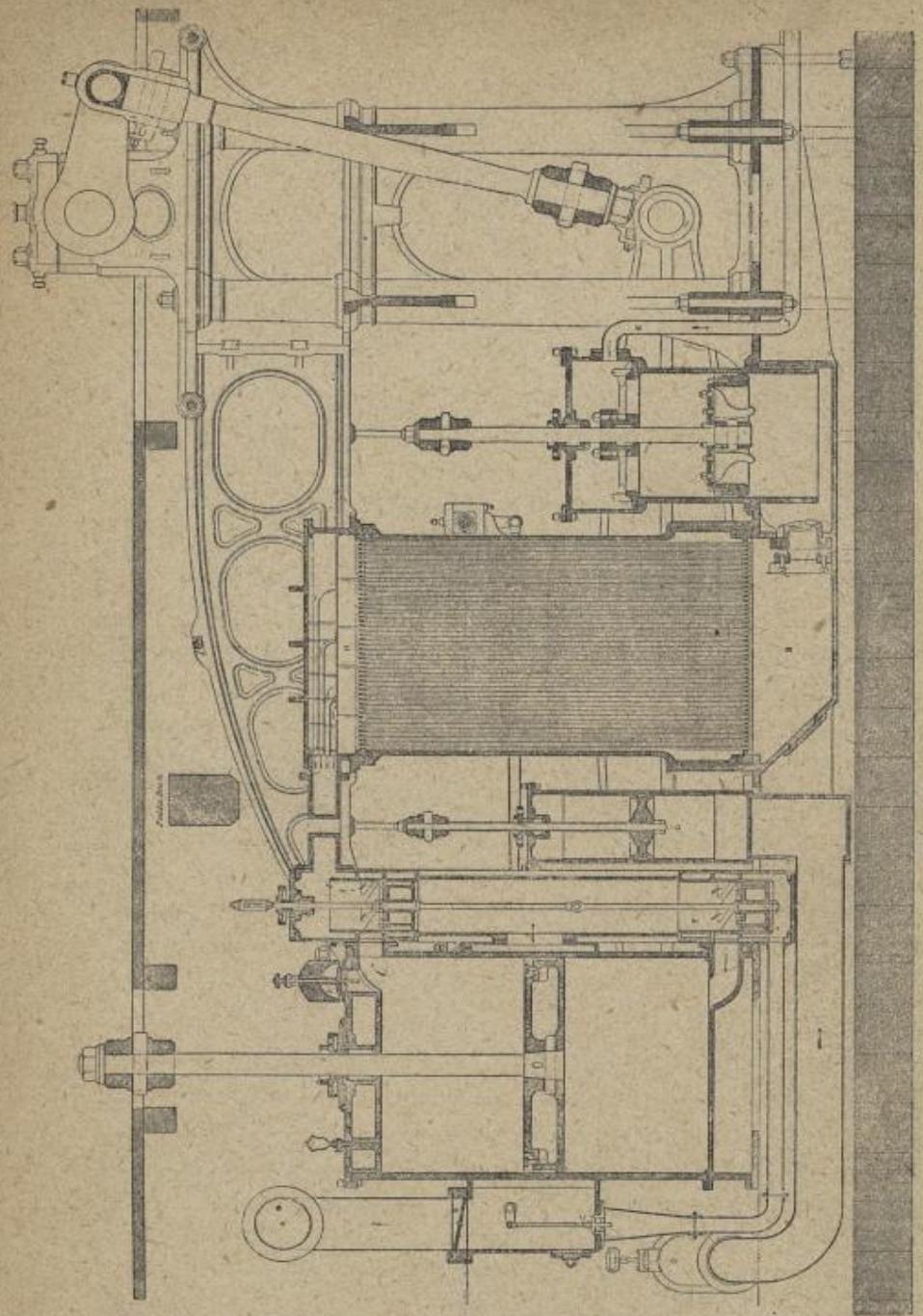


Fig. 7. — Machine du « Wilberforce » (à balanciers inférieurs), construite en 1837, avec condenseur à surface de Hall : la vapeur d'échappement pénètre dans les tubes verticaux du condenseur H ; la pompe de circulation, en G, entretient un courant d'eau autour des tubes, et la pompe à air extrait, à la base du condenseur, l'eau condensée et l'air. La machine est munie d'un liroir cylindrique. Le dessin ne montre pas les bielles pendantes qui transmettent aux balanciers inférieurs le mouvement du piston.

la chaudière au condenseur en un jet rapide, qui actionne les aubes d'une *turbine*. Bien des turbines à vapeur ont été proposées depuis longtemps : mais les premières applications pratiques sont dues à Laval et à Parsons, vers 1889. Ces moteurs ont pris une grande importance et atteignent des puissances colossales.

6. Condenseurs. — On a commencé par refroidir la vapeur, qu'on voulait condenser, dans le cylindre même où elle travaillait, d'abord par arrosage de l'extérieur du cylindre, puis par injection d'eau à l'intérieur. Mais on a reconnu que la condensation dans un récipient séparé du cylindre, où la vapeur s'écoule au moment voulu, produisait le même abaissement de pression. On évite ainsi un refroidissement exagéré des parois du cylindre moteur¹. Au condenseur par mélange de Watt on substitue souvent le condenseur à surface, où l'eau réfrigérante est séparée de la vapeur à condenser. Essayé par Watt sans grand succès, cet appareil fut établi par Hall, en 1831, avec des dispositions qui ne diffèrent guère de celles qui sont adoptées aujourd'hui (fig. 7) ; mais on l'abandonna bientôt, pour le reprendre vers 1860. On ne saurait s'en passer aujourd'hui sur mer. La vapeur circulait dans les tubes du condenseur de Hall et non l'eau de réfrigération comme aujourd'hui.

Avec des pressions de vapeur supérieures à celle de l'atmosphère, la condensation n'était plus indispensable comme au début : elle fut supprimée dans la machine à *échappement libre*, employée quand l'eau manque pour la condensation, ou bien quand la simplicité et la légèreté des machines ont plus d'importance que l'économie du combustible.

1. Le condenseur séparé n'évite pas complètement le refroidissement des parois des cylindres, comme le prouve l'action défavorable de ces parois (§ 24).

CHAPITRE II

DONNÉES PHYSIQUES

7. Force, travail, puissance. — Dans une *force* on distingue la *grandeur* et la *direction*. La pesanteur est une force de direction verticale ; elle fournit l'unité usuelle de force, qui est le poids de la masse d'un kilogramme.

Le *travail* effectué par une force sur un point, qui se meut suivant la direction de la force, est le produit de la force par le chemin parcouru : ce travail est dit *moteur*. Si le mouvement a lieu dans une direction opposée à celle de la force, le travail est *résistant*. Quand la *trajectoire* fait un angle avec la direction de la force, le travail est le produit de la force par la projection, sur la direction de la force, du chemin parcouru. Si la force agit perpendiculairement à la direction du mouvement, cette projection est nulle, et la force ne donne lieu à aucun travail.

L'unité usuelle de travail correspond au parcours d'un mètre suivant la direction d'une force d'un kilogramme : c'est le *kilogrammètre* (kgm).

Pour apprécier le fonctionnement d'une machine, il ne suffit pas de connaître le travail qu'elle produit (ou qu'elle absorbe) : le *temps* employé est un élément essentiel. On appelle *puissance* d'une machine le rapport du travail à la durée de l'opération. Le temps étant compté en secondes, et le travail en kilogrammètres, la puissance se mesure par le nombre de kilogrammètres en une seconde.

Par nombre de kilogrammètres en une seconde, on entend le nombre moyen correspondant à une certaine période de marche.

Pour éviter de trop grands nombres, au lieu de compter la puissance en kilogrammètres par seconde, on a choisi une unité 75 fois plus grande, dite *cheval-vapeur*. L'unité correspondante anglaise, *horse-power*, est un peu différente : elle est d'environ 76 *kgm* par seconde (en mesures anglaises, 550 fois le travail d'une force d'une livre parcourant un pied, en une seconde).

Une autre unité de puissance, le *kilowatt*, correspond à environ 102 *kgm* par seconde. Elle fait partie du système d'unités dit C. G. S.

En multipliant par 0,73545 un nombre de chevaux, on obtient l'équivalent en kilowatts. Inversement la valeur en chevaux est égale à la valeur en kilowatts multipliée par 1,35971 ; les puissances sont rarement connues avec une précision suffisante pour qu'il soit utile d'employer, dans ces conversions, toutes les décimales indiquées.

Un cheval pendant une heure, ou un *cheval-heure*, est un travail de 75 *kgm* par seconde pendant 3600 secondes, c'est-à-dire de 270000 *kgm*. De même, le *kilowatt-heure* est une unité de *travail* qui vaut environ 102×3600 , ou 367200 *kgm*.

Le kilowatt (kW), unité de puissance prescrite par la loi du 2 avril 1919, étant déjà d'un usage très répandu en pratique, il n'y a pas avantage à conserver le cheval-vapeur : mieux vaut ne pas faire usage de deux unités différentes, voisines l'une de l'autre, pour mesurer la même grandeur.

8. Pressions. — Dans les machines, la *pression des fluides* joue un rôle capital. Quand le fluide est un gaz ou une vapeur, cette pression s'exerce également sur toutes les parois qui l'enferment, à moins que le volume enfermé ne soit très vaste, ou que le fluide ne se meuve rapidement. La *pression* est le rapport de la force, qui agit sur une surface, à l'étendue de cette surface ; on la compte en *kg* par *cm*² ; c'est le rapport d'un nombre de *kg* à un nombre de *cm*². La force est perpendiculaire à la surface pressée. Avec la constance de la pression sur toutes les parois, peu importe

l'étendue considérée; avec la pression variable d'un point à l'autre, comme celle qu'exercent les liquides, la pression en un point est la limite de ce même rapport quand la surface envisagée devient infiniment petite.

On définit d'une manière analogue la pression en un point pris au milieu de la masse fluide. Cette définition s'étend aux diverses parties d'un fluide en mouvement.

Une chaudière, pressée à l'intérieur par la vapeur, supporte aussi la pression extérieure de l'atmosphère : les tôles résistent seulement à la différence de ces deux pressions. C'est pourquoi on compte souvent la pression dite *effective*, c'est-à-dire la pression réelle (dite *absolue*) diminuée de celle de l'atmosphère. Comme cette dernière pression est variable, on la suppose égale à une valeur de convention qui correspond à une hauteur barométrique de 760 mm ou 1,0334 kg par cm^2 . Pour plus de simplicité, on peut admettre que l'atmosphère produit une pression d'un kg par cm^2 .

9. Mesure des pressions. — La pression atmosphérique se mesure à l'aide du *baromètre* : la colonne de mercure de cet instrument, soustraite à toute pression à sa partie supérieure, fait équilibre à l'atmosphère, en exerçant à sa base une pression égale. Sur les machines, le baromètre peut servir à mesurer des pressions inférieures à celle de l'atmosphère ou ne la dépassant pas trop : certains condenseurs sont munis de cet instrument.

Pour mesurer des différences de pression entre deux enceintes, on se sert de *manomètres* formés d'un tube en forme d'U, ouvert aux deux extrémités : une des extrémités communique avec l'une des enceintes, l'autre avec la seconde enceinte. Ce tube renferme un liquide, eau ou mercure suivant la valeur des différences de pressions à mesurer : elles sont connues par la dénivellation des colonnes liquides, d'une branche à l'autre. Une différence de pression de 0,1 kg par cm^2 correspond à une hauteur de 1m d'eau ou 73,54 mm de mercure. Si l'une des branches s'ouvre

librement dans l'atmosphère, le manomètre indique la pression dite effective sur l'autre branche.

Pour les pressions un peu élevées, on fait usage de manomètres métalliques, composés d'un tube flexible courbé,

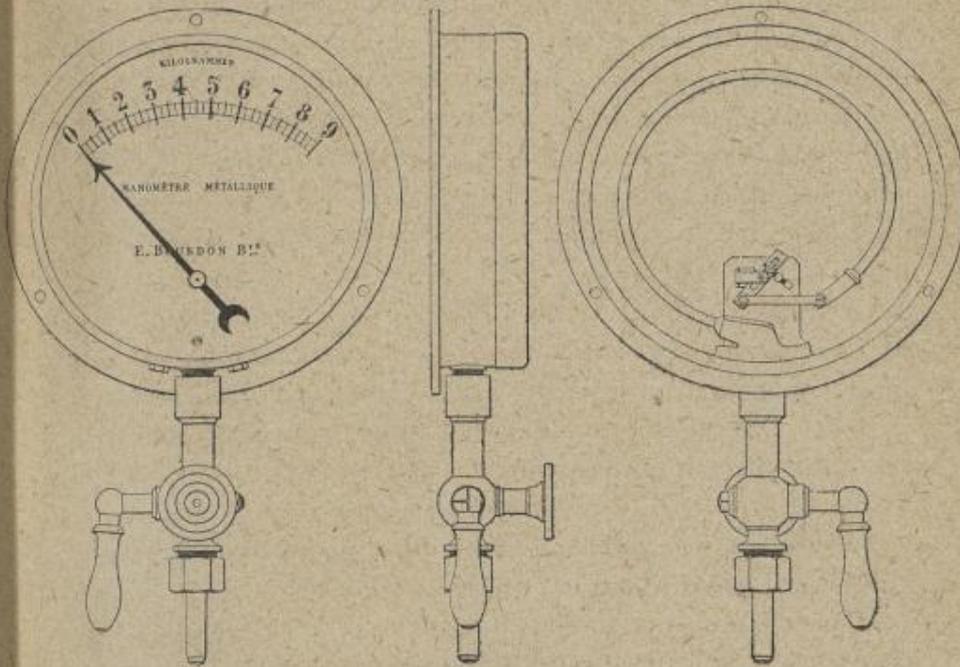


Fig. 8. — Manomètre Bourdon, à tube métallique. La pression à l'intérieur du tube le déforme et en déplace l'extrémité libre, qui est reliée à l'aiguille. La graduation indique la pression effective en kg par cm^2 .

fixé à une extrémité, qui communique avec l'enceinte où l'on veut mesurer la pression, et fermé à l'autre extrémité, qui commande une aiguille (fig. 8). On les vérifie à l'aide de manomètres étalons soumis à la même pression. Les étalons, eux-mêmes, doivent être l'objet de vérifications spéciales, au besoin à l'aide de manomètres à mercure à air libres, qui sont les plus exacts.

10. **Température.** — Les variations de la température, mesurées par les *thermomètres*, sont rapportées aux change-

ments du volume d'un corps, ou bien aux variations de la pression d'un volume constant de gaz. Selon le corps employé à la confection du thermomètre, on peut obtenir des échelles différentes de températures, qui ne coïncident exactement qu'en certains points choisis comme repères.

Le Comité international des poids et mesures a défini les températures par les pressions d'un volume constant d'hydrogène, mesurées dans certaines conditions bien déterminées. Les thermomètres à mercure donnent des indications suffisamment précises pour la plupart des applications entre 0° et 300°; ils sont même parfois disposés pour fonctionner jusqu'à 500°.

Le *pyromètre* Fournier indique à distance des températures assez élevées : il consiste en un petit récipient métallique contenant un liquide, dont on mesure la pression de vapeur. Cette pression est transmise au manomètre de mesure par un tube mince rempli d'un liquide moins volatil.

Au lieu de l'échelle ordinaire centigrade, les physiciens emploient souvent celle des températures dites absolues. Le nombre qui désigne une température absolue s'obtient en ajoutant 273 au nombre de degrés centigrades.

11. Chaleur. — La chaleur se présente dans des conditions fort diverses, avec des températures variables; mais c'est une grandeur mesurable. La définition de l'unité de quantité de chaleur est rappelée dans l'introduction.

La transmission de chaleur la plus simple se fait par le *mélange* de deux corps possédant des températures différentes. Dans ce mélange, qui n'est guère possible qu'entre les fluides, les deux corps prennent une température commune. L'alimentation des chaudières, la condensation par injection, offrent des exemples de ce mode de transmission.

Un corps abandonne ou reçoit de la chaleur par *rayonnement*, soit quand il isole une enceinte absolument vide, soit quand il est en contact avec un fluide; dans ce second cas,

en même temps, la chaleur se communique par *convection*, c'est-à-dire par contact avec renouvellement des parties fluides. Enfin la chaleur se propage à l'intérieur des corps par *conductibilité*.

Des quatre modes de transmission de la chaleur, par *mélange*, par *conductibilité*, par *rayonnement* et par *convection*, les deux premiers obéissent à des lois simples; les deux autres sont des phénomènes complexes et qui se superposent fréquemment. La physique a déterminé les lois du rayonnement seul: mais l'activité de la convection, par sa nature même, est très variable. En certains cas, on applique la loi de *Newton*: le nombre de calories échangées, en une seconde, entre un mètre carré de la surface d'un corps et un fluide, est proportionnel à la différence des températures qui existent à la surface du corps et dans le fluide.

Une loi physique, des plus intéressantes et des plus simples, loi que l'observation des machines à vapeur a contribué à établir, est celle de l'équivalence de la chaleur et du travail: le travail peut donner naissance à la chaleur comme dans les phénomènes du frottement; inversement, dans les machines, une certaine quantité de chaleur disparaît et se transforme en travail. Dans ces transformations, lorsqu'on peut éliminer tous les phénomènes accessoires et les déperditions de travail et de chaleur, on trouve une exacte concordance entre la quantité de chaleur disparue et le travail produit, ou entre le travail qui disparaît et la chaleur qu'il développe: à une calorie ancienne (voir introduction) correspondent 426 *kgm*; c'est du moins le nombre généralement admis aujourd'hui d'après la moyenne des meilleures expériences.

On commettrait une erreur des plus graves en supposant que les machines peuvent ainsi transformer en travail toute la chaleur que l'eau vaporisée reçoit dans la chaudière. Une autre loi physique enseigne qu'une fraction seulement de cette quantité de chaleur peut être utilisée pour la production du travail mécanique; cette fraction

dépend des températures de formation dans la chaudière et de la condensation de vapeur.

12. Diagrammes figurant les états d'un fluide. — Les diagrammes géométriques représentent clairement les transformations physiques d'un fluide, en montrant les valeurs correspondantes de deux éléments caractéristiques. Pour une masse déterminée du fluide, de préférence un kilogramme, le volume occupé est figuré par une longueur Oa , portée en *abscisse* sur l'axe OV (fig. 9), et la pression par l'*ordonnée*

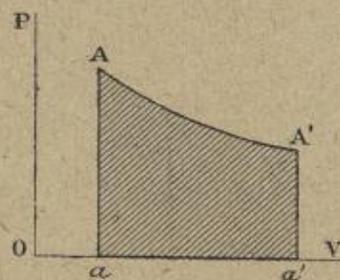


Fig. 9. — Diagramme des pressions et volumes.

aA , de sorte que la position du point A indique, à une échelle connue, la valeur de ces deux éléments; chaque point figure ainsi un état du fluide, caractérisé par la pression et le volume d'un kilogramme; plusieurs états successifs sont figurés par une ligne telle que AA' .

Ce diagramme fait connaître le travail produit par le kilogramme de fluide, qu'on suppose pousser un piston; si la pression reste invariable, la ligne AA' est une droite parallèle à l'axe OV : la force qui pousse le piston est égale au produit de la pression par la surface du piston; le travail produit se calcule en multipliant cette force par la course du piston, ou, ce qui revient au même, en faisant le produit de la pression par l'accroissement du volume aa' ; ce travail est donc figuré par la surface d'un rectangle qui a pour côtés AA' et aa' . Quand la pression varie, le travail est figuré par la surface comprise entre la ligne AA' , quelle qu'elle soit, et les droites aA , aa' et $a'A'$.

Ce travail est moteur ou *positif* quand le corps passe de l'état A à l'état A', c'est-à-dire quand son volume augmente. Si au contraire il passe de A' à A, le volume diminue; le piston comprime le fluide, et le travail exercé contre ce piston est résistant ou *négalif*.

Sur le *diagramme entropique* (fig. 10), les ordonnées représentent, pour un kg d'un fluide, sa température absolue, et les abscisses la quantité dite *entropie*. La propriété fondamentale de ce diagramme est que les surfaces telles que *aABb* figurent la quantité de chaleur reçue pendant l'évo-

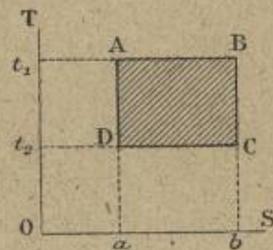


Fig. 10. — Diagramme entropique du cycle de Carnot.

lution AB. On voit de la sorte, sur le diagramme de la figure 10, qu'en allant de A à B, le fluide a reçu une quantité de chaleur mesurée par la surface *aABb*; de C à D, il a au contraire cédé la quantité de chaleur *CDab*; la différence, ou la surface ABCD, représente la chaleur qui s'est transformée en travail dans l'évolution complète avec retour du fluide à l'état primitif A'.

13. Propriétés des vapeurs. — Une *vapeur* résulte de la transformation d'un liquide qui passe à l'état gazeux; en se *condensant* elle reprend l'état liquide. Elle est dite *saturée* tant qu'elle est en contact avec le liquide qui la produit; sa pression dépend alors uniquement de la température,

1. Même sans donner la définition de l'entropie, il semble utile de mentionner ce diagramme à cause de son emploi fréquent dans les bureaux d'études. On consultera sur cette question les articles de M. Boulvin dans la *Revue de mécanique*, année 1897, et le *Cours de mécanique appliquée aux machines*, du même auteur, 3^e fascicule.

quel que soit le volume occupé; si on augmente ou si on diminue la capacité qui renferme la vapeur saturée, en lui fournissant ou en lui soustrayant une quantité convenable de chaleur, de manière à en maintenir la température constante, la pression ne varie pas, tant qu'il subsiste du liquide. Lorsque la dernière particule liquide disparaît, la vapeur est encore saturée; elle est dite *saturée sèche*.

On peut alors *surchauffer* la vapeur, en lui fournissant de la chaleur; la pression peut rester constante, si le volume augmente; la température s'élève.

Lorsqu'une partie seulement du liquide est passée à l'état de vapeur, cette vapeur est souvent séparée nettement du reste du liquide; considérée isolément, elle est saturée sèche. Au contraire, le liquide peut être intimement mélangé à la vapeur sous forme de gouttelettes ou de vésicules. Ainsi mélangée de liquide, la vapeur d'eau forme des nuages blancs lorsqu'elle s'échappe dans l'atmosphère; la vapeur sèche est au contraire un fluide invisible.

La *titre* de la vapeur, mélangée d'eau, est le rapport du poids de vapeur sèche au poids total du mélange.

L'illustre physicien Regnault a mesuré les quantités de chaleur nécessaires pour transformer un kilogramme d'eau, prise à la température du zéro centigrade, en vapeur sèche à une température donnée, le liquide et sa vapeur étant constamment soumis à la pression qui correspond à cette température. Il faut d'abord échauffer l'eau jusqu'à la température choisie pour la vaporisation et lui fournir ce qu'on appelle la *chaleur du liquide*, qui est d'environ une calorie pour chaque degré d'échauffement. Ensuite, pour vaporiser l'eau sans que la température change, il faut lui fournir la *chaleur de vaporisation*. On appelle *chaleur totale* la somme de la chaleur du liquide et de la chaleur de vaporisation.

Une formule simple permet de calculer la chaleur totale pour un kg d'eau prise à 0° et vaporisée à la température θ : c'est, en calories, $606,5 + 0,305 \theta$; par exemple pour $\theta = 100^\circ$ il faut 637 calories.

La table ci-après, établie en calories anciennes, est relative à la vapeur d'eau¹. On remarquera combien est grande la chaleur de vaporisation de l'eau, aux températures ordinaires où se fait cette vaporisation dans les chaudières.

Les pressions données dans le tableau sont les pressions absolues : pour passer aux pressions effectives il suffit d'en retrancher 1,0334 kg, ou simplement 1, en négligeant les décimales. Si l'eau à vaporiser est prise à une température supérieure à 0°, 15° par exemple, la quantité de chaleur à fournir est diminuée de celle nécessaire pour chauffer l'eau de 0° à 15°, approximativement 15 calories.

TEMPÉRATURE	PRESSION en kg par cm ² .	CHALEUR du liquide en calories pour un kg.	CHALEUR de vaporisation en calories pour un kg.	POIDS- du m ³ de vapeur saturée sèche en kg.
30°	0,0429	30,03	585,62	0,030
40°	0,0747	40,05	578,65	0,051
50°	0,1251	50,09	571,66	0,083
100°	1,0334	100,50	536,50	0,606
110°	1,4623	110,64	529,41	0,839
120°	2,0278	120,81	522,29	1,141
130°	2,7607	131,00	515,15	1,524
140°	3,6953	141,21	507,99	2,004
150°	4,8695	151,46	500,79	2,597
160°	6,3250	161,74	493,56	3,320
170°	8,1063	172,05	486,30	4,192
180°	10,2611	182,40	479,00	5,230
190°	12,8396	192,78	471,67	6,456
195°	14,3039	197,98	467,99	7,145
200°	15,8939	203,20	464,30	7,888
205°	17,6090	208,4	460	8,687
210°	19,4750	213,7	457	9,550
215°	21,4670	218,9	453	10,437
220°	23,6403	224,1	449	11,412

Pour surchauffer la vapeur d'eau à pression constante, il faut lui fournir une quantité de chaleur qu'on a longtemps

1. Les *leçons sur les machines à vapeur*, par Hirsch et Debize, contiennent (t. I, p. 136) une table très détaillée des propriétés de la vapeur d'eau jusqu'à la pression de 27 kg. par cm², et la température de 227°, 12.

estimée être de 0,48 calorie par degré de surchauffe. Mais des expériences précises ont montré que ce coefficient était variable suivant les valeurs des pressions et des températures. Pour bien des applications pratiques, on peut se contenter de la valeur approchée 0,5 à 0,55¹.

L'eau se dilate quand on la chauffe; à partir de 4°, le poids du mètre cube varie comme il suit :

0°	999,87 kg	100°	958,6 kg.
4°	1000,00 —	150°	917,2 —
10°	999,73 —	180°	887,5 —
50°	988,13 —	200°	866,2 —

Quand la vapeur se condense, si la température de l'eau condensée reste celle de la vapeur, la quantité de chaleur abandonnée par un kg est égale à la chaleur de vaporisation sous cette température : si de plus l'eau se refroidit d'un certain nombre de degrés, elle abandonne la chaleur correspondante du liquide.

Pour d'autres liquides que l'eau, il y a également une chaleur de vaporisation : la pression est également définie pour chaque température, avec des valeurs différentes pour les divers liquides.

Voici quelques nombres relatifs à l'éther, employé dans certains moteurs :

TEMPÉRATURE	PRESSION en kg par cm ² .	CHALEUR du liquide en calories, pour un kg.	CHALEUR de vaporisation en calories, pour un kg.	POIDS du m ³ de vapeur saturée sèche en kg.
10°	0,25	5,32	93,12	4,19
40°	1,23	21,63	89,48	3,49
70°	2,87	38,48	84,30	8,35
100°	6,74	55,86	77,58	17,35
120°	10,50	67,74	72,26	27,6

En voyant la faible chaleur de vaporisation de l'éther,

1. On trouvera de nombreux détails sur la vapeur surchauffée et ses applications dans le traité de M. Marchis, *la vapeur surchauffée*.

comparée à celle de l'eau, on pourrait penser que l'usage de ce fluide serait plus avantageux dans les machines; mais on perdrait de vue que les nombres des tableaux s'appliquent au kilogramme, tandis qu'il faut produire le même volume de vapeur, sous la même pression, pour avoir une marche comparable. Or, en partant du liquide à 0°, il faut environ 3.500 calories ($5,23 \times 661,4$) pour obtenir un m^3 de vapeur d'eau à la pression de 10,26 kg par cm^2 , tandis qu'un m^3 de vapeur d'éther à 120° (pression 10,3 kg par cm^2) exige environ 3.900 calories ($27,6 \times 140$).

*La chaleur totale multipliée par le poids =
calories*

CHAPITRE III

CONSTITUTION GÉNÉRALE

14. **Modes d'action de la vapeur.** — On utilise l'action motrice de la vapeur, produite dans une chaudière, de deux manières essentiellement différentes : on la fait agir par sa pression ou par la force vive du jet qui s'écoule de la chaudière dans l'enceinte à pression inférieure, condenseur ou atmosphère. La pression s'exerce généralement sur un piston circulaire qui se meut dans un cylindre ; toutefois, dans les machines *rotatives*, elle agit sur des pièces mobiles de formes diverses. Elle s'exerce même directement sur un liquide à élever, dans le *pulsomètre* actuel et dans l'antique machine de Savery.

Les jets de vapeur sont employés de deux manières différentes ; ou bien ils entraînent un autre fluide, gazeux ou liquide, et constituent des souffleries et des appareils éleveurs (souffleurs et aspirateurs d'air, éjecteurs à air ou à eau, injecteurs), ou bien ils agissent sur les aubes d'une *turbine* et leur communiquent un mouvement de rotation.

Les appareils à entraînement ont été dénommés *trompes* par M. Rateau.

Le présent chapitre a trait aux machines à piston.

15. **Cylindres et pistons.** — Le piston circulaire dans un cylindre est un organe mécanique ancien, qu'il était naturel d'utiliser pour la machine à vapeur.

Il doit former joint étanche contre la surface du cylindre. Au début, on s'est servi des procédés en usage pour les pistons des pompes, entourés de matières tenaces et plas-

tiques, telles que des tresses de chanvre. Mais avec l'élévation de la pression et, par suite, de la température de la vapeur, ces matières végétales sont devenues insuffisantes, parce qu'elles se carbonisaient rapidement ; on les a remplacées par des pièces métalliques. On a d'abord muni le piston d'une série de pièces, ou *segments*, en forme d'arcs de cercle, pressés contre le cylindre, avec d'autres pièces intérieures recouvrant les joints que les segments laissent entre eux. Puis on est arrivé à la disposition actuelle de bagues élastiques fendues, auxquelles on a conservé le nom de *segment*.

Avec le *double effet*, qui utilise les deux faces du piston pour recevoir le travail de la vapeur, la *tige* du piston doit traverser le *couvercle* ou *plateau* qui ferme le cylindre, en passant à travers un bourrage qui empêche les fuites. Composé d'abord et pendant longtemps de matières végétales, chanvre, tresses de coton, serrées autour de la tige par le *presse-étoupe*, ce bourrage a été remplacé par des *garnitures métalliques*, résistant aux températures élevées de la vapeur.

16. **Transmission du mouvement du piston.** — Le mouvement rectiligne alternatif du piston moteur peut être directement utilisé, notamment pour actionner le piston d'une pompe. Au début, pour la commande de pompes installées dans un puits, le cylindre moteur était placé verticalement à côté du puits, et la liaison établie par un balancier, oscillant sur un support fixe.

Pour obtenir un mouvement circulaire, nécessaire dans quantité d'appareils, la transformation du mouvement rectiligne alternatif se fait au moyen d'une bielle, dont une extrémité (la *petite tête* ou le *pied*) s'articule sur un tourillon que porte une extrémité de la pièce à mouvement rectiligne (la *tête* ou *crosse de piston*), et dont l'autre extrémité (la *grosse tête*) est articulée sur un tourillon faisant corps avec une *manivelle* calée sur l'arbre, tourillon dont le centre décrit

un cercle. La tête de piston est guidée en ligne droite par des patins qu'elle porte et qui frottent sur les *glissières*, solidement attachées au *bâti*. Dans la machine à simple effet, la bielle peut être articulée sur le piston même, qui n'a plus de tige, mais auquel on donne une longueur suffisante pour qu'il soit bien guidé en ligne droite, sans que le coincement ou *arc-boutement* dans le cylindre soit à craindre.

Ce mécanisme simple, et très fréquemment employé pour

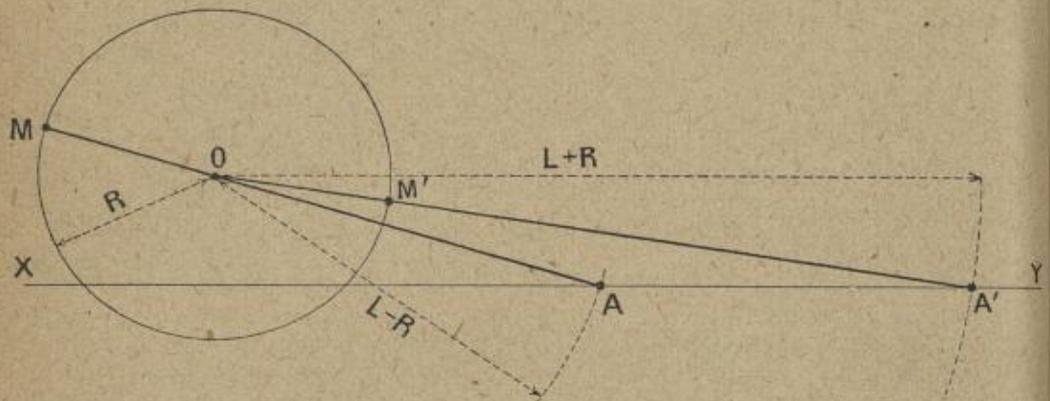


Fig. 41. — Transmission par bielle, avec axe du cylindre, XY, ne rencontrant pas l'axe de l'arbre.

des usages divers, comprend quatre parties essentielles : le bâti, avec le cylindre et les paliers de l'arbre, partie immobile fixée au sol ; le piston avec la tige, qui coulisse dans le cylindre ; l'arbre à manivelle, qui tourne dans les paliers, et la bielle qui réunit le piston à l'arbre. Il est clair que le bâti est aussi nécessaire que les pièces mobiles.

La *longueur* de la bielle est la distance entre les centres des deux articulations cylindriques qui la terminent, de même que le *rayon* de la manivelle est la distance du centre de l'arbre au centre du tourillon de la manivelle, sur lequel s'articule la bielle. La longueur de la bielle est ordinairement 3 à 7 fois le rayon de la manivelle, quelque-

fois 4. On est exceptionnellement descendu en dessous de cette longueur.

L'axe du cylindre, prolongé, rencontre l'axe de l'arbre tournant. Dans certaines applications de ce mécanisme de transmission et même, exceptionnellement, dans certaines machines à vapeur, l'axe du cylindre est déporté, parallèlement à sa position normale, et ne rencontre pas l'axe de l'arbre. Il en résulte que les deux courses simples du piston, faites en sens opposés, ne correspondent plus chacune à un demi-tour de l'arbre (fig. 11).

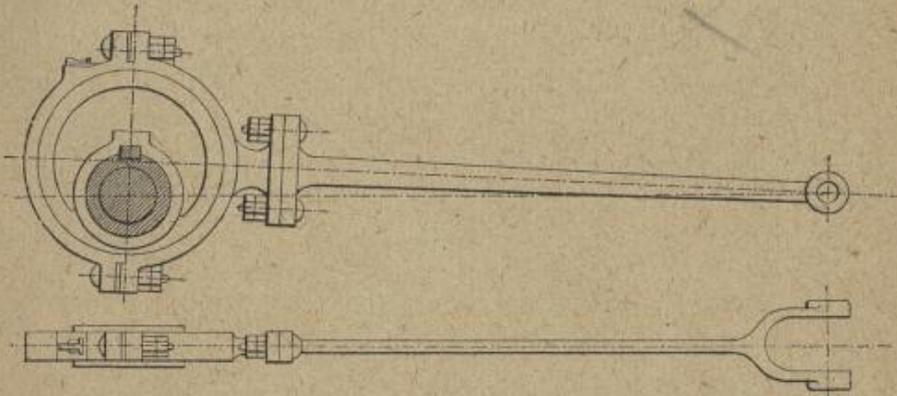


Fig. 12. — Excentrique. En coupe, les hachures montrent l'arbre sur lequel est calée la *poulie* d'excentrique. La poulie est entourée par le *collier*, invariablement relié à la barre, terminée par une fourche sur laquelle s'articule une tige guidée en ligne droite.

La *manivelle* peut être rapportée à l'une des extrémités de l'arbre, contre un des paliers, en *porte-à-faux*, ou bien comprise entre deux paliers sur l'arbre *coudé*.

Il est cependant possible d'installer un tourillon en un point quelconque d'un arbre, sans le couder, en donnant à ce tourillon un rayon assez grand pour qu'il enferme l'arbre. Le tourillon s'appelle alors *poulie d'excentrique*; la tête de bielle qui l'entoure est le *collier d'excentrique*, et la *barre d'excentrique* est le corps de bielle (fig. 12). La loi géométrique du mouvement n'est changée en rien par cette particularité de construction. Toutefois le grand rayon de l'ex-

centrique est cause d'un frottement assez fort ; et même, si on voulait employer l'excentrique à la transformation du mouvement rectiligne d'un piston moteur en mouvement circulaire, le frottement produirait des phénomènes de coincement ou arc-boutement dans une zone assez étendue, quelquefois même en tous les points, de sorte que la transmission serait impossible. Aussi n'emploie-t-on l'excentrique que pour la transformation inverse, du mouvement circulaire en mouvement rectiligne, et pour la commande de mécanismes qui ne demandent qu'une puissance restreinte.

Le bâti, qui porte les pièces mobiles de la machine, est fixé solidement à une fondation, c'est-à-dire à la masse même du sol, qui doit offrir une base absolument rigide. Dans la machine *horizontale*, le bâti s'étend en surface, l'axe du mouvement rectiligne, ou du cylindre, étant horizontal. Cet axe peut être vertical et la machine s'élève en hauteur, le bâti ayant une forme appropriée. Dans la machine *verticale* proprement dite, le cylindre est en dessous de l'arbre, placé à la partie supérieure du bâti. Mais la disposition inverse, dite *pilon*, est plus fréquente, le cylindre étant en haut du bâti, et l'arbre à la partie inférieure. Quelquefois l'axe du cylindre est *incliné*.

L'axe de l'arbre est presque toujours horizontal ; exceptionnellement il est vertical, ce qui entraîne l'horizontalité du cylindre.

Dans les machines qui se déplacent, locomobiles, locomotives, et qui ne sont pas fixées à une fondation, le bâti est constitué par le châssis du véhicule ; sur les bateaux, le bâti du moteur est solidement rattaché à la coque.

Un moteur peut avoir deux ou plusieurs cylindres, portés par un même bâti, et dont les pistons attaquent un arbre unique. Chaque piston peut avoir sa bielle et sa manivelle, ou bien des pistons peuvent être montés *en tandem* sur une tige commune.

CHAPITRE IV

TRAVAIL DE LA VAPEUR DANS LES CYLINDRES

17. Indicateurs. — Un instrument simple, l'*indicateur*, permet de mesurer à chaque instant la pression qui agit sur le piston d'une machine ; on en déduit aisément le travail exercé par la vapeur. Cet instrument réalise le mode de représentation indiqué au § 12, à l'aide d'un *diagramme*, dont les abscisses figurent le volume occupé par la vapeur, et les ordonnées la pression par cm^2 . Les abscisses montrent d'ailleurs la course du piston, car la variation du volume est égale au produit du parcours du piston par la section constante du cylindre.

L'indicateur primitif de Watt est un petit cylindre vertical C (fig. 13) muni d'un piston F ; il communique, par sa partie inférieure, avec le cylindre où travaille la vapeur. Le dessus de ce petit piston est pressé par un ressort à boudin I. La pression de la vapeur comprime plus ou moins le ressort : à chaque flexion du ressort correspond une charge connue, généralement proportionnelle à la flexion. Une planchette verticale E suit le mouvement du piston, réduit dans un rapport convenable. Un crayon L, entraîné par le piston, trace une courbe sur la planchette et donne ainsi la pression pour chaque position du piston. Bientôt la planchette fut remplacée par un barillet oscillant autour d'un axe vertical, sous l'action d'une ficelle entraînée par le piston et d'un ressort de rappel antagoniste (fig 14). Cette disposition plus commode, ne modifie en rien le tracé.

La commande se fait par l'intermédiaire d'une poulie de

réduction, composée d'un axe qui porte deux poulies de diamètres inégaux tournant ensemble. Sur la plus grande

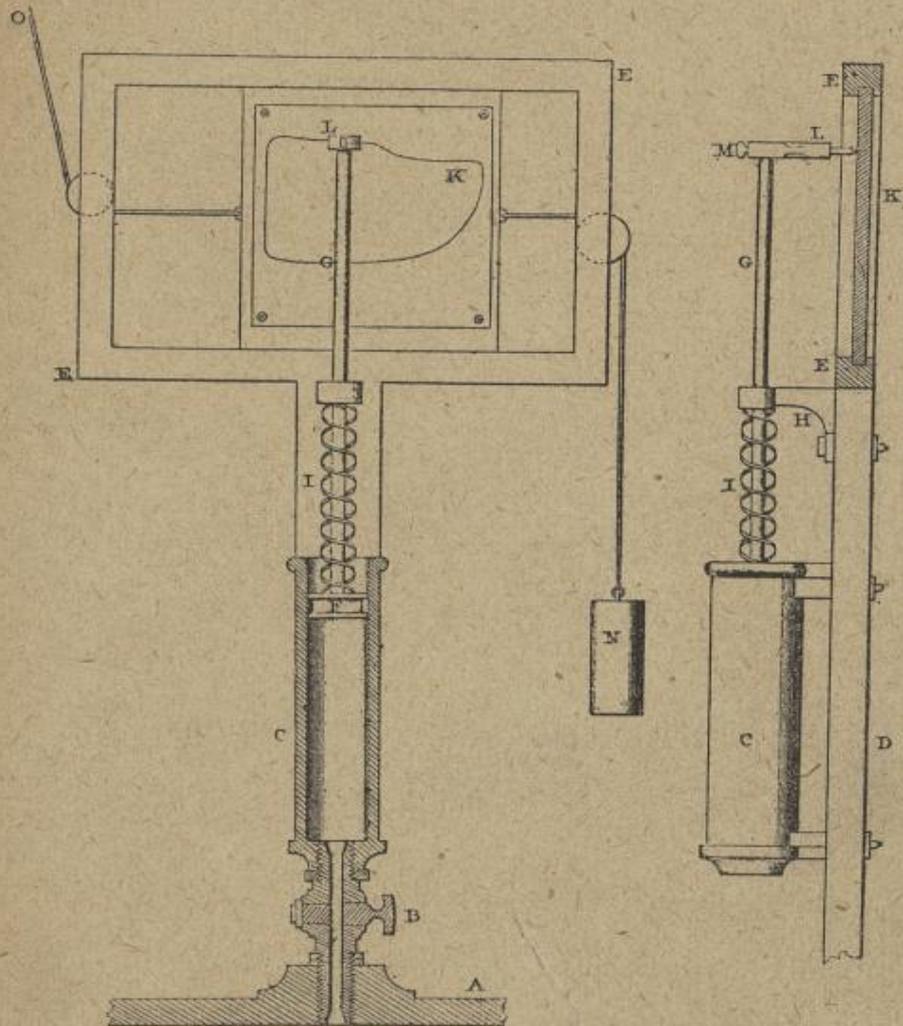


Fig. 13. — Indicateur de Watt, à planchette. L'appareil se monte sur le plateau A du cylindre vertical d'une machine à balancier.

s'enroule la ficelle qui vient du piston de la machine en expérience, et sur la plus petite une autre ficelle qui entraîne le tambour de l'indicateur, les ficelles étant constamment tendues par le ressort du tambour de l'indicateur.

Sur le diagramme, on trace la droite correspondant à la pression atmosphérique (fig. 15), en faisant mouvoir le barillet sans établir la communication avec le cylindre moteur. La *tare du ressort* fait connaître la distance à laquelle on doit tracer l'axe des abscisses OV correspondant au vide

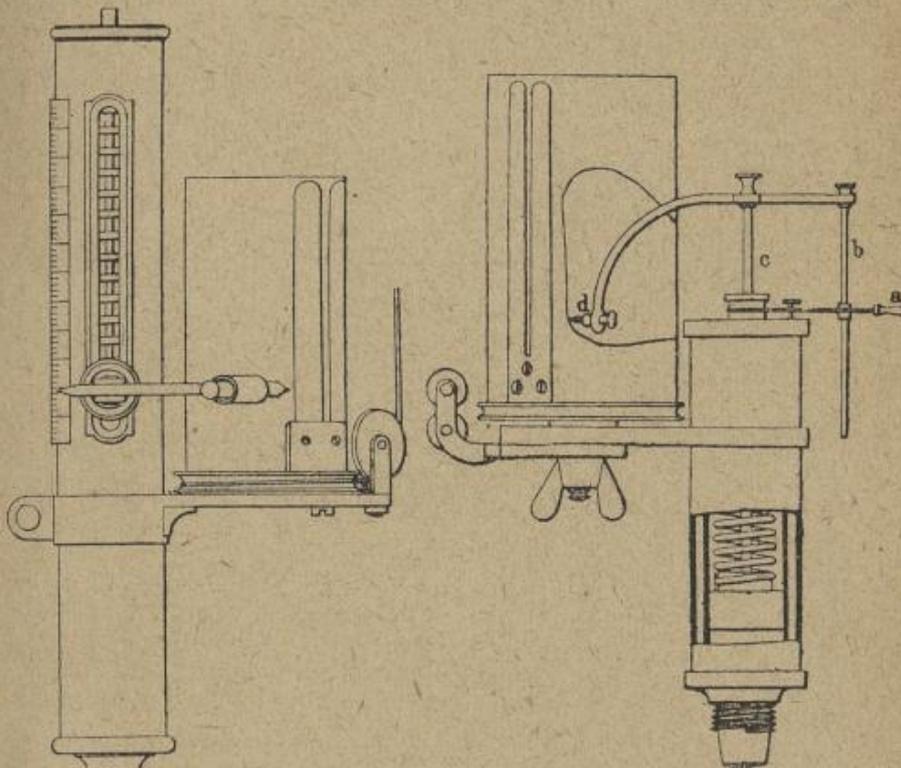


Fig. 14. — Indicateur à barillet d'Hopkinson (d'après le guide pour l'essai des machines de Buchetti).

absolu sous le piston de l'indicateur. Quand la pression mesurée est inférieure à celle de l'atmosphère, le ressort travaille par extension. On peut aussi mener les parallèles représentant des pressions de 1, 2, 3... kg par cm^2 au-dessus de la pression atmosphérique, lignes équidistantes quand les ressorts sont bien construits.

La projection ab du diagramme sur OV est une longueur qui représente, à une échelle connue, le *volume* engendré

par le piston dans sa course, ou la surface du piston multipliée par sa course ; pour étudier la détente du fluide dans la machine, on figure, à la même échelle, par Oa l'espace libre que laisse le piston à fond de course, du côté correspondant au diagramme ; on trace en OP l'axe des ordonnées.

Quand les flexions du ressort sont exactement proportionnelles aux pressions, la surface du diagramme repré-

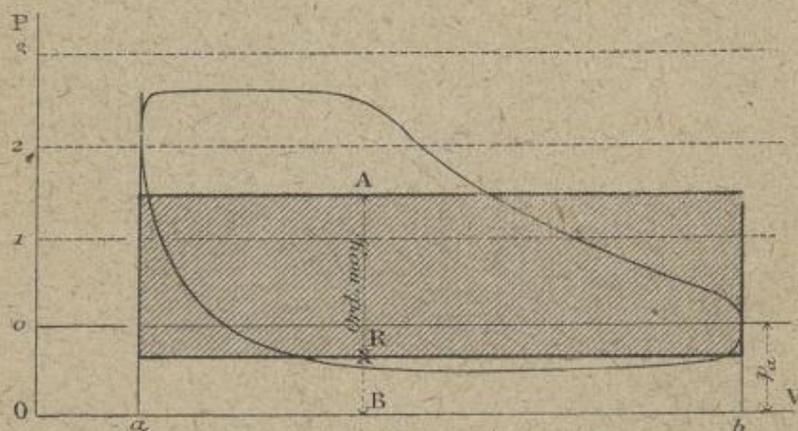


Fig. 15. — Diagramme d'indicateur. L'horizontale 0 correspond à la pression atmosphérique (p_a). AB, ordonnée moyenne pendant l'aller, de gauche à droite ; RB, ordonnée moyenne pendant le retour du piston ; AR, ordonnée moyenne pour la course aller et retour.

sente le travail exercé par la vapeur sur le piston, ou *travail indiqué*, toujours plus grand que le *travail effectif*. Le *planimètre*, dont on promène la pointe sur le contour du diagramme, en mesure directement la surface. Pour calculer le travail indiqué, on détermine l'*ordonnée moyenne* du diagramme, c'est-à-dire la hauteur AR du rectangle ayant même surface (fig. 15) : cette ordonnée moyenne correspond à une pression constante qui produirait même travail sur le piston en le poussant pendant toute sa course motrice, sans qu'aucune résistance agisse pendant le retour. On peut dire aussi que l'ordonnée moyenne pour l'aller et le retour est

la différence de deux ordonnées moyennes, AB pendant l'aller du piston et RB pendant le retour.

On relève et on mesure de même le diagramme sur l'autre face du piston des machines à double effet.

En multipliant l'ordonnée moyenne (exprimée en *kg* par *cm*²) par la surface du piston en *cm*², on calcule la force qui pousse le piston. Le produit de cette force par la course en *m* donne, en *kgm* le travail. La somme des travaux sur les deux faces donne le travail pour un tour.

Le moteur marchant en régime uniforme, le produit de ce travail par le nombre de tours en une seconde donne la puissance. Le nombre de *kgm* par seconde divisé par 102 exprime la puissance en kilowatts.

Plusieurs conditions sont nécessaires pour le fonctionnement précis de l'indicateur.

Une condition primordiale ne touche pas à l'instrument : la quantité qu'on veut mesurer doit être mesurable, ou la pression doit être la même, à chaque instant, dans les différentes parties de la masse de vapeur qui remplit le cylindre moteur. Cette égalité de pression paraît en général à peu près réalisée, au moins en exceptant les passages mêmes d'arrivée et de sortie, sur lesquels il ne conviendrait pas de brancher l'indicateur.

La pression, qui règne dans le cylindre moteur, doit se transmettre exactement et sans retard au piston de l'indicateur : il est bon que cet appareil soit monté sur le fond même du cylindre ; si un tuyau de communication est nécessaire, il doit être gros et court, et protégé contre le refroidissement par une enveloppe. Deux indicateurs, un sur chaque fond, valent mieux qu'un seul instrument mis en communication avec l'un ou l'autre bout du cylindre par un robinet à trois voies et de longs tuyaux.

Il importe que la position du barillet corresponde constamment à celle du piston moteur ; la commande simple par ficelle, avec ressort de rappel, n'établit pas toujours exactement cette correspondance, quand la machine tourne vite.

Le piston d'indicateur devrait à chaque instant occuper la position d'équilibre, où la pression de la vapeur correspond exactement à la tension du ressort. Cette condition, à peu près réalisée pour les machines lentes, ne l'est plus avec les rotations rapides. C'est ainsi que l'indicateur primitif de Watt ne fonctionne pas bien pour des vitesses de plus de 50 à 60 tours par minute. Le piston de l'instrument, poussé, avec les pièces qu'il porte, par une force variable, prend un mouvement tantôt accéléré, tantôt retardé, sans occuper constamment la position d'équilibre statique qui correspondrait à la pression de la vapeur. L'effet du *lancé*

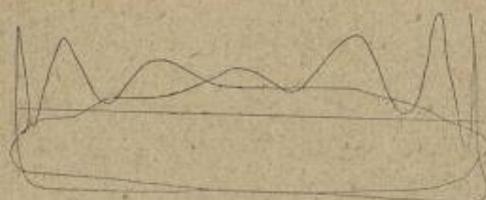


Fig. 16. — Effet du lancé du piston d'indicateur sur le tracé des diagrammes.

du piston, au début de la course, est très visible sur certains diagrammes d'indicateur (fig. 16). La plupart des modifications de l'appareil primitif ont été faites pour atténuer cet inconvénient grave.

Les indicateurs actuels ont des pistons plus petits et plus légers que l'appareil primitif de Watt, où le diamètre était de 40 mm environ. On en a, en outre, beaucoup réduit la course par l'emploi de ressorts très raides; cette modification donnerait un diagramme trop aplati et peu lisible; à l'aide d'un mécanisme très léger, on amplifie le mouvement du crayon (fig. 17). Le bon fonctionnement de l'appareil paraît peu explicable à première vue, car si d'une part on réduit la longueur des oscillations gênantes, d'autre part on les amplifie. L'amélioration tient surtout à ce que le ressort raide donne des oscillations beaucoup plus rapides, que le léger frottement de l'appareil et du crayon sur le papier amortit plus vite.

Il importe d'ailleurs que ces frottements soient toujours faibles, sinon ils troublent les inscriptions de l'appareil : un diagramme en escalier, avec des décrochements suc-

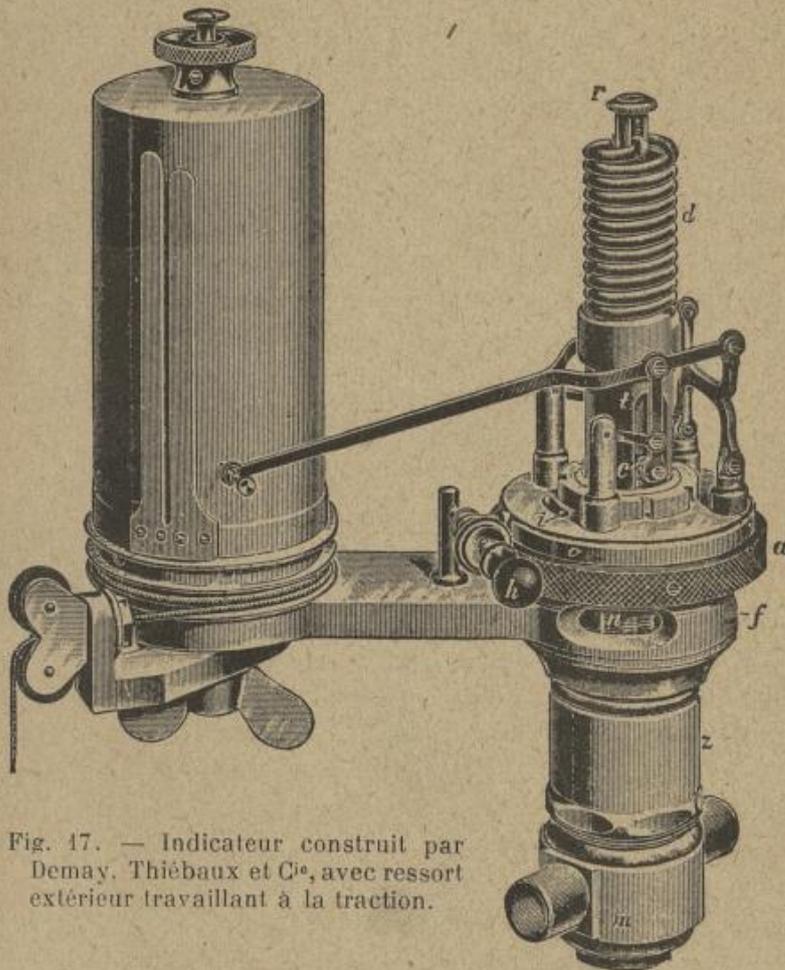


Fig. 17. — Indicateur construit par Demay, Thiébaux et C^o, avec ressort extérieur travaillant à la traction.

cessifs du erayon, est la marque d'un frottement excessif (fig. 18).

Les *indicateurs optiques* s'appliquent aux machines très rapides : un petit disque mince en acier, encastré sur sa circonférence, fait office à la fois de piston et de ressort, en se gonflant sous l'effet de la pression ; en outre, il reçoit un mouvement d'oscillation correspondant à la course du piston

de la machine en essai. Le diagramme est tracé sur un écran par un rayon lumineux réfléchi sur un miroir porté par le disque et sensible à son double mouvement. Dans le *manographe* Hospitalier, le miroir, commandé par le disque d'acier d'une part, reçoit d'autre part, par l'intermédiaire d'un arbre flexible, un mouvement correspondant à celui du piston du moteur, fortement réduit¹.

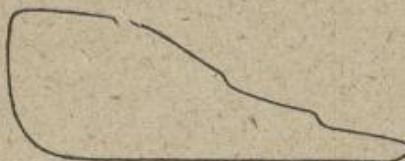


Fig. 18. — Diagramme avec décrochements montrant des frottements excessifs dans l'indicateur.

Les services que rend l'indicateur sont multiples : il fournit les données nécessaires pour l'étude théorique des machines; il mesure la puissance indiquée; il montre comment se fait la distribution de la vapeur et met en évidence les défauts dans le réglage des organes distributeurs, défauts dont la correction peut amener une grande économie dans la dépense de vapeur, ou bien augmenter la puissance du moteur.

18. Dynamomètres. — L'indicateur fait connaître le travail dit *indiqué*, exercé par la vapeur sur le piston d'un moteur, d'où l'on déduit la *puissance indiquée*. Mais ce travail indiqué ne se retrouve pas entier sur l'arbre de la machine : il subit un déchet, parce que les frottements du mécanisme et le fonctionnement de certains organes du moteur, tels qu'une pompe à air de condenseur, en consomment une fraction.

Les *dynamomètres* mesurent la force transmise par un mécanisme; en déterminant d'autre part le chemin par-

¹. On trouvera dans les *proceedings of the institution of mechanical engineers* (année 1923, p. 95) une étude sur des indicateurs récents.

couru par le point d'application, et la durée de l'opération, on peut calculer le *travail* de cette force et la *puissance* qu'elle donne. Les *dynamomètres d'absorption* dépensent le travail en frottements, tandis que les *dynamomètres de transmission* font connaître, par la déformation de certaines

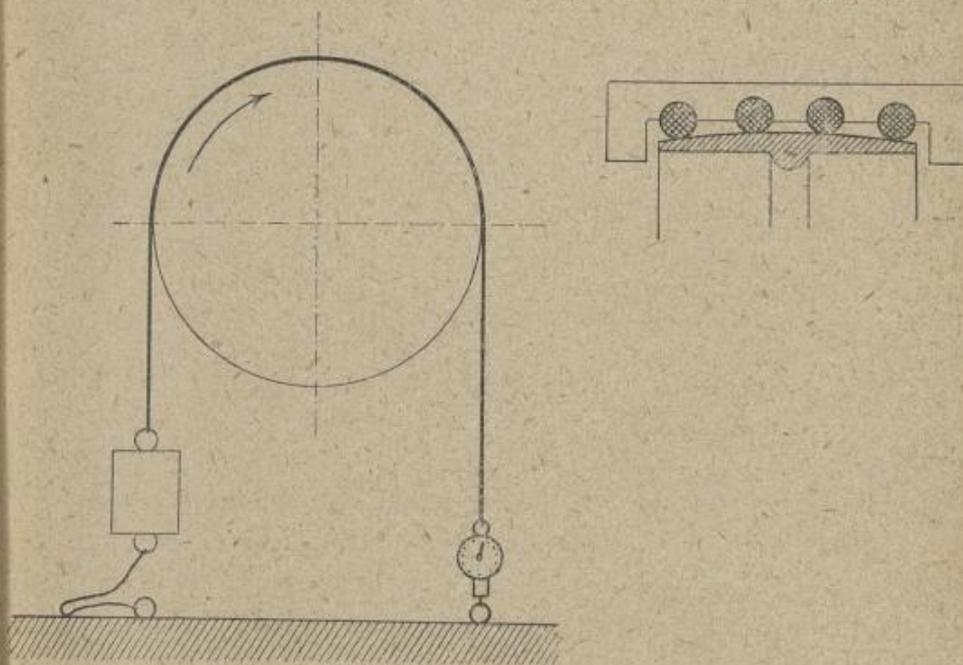


Fig. 19. — Frein à corde, monté sur la poulie d'un moteur : la corde est attachée à un peson à ressort, et porte à l'autre extrémité un poids, muni d'une attache de sûreté, pour en prévenir la projection accidentelle. Entretoise en bois pour maintenir les cordes séparées quand on en emploie plusieurs. Aux cordes on peut substituer une courroie.

pièces, la grandeur de la force qui les traverse. Lors des expériences, les premiers se substituent aux appareils commandés par un moteur, tandis que les seconds fonctionnent pendant la marche utile des machines.

Le dynamomètre le plus simple est le *frein à corde*, employé pour les petits moteurs. Sur une poulie de l'arbre de la machine (séparée de tous les appareils qu'elle doit commander) on place une corde (fig. 19) attachée à un

point fixe et portant un poids qui serre la corde sur la poulie. Le frottement doit être suffisant pour absorber tout le travail produit, ce qu'on voit quand la machine conserve sa vitesse de régime.

Il s'agit de mesurer le travail de frottement que surmonte dans ces conditions la machine. Or, le frottement consiste en une série de forces agissant tangentiellement à la poulie, en sens contraire du mouvement : toutes ces forces tangentielles tendent à entraîner la corde, et sont équilibrées par le poids qu'elle porte.

Il y a cependant une petite correction à faire : le brin de la corde attaché en un point fixe éprouve une certaine tension qui s'ajoute aux forces de frottement. On mesure cette tension en amarrant la corde sur un peson à ressort. Le travail résistant pendant un tour de la poulie est égal au poids (déduction faite de la tension sur l'attache de la corde) multiplié par le chemin parcouru, égal à la circonférence de la poulie.

P étant le poids en kg, t la tension sur l'attache, R le rayon de la poulie en m, n le nombre de tours par minute, la puissance en kilowatts est $\frac{6,28 R (P - t) n}{60 \times 102}$ ou $0,001026 R (P - t) n$

Ce calcul néglige le diamètre de la corde. En réalité, $P - t$ s'exerce suivant l'axe de la corde, et le chemin parcouru est un peu plus grand. Au cercle de rayon R, il faut substituer dans la formule le cercle de rayon $R + r$, r étant le rayon de la corde.

Le *frein de Prony*, prototype des dynamomètres, convient pour des puissances plus importantes. Le frottement est produit par une couronne de sabots (fig. 20) serrés contre la poulie, de manière à absorber tout le travail produit.

Il s'agit de mesurer la force tangentielle nécessaire pour empêcher cette couronne d'être entraînée par la poulie. On pourrait équilibrer directement les forces de frottement qui agissent tangentiellement à la poulie par un poids P suspen-

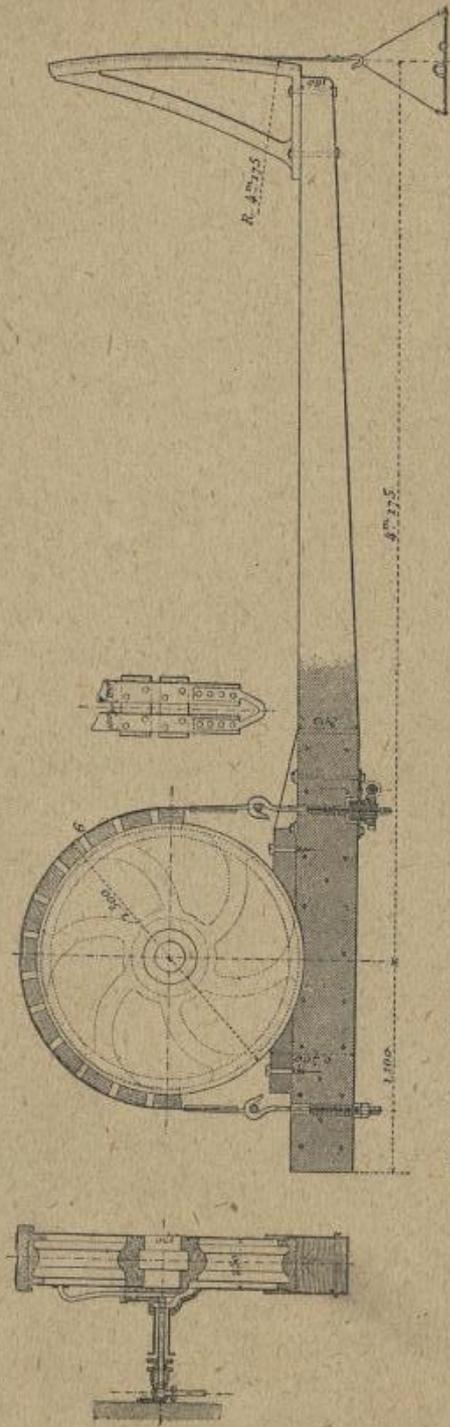


Fig. 20. — Frein de Prony, avec poulie à circulation d'eau dans la jante.

du sur la couronne à une distance du centre précisément égale au rayon de la poulie; le calcul de la puissance se ferait comme ci-dessus. Mais pour éviter des manœuvres de poids trop lourds, il est préférable d'appliquer la charge à l'extrémité d'un levier de longueur L comptée à partir de la verticale qui passe par l'axe de rotation de la poulie. Au poids P agissant à la distance R , on substitue ainsi P' à la distance L . Le principe du levier donne la relation :

$$P' \times L = P \times R \quad \text{ou} \quad P = P' \frac{L}{R}$$

Le travail absorbé en un tour est $6,28 RP$ ou $6,28 RP' \frac{L}{R}$, c'est-à-dire $6,28 L \times P'$.

Le travail en une seconde, la machine faisant $\frac{n}{60}$ tours, est alors $6,28 LP' \frac{n}{60}$, et la puissance en kilowatts, $0,001026 LP' n$.

L'expérience exige qu'on règle simultanément au degré voulu le serrage des sabots et la charge P' .

Ceci suppose le *frein équilibré* quand il ne porte aucun poids; desserré, il doit rester horizontal. Cet équilibre s'obtient par l'addition d'un contre-poids convenable du côté opposé du levier.

Le travail qui disparaît dans un frein se transforme en chaleur. Dans les essais prolongés, un arrosage est nécessaire pour éviter un échauffement excessif de la poulie, qui serait exposée à se rompre par dilatation de la jante.

Des butées solides empêchent des déplacements excessifs et dangereux du levier.

Au frottement des sabots on peut substituer toute autre action qui s'exerce entre une partie tournante fixée sur l'arbre de la machine et un collier qui entoure cette partie tournante, ce collier étant libre de tourner autour d'un axe qui se confond avec l'axe de rotation de la machine: pour empêcher ce collier d'être entraîné et le maintenir en équi-

libre, il faut une force, qui est produite, comme dans le frein de Prony, par un poids suspendu à l'extrémité du levier fixé sur le collier.

Le collier, quand aucun poids n'est suspendu, doit être en équilibre sur l'axe commun de rotation.

Un théorème élémentaire de mécanique indique que le produit du poids suspendu, P , par sa distance à l'axe (ou longueur du levier) est égal à la somme des produits de chacune des forces qui se développent entre la partie tournante et le collier maintenu en équilibre, par sa distance à l'axe (ce produit est ce qu'on appelle en mécanique le *moment* de la force).

Par suite le travail est le même que pour la force P agissant seule à l'extrémité du rayon L .

La *dynamo-dynamomètre*, fort employée pour l'essai des moteurs à pétrole, est une machine dynamo-électrique dont l'*induit* tourne entre les pôles d'une carcasse qui, au lieu d'être invariablement fixée au sol comme dans la machine ordinaire, est libre de tourner sur des couronnes de billes portées par un bâti fixe : deux butées voisines limitent ce mouvement de rotation, qu'on empêche à l'aide d'un poids convenable suspendu à l'extrémité d'un levier que porte cette carcasse, qui ne doit toucher ni l'une ni l'autre des butées.

L'arbre de l'induit est placé dans le prolongement de l'arbre du moteur en essai et lui est relié. Les forces qui tendent à entraîner la carcasse sont principalement les actions électro-magnétiques qui produisent le courant électrique dans la machine, puis le frottement des tourillons de l'arbre de l'induit dans les coussinets portés par la carcasse, et enfin le frottement des balais qui recueillent le courant électrique.

Toutes ces forces sont équilibrées par le poids P qu'on règle de manière à maintenir immobile la carcasse, sans qu'elle touche les butées. Le calcul est identique à celui du frein de Prony.

Le courant électrique produit est détruit dans un rhéostat ou utilisé d'une manière quelconque.

Dans les *dynamomètres hydrauliques*, applicables à de puissants moteurs, de 1 000 kw et plus, l'intermédiaire entre la partie tournante et le collier déplaçable maintenu en équilibre, qui l'entoure, est une masse d'eau; la partie tournante porte une série de palettes ou chicanes qui passent auprès d'autres chicanes portées par le collier en équilibre, de manière à opposer au mouvement une résistance qui doit être vaincue : l'équilibre se fait toujours de même par un poids P à l'extrémité d'un levier L (longueur depuis l'axe de rotation jusqu'à la verticale du poids P); et le théorème des moments s'applique exactement de même, bien qu'à première vue les actions qui se développent dans l'appareil, entre la partie tournante et celle maintenue en équilibre par l'intermédiaire de l'eau, puissent paraître plus complexes. Tel est le dynamomètre Froude.

Le dynamomètre hydraulique Rateau consiste en une véritable pompe centrifuge comprenant une roue munie d'aubes qui tourne dans une enveloppe équilibrée avec contrepoids. L'eau, refoulée tout autour de la roue à aubes dans l'enveloppe, est ramenée, par des conduits ménagés dans cette enveloppe, vers la partie centrale où se fait l'aspiration de la roue à aubes.

La pompe travaille dans ce circuit fermé; pour obtenir une résistance suffisante, le passage de l'eau dans le circuit est plus ou moins obstrué par un registre réglable à volonté suivant la puissance à absorber.

Le travail détruit dans ces appareils se transforme en chaleur et, par suite, la température de l'eau s'élève; on renouvelle l'eau en remplaçant constamment l'eau chaude par de l'eau froide à l'aide de dispositifs appropriés.

En mesurant la quantité d'eau employée et son échauffement à l'aide de deux thermomètres, l'un à l'entrée, l'autre à la sortie, on peut calculer le nombre de calories qu'elle entraîne.

En rapprochant ce nombre de calories du nombre des *kgm* qui disparaissent, on trouve que chaque calorie correspond à 426 *kgm*.

Des mesures de la puissance indiquée d'un moteur et de sa puissance effective, on déduit le *rendement mécanique*, rapport de la seconde à la première,

Les expériences qui viennent d'être décrites supposent que le moteur marche pendant quelque temps à l'état de régime, avec une vitesse uniforme et en produisant le même travail à chaque tour. Ces conditions sont nécessaires d'ailleurs pour qu'on puisse parler d'une puissance définie. L'indicateur peut d'ailleurs servir quand le régime est variable, mais le diagramme ne reste pas le même à chaque tour.

Un dynamomètre de transmission, qui, d'ailleurs, ne conviendrait pas pour de grands efforts, consiste en deux poulies contiguës, ayant même axe géométrique, et dont les faces voisines sont reliées, près de la jante, par un système de ressorts. Il en résulte un déplacement angulaire d'une poulie par rapport à l'autre; l'amplitude de l'angle donne la mesure de la force transmise, d'où on déduit le travail et la puissance. Des mécanismes convenables permettent d'observer et d'enregistrer le déplacement angulaire relatif des deux poulies.

La torsion d'un arbre cylindrique permet d'apprécier le moment des forces qui la produisent; tel est le principe du pandynamomètre de Hirn, récemment repris par divers constructeurs.

19. Machines à un cylindre. — Le moteur le plus simple n'a qu'un cylindre, dont le piston commande l'arbre par l'intermédiaire d'une bielle et d'une manivelle (fig. 21). La chaudière fournit la vapeur à une pression déterminée (souvent comprise entre 5 et 10 *kg* par *cm*²); la vapeur pousse le piston d'abord avec sa pleine pression, puis avec une pression décroissante, pendant la détente: ensuite elle

s'échappe dans un condenseur ou dans l'atmosphère, pendant le retour du piston. Cette action s'exerce de même sur les deux faces du piston dans les machines à *double effet*.

20. Cycle théorique de la machine monocylindrique. — Pour étudier méthodiquement l'action de la vapeur, on imagine une évolution simple, débarrassée de toutes les complica-

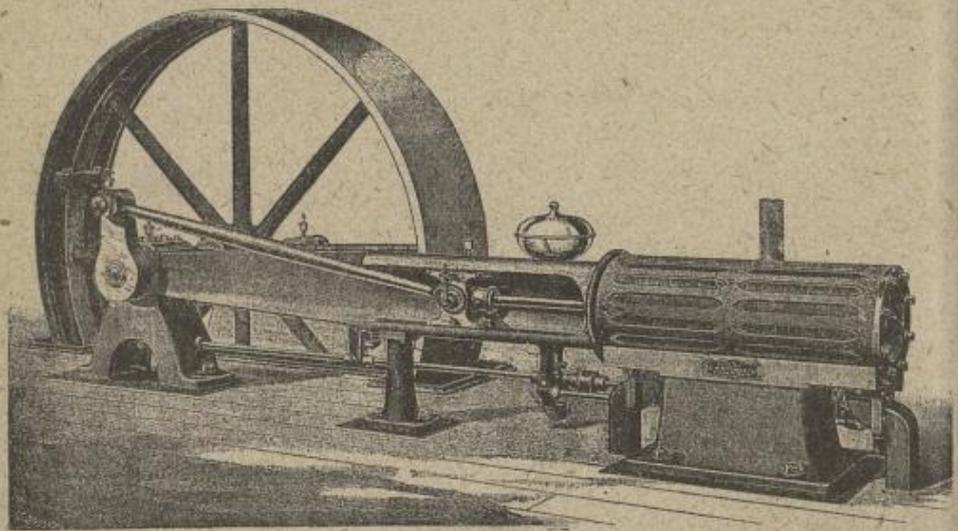


Fig. 24. — Machine horizontale à connexion directe, monocylindrique.

tions de la réalité, suivant ce qu'on appelle le *cycle théorique* de la machine à vapeur. On considère un seul côté du piston, qui, à son point de départ, ne laisse aucun *espace libre*; il est supposé poussé par la pleine pression, sans aucune réduction, pendant une première partie de sa course. La vapeur est saturée sèche. Ensuite la détente est assez prolongée pour qu'à la fin de la course la pression de la vapeur soit descendue jusqu'à la pression d'échappement (au condenseur ou dans l'atmosphère). Pendant toute la course de retour, la face considérée du piston est soumise à cette pression d'échappement, alors résistante. On admet en outre

que, pendant toute cette évolution, la vapeur ne cède aucune quantité de chaleur aux parois du cylindre qui l'enferment, et n'en reçoit aucune (dans cette hypothèse, la détente est dite *adiabatique*). Cette évolution est figurée par le diagramme ABCD (fig. 22), où AB est le volume admis à la pleine pression p_1 , BC la baisse de pression pendant la détente, avec augmentation du volume de Ob à Oc , et CD le retour du piston. Suivant la règle indiquée, la surface ABCD représente le travail produit par le volume de vapeur AB pris à la pression p_1 .

Dans ces conditions idéales, étant données les valeurs de

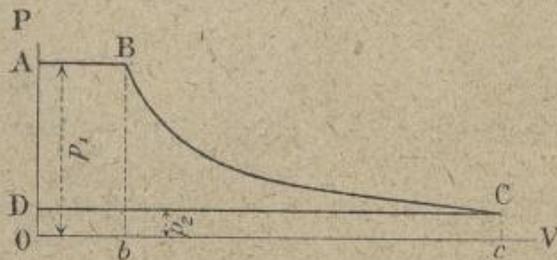


Fig. 22. — Diagramme du *cycle théorique* de la machine à vapeur.

la pression initiale et de la pression finale, on peut calculer la quantité de travail que produirait une course aller et retour du piston, ainsi que le poids de vapeur qu'il recevrait de la chaudière : la règle de trois permet alors de passer au poids de vapeur nécessaire pour produire 367.200 kgm ou un kilowatt-heure. C'est la dépense de vapeur qu'exigerait la machine supposée parfaite, sans aucunes chutes de pression, avec détente complète, et sans échanges de chaleur avec les parois.

L'évolution de la vapeur suivant ce cycle théorique, ou cycle de Rankine, est également figurée par le diagramme entropique (fig. 23), qui permet en outre de mesurer la quantité de chaleur fournie par la chaudière (surface $aA_2B_1C_1c$) et celle qu'enlève le condenseur (surface aA_3C_2c); la différence (surface $A_2B_1C_2C_3$) est la chaleur transformée en travail.

Si la vapeur est surchauffée de la température t_1 à t'_1 , le diagramme devient $A_2B_1C_1D'_1D_2$. Le rendement du cycle théorique, ou rapport de la quantité de chaleur transformée en travail à la quantité de chaleur fournie par la chaudière, est plus élevée, pour les mêmes pressions p_1 et p_2 .

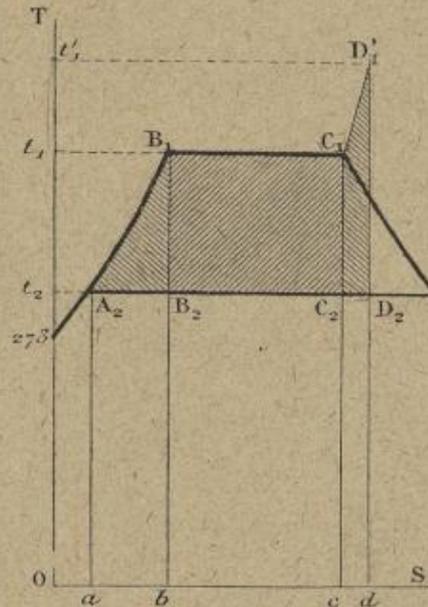


Fig. 23. — Diagramme entropique des cycles théoriques de la machine à vapeur.

Le diagramme de Mollier (fig. 24) donne graphiquement le travail produit, dans la machine parfaite, par un kilogramme de vapeur, pour des valeurs quelconques de la pression initiale et de la pression finale. On en déduit facilement le poids de vapeur nécessaire pour un cheval-heure.

Le tableau qui suit donne quelques valeurs de la consommation théorique par kilowatt-heure, en kg de vapeur, de la machine parfaite. Pour chaque valeur de la pression initiale on considère l'emploi de vapeur saturée sèche, et de vapeur surchauffée à 250° , 300° et 350° . Les quatre valeurs de la pression finale correspondent à l'échappement dans

l'atmosphère, à une condensation médiocre, bonne et très bonne. Les nombres du tableau ne sont donnés qu'avec une seule décimale, mais peuvent suffire pour la plupart des applications.

PRESSION initiale absolue.	ÉTAT initial de la vapeur.	PRESSION FINALES (kg par cm ²).			
		1.033	0,2	0,1	0,05
kg/cm ²		kg.	kg.	kg.	kg.
20	Sat. sèche.	7,2	5,0	4,5	4,2
	250°	6,9	4,9	4,4	4,0
	300°	6,5	4,6	4,2	3,9
	350°	6,1	4,4	4,0	3,7
15	Sat. sèche.	8,1	5,4	4,8	4,5
	250°	7,7	5,2	4,7	4,2
	300°	7,1	4,9	4,4	4,0
	350°	6,6	4,6	4,1	3,8
12	Sat. sèche.	8,7	5,7	5,0	4,6
	250°	8,1	5,4	4,7	4,3
	300°	7,6	5,1	4,5	4,1
	350°	7,1	4,8	4,2	3,9
10	Sat. sèche.	9,5	6,0	5,3	4,8
	250°	8,8	5,6	4,9	4,5
	300°	8,1	5,3	4,6	4,3
	350°	7,5	5,0	4,4	4,0
8	Sat. sèche.	10,5	6,3	5,5	5,0
	250°	9,5	5,8	5,1	4,6
	300°	8,8	5,5	4,8	4,4
	350°	8,0	5,1	4,5	4,1
6	Sat. sèche.	12,1	6,8	5,9	5,3
	250°	10,8	6,2	5,4	4,8
	300°	9,7	5,7	5,1	4,7
	350°	9,0	5,5	4,7	4,3

Pour passer du poids de la vapeur consommée au nombre des calories que doit fournir la chaudière, il suffit de remarquer que le kg de vapeur, qui a travaillé dans la machine, se retrouve à l'état d'eau condensée, et, dans la machine théorique, précisément à la température qui correspond à la pression de la condensation. L'échappement à l'air libre

peut être assimilé à une condensation sous la pression

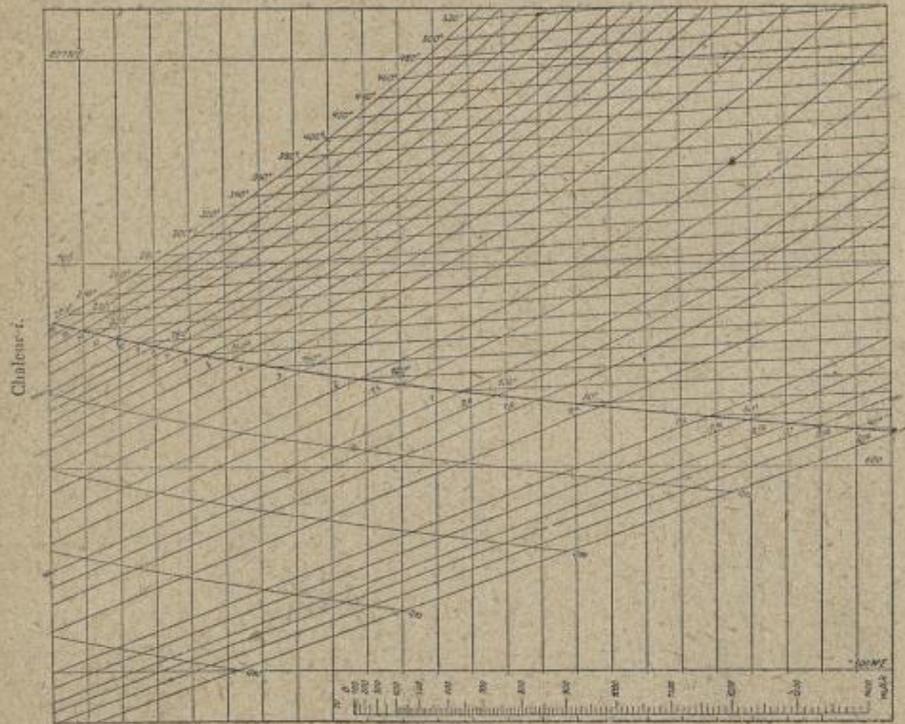


Fig. 24. — Diagramme de Mollier (d'après la *Revue de mécanique*, avril 1903, p. 409), limité aux parties généralement utilisables. Les lignes montant de gauche à droite, droites d'abord, puis courbes, correspondent aux diverses pressions de la vapeur inscrites sur ces lignes, en kg par cm^2 , depuis 0,06 jusqu'à 18. Les courbes descendant en sens inverse, marquées 0,80, 0,85, etc., indiquent le titre de la vapeur saturée. La dernière de ces courbes correspond à la vapeur saturée sèche. Au-dessus, la vapeur est surchauffée, la température étant indiquée sur des droites légèrement inclinées.

Pour connaître la consommation théorique de la machine parfaite, il suffit de mesurer la longueur de la verticale partant du point qui figure l'état initial (par exemple, vapeur saturée sèche à la pression absolue de $12 kg$ par cm^2) jusqu'à la ligne de la pression finale (par exemple 0,1) : cette longueur indique le nombre des calories transformées en travail par $1 kg$ de vapeur : multiplié par 426, ce nombre donne celui des kilogrammètres produits.

L'échelle dessinée au bas du diagramme permet de mesurer sur la même verticale la vitesse d'écoulement de la vapeur.

atmosphérique et à la température correspondante d'en-

viron 100°. Le kg d'eau, à cette température connue dans chaque cas, est refoulé dans la chaudière, qui doit fournir les calories nécessaires pour chauffer l'eau jusqu'à la température de vaporisation, puis la vaporiser et la surchauffer s'il y a lieu.

Par exemple, si l'eau est prise à 40° (température de condensation), et vaporisée sous la pression absolue de 7,5 kg par cm², la chaleur du liquide (depuis 0°) est de 169 calories environ, d'où il faut déduire 40 à cause de la température initiale. Reste 129, auquel s'ajoute la chaleur de vaporisation, 488, soit au total 617 calories par kilogramme de vapeur.

21. Réduction du rendement. — En considérant le cycle théorique, on calcule la dépense de vapeur que ferait une machine idéale substituée, avec les mêmes pressions d'admission et d'échappement, à une machine réelle ; mais le poids de vapeur qui donnerait un kilowatt-heure dans la machine idéale ne donne en réalité qu'une moindre quantité de travail ; la fraction de kilowatt-heure ainsi obtenue définit le *rendement*¹ de la machine réelle comparée à la machine idéale.

Plusieurs causes se combinent pour réduire le travail que produit la vapeur : la détente est rarement poussée jusqu'à ce que la pression de la vapeur atteigne celle qui correspond à la température du condenseur ; l'espace libre, laissé par le piston à fond de course, mérite souvent le nom d'espace *nuisible* ; les parois métalliques des cylindres condensent la vapeur quand elle a une température élevée, et vaporisent l'eau condensée quand cette température baisse : la vapeur admise au cylindre n'est pas toujours sèche ; elle se *lamine* et sa pression s'abaisse dans les différents passages qu'elle doit traverser ; elle peut fuir autour des pistons et des

1. Il importe d'éviter toute confusion entre les divers *rendements* qu'on est amené à considérer. On ne doit jamais employer cette expression sans la définir avec précision.

organes de distribution ; une portion de la chaleur est inutilement rayonnée à l'extérieur des appareils ; enfin les frottements absorbent une partie du travail donné par la vapeur, et réduisent d'autant la puissance de la machine ; la condensation et l'alimentation exigent aussi une dépense de travail. Les paragraphes qui suivent sont consacrés à l'étude de ces causes pour les moteurs à cylindre unique.

22. **Détente incomplète.** — Sauf lorsque la pression d'échappement est élevée, ce qui n'est nullement désirable en prin-

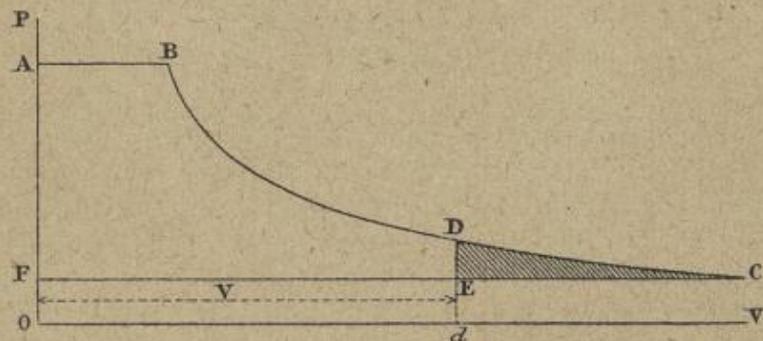


Fig. 25. — Diagramme de la perte de travail résultant d'une détente incomplète.

cipe, il est pratiquement impossible de pousser la détente de la vapeur d'eau jusqu'à cette pression finale, parce qu'il faudrait agrandir démesurément le volume que lui offre dans le cylindre le piston en se déplaçant. Aux faibles pressions réalisées dans les machines à condensation, la densité de la vapeur d'eau est minime ; elle occupe un très grand volume en n'exerçant qu'une très faible pression par centimètre carré¹. L'échappement se produit quand la pression a encore la valeur représentée par l'ordonnée dD , et on perd le travail correspondant à la surface DCE (fig. 25).

Sur le diagramme entropique (fig. 26), la ligne de volume

1. Poids du m^3 à 40° :	51 g ;	pression :	74,7 g par cm^2 .
—	30° : 30 —	—	: 42,9 — —
—	20° : 17 —	—	: 23,6 — —

constant de vapeur D'E' limite la portion de surface inutilisée pour cette cause.

Cette perte explique pourquoi l'abaissement au maximum de la pression finale (très bon *vide* au condenseur) n'a pas très grand effet sur le moteur à piston : il n'est sensible que

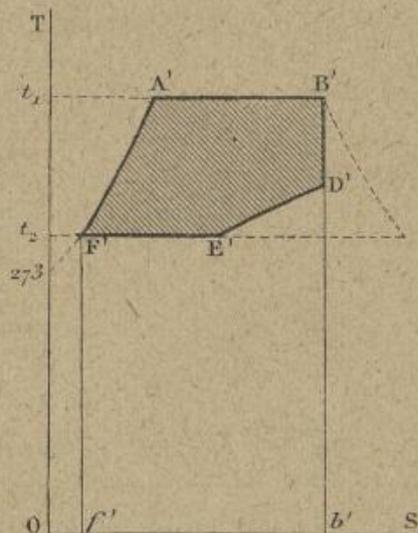


Fig. 26. — Diagramme entropique de la perte de travail résultant d'une détente incomplète.

sur la longueur FE (fig. 25), et inutilisé sur la longueur (beaucoup plus grande) EC.

23. Espace libre. — Il est nécessaire d'arrêter le piston à quelque distance du fond du cylindre, afin d'être sûr qu'il ne le frappera jamais, par suite de la déformation élastique et de la dilatation des organes et du jeu des articulations, que l'usure augmente : cette distance est en outre assez largement calculée pour qu'une petite quantité d'eau ne risque pas de défoncer le cylindre.

Le jeu du piston à fond de course est souvent de 5 mm en moyenne, pour chaque côté, dans les machines fixes de dimensions ordinaires ; il s'élève jusqu'à 10 mm dans les

locomotives ; enfin on atteint et on dépasse la cote de 15 mm dans les grandes machines marines.

L'espace libre comprend encore le volume des conduits de distribution depuis le cylindre jusqu'à l'organe d'obturation.

On définit habituellement la capacité de l'espace libre par une fraction du volume engendré par le piston dans sa course simple : la valeur de chaque espace libre est généralement comprise entre 2 et 15 p. 100 de ce volume, et dépasse même ces limites.

Lorsque l'échappement dure pendant toute la course de retour du piston, comme dans l'évolution théorique, l'espace libre contient, en fin de course, la vapeur à la pression inférieure p_2 ; au début d'une course nouvelle, il doit être rempli de vapeur à la pression supérieure p_1 . La consommation de vapeur à chaque coup de piston en est augmentée.

Le travail produit par coup de piston augmente en même temps : Oa (fig. 27) représentant l'espace libre, à la même échelle que le volume engendré par le piston, et ab le volume de vapeur admis derrière le piston, à la pression p_1 , ce n'est pas ce volume ab qui se détend pendant le reste de la course, mais le volume Ob .

La courbe BC' (en ponctué) que donnerait la détente du volume ab seul, devient BC .

L'augmentation de travail ainsi obtenue correspond à la détente du volume Oa de vapeur, mais le travail qu'il pourrait donner par son admission à pleine pression est perdu : en outre, l'interruption de la détente en Dd , quand elle est incomplète, vient réduire ce travail supplémentaire.

Dans certains cas, lorsque la pression d'échappement est élevée, par exemple dans les machines sans condenseur, on peut éviter l'augmentation de dépense due à l'espace libre par la compression de la vapeur dans cet espace : on ferme l'ouverture d'échappement avant que le piston n'ait achevé sa course de retour, quand il passe par un point C' . La vapeur ainsi enfermée dans le cylindre est comprimée par le piston, qui achève sa course, suivant $C'A$, de sorte qu'à

la fin l'espace libre se trouve rempli de vapeur à la pression de la chaudière. Mais cet effet utile est compensé par le travail résistant sur le piston absorbé par cette compression. Elle a, d'autre part, l'avantage d'éviter l'application subite de la pleine pression sur le piston, qui fatigue les organes de la machine.

Avec une détente complète, suivant BC, et une compression C''A, le travail moteur supplémentaire dû à la vapeur de l'espace libre, travail représenté par la surface BCC', est

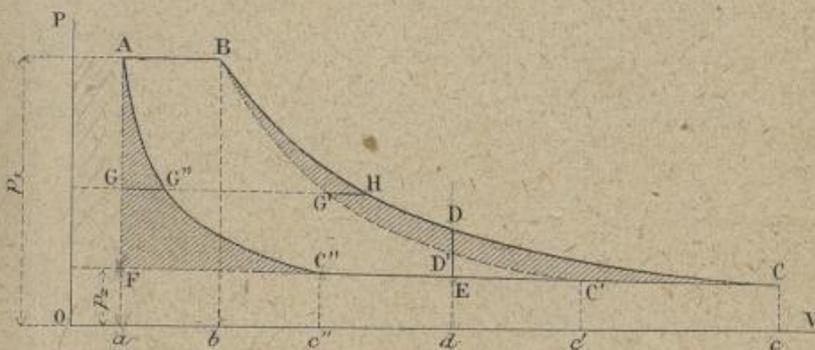


Fig. 27. — Effet de l'espace libre, et compression de la vapeur. Au commencement de la détente le cylindre, avec l'espace libre Oa , renferme le volume Ob de vapeur, qui se détend, au lieu du volume ab . Dans certaines conditions hypothétiques, la compression de la vapeur d'échappement, suivant $C''A$, peut compenser l'effet nuisible de l'espace libre, le travail supplémentaire absorbé par cette compression (aire $C''AF$), étant égal à l'excédent BCC' du travail de la détente.

compensé par le travail de compression $C''AF$, de sorte que le travail de la machine reste le même que dans la machine théorique sans espace libre (surface $ABCC''A =$ surface $ABC''FA$). Mais cette conception suppose une machine idéale, qui s'écarte notablement des conditions complexes de la réalité.

Souvent la compression est incomplète : l'échappement se ferme quand le piston a dépassé le point C'' : la pression de la vapeur comprimée est alors inférieure à celle de la chaudière, qui doit fournir la quantité nécessaire pour achever le remplissage de l'espace libre.

24. Action des parois. — L'évolution théorique suppose qu'il ne se fait aucun échange de chaleur entre la vapeur et les parois qui l'enferment, cylindre et piston. En réalité, d'importantes transmissions de chaleur se produisent entre la vapeur, plus ou moins mélangée d'eau, et les parois.

Au moment de l'admission, le fond du cylindre et le piston, puis une portion de la surface cylindrique, viennent d'être en contact avec la vapeur refroidie par l'échappement ; ces parois, relativement froides, condensent une partie de la vapeur admise. Pendant la détente, la pression et par suite

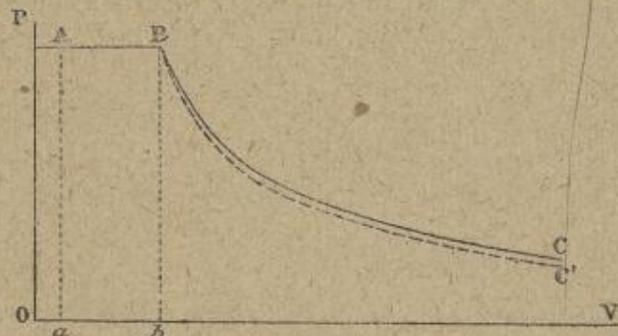


Fig. 28. — Détente adiabatique (courbe BC') et détente réelle (courbe BC).

la température s'abaissent : une partie de l'eau condensée pendant l'admission peut alors se revaporiser, aux dépens de la chaleur déposée dans la paroi. Mais c'est surtout pendant l'échappement que cet effet se produit et que les parois se refroidissent.

L'observation des machines montre que le poids de la vapeur consommée dépasse beaucoup celui qui correspondrait au volume apparent admis dans le cylindre : il n'est pas rare de trouver une dépense de 10 à 12 kg, quand elle ne devrait être que de 7 ou 9. S'il n'y a pas de fuites autour du piston ou des appareils de distribution, cette augmentation de dépense n'est explicable que par des condensations.

La revaporisation, pendant la détente, de l'eau condensée sur les parois a pour effet d'augmenter un peu la pression

de la vapeur, ou de relever la courbe de détente : au lieu de la courbe théorique BC' , on observe, avec l'indicateur, la courbe BC (fig. 28). Rapportée aux axes OP et OV , cette courbe est telle que le produit pv de la pression p (ordonnée de la courbe) par le volume v (abscisse de la courbe) est constant aux divers points, à très peu de chose près : cette courbe est un arc d'*hyperbole équilatère* : le tracé par points en est facile (voir fig. 32).

Sur le diagramme entropique (fig. 29), qu'on trace facilement en partant du diagramme d'indicateur, la détente adiabatique serait figurée par la verticale en ponctué et la

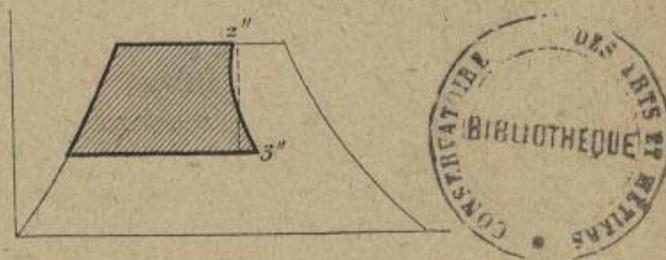


Fig. 29. — Diagramme entropique indiquant une cession de chaleur à la vapeur vers la fin de la détente.

courbe réelle $2''3''$ indique une cession de chaleur à la vapeur à la fin de la détente.

On peut d'ailleurs observer directement les condensations et les revaporisations qui se produisent sur le métal des cylindres, à l'aide du *révéléateur de Donkin*, manchon en cristal qui communique avec l'intérieur du cylindre¹.

On a aussi observé la température dans l'épaisseur même du métal qui constitue les parois des cylindres : on a reconnu qu'à une très petite distance de la face en contact avec la vapeur, la température restait invariable et conservait une valeur supérieure à la moyenne arithmétique des températures extrêmes de la vapeur ; dans une couche de quelques millimètres seulement, la température varie périodi-

1. Voir la description du révéléateur dans la *Revue de mécanique*, 2^e sem. 1900, p. 635.

quement, comme celle de la vapeur, mais avec de moindres écarts.

La condensation pendant l'admission est d'autant moindre que cette température invariable du métal est plus élevée.

Un autre fait intéressant est le peu d'activité des échanges quand le métal est sec et la vapeur sèche également : le nombre de calories transmises en une seconde par une surface donnée est alors relativement faible, malgré un écart assez grand entre les températures du métal et de la vapeur. Au contraire, la présence de l'eau active beaucoup les échanges.

La proportion de vapeur condensée pendant l'admission, dans une machine donnée, ne dépend pas seulement de l'écart entre les températures extrêmes que prend la vapeur dans le cylindre, mais aussi de l'écart entre les températures de la vapeur au commencement et à la fin de la détente. C'est ainsi que cette proportion condensée n'augmente pas beaucoup quand on substitue la condensation à l'échappement dans l'atmosphère, bien que la température inférieure de la vapeur passe alors de 100° à 40° ou 50° .

La proportion condensée à chaque coup de piston d'une machine donnée diminue quand la vitesse de la machine augmente, mais elle ne varie pas en raison inverse de cette vitesse, comme on serait tenté de le croire : cette condensation paraît être proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la vitesse : elle tomberait à moitié pour une vitesse quadruple.

De ces observations on peut déduire que la quantité d'eau condensée dans un temps donné est plus grande au début qu'à la fin de l'admission : l'écart de température entre la vapeur et le métal va en effet en diminuant par suite du réchauffement du métal ; d'autre part, la formation d'eau augmente le coefficient de transmission.

Il importe de réduire autant que possible l'étendue des parois en contact avec la vapeur, qu'exagèrent les longs conduits des lumières des machines à tiroir.

On a quelquefois proposé de substituer à la fonte une substance moins conductrice de la chaleur, telle que le plomb ou la porcelaine, ce qui serait possible pour les fonds de cylindre et les faces de piston, surfaces sur lesquelles aucun frottement ne se produit. Ces applications ne paraissent guère être entrées dans la pratique.

Il convient de remarquer que la partie cylindrique, sur laquelle frotte le piston, surtout dans la région médiane, n'est pas placée dans les mêmes conditions que le fond et le piston, au point de vue de l'action de la paroi. En effet, ces parois cylindriques sont alternativement en contact avec la vapeur qui agit sur les deux faces du piston, et, quand la détente est grande, la partie médiane n'est jamais en contact avec la vapeur à sa température la plus élevée.

25. Enveloppes de vapeur. — Watt avait entouré le cylindre de ses machines de vapeur prise à la chaudière ; l'utilité de cette enveloppe, bien établie aujourd'hui, a été souvent discutée. A considérer seulement le refroidissement extérieur, elle ne peut être que défavorable : constamment chauffée à la température de la chaudière, elle rayonne au dehors par une surface plus grande que celle du cylindre simple. Mais l'effet utile s'exerce vers l'intérieur, en modifiant beaucoup l'action des parois ; l'enveloppe leur donne une température plus élevée, et réduit ainsi l'activité des échanges avec la vapeur qui pousse le piston : la condensation à l'admission est moins abondante, et la proportion d'eau revaporisée pendant la détente est plus forte ; la dépense de vapeur est réduite, et le travail moteur se trouve augmenté.

Ces avantages se payent, il est vrai, par une dépense de vapeur dans l'enveloppe. Tout compte fait, l'expérience indique un bénéfice, c'est-à-dire une moindre dépense totale de vapeur, pour un même travail.

L'enveloppe s'étend autour de la surface cylindrique et, quand elle est complète, sur les fonds, qu'il importe surtout

de chauffer. Elle est desservie de deux façons différentes, par une dérivation spéciale de vapeur prise à la chaudière, ou par la circulation de la vapeur même qui va travailler dans le cylindre. Pour qu'elle fonctionne bien, il faut que la vapeur y accède librement, qu'elle la remplisse entièrement, et qu'il ne s'y forme jamais de poches d'air ou d'eau.

Avec l'alimentation par une dérivation spéciale, l'écoulement de l'eau condensée s'obtient de diverses manières : quand la machine est voisine de la chaudière qui l'alimente, et placée à un niveau supérieur, un simple tuyau, aboutissant à la partie inférieure de la chaudière, y ramène l'eau de l'enveloppe. Le cylindre de certaines locomobiles et machines demi-fixes est monté sur la chaudière : il est alors facile de placer le cylindre dans la vapeur.

Parfois on renvoie à la chaudière l'eau condensée dans l'enveloppe au moyen d'une *pompe de purge* à piston plongeur commandée par le moteur et marchant constamment : on donne, par exemple, à cette pompe des dimensions telles qu'elle aspire un volume un peu inférieur au 1000^e du volume engendré par le piston moteur.

Les robinets purgeurs, manœuvrés à la main ou automatiques, assèchent les enveloppes d'une façon moins satisfaisante : ces derniers sont souvent capricieux, et l'eau chaude de condensation est perdue au lieu de retourner à la chaudière.

Lorsqu'on fait circuler dans l'enveloppe la vapeur même avant son entrée dans le cylindre, elle entraîne l'eau condensée : la vapeur arrive dans le cylindre un peu plus humide, ce qui ne paraît pas avantageux. Cependant cette disposition est adoptée par d'habiles constructeurs. On peut d'ailleurs employer des dispositifs qui séparent de la vapeur, au moins en partie, l'eau condensée dans l'enveloppe.

L'alimentation indépendante de l'enveloppe a des avantages d'ordre pratique : elle permet d'échauffer la machine avant la mise en marche et de la maintenir chaude pendant

les arrêts, de sorte qu'on évite au départ des condensations gênantes ou même dangereuses.

La proportion de vapeur condensée dans l'enveloppe varie beaucoup ; elle est souvent comprise entre le vingtième et le dixième de la quantité totale dépensée par les machines monocylindriques.

La pression et par suite la température de la vapeur peuvent être plus élevées dans l'enveloppe que dans le cylindre, par exemple si elle est fortement détendue avant l'admission dans le cylindre. L'action de l'enveloppe est alors plus active, mais la dépense de vapeur y augmente. L'expérience semble indiquer qu'un excès notable de pression dans l'enveloppe n'est pas avantageux.

Inversement, le contact extérieur de la paroi avec la vapeur relativement froide, qui sort d'un cylindre, en abaisse la température, augmente le flux de chaleur qui la traverse, ainsi que l'importance des échanges à chaque coup de piston. Les conduits d'échappement contournent souvent le cylindre sur une certaine étendue et produisent cet effet : en traçant le dessin d'un cylindre, il convient d'éloigner ces conduits aussitôt qu'on le peut. Comme circonstance atténuante, ce contact se produit le plus souvent au milieu de la surface cylindrique, c'est-à-dire dans la région soumise intérieurement aux moindres variations de température, quand l'admission n'est pas très longue.

En résumé, l'enveloppe, en chauffant la paroi du cylindre, diminue l'amplitude des oscillations de la température sur la face intérieure, ainsi que la profondeur de la couche soumise aux fluctuations. L'activité des échanges entre la vapeur et les parois est ainsi réduite ; le métal peut être à peu près sec à la fin de la détente, de sorte qu'il ne se refroidit presque plus pendant l'échappement.

Par contre, l'enveloppe de vapeur augmente la perte due au rayonnement extérieur ; le gain qu'elle procure en est réduit, mais sans être annulé : il n'est guère d'expériences qui n'indiquent une moindre consommation de vapeur pour

un même travail quand on fait usage de l'enveloppe, du moins dans les machines bien réglées.

Les cylindres de dimensions modérées peuvent être fondus en une seule pièce avec leur enveloppe. Dans les grands cylindres, on rapporte une *chemise* inférieure, qui laisse un vide de 30 mm environ formant l'enveloppe. Les plateaux des cylindres, à double fond, sont raccordés à l'enveloppe par des tuyaux.

Le piston lui-même peut être creux et recevoir une circulation de vapeur; mais cette disposition, logique en principe, est trop compliquée pour s'être répandue en pratique.

26. Humidité de la vapeur. — La vapeur, en sortant d'une chaudière, peut entraîner un peu d'eau; les condensations dans la tuyauterie, qui la conduit à la machine, la rendent plus humide. L'eau en abondance dans le cylindre risque d'en faire rompre le plateau; on assèche la vapeur, avant son emploi, en lui faisant parcourir des coudes brusques devant des poches qui reçoivent l'eau.

Malgré les précautions prises pour l'assécher, la vapeur est souvent humide à son entrée dans le cylindre, surtout quand elle a au préalable circulé dans l'enveloppe. La présence de l'eau dans la vapeur augmente l'importance des échanges de chaleur avec les parois.

Non seulement pour les études théoriques, mais aussi pour connaître la production des chaudières et la consommation des machines, il est utile de mesurer la proportion d'eau entraînée par la vapeur, car l'humidité de la vapeur augmente, en apparence, la production de la chaudière par kilogramme de combustible, puisqu'on compte comme eau vaporisée celle qui est simplement entraînée, tandis qu'elle exagère la consommation apparente de la machine.

La mesure de l'humidité de la vapeur, c'est-à-dire du poids d'eau contenu dans un kilogramme de vapeur humide, est assez délicate, surtout parce qu'on n'est jamais sûr que

l'échantillon prélevé représente bien la qualité moyenne de tout le courant de vapeur.

Un des appareils les plus commodes, applicable seulement quand la proportion d'eau est faible, est le calorimètre de *Barrus*¹.

27. Vapeur surchauffée. — On emploie fréquemment aujourd'hui la vapeur surchauffée de 100°, de 150° et même davantage.

Lorsqu'on alimente un cylindre avec la vapeur modérément surchauffée, elle n'y reste pas surchauffée : elle est déjà saturée et même en partie condensée avant la fin de l'admission. On serait tenté de croire qu'on n'a presque rien gagné à la surchauffe ; mais en observant de plus près la marche de la machine, on remarque que pour un même travail, la consommation de vapeur diminue.

Cette économie tient à ce que la surchauffe mitige l'action des parois qui soutirent de la chaleur à la vapeur pendant l'admission, pour la restituer en partie pendant la détente, mais surtout pour l'envoyer se perdre au condenseur pendant l'échappement. Pendant l'admission, c'est en partie aux dépens de la chaleur de surchauffe que les parois se réchauffent, chaleur communiquée sans dépôt d'eau, dont

1. Lorsque la vapeur s'écoule en se *laminant* par un orifice étroit, elle s'assèche, puis se surchauffe, pourvu que la proportion initiale d'humidité soit assez petite. Ce principe est appliqué dans l'appareil *Barrus* : branché au point où on veut doser la vapeur, il laisse écouler un jet par un orifice étroit : après l'écoulement, la vapeur, qui a pris la pression atmosphérique, suit un tuyau qui débouche librement au dehors ; un thermomètre, placé dans ce tuyau, mesure la température de la vapeur détendue ; quand elle est surchauffée, il indique une température θ , supérieure à la température θ_a qui correspond à la pression atmosphérique (soit 100° quand le baromètre marque 760 mm). Un manomètre mesure la pression initiale de la vapeur p_1 . En désignant par q_1 , r_1 , q_a , r_a , les chaleurs du liquide et de vaporisation (voir § 13) qui correspondent à la pression p_1 et à la pression atmosphérique, on calcule le titre x de la vapeur (c'est-à-dire la proportion de vapeur sèche dans un kilogramme de vapeur humide) par la formule :

$$q_1 + r_1 x = q_a + r_a + 0,5(\theta - \theta_a)$$

où 0,5 est approximativement le *coefficient de chaleur spécifique sous pression constante* de la vapeur surchauffée.

On trouvera la description de cet appareil, et d'autres servant à la même mesure, par M. Izart, dans la *Revue de mécanique*, janvier 1911, p. 38.

un peu plus tard l'évaporation refroidira vivement le cylindre : en définitive, les échanges de chaleur sont moins actifs entre le fluide et les parois, qui prennent une température moyenne plus élevée.

La surchauffe agit donc un peu comme l'enveloppe de vapeur, mais avec une moindre dépense de chaleur. Son action s'exerce directement sur les parois mêmes qui produisent des échanges. La surchauffe rend ainsi l'enveloppe inutile.

La meilleure température de surchauffe paraît être celle qui évite complètement toute condensation dans le cylindre, pendant l'admission et pendant la détente ; cette température est assez élevée.

Il est remarquable que l'élévation de température du fluide évoluant dans le cylindre atténue l'importance des échanges de chaleur avec les parois.

Bien qu'elle ait été employée avec succès vers 1850, on a longtemps reproché à la surchauffe de faire gripper les tiroirs et les pistons. L'emploi des huiles minérales pour le graissage a permis les hautes températures de la vapeur. Les distributions à soupapes, et la substitution des tiroirs cylindriques aux tiroirs plans, particulièrement difficiles à maintenir en bon état avec la vapeur surchauffée, ont fait disparaître les anciennes objections.

28. Laminage. — Lorsque la vapeur, pour entrer dans un cylindre, traverse rapidement des orifices étroits, elle ne conserve pas la même pression que dans la chaudière ; il se produit alors une chute de pression, qu'on appelle *laminage de la vapeur*. Le laminage peut aussi se produire à la sortie même de la chaudière, si l'ouverture de la prise de vapeur est étroite, et en d'autres passages.

Pendant ce laminage de la vapeur, elle ne donne pas le travail mécanique qu'elle pourrait produire par sa détente, en passant de la pression initiale à la pression réduite ; il en résulte qu'elle conserve les calories qui se seraient chan-

gées en travail dans cette détente. Aussi, après le laminage, la proportion d'eau que contient la vapeur humide se trouve légèrement réduite; elle peut même se surchauffer, comme dans le calorimètre Barrus.

Il ne faut pas oublier le sens précis du mot *surchauffer*, tel qu'il a été défini: il n'indique pas que la température augmente, car au contraire elle s'abaisse pendant l'écoulement, mais il signifie qu'à la pression considérée le volume de la vapeur est plus grand que celui qu'occuperait la vapeur saturée sèche; la température en est un peu plus élevée¹.

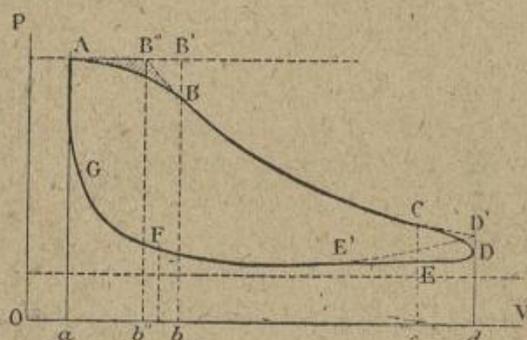


Fig. 30. — Diagramme avec laminage de vapeur à l'admission (AB) et à l'échappement (CDEF).

La distribution par un tiroir à fermeture progressive donne lieu à un laminage, souvent assez fort à la fin de l'admission, marqué sur le diagramme d'indicateur par un trait tel que AB (fig. 30). Une distribution sans laminage donnerait l'admission AB' à pression constante. Le laminage ne fait pas perdre le travail représenté par la surface AB'B: pour en apprécier justement l'effet, il faut imaginer une admission à pleine pression AB'', telle que la courbe de détente, par-

¹. Par exemple, si les pressions de part et d'autre de l'orifice d'écoulement sont de 10 et de 5 kg par cm^2 , un mélange de 983 g de vapeur et de 17 g d'eau donne, après l'écoulement, un kg de vapeur saturée sèche. Le passage de la température de 200° à 150°, ou de la pression de 15,89 kg, par cm^2 à 4,77 kg, assèche le mélange de 970 g de vapeur avec 30 g d'eau. Un kilogramme de vapeur sèche, sous la pression de 10 kg par cm^2 , ou à la température de 178°9, donnera sous la pression de 5 kg par cm^2 de la vapeur surchauffée à 169°, tandis que la température de la vapeur saturée est, sous cette pression, 151°.

La pression, une fois abaissée dans le cylindre jusqu'à une valeur un peu supérieure à la pression du condenseur, reste à peu près constante pendant une partie de la période d'échappement; puis la fermeture progressive de l'orifice d'échappement commence à la relever avant la fermeture complète; la compression de la vapeur en est un peu augmentée. Enfin l'ouverture anticipée de l'orifice d'admission ramène graduellement la pression jusqu'à celle de l'admission, suivant GA.

Au travail non recueilli par suite du laminage à l'échappement correspondent des calories entièrement perdues au condenseur, sans aucune récupération.

29. Fuites. — Les fuites de vapeur augmentent évidemment la consommation; en général, il est aisé de faire disparaître les fuites visibles vers l'extérieur; mais il est difficile d'apprécier celles qui se produisent à l'intérieur de la machine, autour des pistons et des organes de distribution. L'action des parois est comparable à une fuite importante de vapeur depuis la chaudière jusqu'au condenseur; dans les recherches expérimentales, le poids de la vapeur qui fuit effectivement s'ajoute au poids condensé et revaporisé dans le cylindre.

Quelquefois des fuites intérieures existent par suite de défauts dans la fonte des cylindres ou dans l'assemblage des enveloppes de vapeur.

Autour d'une soupape de prise de vapeur, une fuite est dangereuse, parce qu'elle peut causer une marche intempestive de la machine.

30. Pertes de chaleur. — On ne peut empêcher la chaleur de se dissiper autour des machines, et il en résulte une perte assez importante. Malgré l'action salutaire des revêtements isolants, les conduites, les cylindres et leurs boîtes à vapeur dégagent constamment des calories.

Par exemple, la surface extérieure du cylindre et de la

tuyauterie d'une machine Corliss, qui dépense 1.000 kg de vapeur à l'heure, est de 12 m²; le métal est en contact à l'inférieur avec la vapeur à 165° qui enveloppe le cylindre moteur. Sans revêtement isolant, on condenserait par heure 48 kg de vapeur, perdant ainsi 20.000 calories. Le revêtement isolant réduit cette quantité à 20 kg environ.

Le voisinage des passages de vapeur, pour l'admission et pour l'échappement, entraîne encore une perte de chaleur. Souvent une mince paroi de fonte sépare la boîte à vapeur du conduit qui débouche dans le condenseur : un flux incessant de chaleur se perd en traversant cette paroi.

31. Transformation du travail indiqué. — Les principales pièces frottantes, qui consomment inutilement une partie du *travail indiqué* de la machine, sont les pistons contre les cylindres, les tiges dans leurs garnitures, les têtes de piston sur les glissières, les grosses têtes de bielles motrices autour des tourillons moteurs, les fusées de l'arbre dans les paliers. Il faut y ajouter les mécanismes de distribution : le tiroir ordinaire, non équilibré, absorbe un travail important en frottant sur sa table. En outre, les pompes du condenseur et les pompes alimentaires viennent prendre leur part du travail indiqué.

On peut prévoir le travail absorbé par les frottements d'une machine, en calculant les forces qui appuient l'une contre l'autre les pièces frottantes. La loi du mouvement de ces pièces est connue ; il est vrai que les coefficients de frottement sont incertains et varient suivant le graissage. Aussi la mesure directe de la puissance indiquée et de la puissance effective est-elle préférable.

Comme l'essai au frein dynamométrique est difficile, on se contente parfois de mesurer la puissance consommée en frottements en relevant le diagramme sur la machine tournant à vide, sans résistance extérieure. Cette méthode suppose que le travail des résistances passives reste le même

que dans la machine en charge, ce qui peut ne pas être toujours exact.

Le rendement en puissance effective des machines à vapeur est souvent compris entre 80 et 90 p. 100 de la puissance indiquée. Assez forts dans les machines neuves, les frottements s'atténuent quand la marche a rodé les surfaces frottantes.

32. Dimensions des cylindres. — La puissance fournie par un même cylindre peut varier beaucoup; elle dépend de la pression de la vapeur qu'il reçoit, du degré de détente, de la contre-pression à l'échappement, et, plus généralement, des diverses circonstances de la distribution; elle change avec la vitesse de rotation de la machine. Pour déterminer les dimensions qu'on donnera à un cylindre auquel on demande une certaine puissance, on fixe au préalable ces diverses conditions de marche. On peut alors prévoir le diagramme du travail de la vapeur, et son ordonnée moyenne; on en déduit le volume du cylindre donnant le travail demandé à chaque tour.

Cette méthode détermine seulement le produit de la surface du piston par la course, et on peut choisir arbitrairement, ou plutôt d'après d'autres considérations, l'une de ces dimensions. A égalité de volume engendré par le piston, deux cylindres sont équivalents, sous réserve des différences secondaires dans le travail qui résultent de la variation des espaces libres et de l'action des parois.

En réalité, c'est un travail effectif qu'on demande à la machine, tandis qu'on déduit du diagramme le travail indiqué, qui surpasse le travail effectif dans une proportion estimée d'après les analogies connues.

Le tracé approximatif du diagramme n'est pas bien difficile, en tenant compte dans chaque cas des détails de la distribution et des laminages, à l'admission et à l'échappement, qui résultent de la section des passages et de la vitesse de la machine.

Une formule simple (dite de *Poncelet et Morin*) permet de calculer approximativement l'ordonnée moyenne du diagramme. On suppose d'abord un diagramme tel que ABDEF (fig. 32) où la courbe de détente, BD, est une hyperbole équilatère (p. 55). L'ordonnée moyenne se calcule alors par la formule $kp_1 - p_2$, p_1 et p_2 étant les pressions d'admission

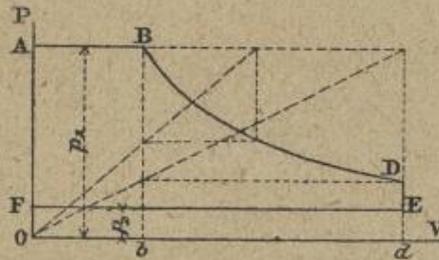


Fig. 32. — Diagramme de la formule de Poncelet et Morin, montrant le tracé d'un point quelconque de l'hyperbole BD, à l'aide d'un vecteur mené de O et coupant l'ordonnée bB .

et d'échappement, et le coefficient k dépendant du *degré d'admission*, c'est-à-dire du rapport du AB et de FE.

Le tableau qui suit donne les valeurs de ce coefficient k pour divers degrés d'admission :

1	1
0,9	0,995
0,8	0,979
0,7	0,950
0,6	0,908
0,5	0,847
0,4	0,767
0,35	0,717
0,30	0,663
0,25	0,597
0,20	0,522
0,18	0,489
0,15	0,435
0,14	0,415
0,13	0,396
0,1	0,303

Le diagramme réel aura une moindre surface que le diagramme hypothétique ABDEF, surtout dans les machines

qui fonctionnent avec laminages et compression. On doit donc appliquer dans chaque cas un coefficient de réduction à l'ordonnée moyenne calculée comme il vient d'être dit. Parfois on adopte la valeur assez forte 0,7.

Une nouvelle réduction est nécessaire pour passer du travail indiqué au travail effectif¹.

La vitesse restant la même, on augmente ou on diminue la puissance en accroissant ou en réduisant la longueur AB de l'admission, ou bien en faisant varier la pression initiale p_1 .

33. Machines compound. — La machine compound se compose essentiellement de deux cylindres successifs de dimensions différentes, séparées par un réservoir intermédiaire, dénommés cylindre à haute pression, ou *admetteur*, ou *petit cylindre*, et cylindre à basse pression, ou *détendeur* ou *grand cylindre*. L'évolution théorique est la suivante: un volume AB de vapeur (fig. 33), à la pression p_1 de la chaudière, est admis dans le petit cylindre, dont elle pousse le piston, puis se détend suivant BC pendant le reste de la course de ce piston. La pression est alors p'_1 , comme dans le réservoir intermédiaire; pendant le retour du piston, cette vapeur à la pression p'_1 s'échappe dans ce réservoir, la contre-pression sur le piston étant figurée par CD.

D'autre part, le réservoir fournit au grand cylindre, pendant l'admission, un même volume DC de vapeur à la pression p'_1 ; pendant la détente, suivant CE, cette va-

1. Par exemple, on veut développer 100 kilowatts, avec une admission au cinquième et des pressions extrêmes de 6 et 0,2 kg par cm^2 , dans le cylindre unique d'un moteur à double effet, faisant 80 tours par minute. Un coup simple de piston doit produire $\frac{102 \times 100 \times 60}{2 \times 80}$ ou environ 3.840 *kgm* effectifs, et $\frac{3.840}{0,85}$ ou 4.500 *kgm* indiqués, en admettant un rendement mécanique de 85 p. 100. Le diagramme de Poncelet doit correspondre à $\frac{4.500}{0,7}$ ou à 6.400 *kgm*. Or l'ordonnée moyenne de ce diagramme est de $6 \times 0,322 = 0,2$ ou 2,94 kg par cm^2 . La surface du piston, en centimètres carrés, multipliée par la course, en mètres, est donc égale à $\frac{6.400}{2,94}$ ou 2.170. Avec un diamètre de 560 mm, la course sera de 900 mm.

peur continue à pousser le piston jusqu'au bout de sa course.

En général, le volume du second cylindre ne pourra pas être assez grand pour que la détente soit complète jusqu'à la pression du condenseur, p_2 : on aura donc chute de pression EF à l'échappement du grand cylindre, puis contre-pression FG pendant le retour du piston.

En définitive, la surface du diagramme total ABEFG est partagée en deux parties : l'une, ABCD, figure le travail accompli par la vapeur dans le premier cylindre, l'autre,

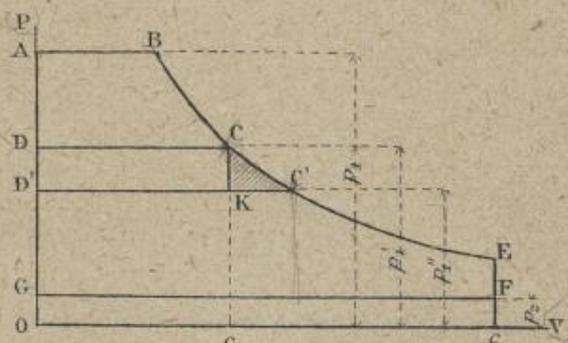


Fig. 33. — Diagramme théorique du travail dans les deux cylindres d'une machine compound. Travail de la vapeur dans le petit cylindre, ABCD ou ABCKD'; travail dans le grand cylindre, DCEFG ou D'D'EFG; perte triangulaire, CC'K.

DCEFG, le travail dans le second. Les volumes des deux cylindres sont représentés par les longueurs DC et GF.

Si le volume admis dans le grand cylindre était plus grand que DC, et égal à D'C', la pression p_1 du réservoir serait plus faible : le petit cylindre fournirait un travail plus fort ABCKD'; le grand cylindre ne donnerait que D'C'EFG et le total serait moindre que la surface du diagramme primitif, d'une quantité CKC'¹.

Ce premier aperçu ferait juger la machine compound

1. En réalité, les calories correspondant au travail ainsi perdu se retrouvent dans la vapeur qui se rend au grand cylindre. Le diagramme entropique (fig. 34), à rapprocher de celui que donne la figure 31, montre comment une petite fraction de ces calories se transforme ultérieurement en travail.

En ce qui touche la détente, elle reste incomplète, quand la pression d'échappement p_2 est basse, aussi bien avec la compound qu'avec la machine monocylindrique, puisqu'elle est forcément limitée au volume du dernier cylindre. Elle est incomplète aussi dans le premier cylindre de la compound, lorsque le diagramme se rapproche de ABCKD' (fig. 33), donnant lieu à la *perte triangulaire* CKC'.

L'effet des espaces libres des cylindres se trouve atténué par la disposition de la compound, comparée à la machine réduite au grand cylindre seul : MA et M'A' (fig. 35) représentent ces deux espaces libres; s'il n'y avait aucune compression de la vapeur, la chaudière devrait remplir l'espace libre du petit cylindre, MA, plus petit que M'A' et déjà occupé par la vapeur à la pression p'_1 du réservoir; d'autre part cette vapeur du réservoir devrait remplir l'espace libre M'A', du grand cylindre. Dans la machine monocylindrique, c'est la vapeur à la pression p_1 de la chaudière qui remplit MA'', égal à M'A' : la quantité de vapeur ainsi dépensée est plus grande.

En outre, le petit cylindre de la compound se prête à une compression complète, vu la valeur élevée de la pression d'échappement, p'_1 : on peut dans ce cylindre s'approcher du diagramme ABCD, qui compense l'effet de l'espace libre.

Dans le grand cylindre, la compression relève la pression jusqu'à une valeur telle que OJ, qui s'approche plus de la pression p'_1 que de la pression p_1 : le poids de la vapeur, prise au réservoir pour remplir cet espace libre, se trouve ainsi réduit.

La disposition compound paraît atténuer notablement l'action des parois. En désignant par θ_1 , θ'_1 et θ_2 les températures de la vapeur saturée aux pressions p_1 , p'_1 et p_2 , la température du fluide oscille entre θ_1 et θ'_1 dans le petit cylindre, entre θ'_1 et θ_2 dans le grand, tandis qu'elle oscillerait entre θ_1 et θ_2 dans le grand cylindre seul. Cette réduction des écarts de température diminue la condensation de la vapeur de la chaudière dans le petit cylindre, qui, en

outre, présente des parois moins étendues que la machine monocylindrique : la vapeur ainsi condensée se revaporise pendant la détente et pendant l'échappement au réservoir. Dans le réservoir, s'il est bien enveloppé, il ne se produit guère de condensation. C'est en pénétrant dans le grand cylindre qu'une nouvelle condensation se fait sur les parois; l'eau condensée se vaporise pendant la détente et l'échappement final.

En considérant, au lieu de la variation totale de température, celle du commencement à la fin de la détente, qui joue un rôle important dans ces phénomènes, on trouve encore avantage à la machine compound.

Les enveloppes de vapeur s'appliquent aux machines compound, qui se prêtent à des combinaisons variées. Le cylindre à haute pression se trouve enveloppé, comme celui d'une machine monocylindrique, par la vapeur à la pression d'admission, parfois par la vapeur même qui va y pénétrer. Le cylindre à basse pression peut être enveloppé de même par la vapeur à la pression de la chaudière : on obtient ainsi une enveloppe très active, mais consommant une assez forte proportion de vapeur quand la pression initiale est élevée. Diverses expériences pratiques de consommation semblent indiquer que cette disposition n'est pas la plus avantageuse, et qu'il vaut mieux alimenter l'enveloppe du grand cylindre par la vapeur détendue jusqu'à une pression voisine de celle du réservoir.

Le réservoir peut être réchauffé par une enveloppe et même par un faisceau tubulaire, où circule la vapeur de la chaudière : la vapeur y est alors séchée ou même légèrement surchauffée. Cette disposition est séduisante, car en prenant à la chaudière une quantité de chaleur relativement faible, on améliore notablement la qualité de la vapeur dans le réservoir.

Néanmoins les expériences pratiques de consommation ne sont pas toutes favorables à ce réchauffage du réservoir, qui, parfois, augmente la dépense totale de vapeur. L'enve-

loppe du réservoir peut toutefois être justifiée par l'augmentation de puissance qu'elle donne¹

La surchauffe s'applique avec avantage aux machines compound : elle permet de réduire beaucoup les condensations dans le petit cylindre et d'en supprimer l'enveloppe sans inconvénient. L'évolution subséquente dans le grand cylindre est aussi améliorée.

La disposition compound augmente la perte de travail causée par le laminage, puisque la vapeur est laminée à l'admission et à l'échappement de chacun des deux cylindres successifs. Par contre, l'effet des fuites intérieures est moindre, la chute totale de pression étant partagée en deux par le réservoir intermédiaire.

La disposition compound augmente la surface extérieure des appareils; une machine monocylindrique se réduit au cylindre à basse pression seul de la compound équivalente. Toutefois, si l'enveloppe de ce cylindre n'est pas chauffée directement par la vapeur de la chaudière, la température intérieure se trouve réduite dans le grand cylindre, ce qui établit une certaine compensation entre les quantités de chaleur perdues extérieurement par les deux machines.

Des raisonnements analogues s'appliquent à la transformation du travail indiqué en travail effectif : la multiplicité

1. Par exemple, des expériences de M. Witz, sur une machine compound construite par Dujardin, ont donné les nombres qui suivent. Les deux cylindres ont pour diamètres 660 et 1150 mm, avec une course de 1350 mm; le nombre de tours par minute est 64; les pressions extrêmes sont 6 kg et 0,13 kg par cm^2 en moyenne; la puissance indiquée varie de 540 à 560 chevaux. Les consommations moyennes de vapeur, pour 270 000 kgm indiqués (cheval-heure) ont été d'environ :

6,5 kg quand aucune enveloppe n'était chauffée;
6,1 — avec les enveloppes des cylindres et du réservoir chauffées;
6,0 — avec les enveloppes des deux cylindres chauffées.

La vapeur des enveloppes avait la pression de la chaudière.

Les proportions (en poids) de vapeur condensée dans les enveloppes, par rapport à la consommation totale, étaient, dans la seconde expérience :

1,75 p. 100 dans l'enveloppe du petit cylindre;
2,12 — — — du grand —
8,32 — — — du réservoir.

Dans la troisième expérience, on a condensé :
1,75 p. 100 dans l'enveloppe du petit cylindre;
3,56 — — — du grand —

des organes de la compound semble augmenter les résistances passives, mais la réduction des pressions diminue le frottement de la plupart de ces organes. En général, le déchet, de ce chef, sera un peu plus fort dans la compound. Il n'en est pas de même si l'on est conduit à doubler la machine monocylindrique, en montant deux cylindres pour un seul arbre.

Comment doit-on fixer¹, dans une machine compound, la pression moyenne p' , du réservoir par rapport aux pressions extrêmes p_1 et p_2 ? La pression du réservoir est parfois choisie de manière à ce que chacun des deux cylindres produise à peu près le même travail : cette répartition du travail est la plus convenable quand les deux pistons commandent deux manivelles d'un même arbre. Avec deux cylindres en tandem, elle n'a plus d'intérêt; elle doit être modifiée pour la compound à trois cylindres et trois manivelles, où le cylindre à basse pression est divisé en deux².

Quant au volume du réservoir, il peut être assez grand pour que les variations de la pression y soient peu sensibles; mais, avec la capacité, le poids et l'encombrement augmentent, ainsi que la perte extérieure de chaleur : aussi préfère-t-on souvent de petits réservoirs, où les fluctuations de la pression sont assez importantes. Ces variations de pression sont peu sensibles quand le volume du réservoir atteint celui du grand cylindre. Elles dépendent en outre du nombre des cylindres et du calage des manivelles.

La machine compound permet de détendre suffisamment la vapeur avec une assez faible détente dans chacun des cylindres, convenablement réalisée par la distribution simple à tiroir.

Pour calculer rapidement les volumes des cylindres d'une

1. Il faut remarquer qu'en réalité on ne fixe pas directement cette pression p' , du réservoir, mais qu'elle s'établit d'après les conditions d'admission dans le grand cylindre et d'échappement du petit.

2. Pour éviter des dimensions trop grandes du cylindre à basse pression, on peut multiplier le nombre des manivelles motrices, on divise ce cylindre en deux moitiés, alimentées toutes deux par le réservoir.

machine compound devant produire une puissance déterminée dans des conditions données, on cherchera, par la formule donnée plus haut, le volume du cylindre de la machine monocylindrique qui donnerait même puissance en recevant le même volume de vapeur à la même pression initiale. Ce sera le cylindre à basse pression de la compound. Le cylindre à haute pression se détermine d'après la proportion admise entre les volumes des deux cylindres. Le plus souvent le grand cylindre est de 2,5 à 3 fois plus grand que le petit. Quelquefois ce rapport descend jusqu'à 2. Les courses

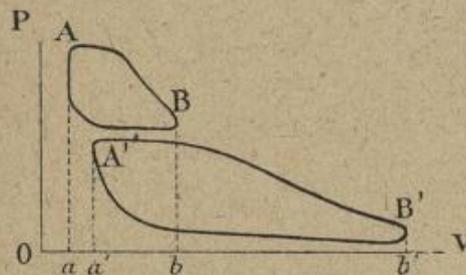


Fig. 36. — Diagramme totalisé de machine compound.

Oa , espace libre du petit cylindre; — ab , volume du petit cylindre; — Oa' et $a'b'$, espace libre et volume du grand cylindre.

étant les mêmes, le rapport des volumes est égal au rapport des carrés des diamètres des cylindres.

Quand on relève à l'indicateur des diagrammes sur les deux cylindres d'une machine compound, ces diagrammes ont habituellement même longueur, bien qu'ils se rapportent à des cylindres de volumes différents. Pour

comparer directement ces diagrammes, on les transforme en modifiant pour l'un deux les abscisses, de manière à les rendre proportionnelles aux volumes des cylindres. On groupe alors ces diagrammes par rapport à deux axes de coordonnées, de manière à figurer pour chacun, par une abscisse, l'espace libre correspondant (fig. 36). On obtient ainsi ce qu'on nomme le *diagramme totalisé*. Ce groupement est quelque peu arbitraire dans les machines à double effet, car chaque cylindre fournit deux diagrammes, et, le plus souvent, les courses des divers pistons ne commencent pas en même temps : d'ailleurs, les deux diagrammes de chaque cylindre sont rarement identiques, à cause des irrégularités de la distribution et des fluctuations de la pression dans les réservoirs.

34. **Machines de Woolf.** — Comme la compound, la machine de Woolf (fig. 6) a deux cylindres de dimensions différentes qui communiquent, l'un avec la chaudière, l'autre avec le condenseur : mais il n'y a plus de réservoir entre les cylindres : les deux pistons ont une marche concordante et la vapeur passe immédiatement d'un cylindre dans l'autre.

Le diagramme théorique du travail représente en AB (fig. 37) le volume de vapeur à la pression initiale p_1 qui pénètre

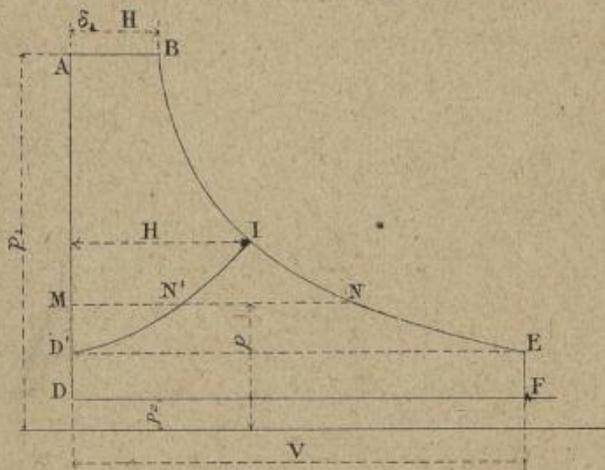


Fig. 37. — Diagramme théorique de la machine de Woolf; travail de la vapeur dans le premier cylindre, $ABID'$; travail dans le second cylindre, $IEFDD'$.

dans le premier cylindre et qui s'y détend jusqu'au volume H de ce cylindre, suivant la courbe BI . Pendant le retour du piston, les deux cylindres sont en communication; la vapeur continue à se détendre, en passant du volume H au volume V du second cylindre, suivant la courbe IE . Enfin la vapeur s'échappe dans le condenseur à la pression p_2 , pendant le retour du piston du second cylindre (droite FD). La détente est supposée incomplète. Le travail total est représenté par l'aire $ABEFD$; pour connaître la fraction de ce travail fournie par chaque cylindre, on construit la courbe ID' qui représente la contre-pression sur le petit piston pendant son retour, contre-pression égale à chaque instant à la pres-

sion motrice sur le grand piston. Le travail du petit cylindre est représenté par l'aire $ABID'$, celui du grand par $IEFDD'$; cette répartition est différente de celle que donne la machine compound.

Les diagrammes relevés à l'indicateur sur les machines de Woolf, pour les courses simples correspondantes des deux pistons, se présentent comme sur

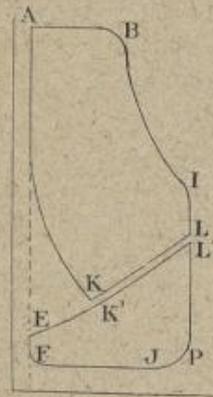


Fig. 38. — Diagrammes relevés sur une machine de Woolf.

la figure 38 : AB montre l'admission de vapeur à la pression p_1 , dans le petit cylindre; BI , la détente dans ce cylindre; IL , une chute de pression à l'échappement de ce cylindre; LK , la contre-pression décroissante sur le piston pendant sa course de retour; KA , la compression dans le petit cylindre à la fin de cette course de retour. Le grand cylindre donne le diagramme $L'K'EFJP$ ($L'K'$, détente de la vapeur pendant la communication des deux cylindres; $K'E$, fin de la détente, dans le grand cylindre seul; EFJ échappement et JP compression).

Ce second diagramme est relevé sur un cylindre de volume V ; pour le comparer au premier, il faut en multiplier la surface par le rapport $\frac{V}{H}$.

La machine de Woolf a, sur la machine monocylindrique, une partie des avantages de la compound, mais paraît inférieure en principe à cette dernière. Les écarts de la température de la vapeur dans chaque cylindre sont, pour le premier t_1 et t'_2 , pour le second t'_1 et t_2 , t'_1 étant plus élevé que t'_2 . Au lieu de s'arrêter à une limite commune, comme dans une compound à grand réservoir, les températures extrêmes dans les deux cylindres chevauchent. Lorsque le réservoir de la compound est petit, il se produit de même des fluctuations assez fortes de la pression lors de l'échappement du petit cylindre et de l'admission dans le grand.

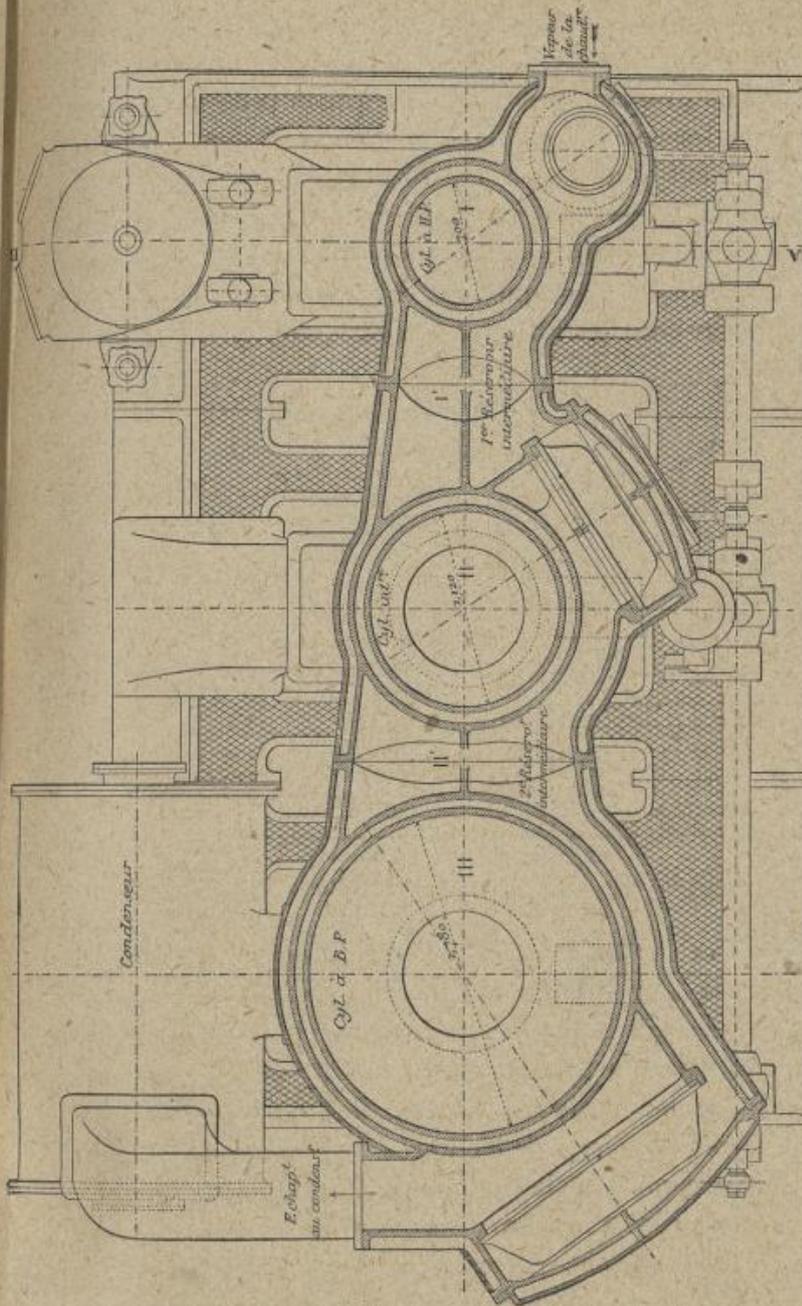


Fig. 39. — Machine à triple expansion de « la Charente », construite vers 1889; coupe horizontale perpendiculaire aux axes des cylindres. Course des pistons, 1,200 m; nombre de tours par minute, 76. Distribution par tiroir cylindrique au premier cylindre, par tiroirs plans aux deux autres. Rapports des volumes engendrés par les trois pistons, 4 — 2,559 — 6,466. Pression initiale effective de la vapeur, 10 kg par cm^2 . Puissance totale indiquée, 1540 kilowatts. La figure 84 donne l'élevation transversale de cette machine.

35. Triple et quadruple expansion. — La théorie des machines à triple expansion est analogue à celle des machines

compound : un cylindre à *haute pression* (fig. 39) reçoit la vapeur de la chaudière, à la pression p_1 , et la laisse échapper dans un premier réservoir, où règne la pression p'_1 ; ce réservoir alimente un cylindre *intermédiaire*, dont l'échappement se fait dans un second réservoir, sous la pression p''_1 ; la vapeur traverse ensuite le cylindre à *basse pression*, qui communique enfin avec le condenseur.

Le diagramme théorique (fig. 40) est découpé en trois tranches par deux parallèles à l'axe OV, au lieu d'être par-

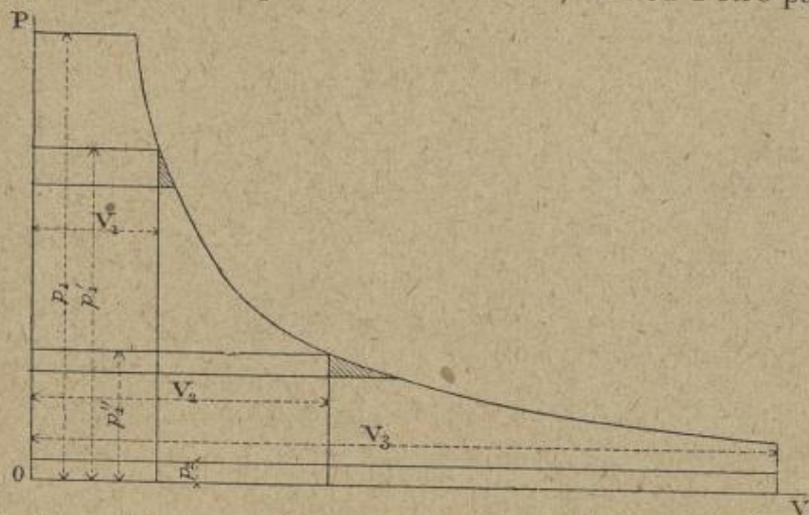


Fig. 40. — Diagramme théorique de la machine à triple expansion.

tagé en deux parties seulement comme dans la compound.

En réalité, il y a généralement une chute de pression à l'échappement de chaque cylindre; les pressions dans les réservoirs sont un peu moindres que p'_1 et p''_1 , et il en résulte un déchet sur le travail total, figuré par les surfaces triangulaires couvertes de hachures.

Plus encore que dans la compound, à égalité des pressions extrêmes, on réduit les écarts de température dans chaque cylindre, l'influence des espaces libres, et on facilite la compression complète de la vapeur dans ces espaces; toutefois cette division du diagramme en trois parties n'est guère pratique que lorsque les écarts des pressions extrêmes p

et p_2 sont assez grands, par suite de l'accroissement de la pression p_1 . En fait, l'écart des pressions dans les deux

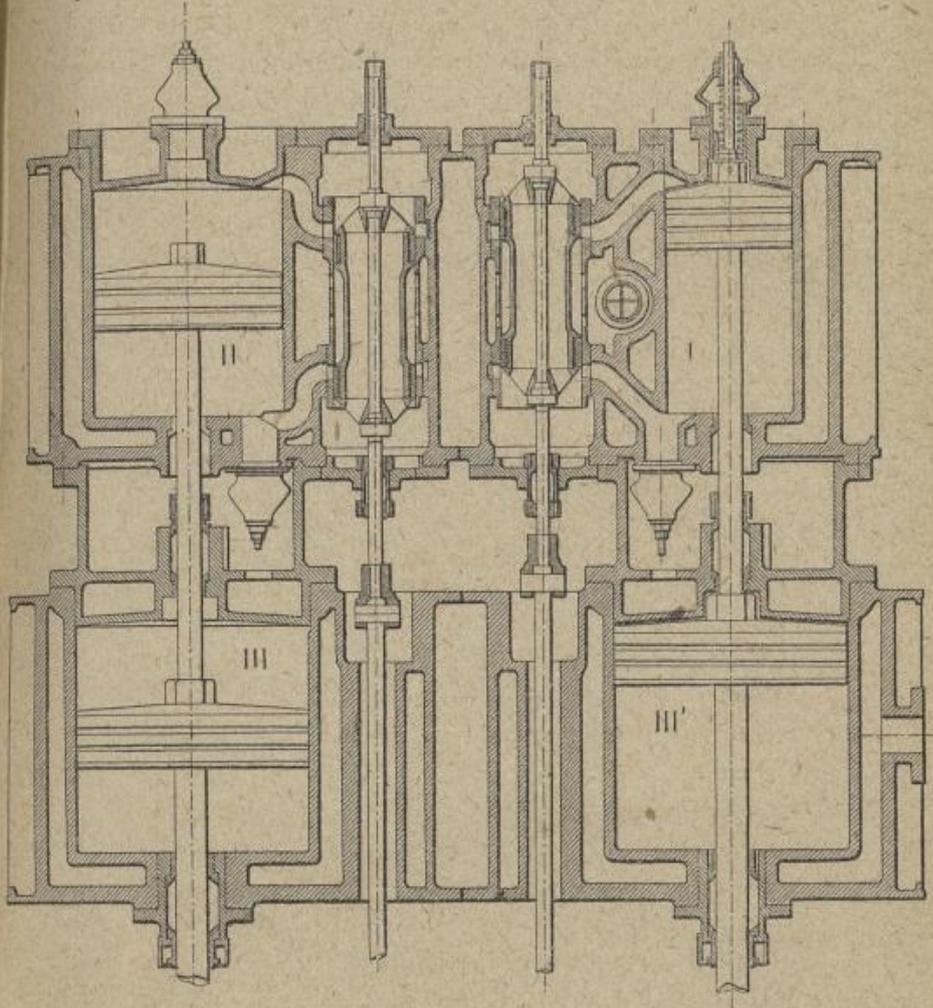


Fig. 41. — Machine pilon à triple expansion, à quatre cylindres, construite par Weyher et Richemond; coupe longitudinale des cylindres. La distribution se fait dans les cylindres I et II par tiroirs cylindriques. Pour les deux demi-cylindres III et III' il y a des tiroirs plans.

derniers cylindres, à moyenne et à basse pression, des machines à triple expansion qu'on construit aujourd'hui est à peu près le même que dans les cylindres des compound

construites il y a une trentaine d'années. Les valeurs de la pression initiale p_1 sont fréquemment comprises entre 10 et 12 kg par cm^2 et dépassent même ce dernier nombre.

On cherche à donner aux trois cylindres des proportions telles que chacun produise le tiers du travail total, quand chaque cylindre commande une manivelle d'un arbre unique, les trois manivelles étant calées à 120° . Pour n'avoir que deux manivelles, on place en tandem deux des trois cylindres; souvent alors on divise en deux le dernier cylindre,

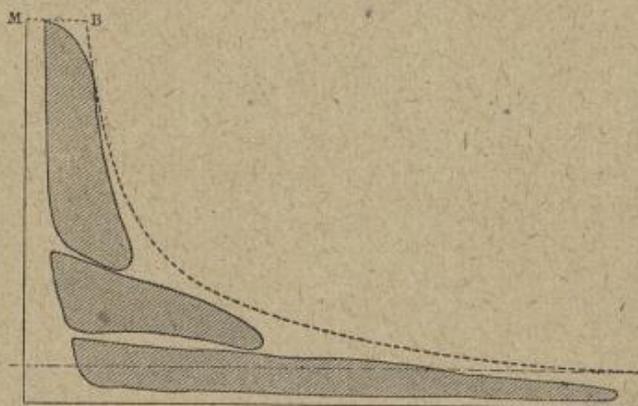


Fig. 42. — Diagramme totalisé d'une machine à triple expansion.

et la machine comprend deux groupes de deux cylindres en tandem (fig. 41).

Les volumes des cylindres sont fréquemment dans la proportion 1 — 2,5 à 2,8 — 6 à 7. Quand le dernier cylindre est divisé en deux, c'est la somme des volumes de ces deux parties qui forme le troisième terme de la série.

Les deux réservoirs intermédiaires sont en général assez petits, pour ne pas encombrer la machine et ne pas exagérer le refroidissement extérieur. Aussi constate-t-on souvent des fluctuations de la pression dans les réservoirs pendant un tour de la machine, fluctuations qui n'ont pas grand inconvénient quand elles ne sont pas excessives.

Pour tracer le *diagramme totalisé*, on amplifie les abscisses des diagrammes d'indicateur, relevés sur le moyen et le

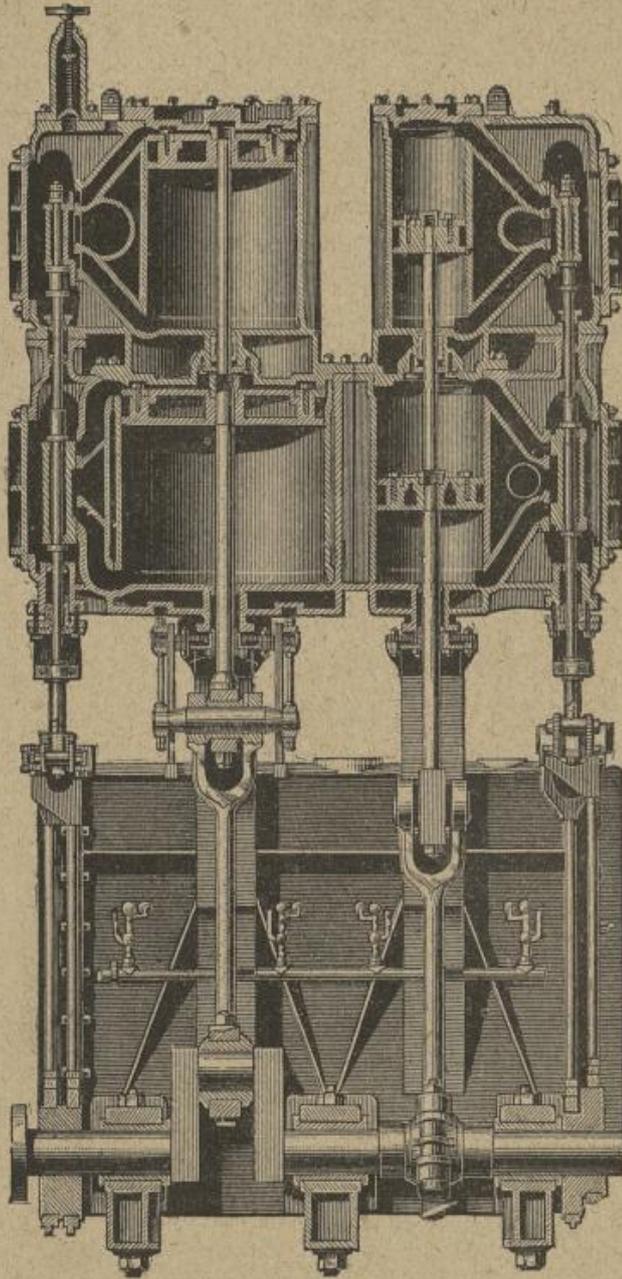


Fig. 43. — Machine à quadruple expansion, à deux manivelles
(d'après Thurston).

grand cylindre, suivant les rapports de leurs volumes au volume du petit cylindre. On ramène aussi les ordonnées à la même échelle. Les surfaces permettent alors la comparaison directe des travaux donnés par chaque cylindre (fig. 42).

On peut encore pousser plus loin la division du diagramme théorique, en employant quatre cylindres successifs et trois réservoirs intermédiaires. C'est ce qu'on fait quelquefois pour des machines marines et fixes avec une pression initiale élevée. Cette quadruple détente se prête à l'emploi de deux groupes en tandem, avec deux manivelles à un angle droit (fig. 43). La proportion des volumes des cylindres sera par exemple, 1 — 2,25 — 3 — 11.

36. Vapeurs combinées. — Les machines à vapeurs combinées se composent de deux moteurs, actionnés l'un par la vapeur d'eau, l'autre par la vapeur d'un liquide plus volatil, tel que l'éther; la vapeur d'eau s'échappe du premier moteur dans un condenseur à surface, refroidi, non par un courant d'eau à la manière ordinaire, mais par le liquide volatil, qui se vaporise aux dépens de la chaleur abandonnée par l'eau qui se condense.

Le condenseur du premier moteur sert de chaudière à l'autre : dans ses deux enceintes, que sépare une surface métallique suffisamment étendue, la température est à peu près la même, mais à cette température (60° environ), la pression de la vapeur d'eau est faible, tandis que la pression du second liquide est beaucoup plus grande¹.

Après avoir travaillé dans le second moteur, la vapeur du second liquide se liquéfie dans un condenseur à surface, entretenu à une température aussi basse que possible par un courant d'eau. Une pompe alimentaire renvoie le liquide au condenseur évaporatoire.

1. Pressions de la vapeur à 60° : eau, 0,2 kg par cm^2 ; éther, 2,35; chloroforme, 1 kg par cm^2 . A 70°, ces pressions sont respectivement 0,32 — 3,12 — 1,4 kg par cm^2 .



Du Tremblay a employé l'éther, et Lafont, le chloroforme, vers 1850. Dans la machine plus récente de Behrend et Zimmermann, le second liquide est l'anhydride sulfureux (acide sulfureux).

Cette combinaison a un avantage : dans la machine ordinaire, la vapeur d'eau évolue entre des températures qui sont, par exemple, 180° et 20° : mais la pression et la densité de la vapeur deviennent si faibles vers cette limite inférieure, qu'il faudrait un cylindre de dimensions inacceptables pour en utiliser toute la détente : le diagramme complet serait ABCEF (fig. 44) ; aussi ne réalise-t-on que le diagramme ABCGF, FG représentant le volume du cylindre,

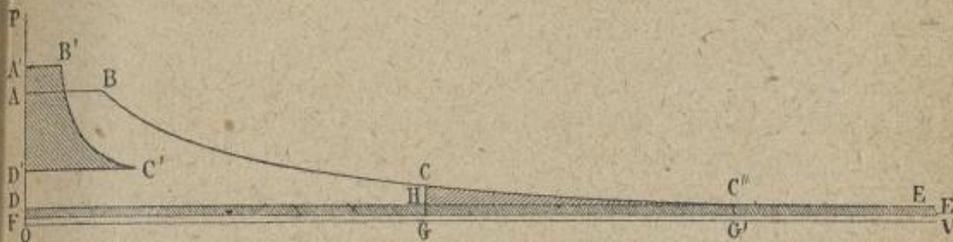


Fig. 44. — Diagrammes théoriques des machines à vapeurs combinées. Le point E est en dehors de la figure, vers la droite, à l'intersection de la courbe de détente BC et de la droite FG.

et on perd le travail représenté par la surface CEG. Dans la machine à vapeurs combinées, la vapeur d'eau en se condensant vaporise un fluide dont la vapeur a une pression beaucoup plus élevée : par exemple, cette pression est représentée par l'ordonnée OA' , tandis que la pression de la vapeur d'eau, à la même température, est OD . A la température finale de condensation cette pression est OD' au lieu de OF pour l'eau. On a ainsi une vapeur pratiquement utilisable dans un cylindre pour produire du travail, parce qu'elle exerce une pression suffisamment forte par cm^2 ; on obtient le travail $A'B'C'D'$ dans un cylindre de volume $D'C'$.

Il faut bien remarquer que tout le travail ainsi recueilli dans le second cylindre n'est pas un bénéfice net supplé-

mentaire par rapport à la machine à vapeur d'eau seule ; car la vapeur d'eau est condensée à une température plus élevée et, par conséquent, la contre-pression à l'échappement est plus forte ; cette contre-pression sera OD au lieu de OF, et le travail du premier cylindre est réduit de la quantité DHGF. Mais cette réduction est moindre que la quantité gagnée dans le second cylindre.

En pratique, le transfert de chaleur de la vapeur d'eau au fluide volatil ne va pas sans quelque perte de chaleur au dehors ; en outre, la température de l'eau qui se condense est un peu plus élevée que celle du fluide volatil qui se vaporise, ce qui diminue la pression de ce fluide.

Certaines précautions sont nécessaires pour la marche de ces machines : il faut que tous les joints soient parfaitement étanches, ainsi que les garnitures de tiges de piston, afin d'éviter toute fuite du second fluide, fuites qui seraient fort gênantes et, en outre, exigeraient le renouvellement d'une substance coûteuse. Les condenseurs doivent aussi avoir une étanchéité parfaite. Avec l'anhydride sulfureux, il est indispensable d'éviter la moindre introduction d'eau qui formerait de l'acide sulfurique, destructeur des appareils.

Cet emploi combiné de deux fluides, ingénieux en théorie, ne s'est jamais répandu ; il a d'ailleurs perdu tout intérêt pratique depuis que la turbine permet une bonne utilisation de la vapeur d'eau aux plus faibles pressions réalisables.

On a récemment proposé une combinaison analogue mais avec un fluide moins volatil que la vapeur d'eau, la vapeur de mercure, qui, après avoir travaillé dans un cylindre, vaporise l'eau en se condensant.

37. Essais des machines. — L'observation précise des machines est nécessaire pour en étudier la théorie comme pour en apprécier le fonctionnement pratique. Les deux quantités fondamentales à déterminer sont le poids de la

vapeur consommée et le nombre des kilogrammètres produits dans un temps donné.

La consommation de vapeur se mesure par le jaugeage de l'eau d'alimentation introduite dans la chaudière qui la produit, le niveau de l'eau dans cette chaudière étant exactement le même au début et à la fin de l'essai. Pour que cette mesure corresponde effectivement à la consommation de la machine, il faut qu'aucune fuite n'existe à la chaudière et à la tuyauterie de vapeur, et que les soupapes de sûreté ne se soulèvent pas pendant l'essai.

Quand on dispose d'un condenseur à surface, on peut jauger l'eau qui provient de la condensation de la vapeur qui a traversé la machine. Il faut vérifier que ce condenseur est bien étanche et ne donne lieu à aucune rentrée de l'eau de circulation, qui se mêlerait à l'eau condensée recueillie.

Lorsque le cylindre du moteur est muni d'une enveloppe dont l'eau retourne directement à la chaudière, cette dépense de vapeur n'est pas mesurée dans les deux méthodes qui viennent d'être indiquées; et cependant elle correspond à un apport de chaleur venant de la chaudière. Dans les essais précis, on recueille à part l'eau condensée dans les enveloppes.

On mesure la pression de la vapeur, qu'il faut maintenir aussi constante que possible pendant la durée de l'essai, à l'aide d'un manomètre placé sur la boîte à vapeur du cylindre, où elle peut être moindre qu'à la chaudière. On relève aussi la pression dans le condenseur.

Il est utile de déterminer le degré d'humidité de la vapeur à son arrivée au moteur, mais cette mesure est assez délicate. Quand on fait usage de vapeur surchauffée, on en mesure la température, ce qui exige certaines précautions, car cette température peut ne pas être uniforme dans toute la section du courant de vapeur. En outre les appareils de mesure des hautes températures sont parfois inexacts et doivent être soigneusement vérifiés.

La mesure du travail se fait avec l'indicateur. Pour une expérience précise, il faut que le régime de la machine soit bien uniforme pendant toute la durée de l'essai. On doit donc maintenir avec aussi peu de variations que possible la résistance opposée à la machine, la pression de la vapeur et le degré d'admission. On relève des diagrammes à intervalles égaux.

A l'aide d'un compteur de tours, dont on observe de temps en temps les indications, on mesure la vitesse de rotation.

Le travail total produit pendant l'essai se déduit des ordonnées moyennes des diagrammes, dont on peut prendre la moyenne générale s'ils présentent peu d'écarts, et du nombre de tours de l'arbre. Connaissant les dimensions des cylindres (diamètre et course¹), on calcule aisément le nombre de kilogrammètres, ou de kilowatt-heures.

A un autre point de vue, l'examen du diagramme permet d'apprécier le réglage de la distribution.

La durée de l'essai doit être aussi longue que le permettent les conditions de fonctionnement de l'appareil. Il est bon d'y consacrer une journée entière.

Cette méthode donne la puissance indiquée. Il est intéressant de connaître aussi la puissance effective, relevée à l'aide d'un dynamomètre. Mais cette mesure exige en général des installations difficiles et coûteuses. On se contentera souvent de la mesure de la puissance indiquée de la machine fonctionnant sans résistance.

Dans certaines installations, on peut mesurer directement le travail utile produit, par exemple la quantité d'eau élevée à une hauteur connue par une pompe, l'intensité et la tension d'un courant électrique. Mais on voit que ce résultat utile dépend de deux rendements successifs, dans

1. Le diamètre doit être relevé exactement en profitant d'un démontage du plateau du cylindre. On doit aussi tenir compte de la dilatation produite par la chaleur. Une élévation de température de 180° augmente le diamètre d'environ 0,003, et le volume de 0,004. -

le moteur et dans la pompe ou la dynamo qu'il commande, ou même de trois rendements, s'il y a une transmission entre les deux appareils.

Ayant mesuré la quantité de vapeur dépensée et la quantité de travail indiqué produite, on voit ce qu'exige un kilowatt-heure. Pour avoir une appréciation précise du moteur, il faut déterminer la dépense de vapeur qu'exigerait le cycle théorique, entre les mêmes pressions à l'admission et à l'échappement : on voit de combien la machine réelle s'écarte de la machine fictive parfaite.

Au lieu du poids de vapeur, qui ne constitue pas une unité précise, parce que la quantité de chaleur nécessaire pour la produire varie suivant la température initiale de l'eau d'alimentation, la pression, l'état d'humidité ou de surchauffe, il est préférable d'indiquer, pour la machine réelle et pour la machine idéale, les quantités de chaleur correspondantes, qu'il est facile de calculer dans chaque cas, à l'aide des nombres donnés par les tables.

Quels que soient les soins apportés aux mesures, on ne peut espérer atteindre une approximation d'un millième; il est donc illusoire d'indiquer les puissances avec plus de trois chiffres significatifs, et la règle à calcul convient pour la plupart des opérations numériques.

Ci-après on trouvera quelques exemples des consommations de bonnes machines :

MACHINE CORLISS DU CREUSOT; CYLINDRE DE 550 SUR 1100 mm,
AVEC ENVELOPPE DE VAPEUR; MARCHÉ A CONDENSATION

Pression effective moyenne de la vapeur.	7,75 kg par cm^2
Admission, en centièmes de la course . . .	42,5
Nombre de tours par minute	58,4
Puissance indiquée, en kilowatts	158
— effective —	130
Consommation de vapeur par kilowatt- heure indiqué.	40,71 kg
Poids de vapeur condensée dans l'enve- loppe, par kg de la dépense totale. . . .	32 g

MACHINE COMPOUND A SOUPAPES DE SULZER; CYLINDRES DE 320 ET 525 SUR 900 mm, AVEC ENVELOPPES DE VAPEUR; MARCHÉ A CONDENSATION

Pression effective de la vapeur	9,15 kg par cm^2
Nombre de tours par minute	83
Puissance indiquée en kilowatts	134
Consommation de vapeur par kilowatt- heure indiqué	8,86 kg

La même machine, avec vapeur surchauffée de 82°, et pression effective de 9,06 kg par cm^2 , produisant 129 kilowatts indiqués, a dépensé 7,60 kg par kilowatt-heure.

MACHINE COMPOUND A DISTRIBUTEURS VAN DEN KERCHOVE; CYLINDRES DE 325 ET 560 SUR 850 mm, AVEC ENVELOPPES; MARCHÉ A CONDENSATION (ESSAIS DE M. LE PROFESSEUR SCHRÖTER, EN 1902).

1° Vapeur saturée.

Pression effective moyenne de la vapeur	8,93 kg par cm^2
Nombre de tours par minute	126,9
Puissance indiquée en kilowatts	123
Consommation de vapeur par kilowatt- heure indiqué	7,17 kg
Condensation dans l'enveloppe du cylin- dre à haute pression, par kg de la dé- pense totale	49,8 g
Condensation dans l'enveloppe du cylin- dre à basse pression	87,2 g
Dépense de calories par kilowatt-heure indiqué	4750

2° Vapeur surchauffée.

Pression effective moyenne de la vapeur, Surchauffe (au-dessus de la température de saturation)	9,21 kg par cm^2
Nombre de tours par minute	126,9
Puissance indiquée en kilowatts	123
Consommation de vapeur par kilowatt- heure indiqué	5,85
Condensation dans l'enveloppe du cylin- dre à haute pression, par kg de la dé- pense totale	3,8 g
Condensation dans l'enveloppe du cylin- dre à basse pression	35,1 g
Dépense de calories par kilowatt-heure indiqué	4250

MACHINE A TRIPLE EXPANSION, A SOUPAPES, DE SULZER; CYLINDRES DE 865,2 — 1250 — DEUX DE 1550,1 SUR 1300 mm, AVEC ENVELOPPES, MARCHÉ A CONDENSATION.

Pression effective de la vapeur	13,33 kg par cm^2 ;
Nombre de tours par minute	83,5
Puissance indiquée en kilowatts	2235
Consommation de vapeur par kilowatt- heure indiqué	7,16

La même machine, avec vapeur surchauffée de 116° et pression effective de 12,83 kg par cm^2 , produisant 2120 kilowatts indiqués, a dépensé 5,80 kg par kilowatt-heure.

CHAPITRE V

DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

38. Phases de la distribution. — Dans le cylindre d'une machine à double effet, chacun des deux compartiments,

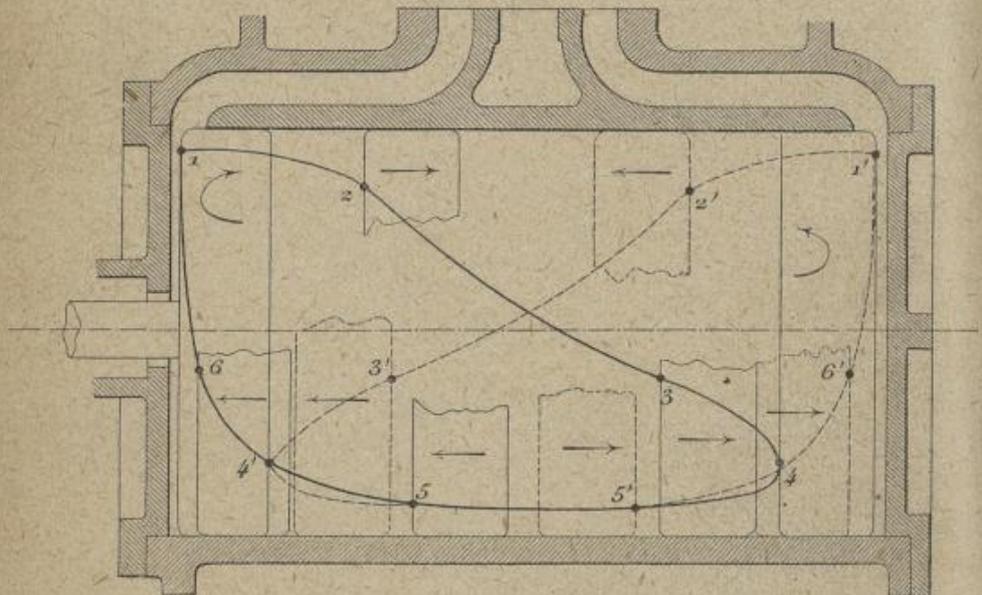


Fig. 45. — Diagrammes de la pression sur les deux faces du piston.

1, 2, pression sur la face gauche du piston pendant l'admission; — 2, 3, pendant la détente; — 3, 4, pendant l'échappement anticipé; — 4, 5, pendant l'échappement; — 5, 6, pendant la compression; — 6, 1, pendant l'admission anticipée; 1', 2', 3', 4', 5', 6', mêmes phases sur la face droite du piston.

que sépare le piston, est en communication tantôt avec une source de vapeur à la pression supérieure, tantôt avec une enceinte où règne une pression moindre; à d'autres instants, ce compartiment est complètement isolé : alors la

vapeur qu'il renferme se détend ou est comprimée, selon le sens du mouvement du piston.

La distribution comprend ainsi, pour chacun des deux compartiments, qu'il convient de considérer isolément,

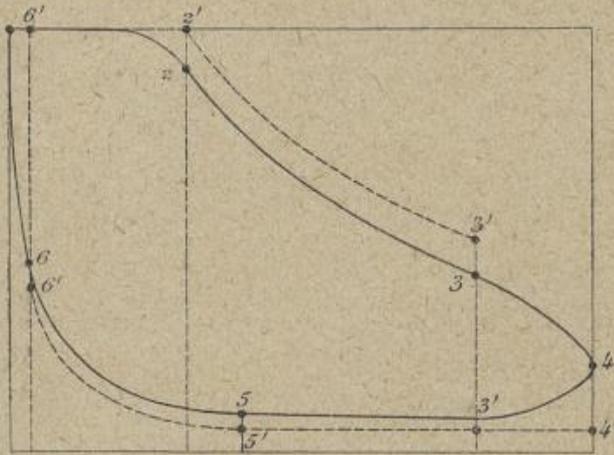


Fig. 46. — Phases de la distribution sans laminages (trait ponctué) et avec laminages (trait plein).

quatre phases, l'*admission*, la *détente*, l'*échappement*, la *compression*.

En tenant compte des changements dans le sens du mouvement du piston, on subdivise ces quatre phases en six :

- | | | |
|-----------------------------|--|--|
| Pendant l'aller du piston | $\left\{ \begin{array}{l} 1^{\circ} \text{ l'admission ;} \\ 2^{\circ} \text{ la détente ;} \\ 3^{\circ} \text{ l'échappement anticipé ;} \end{array} \right.$ | |
| Pendant le retour du piston | | $\left\{ \begin{array}{l} 4^{\circ} \text{ l'échappement ;} \\ 5^{\circ} \text{ la compression ;} \\ 6^{\circ} \text{ l'admission anticipée.} \end{array} \right.$ |
| | | |

Le piston n'effectue qu'un faible parcours pendant la sixième phase, qui même n'existe pas dans beaucoup de machines. Souvent aussi les périodes d'échappement anticipé et de compression (3° et 5°) ne correspondent qu'à de petits déplacements du piston.

La figure 45 représente les diagrammes d'indicateur

relevés dans les deux compartiments du cylindre, ou, comme on dit, sur les deux *faces* du piston; les commencements des six périodes de la distribution sont numérotés. On voit, sur ces diagrammes, les laminages de la vapeur, qui dépendent de la grandeur des orifices de passage et de la vitesse du piston. La figure 46 montre, en traits ponctués, le diagramme que donnerait la machine marchant avec une assez grande lenteur pour qu'il n'y ait aucune chute de pression au passage des orifices du cylindre; le diagramme avec laminage est en traits pleins.

39. **Tiroir et excentrique.** — Pour ouvrir et fermer un orifice, le plus simple est de faire glisser une plaque sur

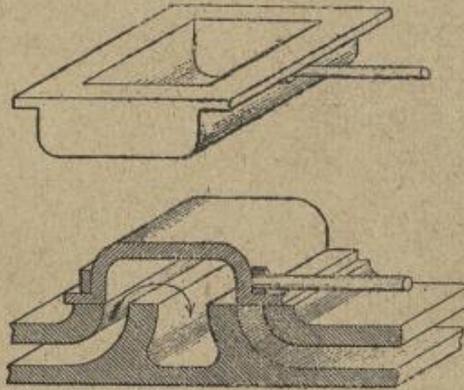


Fig 47. — Tiroir ordinaire: vue en dessous; coupe du tiroir et de lumières.

une table plane percée d'une ouverture, que la plaque découvre et recouvre; la vapeur, qu'il s'agit de laisser passer et d'arrêter, accède librement au-dessus de la plaque et la maintient constamment appliquée sur la table. Pour l'échappement, il conviendrait qu'une telle plaque fût à l'intérieur du cylindre pour en éviter le soulèvement, mais une plaque unique suffit pour l'admission et pour l'échappement, quand on en creuse la face qui glisse sur la table; elle établit la communication de l'orifice avec une seconde ouverture de

la table, qui sert pour l'échappement : tel est le tiroir ordinaire (fig. 47).

La figure 48 représente les deux lumières d'admission, aboutissant aux fonds du cylindre, et celle du milieu, qui sert pour l'échappement. Les ouvertures des lumières sur la table sont des rectangles de hauteur commune h et de

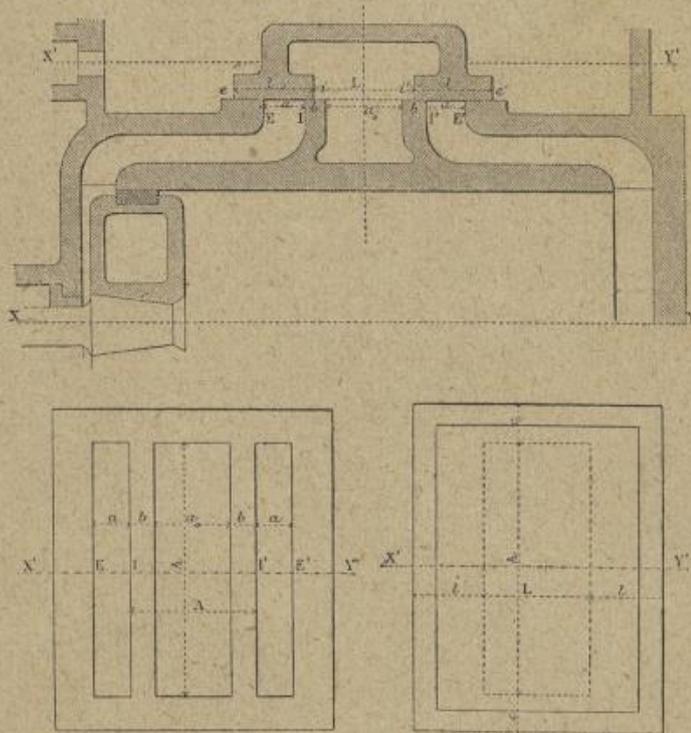


Fig. 48. — Lumières du cylindre et tiroir ; coupe longitudinale ; vue en dessus des lumières, le tiroir enlevé ; vue en dessus du tiroir.

bases a , a_0 , a' , séparées par des barrettes de largeur b . La hauteur h est relativement grande afin de donner une section de passage suffisante avec une faible course du tiroir. Le tiroir présente une face plane qui s'applique exactement et qui glisse sur la table ; cette face est un rectangle de hauteur un peu plus grande que h . L'évidement rectangulaire intérieur est de hauteur h .

Dans les machines simples, le tiroir est conduit par une

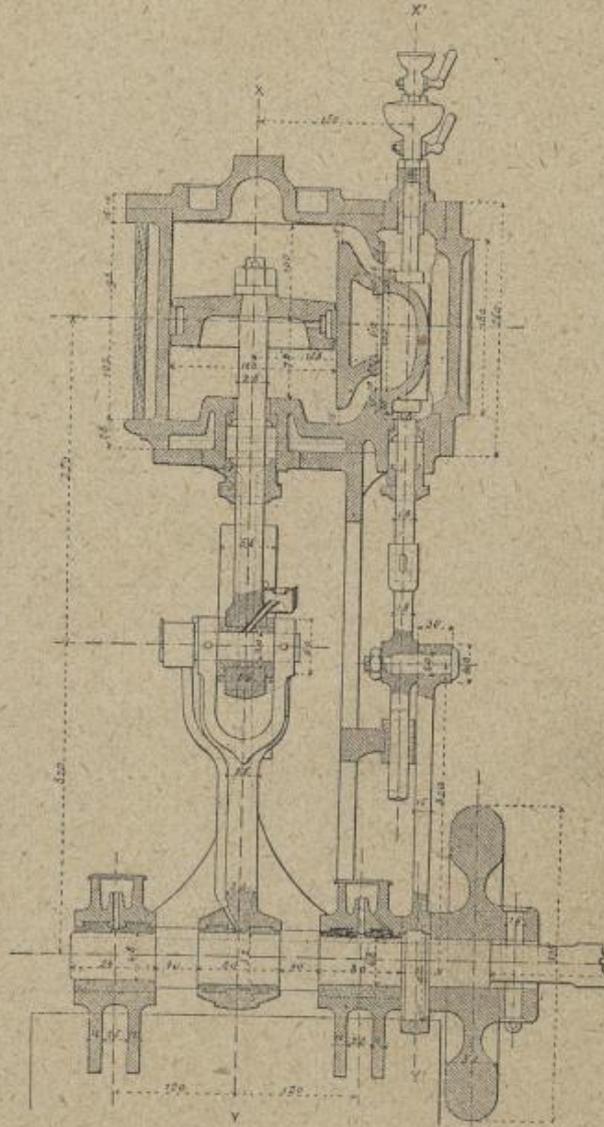


Fig. 49. — Cylindre et tiroir avec axes parallèles, placés avec l'axe de l'arbre moteur dans un plan unique, pour une machine pilon ; coupe verticale par le plan des axes. Dans la position figurée, l'admission a lieu au-dessus du piston, et l'échappement en dessous.

manivelle de rayon r , le plus souvent de l'espèce dite *excen-*

trique. Fréquemment, les axes du cylindre et de la tige du tiroir sont parallèles et un même plan contient ces deux axes et celui de l'arbre (fig. 49).

Dans les tracés qui suivent, le mouvement du tiroir est représenté dans le plan de l'excentrique, perpendiculaire à l'arbre moteur; sur la figure 50 notamment, la coupe du tiroir et des lumières est supposée rabattue dans ce plan.

Les dimensions, qui caractérisent une distribution par tiroir, sont celles des lumières, du tiroir, du mécanisme de

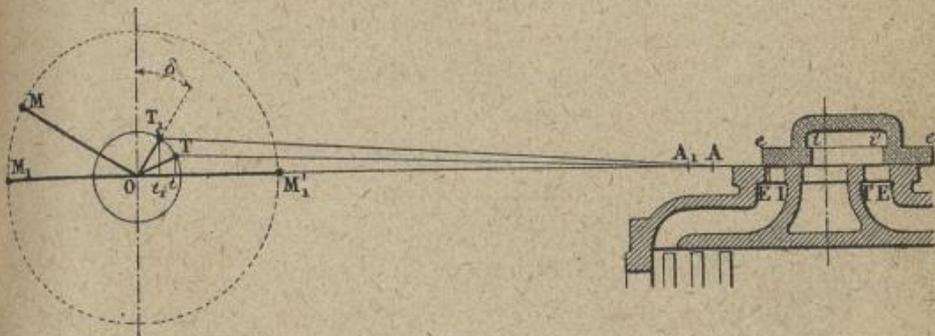


Fig. 50. — Commande du tiroir par un excentrique : coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre : la coupe des lumières du cylindre et du tiroir est rabattue, par une rotation de 90° , sur le plan de la figure.

commande, et enfin une cote qui précise la position du tiroir sur la table des lumières.

Pour les lumières, il faut avant tout fixer les distances des bords des deux lumières extrêmes, c'est-à-dire les trois longueurs EI , II' , $I'E'$ (fig. 48), désignées par les lettres a , A et a' ; les largeurs a et a' sont d'ordinaire égales.

Les dimensions caractéristiques du tiroir sont de même les distances de leurs quatre bords, ei , $i'i'$ et $i'e'$, désignées par l , L et l' : les longueurs l et l' sont fréquemment égales.

Le mécanisme de commande est défini par le *rayon d'excentricité* r et par l'*angle* que fait ce rayon avec la manivelle motrice, compté dans le sens du mouvement de rotation; on appelle *angle d'avance* (δ sur les figures), ou *avance angulaire*,

l'excès de cet angle sur un angle droit. Il faut aussi connaître la longueur de la bielle ou *barre d'excentrique*, TA (fig. 50).

Enfin la position du tiroir sur la table des lumières est précisée quand on indique la distance du bord mobile e au bord fixe E, pour une position déterminée de la machine, par exemple lorsque la manivelle motrice est à son *point mort* OM_1 ; à ce moment, le piston est à fond de course du côté de la lumière El. Cette distance Ee , pour cette position de la machine, s'appelle *avance linéaire* du tiroir; elle est souvent très petite ou nulle.

Toutes ces cotes étant fixées, en partant de la position initiale OT_1 , occupée par le rayon d'excentricité quand le piston est à fond de course, qu'on fasse faire un tour complet à l'arbre de la machine, et qu'on observe le déplacement du bord e du tiroir, par rapport au bord E de la lumière; au début, la lumière s'ouvre, ou est déjà légèrement ouverte; le bord mobile e est en contact avec le bord fixe E ou bien l'a légèrement dépassé vers la droite, sur la figure; puis tant que e continue son mouvement vers la droite, la lumière El s'ouvre de plus en plus; l'ouverture se rétrécit quand e se déplace en sens contraire, pour être complètement close lorsque e se trouve au delà de E: en résumé, l'ouverture et la fermeture ont lieu quand le bord mobile du tiroir, e , passe sur le bord fixe de la lumière, E; la lumière est ouverte ou fermée suivant que e se trouve plus ou moins éloigné que E du point O, centre de l'arbre.

La communication avec le condenseur, pour le même côté du piston, commence et cesse quand le bord intérieur du tiroir, i , passe sur le bord I de la lumière; cette communication est ouverte ou fermée suivant que le bord i est plus rapproché ou plus éloigné du centre O que le bord I.

Connaissant ainsi les positions des bords du tiroir, e et i , qui produisent l'ouverture et la fermeture de la lumière, El, pour l'admission et pour l'échappement, sur le côté du piston desservi par cette lumière, on en déduit les positions

correspondantes du rayon d'excentricité OT , qui conduit le tiroir.

Pour la seconde lumière, qui dessert l'autre face du piston, ce sont les déplacements du bord e' du tiroir, par rapport au bord fixe E' , et du bord i' par rapport à I' , qui régissent l'admission et l'échappement.

L'étude de ces mouvements serait peu commode, s'il fallait tracer, pour chaque position intéressante du tiroir, le mécanisme complet de commande, avec sa longue bielle : mais ce tracé peut être simplifié. Le mécanisme étant dans

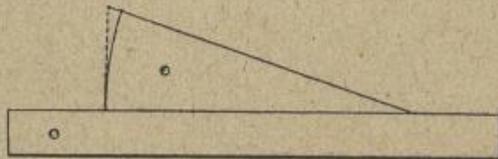


Fig. 51. — Gabarit pour le tracé exact du déplacement du tiroir : le rayon du petit côté de l'équerre est égal à la longueur de la barre d'excentrique (à l'échelle du dessin).

une position quelconque, OTA (fig. 50), l'arc de cercle Tt , dont A est le centre et AT le rayon, détermine une longueur At égale à celle de la barre d'excentrique AT , longueur At qui prolonge, vers l'arbre, la tige du tiroir. Si cette tige était effectivement prolongée de la sorte, et portait en t un modèle du tiroir, avec ses dimensions caractéristiques, l, L, l' , ce modèle, lié par une tige rigide au véritable tiroir, en répéterait les mouvements pendant la marche de la machine; le tiroir serait ainsi rapproché du cercle décrit par le rayon de l'excentrique, OT , ce qui faciliterait le tracé de l'épure. On obtient aisément le point t , correspondant à T , en traçant l'arc de cercle de rayon égal à la longueur de la bielle du tiroir, à l'aide d'un gabarit simple, construit en taillant le petit côté d'une équerre à dessin suivant le rayon voulu (fig. 51).

Il faut transporter en même temps les points fixes de la table sur laquelle se meut le tiroir : en désignant par e l'avance linéaire, pour la position initiale OT_1 , le point E est

à la distance ε du bord e du tiroir, alors en t_1 (fig. 52). L'arbre tournant dans le sens de la flèche, le point e s'éloigne de E , en ouvrant de plus en plus la lumière, jusqu'à ce qu'il arrive en T' ; alors il se rapproche de E , qu'il rencontre lorsque le rayon d'excentricité passe en OT_2 . La lumière reste alors fermée pour l'admission, jusqu'à ce que le rayon passe en OT_6 ; à ce moment commence l'admission anticipée.

Pour l'échappement, on doit suivre le mouvement du bord i du tiroir, qui est à la distance l du bord e , par rap-

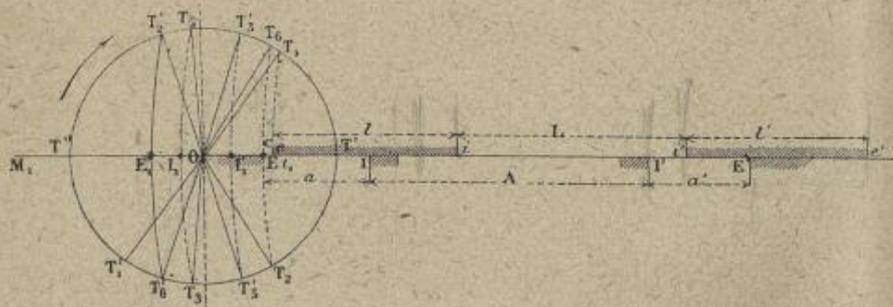


Fig. 52. — Mouvement du tiroir sur la table des lumières.

port au point fixe I , qui est séparé de E par la largeur a de la lumière. Qu'on transporte les points i et I d'une longueur l vers e : le mouvement relatif ne changera pas, mais i se confondra avec le point t , qui précédemment figurait le bord e ; après ce transport, I est en I_1 , ayant dépassé E d'une longueur $l - a$, égale à l'excès de la largeur de la bande du tiroir sur celle de la lumière.

On voit alors que le point t (c'est-à-dire le bord intérieur i du tiroir) passe sur I_1 quand le rayon OT vient en OT_3 et en OT_5 ; la position OT_3 marque le commencement de l'échappement anticipé, et OT_5 , la fin de l'échappement : la séparation de ces deux périodes a lieu lorsque le piston est à fond de course; à ce moment OT passe en OT_1 , diamétralement opposé à OT_1 .

Le déplacement du même point t sur le diamètre TT''

montre comment la distribution se fait sur l'autre face du piston, si on lui fait représenter successivement les bords e' et i' du tiroir; il faut pour cela supposer les points fixes E' et I' déplacés vers E respectivement de la longueur du tiroir, $l + L + l'$ et de la longueur $l + L$.

En résumé, toute l'étude de la distribution revient à suivre sur le diamètre $T'T''$ le mouvement du point t , projection de

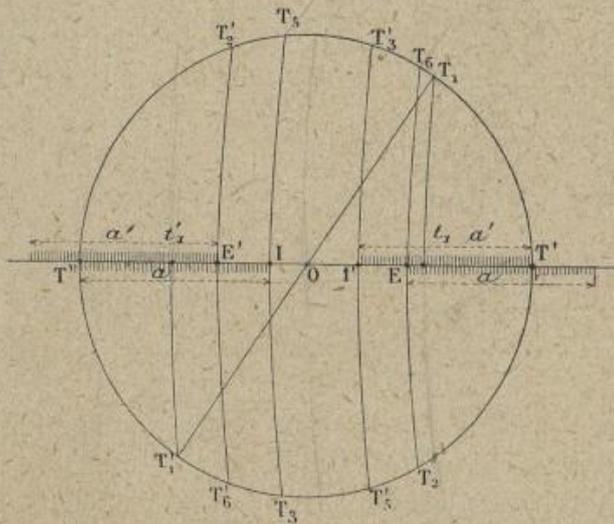


Fig. 53. — Épure du déplacement du tiroir sur les lumières.

Sur la face du piston voisine de l'arbre : $T_1 T_2$, parcours angulaire pendant l'admission; — $T_2 T_3$, détente; — $T_3 T_4$, échappement anticipé; — $T_4 T_5$, échappement; — $T_5 T_6$, compression; — $T_6 T_1$, admission anticipée. Les lettres avec accents s'appliquent à l'autre face du piston.

T suivant un arc de cercle, dont le rayon est la longueur de la barre, et qui coupe normalement ce diamètre.

Sur ce diamètre $T'T''$ sont marqués quatre points fixes $EIE'I'$ (fig. 53) : le passage du point mobile t sur ces repères indique le commencement et la fin des diverses phases de la distribution; et la distance de t à ces repères montre à chaque instant la largeur des ouvertures données par le tiroir.

La distance EI de la figure 53 est égale à $l - a$, excès de la largeur l de la bande du tiroir sur la largeur a de la lumière : lorsque cette bande recouvre la lumière, elle la

dépasse de deux quantités dont la somme est constante et égale à cette différence $l - a$. En précisant une position spéciale du tiroir, on peut définir séparément chacune de ces quantités dont la somme égale $l - a$: c'est ce qu'on nomme le *recouvrement extérieur* et le *recouvrement intérieur* du tiroir : cette définition séparée n'est pas indispensable, car il suffit de considérer la *somme* de ces deux longueurs. De même $E'T'$ est égal à la différence, $l' - a'$, des largeurs de l'autre bande et de l'autre lumière, ou à la somme des recouvrements de cette seconde bande.

Sur le diamètre $T'T''$, II' est égal à la différence de la distance A des bords intérieurs des lumières et de la distance L des bord intérieurs du tiroir : cette différence est la somme des *recouvrements intérieurs* du tiroir. L peut être plus grand que A , alors le tiroir ne peut recouvrir à la fois, vers l'intérieur, les deux lumières ; on dit qu'il a des *recouvrements intérieurs négatifs* ou des *découverts* : sur le diamètre $T'T''$, le point I passe à droite du point I' .

Enfin la distance du point E à la position initiale t_1 du point t est l'*avance linéaire* correspondante du tiroir, ε . L'advance linéaire pour l'autre côté du piston, ε' , égale à $E't'_1$ (fig. 53), se déduit des dimensions qui viennent d'être indiquées.

On voit que les éléments essentiels, qui précisent les phases d'une distribution, se réduisent aux suivants :

Le rayon d'excentricité, r ;

L'angle d'advance, δ ;

La longueur de la barre d'excentrique, qui fixe le rayon de l'arc projetant Tt ;

La somme des recouvrements sur chacune des bandes du tiroir ;

La somme des deux recouvrements intérieurs ;

L'advance linéaire du tiroir à l'un des fonds de course du piston, ε ou ε' .

En ajoutant sur le tracé (fig. 53), à partir des quatre points fixes, les largeurs a et a' des lumières, on fait voir directe-

ment, dans chaque position du point mobile t , les dimensions des ouvertures.

Les phases de la distribution sont ainsi rapportées aux positions de la manivelle du tiroir, ou du rayon d'excentricité; on en déduit les positions correspondantes du piston, qu'il faut connaître pour se rendre compte du travail exercé par la vapeur. Sur les coupes perpendiculaires à l'arbre de la machine, la manivelle motrice se projette suivant un rayon OM (fig. 54), qui suit à distance angulaire constante,

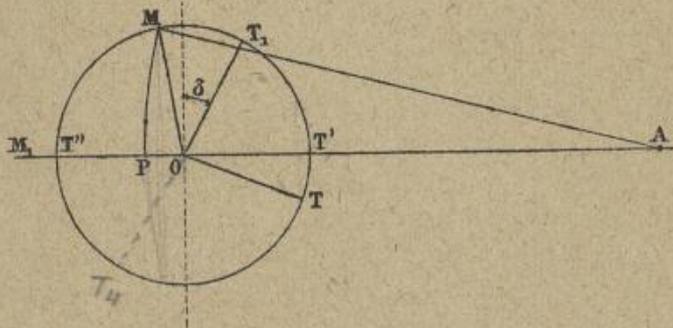


Fig. 54. — Mouvements corrélatifs du piston et du tiroir : la manivelle motrice OM suit la manivelle du tiroir, OT , à distance angulaire invariable, égale à $90^\circ + \delta$.

$90^\circ + \delta$, le rayon OT de l'excentrique. Le rayon R de la manivelle motrice est presque toujours plus grand que le rayon d'excentricité, r : mais, pour simplifier les tracés, on peut supposer ces rayons égaux, ce qui revient à un simple changement d'échelle pour l'un deux.

Pour une position quelconque de OT , il faudrait donc tracer OM tel que l'angle MOT fût égal à $90^\circ + \delta$, puis la bielle motrice MA . Le mouvement de A est le même que celui du piston. On peut encore transporter ce point A dans l'intérieur du cercle OM , comme on l'a fait pour le tiroir, en traçant l'arc de cercle MP de rayon AM , ou en *projetant circulairement* M sur $T'T''$ à l'aide d'un rayon égal à la longueur de la bielle motrice : ce rayon subira la même transformation d'échelle que la manivelle OM .

Il est évident qu'on simplifiera les tracés, si, au lieu de mener tous ces rayons OM à la distance angulaire $90^\circ + \delta$ en arrière de OT, on suppose qu'on fasse tourner de cet angle $90^\circ + \delta$ vers OT, une fois pour toutes, le système des rayons

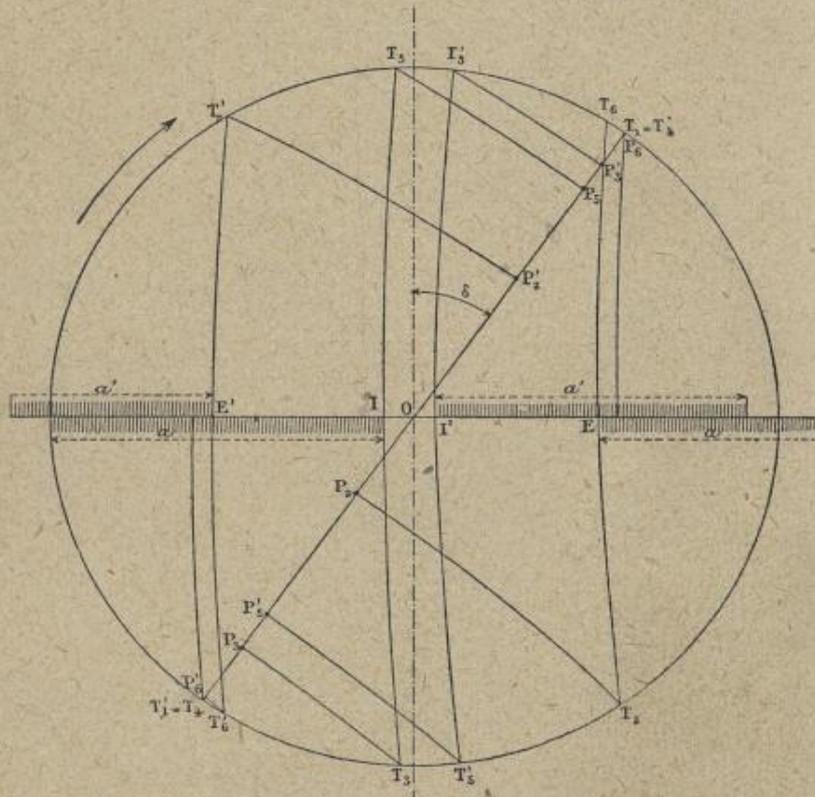


Fig. 55 — Tracé des positions correspondantes du tiroir et du piston au début des diverses phases de la distribution : le mouvement du tiroir se projette sur le diamètre horizontal, celui du piston sur le diamètre T_1T_1' .

OM, ainsi que le diamètre $T'T'$. OM se confond alors avec OT et doit se projeter sur le diamètre T_1T_1' (fig. 55); on n'aura plus qu'à mener l'arc de cercle projetant TP; le mouvement de P sur le diamètre T_1T_1' sera précisément celui du piston entre ses fonds de course.

Ces tracés permettent d'apprécier les diverses distribu-

tions que donne un tiroir conduit par un excentrique. Pour simplifier cette recherche, on supposera d'abord, comme cela existe souvent, que les avances linéaires, ε et ε' , sont nulles, ainsi que les recouvrements intérieurs ($L = A$). En choisissant l'angle δ d'avance, on fixe le diamètre T_1T_3 .

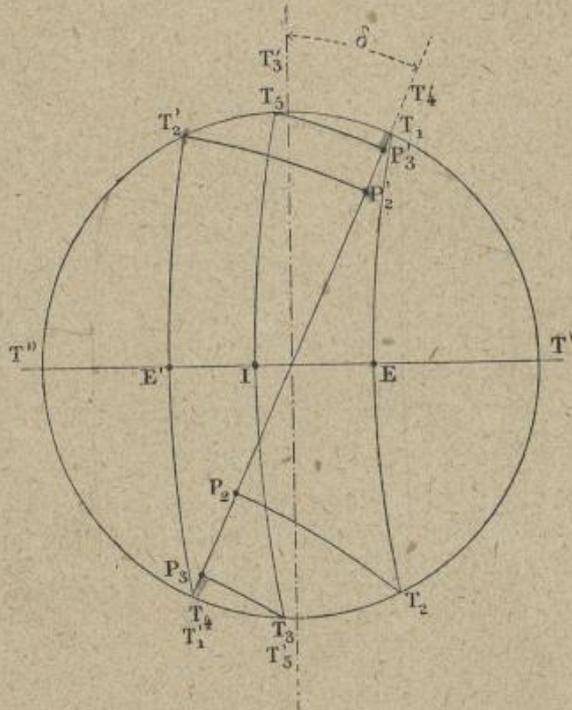


Fig. 56. — Distribution sans avances linéaires ni recouvrements intérieurs, avec parcours égaux du piston pendant les phases d'échappement anticipé et de compression ($P_3T_4 = P'_3T_1$).

Puisque ε et ε' sont nuls, les points fixes E et E' sur le diamètre $T''T'$, doivent coïncider (fig. 56) avec les projections circulaires de T_1 et de T_4 . Leur distance, c'est-à-dire la somme des recouvrements extérieurs du tiroir, augmente donc avec l'angle d'avance. D'après la seconde hypothèse, les points I et I' se confondent : on pourra les placer de manière que les longueurs P_3T_4 et P'_3T_1 soient égales : alors les périodes d'échappement anticipé et de compression

correspondent à des parcours égaux du piston, les points P_3 et P'_3 , P'_3 et P_3 se confondant.

Pendant les admissions sur les deux faces du piston, la manivelle parcourt deux angles égaux: mais l'égalité n'existe pas pour les parcours du piston: T_1P_2 est plus petit que $T'_1P'_2$, puisque la courbure des arcs projetants, T_2P_2 , $T'_2P'_2$, réduit le parcours T_1P_2 , correspondant à la face du piston qui regarde l'arbre et allonge le parcours, $T'_1P'_2$, pour l'autre face. Plus le rayon projetant est petit, ou plus le rapport des longueurs de la bielle et de la manivelle est faible, plus cette différence est marquée.

Par contre, l'ouverture de la lumière est un peu plus grande pour le côté qui a la plus courte admission, à cause de la courbure de l'arc projetant T_1E , T'_1E' : elle est ET' pour le côté qui regarde l'arbre, $E'T''$ pour l'autre. La courbure de cet arc est d'ailleurs habituellement bien moindre que celle de l'arc TP , la bielle du tiroir étant, par rapport à sa manivelle, plus longue que la bielle motrice. Dans les machines rapides, le laminage sera moindre du côté de la plus grande ouverture, qui correspond au plus faible parcours du piston, ce qui rapproche de l'égalité le travail moteur sur les deux faces du piston.

Plus l'angle d'avance δ sera grand, plus les parcours du piston, pendant l'admission, T_1P_2 et $T'_1P'_2$, diminueront; mais, par contre, les parcours P_3T_4 et $P'_3T'_4$ (ou P'_3T_1), pendant l'échappement anticipé et la compression, augmenteront; en outre, les ouvertures les plus grandes des lumières, ET' et $E'T''$, se restreindront. Aux courtes admissions correspondront de longs échappements anticipés et de longues compressions, et de faibles ouvertures des lumières pour l'entrée de la vapeur.

L'examen des effets des *avances linéaires* et des *recouvrements intérieurs* complète ce premier aperçu.

Les *avances linéaires* (ε et ε') allongent les périodes d'admission, qui ne cessent plus quand le point t repasse en t_1 et en t'_1 ; elles augmentent d'autant la plus grande ouverture

des lumières. Dans les machines rapides, elles assurent l'établissement de la pression de la chaudière dès le début de l'admission proprement dite. Inversement, elles peuvent remédier quelque peu à un excès de compression, en permettant à la vapeur trop comprimée de refluer dans la boîte à vapeur; le terme *admission anticipée*, qui indique une circulation géométrique de la distribution, n'est plus alors effectivement exact.

En donnant au tiroir, pour la lumière la plus voisine de l'arbre, une avance linéaire (ε) plus grande que pour l'autre lumière (ε'), on augmente le parcours T_1P_2 plus que $T'_1P'_2$, et on rapproche de l'égalité les deux parcours du piston pendant l'admission sur les deux faces.

Dans les petites machines, on se contente souvent du réglage à *avances linéaires égales*, facile à réaliser par tâtonnements: on modifie sur place la longueur de la tige du tiroir, jusqu'à ce qu'il donne effectivement, pour les deux côtés du cylindre, des avances égales, qu'on observe en faisant tourner l'arbre après avoir démonté le plateau de la boîte à vapeur.

L'effet des *recouvrements intérieurs* est évident sur les figures. A mesure que les longueurs EI et $E'I'$ augmentent, les périodes d'*échappement anticipé*, P_3T_4 et $P'_3T'_4$ (fig. 55) se réduisent, mais celles de *compression*, P_5P_6 et $P'_5P'_6$ deviennent plus longues. On peut, au contraire, diminuer les compressions, en rapprochant I de E et I' de E' , mais on augmente les parcours d'échappement anticipé.

Souvent il suffit de connaître approximativement les positions du tiroir et du piston: on peut alors négliger la courbure des arcs de cercle Tt et TP et les remplacer par des droites perpendiculaires à TT'' et à T_1T_4 . L'erreur ainsi commise, minime pour le tiroir, est presque toujours assez importante pour le piston.

On voit sur les épures que la longueur $l-a$, ou la somme des recouvrements d'une bande, portée en EI (fig. 55) a une influence capitale, mais que la largeur même de la lumière,

a , n'apparaît pas dans les tracés. Toutefois, l'épure montre que la plus grande ouverture est ET' (fig. 53), pour l'admission, IT'' pour l'échappement; IT'' est habituellement plus long de IT'' : la largeur a devra donc être au moins égale à ET' ; elle serait ainsi suffisante pour l'admission, mais trop petite pour l'échappement; d'autre part il est inutile de la prendre supérieure à IT'' . De même, la largeur de l'autre lumière, a' , sera comprise entre $E'T''$ et $I'T'$. On prend souvent une valeur commune de a et de a' un peu inférieure au maximum IT'' ou $I'T'$.

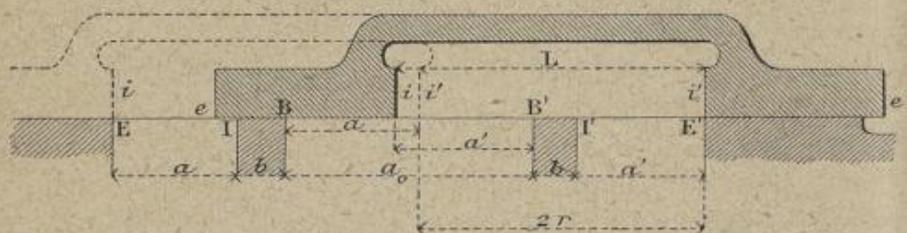


Fig. 57. — Détermination de la largeur a_0 de la lumière centrale : le tiroir, à fond de course vers la gauche, doit laisser une ouverture iB' égale à $I'E'$.

Pour déterminer la largeur a_0 de la lumière centrale, on remarque que lorsque le tiroir, à l'un de ses fonds de courses, ouvre en grand à l'échappement une des lumières extrêmes, il ne faut pas que la bande qui dessert l'autre lumière extrême (fig. 57) vienne recouvrir une fraction trop grande de la lumière centrale : il convient que la largeur du passage iB' soit toujours égale au moins à l'ouverture donnée sur $E'I'$, c'est-à-dire, généralement à la largeur même a' . De même le bord i' du tiroir ne doit pas trop approcher du bord B ; il convient qu'il laisse toujours un vide égal au moins à a .

De la figure 57, on déduit la relation :

$$a_0 = a + a' + 2r - L.$$

Les proportions des appareils sont toujours telles que le bord e ne puisse jamais dépasser le bord B , ce qui laisserait fuir la vapeur qui remplit la boîte à tiroir.

Dans tous ces tracés ne figure pas la hauteur h des lumières : on fixe cette hauteur de manière à obtenir une section suffisante de lumière $a \times h$: toutefois les convenances de construction ne permettent guère que cette hauteur dépasse le diamètre du cylindre.

Souvent on se contente de règles empiriques simples pour proportionner les orifices de passage ; on suppose le piston animé de sa *vitesse moyenne*, égale, en m par seconde, à $\frac{4 R n}{60}$,

R étant le rayon de la manivelle motrice, en mètres, et n le nombre de tours par minute : on en déduit la vitesse de la vapeur, comme s'il n'y avait aucune condensation ni aucune contraction de la veine fluide, au moment de la plus grande ouverture pour l'admission. On proportionne les ouvertures pour que cette vitesse fictive de la vapeur ait une valeur qu'on choisit, suivant la nature des machines, entre 25 et 60 m par seconde¹.

L'axe du mouvement du tiroir n'est pas toujours parallèle à l'axe du cylindre ; les deux axes peuvent faire un angle α . On ramène immédiatement cette disposition à celle qui a été étudiée, en supposant qu'on rétablisse le parallélisme en faisant tourner de l'angle α l'axe du tiroir avec sa manivelle, ainsi que la table des lumières. On détermine alors le véritable angle d'avance δ ; la manivelle du tiroir fait en réalité, avec la manivelle motrice, l'angle $90^\circ + \delta - \alpha$.

Un *balancier de renvoi* est parfois employé pour la commande d'un tiroir dont l'axe est parallèle à celui du cylindre, sans être dans le plan déterminé par cet axe et par l'axe de l'arbre. On peut alors considérer le tiroir comme retourné bout pour bout et l'excentrique doit être calé à 180° de sa position normale. Sur le diagramme fondamental (fig. 53) les points E et I sont alors les bords de la lumière la plus éloignée de l'arbre. Le balancier modifie quelque peu le mouvement du tiroir : il renverse l'effet des obliquités de la

1. Une ouverture égale à la n° partie de la surface du piston donne à la vapeur une vitesse égale à n fois celle du piston.

barre d'excentrique; avec l'égalité des avances linéaires sur les deux côtés, la plus grande ouverture des lumières est moindre du côté où la période d'admission correspond à un plus petit parcours du piston. Ces causes d'inégalité s'ajoutent au lieu de se compenser.

Pour se rendre compte des ressources qu'offre la distribution simple par tiroir, avec les différentes valeurs de l'avance angulaire, δ , on néglige d'abord les effets de l'obliquité des bielles, puis on considère un tiroir sans avances linéaires ni recouvrements intérieurs. Dans ce cas, avec un angle d'avance nul, l'admission a lieu pendant tout le parcours du piston : on a une distribution sans détente, usitée dans quelques appareils à vapeur, tels que les *servo-moteurs*, et appliquée aux moteurs hydrauliques. Avec une petite avance angulaire, jusqu'à 20° , l'admission dure encore pendant presque toute la course. Une avance de 20° à 40° donne des périodes d'admission pendant plus de la moitié de la course totale du piston. Avec des avances de 40° à 60° , l'admission diminue, mais les périodes d'échappement anticipé et de compression augmentent notablement. Elles deviennent excessives pour des avances supérieures à 60° .

Par l'addition de recouvrements intérieurs au tiroir, on augmente la détente aux dépens de l'échappement anticipé, mais on allonge aussi la période de compression. Le découvert intérieur produit des effets inverses.

Le seul examen de la longueur géométrique des phases ne donne pas une idée suffisante d'une distribution : les *laminages* de vapeur y ont une action fort importante. La fermeture graduelle de l'orifice ouvert à l'admission, et l'ouverture graduelle de l'orifice d'échappement, allongent en réalité la période de détente aux dépens de celles d'admission et d'échappement anticipé. Cela permet souvent d'obtenir une détente convenable de la vapeur avec des avances de 40° environ.

La fermeture graduelle de l'orifice d'échappement augmente la compression; mais il faut remarquer, que, si le

tiroir donne une assez grande période de compression, il entraîne aussi pour le cylindre de vastes espaces libres dans lesquels la vapeur se comprime.

C'est ainsi que les divers inconvénients qu'entraîne la distribution par excentrique et tiroir, tels que laminages de vapeur, grands espaces libres, forte compression, se combinent de manière à se compenser en partie.

Le tiroir est habituellement monté avec un déplacement possible dans une direction perpendiculaire à la table des lumières, déplacement qui le maintient collé sur la table malgré l'usure, et en permet au besoin le soulèvement. Il est souvent pris dans un cadre forgé avec la tige, ou il est traversé par la tige.

40. Formes diverses de tiroirs. — Certaines modifications des tiroirs n'entraînent aucun changement des phases de la distribution. En considérant un cylindre qui grandit suivant la loi de similitude géométrique, on voit que le volume croît plus vite que la section des lumières : si la vitesse de marche reste la même, cette section finit par devenir insuffisante. Quelquefois on applique contre le cylindre deux tiroirs, jouant chacun sur une table différente.

Avec le tiroir à doubles orifices (fig. 58), employé dans les anciennes machines marines, les sections de passage, pour l'admission et pour l'échappement, sont deux fois plus grandes. Les lumières extrêmes du cylindre sont dédoublées. Des quatre ouvertures rectangulaires ajoutées sur la face frottante du tiroir, les deux plus voisines de la cavité centrale sont en communication constante avec la boîte à vapeur : la largeur n'a pas besoin d'en être plus grande que la fraction de la lumière du cylindre découverte pour l'admission lorsque le tiroir est à fond de course ; les deux ouvertures extrêmes du tiroir sont en communication constante avec l'échappement, comme la cavité centrale. Quant à la largeur de la bande ménagée entre les lumières dédoublées du cylindre, elle est assez grande pour ne jamais être

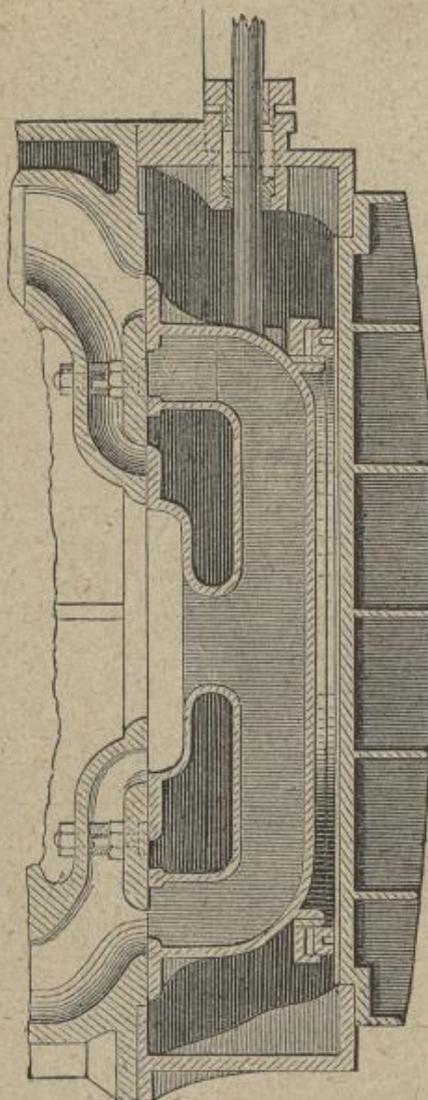


Fig. 58. — Tiroir à doubles orifices et à compensateur du « Great Eastern », construit en 1859. La vapeur de la chaudière occupe l'espace couvert de grosses hachures verticales. Le compensateur, porté par le tiroir et frottant sur le plateau de la boîte à vapeur, soustrait à la pression une partie de la surface du tiroir.

quittée par la barrette qui sépare les deux ouvertures voisines du tiroir.

On diminue le volume des espaces libres en faisant déboucher les lumières d'admission sur la table près des fonds du cylindre; mais ces lumières se trouvent alors éloignées l'une de l'autre, et le tiroir devrait avoir une longueur démesurée. On le coupe en deux, en pratiquant deux lumières d'échappement, et on a deux tiroirs solidaires au lieu d'un seul.

Le tiroir à canal ou tiroir de *Trick* (fig. 59) augmente les sections de passage pour l'admission de vapeur. Au moment de l'ouverture de l'admission ou du contact des bords E et e , le bord e_1 du canal coïncide avec le bord E_1 de la partie dressée de la table, bord dont la position rigoureuse, indifférente avec le tiroir ordinaire, devient ici obligatoire. Dès que le tiroir avance, la vapeur pénètre dans la lumière non seulement directement, mais aussi par

le canal : c'est comme si, au début de l'admission, le tiroir marchait deux fois plus vite. La même action se produit avant la fermeture de la lumière d'admission. L'échappement se fait sans modification. Le canal unique du tiroir fonctionne de même lors de l'ouverture de la lumière de droite : alors le bord e'_1 vient coïncider avec le bord E'_1 de la table.

Les dimensions sont déterminées de sorte que le canal ne vienne jamais communiquer avec la lumière d'échappe-

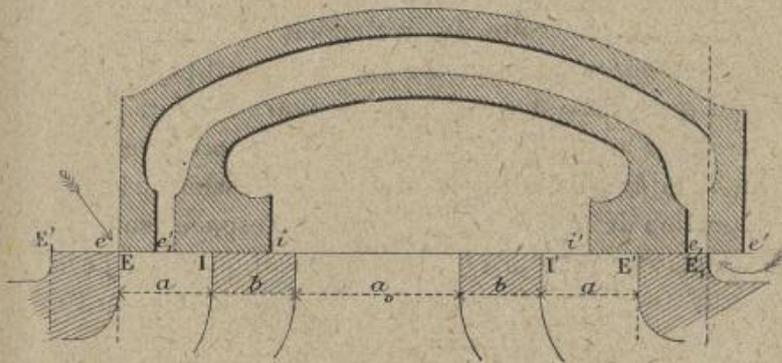


Fig. 39. — Tiroir de Trick, à canal, doublant les sections de passage au début et à la fin de l'admission.

ment, et ne mette pas en relation les deux côtés du cylindre, ce qui arriverait si les deux bouts du canal pouvaient communiquer en même temps avec les deux lumières extrêmes du cylindre¹. Ces conditions obligent à rapprocher beaucoup les ouvertures du canal des bords extérieurs des tiroirs et à les faire étroites.

Les tiroirs plans sont appuyés contre la table par une force souvent très grande, qui dépend de leur surface et des pressions de la vapeur. Cette force change un peu avec la position du tiroir, car l'étendue de la surface inférieure,

1. Dans certaines machines, au contraire, le canal établit pendant un instant cette communication, un peu avant le commencement de l'échappement anticipé sur une face du piston et de la compression sur l'autre face, afin de faire passer un peu de vapeur du côté où elle sera comprimée et d'augmenter ainsi la compression.

en contact avec la vapeur d'échappement, varie, ainsi que la pression dans la lumière du cylindre recouverte par le tiroir. Pour évaluer approximativement, et par excès, la charge du tiroir, on en multiplie la surface totale (produit de la longueur par la hauteur) par la différence des pressions à l'admission et à l'échappement. La surface de portée du tiroir sur la table doit être assez grande pour que la charge ne dépasse guère 30 kg par cm^2 .

De cette charge résulte un frottement, qui dépend de l'état des surfaces et la nature du graissage, et un travail qui disparaît par suite du frottement. Ce travail est non seulement perdu, mais encore nuisible, car il produit l'usure des surfaces frottantes et même des avaries par grippement.

On réduit le frottement au moyen du *compensateur*, tel que celui de la figure 58, qui soustrait à la pression de la vapeur une portion de la surface du tiroir. L'espace isolé par le compensateur est mis en communication avec l'échappement, au moyen d'un trou percé dans le dos du tiroir, ou mieux d'une ouverture dans le plateau et d'un tuyau muni d'un robinet, qui permet de supprimer cette communication en cas de fuites anormales.

La surface ainsi isolée doit être déterminée de telle sorte que, dans toutes les positions du tiroir, une force assez grande l'applique sur la table; si cette surface est trop étendue, le tiroir risque de se soulever par moments et de laisser fuir la vapeur. En général la portion soustraite à la pression ne dépasse pas les 5 à 6 dixièmes de la surface totale du tiroir.

Les types divers de compensateurs sont assez nombreux. En ouvrant complètement le dos du tiroir sous le compensateur, et en plaçant un conduit d'échappement en regard de cette ouverture, on supprime la lumière d'échappement, de forme assez compliquée, fondue avec le cylindre. Tel est le *tiroir à dos percé*.

C'est surtout dans les grandes machines que le compensateur est utile. Pour les petites machines, c'est une com-

plication qui augmente les frais de réparation, et l'appareil peut donner lieu à des fuites de vapeur.

On réduit aussi le frottement par l'emploi du *tiroir piston*

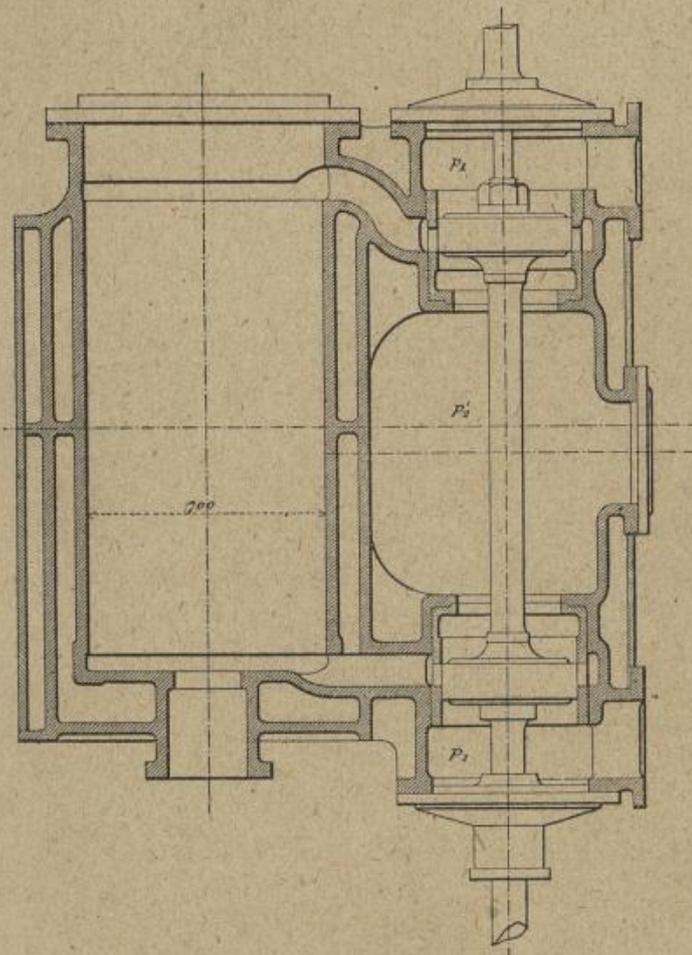


Fig. 60. — Cylindre avec tiroir cylindrique : admission de vapeur par les bords extérieurs en p_1 ; échappement par les bords intérieurs, en p_2 .

ou tiroir *cylindrique*, aujourd'hui presque toujours préféré au tiroir plan. La boîte à vapeur devient un cylindre où se meuvent deux pistons solidaires (fig. 60), conduits par la tige du tiroir. Ces pistons se déplacent sur deux lumières

annulaires. La vapeur est admise de part et d'autre de ces deux pistons ; l'échappement se fait entre eux. Ces pistons solidaires distribuent la vapeur exactement comme le tiroir ordinaire. Les lumières annulaires sont coupées par une série de barrettes pleines, qui maintiennent les pistons et empêchent qu'ils n'en accrochent les bords. Les pressions de la vapeur se compensent exactement sur ces pistons (à la surface de la tige de commande près).

Chaque piston est muni d'une bague fendue élastique, de longueur convenable, qui frotte contre la surface cylindrique

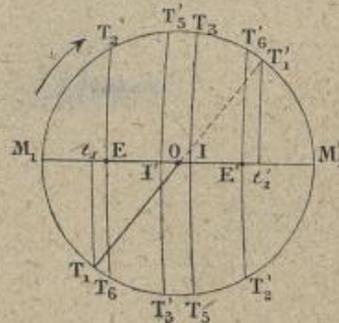


Fig. 61. — Epure de la distribution par tiroirs à bords intervertis.

Face du piston regardant l'arbre : $T_1 T_2$, parcours angulaire du centre de l'excentrique pendant l'admission ; — $T_2 T_3$, détente ; — $T_3 T_6$, échappement anticipé et proprement dit ; — $T_5 T_6$, compression ; — $T_6 T_1$, admission anticipée. Les mêmes lettres avec accent s'appliquent à la distribution sur l'autre face du piston.

alésée : un couvre-joint, rapporté dans l'intérieur de la bague, rend la coupure à peu près étanche. Souvent aussi on emploie, sur chaque piston, deux bagues élastiques étroites séparées par une bague non fendue qui en maintient l'écartement. De petits ressorts d'acier, placés à l'intérieur des bagues, tendent à les faire ouvrir.

On a même construit des pistons distributeurs sans bagues, montés à frottement doux dans leur cylindre : il paraît difficile que ces pièces soient étanches.

La pression de la vapeur dans les lumières des cylindres, quand'elles sont recouvertes par le tiroir cylindrique, tend à resserrer les bagues, c'est-à-dire à les écarter de la sur-

face sur laquelle elles doivent porter : des fuites en résulteraient. Pour éviter ce défaut, il est bon de disposer le tiroir pour que la vapeur à la pression supérieure puisse pénétrer à l'intérieur des bagues et les appuyer contre la table cylindrique, en ajoutant son action à celle des ressorts. Le tiroir ainsi disposé donne lieu à un certain frottement.

On peut intervertir les côtés d'admission et d'échappement des tiroirs cylindriques, en faisant pénétrer la vapeur d'admission entre les deux pistons, et faisant communiquer avec l'échappement les deux faces extérieures, à condition d'intervertir les recouvrements du tiroir et de

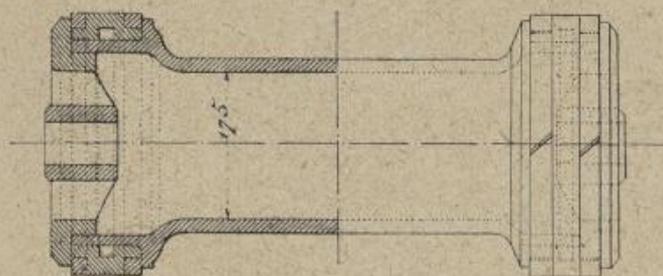


Fig. 62. — Tiroir cylindrique à tige creuse.

déplacer de 180° le rayon de l'excentrique qui le conduit. La figure 64 donne dans ce cas l'épure des positions du tiroir au début des phases de la distribution.

Quand l'admission se fait ainsi par les bords intérieurs du tiroir, un conduit unique amène la vapeur au milieu du cylindre. On évite d'ailleurs les doubles conduits d'admission ou d'échappement en réunissant par une tige creuse les deux pistons solidaires du tiroir cylindrique (fig. 63).

Dans les grandes machines pilon, il est utile d'équilibrer le poids du tiroir au moyen d'un piston, constamment poussé de bas en haut par la vapeur, le haut du cylindre où joue ce piston étant en communication avec l'échappement. Une différence sur les diamètres des deux pistons, qui composent un tiroir cylindrique, en équilibre plus simplement le poids. Comme en général ce tiroir doit pouvoir

être démonté par le haut, il faut alors que l'admission se fasse entre les deux pistons, c'est-à-dire par les bords intérieurs.

En exagérant la force qui tend à soulever constamment le tiroir, on réduit l'effort que doit transmettre le mécanisme de commande pendant la course ascendante : alors ce mécanisme travaille plus en tirant le tiroir qu'en le poussant, condition favorable pour un système formé de tiges longues et minces.

41. Coulisse de Stephenson. — Souvent il est nécessaire que la rotation d'une machine s'effectue à volonté dans un sens ou dans l'autre.

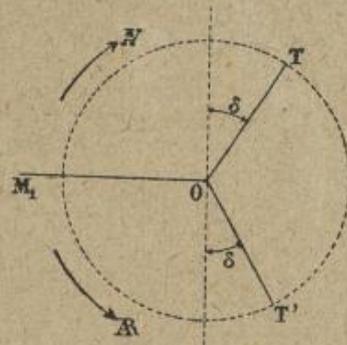


Fig. 63. — Excentriques pour marches avant et arrière.

Soit OT (fig. 63) le rayon d'excentricité qui donne une distribution convenable pour un sens de rotation, qu'on appellera *marche avant* : OT est calé à $90^\circ + \delta$ en avant de la manivelle motrice OM_1 , dans le sens de cette rotation. Soit OT' le même rayon d'excentricité, correspondant à un excentrique calé avec le même angle $90^\circ + \delta$ en arrière de OM_1 ; ce second excentrique

donnerait la même distribution pour une rotation en sens contraire de l'arbre ou *marche arrière*.

On pourra donc obtenir les deux marches en employant deux excentriques, chacun conduisant sa bielle ou sa barre, à condition de relier la tige du tiroir à l'une ou l'autre de ces barres. On a employé à cet effet des mécanismes assez compliqués, jusqu'à la *coulisse* de Stephenson, en 1842. Les deux extrémités des barres d'excentriques sont réunies par une pièce dite *coulisse*, dans laquelle peut glisser un *coulisseau*, articulé sur la tige du tiroir, et ce mécanisme permet d'amener l'extrémité de l'une ou l'autre barre devant la tige du tiroir qu'elle doit commander.

La figure 64 montre les pièces réduites à leurs axes ; OM_1 est la manivelle motrice ; OT , OT' sont les rayons des excentriques, de longueur r ; TC , $T'C'$, les barres d'excentrique, de longueur l ; CC' est la coulisse ; AB , la tige de

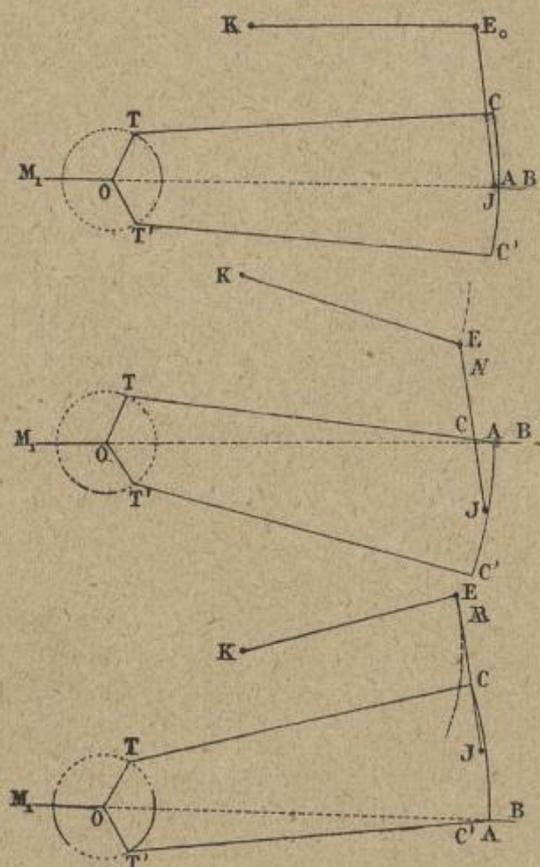


Fig. 64. — Coulisse de Stephenson à *barres droites* ; arbre de relevage dans ses positions moyenne et extrêmes.

tiroir, dont le point A est astreint à rester toujours sur la coulisse et sur la droite OB .

Réduit à ces éléments, le système serait déformable d'une infinité de manières : la coulisse est supportée par une *bielle de suspension* EJ , articulée en J , et à l'extrémité E d'un levier KE , fixé sur un arbre K dit *arbre de relevage*.

Quand on fait tourner cet arbre de manière à amener E en E_{AV} , le point C vient saisir le point A, et c'est l'excentrique OT qui conduit le tiroir. L'arbre de relevage est immobilisé dans cette position. Quand, au contraire, on fixe

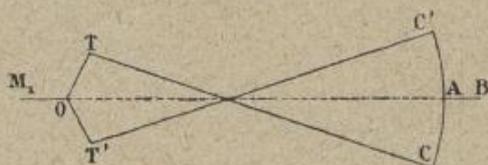


Fig. 65. — Coulisse de Stephenson à *barres croisées*.

KE dans la position E_{AB} , c'est l'excentrique OT' qui commande le tiroir.

Les barres d'excentriques sont parfois montées différemment (fig. 65), OT commandant l'extrémité inférieure de la coulisse, et OT' l'extrémité supérieure. Les barres sont dites alors *croisées* ou *fermées* : dans la première disposition,

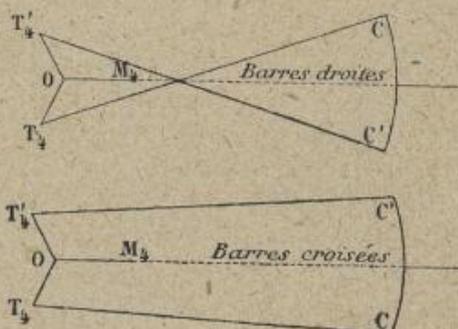


Fig. 66. — Barres après une rotation de 180° .

elles sont *droites* ou *ouvertes*. Ces expressions ne désignent exactement la situation des barres que dans la position initiale considérée, car, après un demi-tour, les barres droites se coupent, et les barres croisées ne se coupent plus (fig. 66).

La coulisse rend d'autres services que le simple changement du sens de la marche. Qu'on imagine le levier de l'arbre

de relevage fixé dans une position intermédiaire KE (fig. 67), le point A se trouve en un point intermédiaire de la coulisse et le tiroir prend un mouvement dont on n'aperçoit pas immédiatement la loi. Ce mouvement, étant d'ailleurs absolument défini, peut être déterminé, soit par calculs, soit par épures, pour une série de positions de KE comprises entre KE_{AV} et KE_{AB} . On reconnaît alors que le mouvement du tiroir est assimilable, par approximation, à celui que lui donnerait un certain excentrique de rayon et d'angle de calage variables pour chacune des positions de KE. C'est ce qu'on appelle,

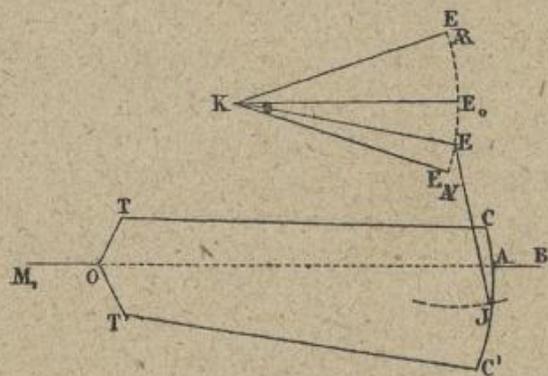


Fig. 67. — Tiroir conduit par un point intermédiaire de la coulisse.

dans chacune de ces positions, l'*excentrique fictif* du tiroir, qu'on pourrait substituer à la coulisse.

La règle de Guinotte donne les excentriques fictifs d'une coulisse : si le point A de la coulisse (fig. 68), menée par les deux excentriques OT et OT', conduit le tiroir, on obtient le rayon de l'excentrique fictif, OG, en joignant TT' et en prenant le point G qui divise TT' comme le point A divise la coulisse CC' : le rapport des longueurs $\frac{GT}{GT'}$ est égal au rapport $\frac{AC}{AC'}$. Les deux excentriques OT et OT' peuvent avoir des rayons et des angles de calage différents, et le point A peut être en dehors de CC', en A' par exemple : le rayon de l'excentrique fictif est alors OG'. En réalité, le

coulisseau oscille un peu sur la coulisse pendant la marche, de sorte que le point A représente une position moyenne ; et la règle ne donne pas le mouvement du tiroir avec une exactitude complète, mais avec une approximation suffisante pour étudier un avant-projet ou pour se rendre compte de la marche d'une machine.

L'épure exacte fait connaître le degré de précision de la méthode, qui dépend des divers éléments du mécanisme.

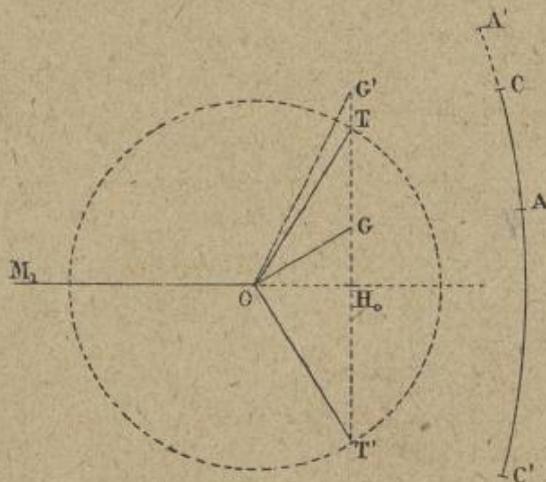


Fig. 68. — Excentriques fictifs de la coulisse de Stephenson : le point A de la coulisse donne à peu près la même distribution que l'excentrique fictif OG.

Pour la coulisse de Stephenson ordinaire, avec deux excentriques OT, OT', ayant même rayon et même angle de calage, la variation de l'excentrique fictif sera celle de OG, G allant de T à T' (fig. 68). On obtient ainsi une première représentation approximative de la distribution : en considérant la marche avant, par exemple, on voit l'angle d'ayance croître de δ à 90° : la période d'admission diminue depuis une certaine valeur initiale, tandis que les périodes d'échappement anticipé et de compression s'allongent.

On peut facilement pousser plus loin cette étude, sans arriver à la détermination exacte et complète de toute la

distribution, en considérant la position, particulièrement importante, du tiroir quand le piston est à fond de course : il laisse alors l'ouverture ϵ , dite *avance linéaire*. Cette avance ne doit jamais se transformer en *retard*.

Il suffit de considérer la machine arrêtée avec la manivelle à ses *points morts*, ou le piston à ses fonds de course, ce qui fait deux positions différentes à examiner, et de voir comment le tiroir se déplace quand on manœuvre l'arbre de relevage. L'ouverture de la lumière d'admission, pour chacune des deux positions, est alors ce qu'on appelle l'avance linéaire. Pour que les avances linéaires, correspondant aux deux fonds de course, soient à peu près égales entre elles, il faut prendre pour rayon de la coulisse la longueur l des barres d'excentriques. Quand les barres sont *droites*, les avances linéaires augmentent à mesure qu'on fait commander le tiroir par un point plus voisin du milieu de la coulisse. Les plus grandes avances correspondent à l'arbre de relevage au *point mort*, expression qu'il ne faut pas confondre avec celle qui s'applique aux manivelles motrices : l'avance linéaire est alors la plus grande ouverture de la lumière d'admission.

Au contraire, quand la coulisse est commandée par des barres *croisées*, les avances linéaires diminuent à mesure que l'arbre de relevage se rapproche de sa position moyenne.

Quand les barres sont droites, l'augmentation des avances linéaires, à mesure qu'on ramène l'arbre de relevage vers sa position moyenne, atténue la diminution de l'ouverture des lumières, qui résulte de la réduction de la course du tiroir. Dans les machines rapides, cette action peut être avantageuse.

Avec les barres croisées, au contraire, si l'avance linéaire est faible au début, quand l'arbre de relevage est à fond de course, elle disparaîtra quand l'arbre se rapprochera de sa position moyenne ; au point mort même, la lumière ne s'ouvrira plus du tout. Ce peut être un avantage si la

coulisse ne sert que d'appareil de changement de marche, le tiroir étant toujours conduit par l'une ou l'autre de ses extrémités : en mettant l'arbre de relevage à son point mort, on fera stopper la machine.

En tenant compte de cette variation des avances linéaires, on trace plus exactement les excentriques fictifs : avec les barres droites, les centres de ces excentriques forment l'arc d'une courbe telle que TG'_0T' (fig. 69) au lieu d'être placés sur la corde TT' ; la distance G'_0G_0 représente l'accroissement

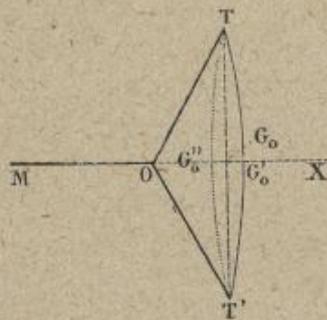


Fig. 69. — Centres des excentriques fictifs, avec barres droites (TG'_0T') et barres croisées (TG''_0T').

de l'avance linéaire pendant la manœuvre de l'arbre de relevage. Avec les barres croisées, les centres forment un arc tourné en sens inverse TG''_0T' .

La coulisse est suspendue à l'arbre de relevage par une bielle articulée en un point J, qui est placé soit au milieu de l'arc de la coulisse, soit à l'une des extrémités, en C ou C'. Ce point d'articulation décrit un arc de cercle autour de l'extré-

mité du levier de suspension, E. Il convient que cet arc se rapproche autant que possible de la parallèle à l'axe OX' du tiroir, afin de réduire au minimum la petite oscillation du coulisseau A, dans la coulisse.

Les figures 70 à 72 représentent quelques-unes des formes adoptées pour l'exécution des coulisses de Stephenson. Celle qui se rapproche exactement des tracés géométriques est la coulisse à deux flasques (fig. 70), reliées par des entretoises à leurs extrémités. Les axes d'articulation sont formés par des tourillons forgés avec les flasques ; sur les tourillons extrêmes s'articulent les fourches qui terminent les barres, et, sur ceux du milieu, la bielle de suspension, dédoublée de manière à laisser passer les fourches de la barre supérieure.

L'extrémité de la tige du tiroir porte deux tourillons dont l'axe correspond au point A de la figure 64; sur ces tourillons s'engagent deux coulisseaux, disposés pour glisser dans les flasques de la coulisse. On peut ainsi faire occu-

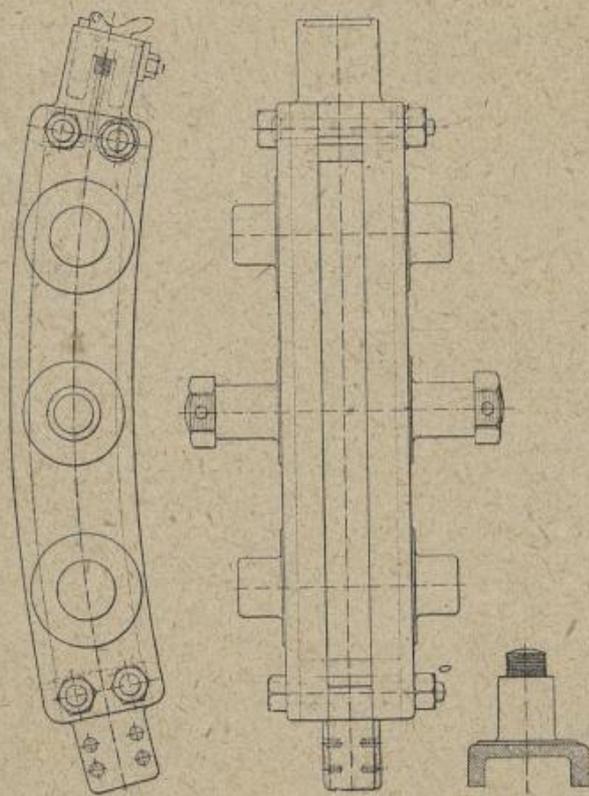


Fig. 70. — Coulisse de Stephenson à flasques, pour locomotive : élévations; coupe transversale d'une des flasques. L'entretoise supérieure porte un godet graisseur, et l'entretoise inférieure un guide.

per au point A toutes les positions depuis l'articulation C de l'une des barres jusqu'à l'articulation C' de l'autre.

Au lieu d'être creusées à l'intérieur pour recevoir le coulisseau, les deux flasques peuvent être à section rectangulaire, et le coulisseau porte des rebords extérieurs qui embrassent les flasques.

les axes d'articulation des barres. Les différences secondaires de distribution qui en résultent paraissent sur les épreuves exactes.

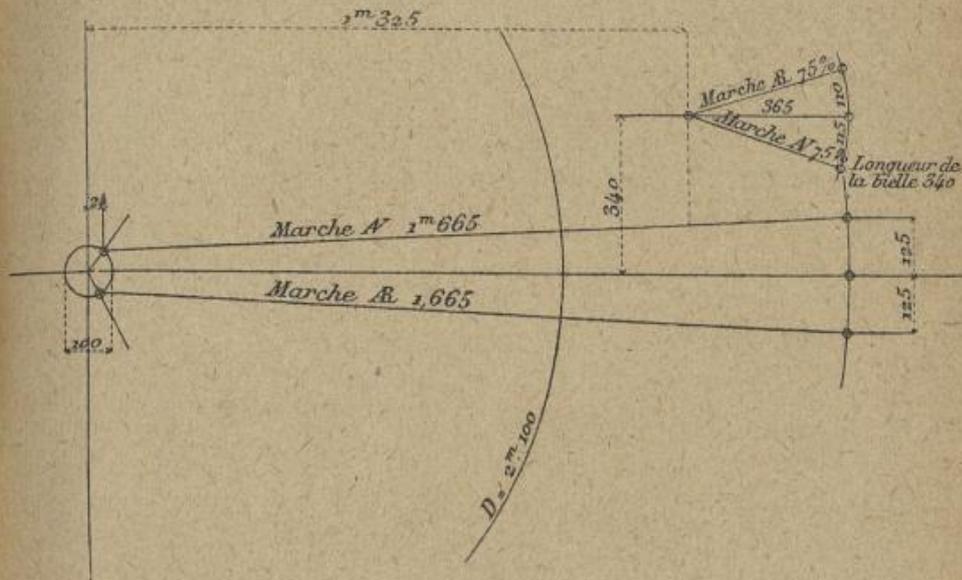


Fig. 73. — Distribution de locomotive par coulisse de Stephenson.

Quand un seul excentrique commande le tiroir, toutes les pièces de la distribution peuvent avoir un plan de symétrie commun, perpendiculaire à l'arbre moteur. Il n'en est plus de même quand deux excentriques mènent les extrémités d'une coulisse : ces deux excentriques sont placés de part et d'autre du plan de symétrie de la coulisse. Il en résulte une certaine obliquité d'efforts, qui augmente un peu les frottements des articulations. Quelquefois on rétablit la symétrie en divisant l'un des excentriques en deux moitiés encadrant l'autre excentrique.

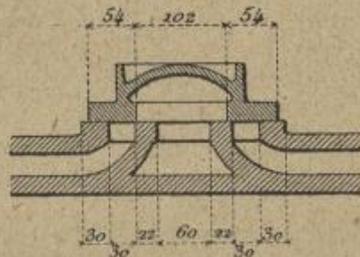


Fig. 74. — Tiroir et lumières de la distribution commandée par la coulisse de la figure 73.

SENS DE LA MARCHÉ	AVANCES LINÉAIRES		OUVERTURES MAXIMA DES LUMIÈRES A L'ADMISSION		ADMISSION		DÉTENTE		ÉCHAPPE- MENT ANTICIPÉ		EGRAIPPE- MENT		COMPRESSION		ADMISSION ANTICIPÉE	
	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV
Avant . . .	mm 1		mm 24	mm 22	p. 100 73	p. 100 77	p. 100 19	p. 100 17	p. 100 8	p. 100 6	p. 100 93	p. 100 94	p. 100 67/8	p. 100 87/8	p. 100 1/8	p. 100 4/8
Arrière . . .	3	2	23	21	72	75	20	18	8	7	92	94	72/3	83/4	4/3	4/4
Avant . . .	3	2 1/2	13	12	54	57 1/2	31	30 1/2	15	12	87	84	12 1/2	13 1/3	4/2	2/3
Arrière . . .	4 1/2	3	12 1/2	12	51	53	33	31	16	14	83	82 1/2	14 1/3	17	2/3	1/2
Avant . . .	4	3	8	7	35	37	41	44	24	19	78	73	21 1/4	26	3/4	1
Arrière . . .	5	3 1/2	8	7	32 1/2	35	42 1/2	42	25	23	75	71	23 1/2	28	1 1/2	1
Avant . . .	5	4	5 1/2	4 1/2	20	20	45	50	35	30	66	61	32	36 1/2	2	2 1/2
Arrière . . .	4 1/2	3 1/2	5 1/2	4 1/2	19	21	46	48	35	31	66	61	31	36	3	3
Point mort.	5	4	5	4	41	40	44	47	48	43	54	48	40	45	6	7

A titre d'exemple, les figures 73 et 74 représentent une distribution de locomotive par coulisse de Stephenson. Le tableau page 128 en donne les phases, sur les côtés avant (AV), le plus éloigné de l'essieu, et (AR) du piston, pour neuf positions de l'arbre de relevage. Les phases sont définies par les parcours du piston, en centièmes de sa course.

42. **Systèmes divers de coulisses.** — La *coulisse de Gooch*, ou *coulisse retournée* (fig. 75), est commandée, comme celle de Stephenson, par deux *barres TC et T'C'*; elle est suspen-

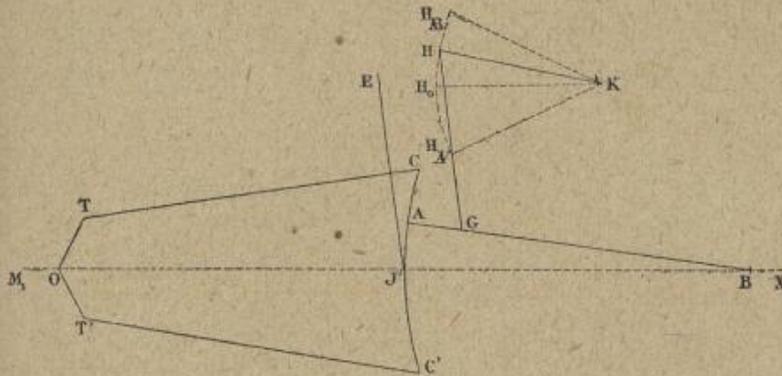


Fig. 75. — Schéma du mécanisme de distribution par coulisse de Gooch.

OT, OT' rayons des excentriques; — CC' coulisse suspendue au point fixe E;
AB, bielle du tiroir, suspendue au levier HK de l'arbre de relevage K.

due par une bielle JE, oscillant autour d'un axe E invariable. La tige du tiroir est entraînée par une bielle AB, suspendue par la bielle GH au levier HK de l'arbre de relevage. Suivant la position donnée à cet arbre de relevage, l'extrémité A de cette bielle est commandée par l'un des bouts C, C', ou par un point intermédiaire quelconque de la coulisse. Le tiroir est ainsi conduit soit par l'un des excentriques, OT, OT', soit par un excentrique fictif dont le centre est sur la droite TT'.

Le rayon de la coulisse est la longueur même de la bielle AB : dans la position de la figure 75, c'est-à-dire quand la manivelle motrice est au point mort, on peut manœuvrer

l'arbre de relevage sans déplacer le tiroir, qui donne à ce moment *l'avance linéaire*. Il en est de même quand la manivelle motrice est à son autre point mort. La coulisse de Gooch donne des avances linéaires constantes pour toutes

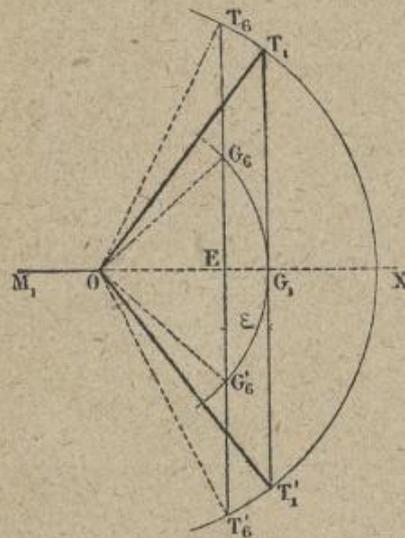


Fig. 76. — Variation de la période d'admission anticipée, avec avance linéaire constante. Le parcours angulaire pendant cette période varie de $T_6 T_1$ à $G_6 G_1$ quand le centre de l'excentrique fictif passe de T_1 à G_1 .

les positions de l'arbre de relevage, du moins quand elle est montée régulièrement, de telle sorte que l'arc CC' se place normalement à l'axe OX , quand la manivelle motrice passe par ses points morts.

La constance des avances linéaires n'entraîne pas celle des périodes d'admission anticipée, qui sont d'autant plus longues que le coulisseau est plus près du milieu de la coulisse : les centres des excentriques fictifs sont rangés sur la corde $T_1 T_1'$ (fig. 76), et l'admission anticipée se produit pendant le parcours d'un arc de projection constante EG_1 , c'est-à-dire pendant le

parcours d'un angle d'autant plus grand que le rayon, qui varie de OT_1 à OG_1 , est plus petit.

La coulisse d'Allan (fig. 77) est droite; elle est suspendue à un levier KH de l'arbre de relevage, dont un second levier KH' porte la bielle AB du tiroir : quand on fait tourner cet arbre, on élève la coulisse et on abaisse la bielle, et vice versa. Les avances linéaires ne sont pas constantes.

Les mécanismes de Gooch et d'Allan demandent une longueur plus grande que celui de Stephenson, pour être montés dans des conditions analogues, puisqu'il faut loger en plus la bielle AB .

moteur par la bielle ME. Enfin le point F, guidé en ligne droite suivant X'Y', conduit le tiroir.

Pour déterminer les excentriques fictifs équivalents à ce mécanisme, il faut considérer le levier EF comme une cou-

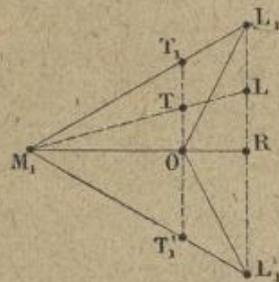


Fig. 79. — Excentriques fictifs de la distribution Walschaerts.

lisse droite, dont l'extrémité E est conduite par la manivelle motrice même, OM_1 (fig. 78) ; quant à la coulisse CC' , qui oscille autour de l'axe l , ce n'est qu'un balancier qui réduit plus ou moins l'amplitude du mouvement donné par l'excentrique OT_1 et en renverse le sens quand le point A se trouve entre l et C' . Cette coulisse CC' équivaut donc à un excentrique perpendiculaire à OM_1 et dont le rayon varie de OT_1 à OT'_1 (fig. 79). Soit OT cet excentrique équivalent, pour une position quelconque de l'arbre de relevage ; d'après la règle générale, on divise M_1T par un point L placé comme le point F, qui mène le tiroir, sur la coulisse droite EB . L'excentrique fictif a pour rayon OL . Tous les points L ainsi construits se rangent sur la ligne droite $L_1L'_1$.

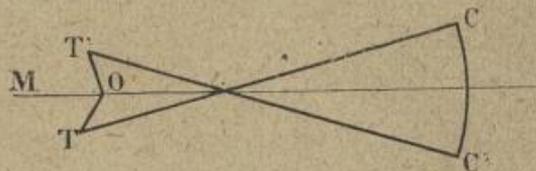


Fig. 80. — Coulisse de Stephenson pour tiroir à admission par les bords intérieurs : montage à barres droites, donnant la plus grande avance linéaire au milieu de la coulisse.

Les avances linéaires de la distribution Walschaerts sont constantes, aux divers crans de marche, parce que le centre de l'arc CC' de la coulisse se trouve précisément en B, quand la manivelle motrice est à l'un de ses deux points morts : on peut alors manœuvrer l'arbre de relevage sans déplacer le tiroir, qui, dans cette position, donne l'avance linéaire.

Le mécanisme de Walschaerts est très fréquemment employé sur les locomotives¹.

Lorsqu'une coulisse de Stephenson, de Gooch ou d'Allan doit conduire un tiroir cylindrique avec admission par les bords intérieurs, les deux excentriques doivent être décalés, chacun de 180° . La figure 80 représente dans ce cas le montage à barres droites de la coulisse de Stephenson.

Avec la coulisse Walschaerts, le calage de l'excentrique n'a pas besoin d'être modifié pour l'admission par les bords intérieurs du tiroir ; les zones de marche avant et de marche

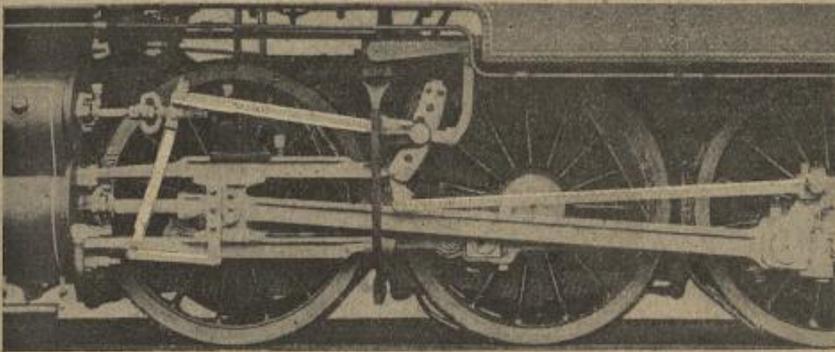


Fig. 81. — Distribution Walschaerts avec tiroir admettant par les bords intérieurs.

arrière s'intervertissent sur la coulisse. Mais le point F (sur la fig. 78) du levier d'avance, qui commande le tiroir, doit être placé entre B et E et non au delà de B (fig. 81).

Dans la *distribution Marshall*, la tige du tiroir, BX' (fig. 82), est conduite par un point A d'une barre menée par l'excentrique OT, calé dans la direction même de la manivelle motrice OM ; le point C de cette barre est astreint à décrire un arc de cercle autour d'un centre H, qui peut occuper diverses positions sur l'arc H_A, H_0, H^{AB} : le point H est l'extrémité du levier de l'arbre de relevage, dont l'axe est en K.

Pour trouver les excentriques fictifs, on prend (fig. 83),

1. La *Revue de mécanique*, 1902, 1^{er} sem., p. 105, donne une intéressante « histoire de la distribution Walschaerts », par M. Boulvin.

sur la perpendiculaire au rayon de l'excentrique OT des longueurs OD, OD' égales à la demi-course la plus grande du point C projeté sur une parallèle à OX; il suffit alors de diviser TD prolongé de telle sorte que $\frac{LT}{DT} = \frac{AT_1}{CT_1}$. Le centre de l'excentrique fictif se déplacera sur LL'.

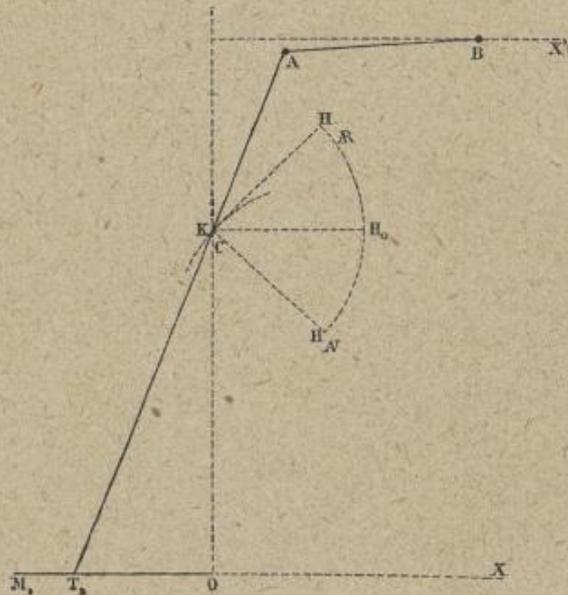


Fig. 82. — Distribution Marshall.

OT, rayon de l'excentrique; — TCA, barre dont le point C décrit un arc de cercle autour de l'extrémité H du levier HK de l'arbre de relevage K, et dont le point A conduit le tiroir.

La distribution de Marshall donne encore des avances linéaires constantes aux divers crans de marche, pourvu que le point C, articulé sur la bielle de suspension HC, vienne se projeter sur l'axe K de l'arbre de relevage quand la manivelle motrice passe à ses points morts. Alors la manœuvre de l'arbre ne déplace pas le tiroir.

La distribution Marshall se prête à des variantes. Le point A, qui conduit le tiroir, peut être placé entre le centre de l'excentrique T, et le point C guidé par l'arbre de relevage;

l'excentrique est alors à l'opposé de la manivelle motrice (fig. 84).

Si l'admission se fait par les bords intérieurs d'un tiroir cylindrique, la poulie d'excentrique reste calée suivant la manivelle motrice quand le point A se trouve entre les deux points guidés T et C, ou, au contraire, est à l'opposé de la manivelle quand A est placé sur le prolongement de TC.

La barre de la distribution Marshall n'agit pas en tirant ou en poussant le tiroir suivant sa longueur, mais est soumise à des efforts transversaux.

La forme est établie en conséquence, pour que ces efforts ne la fassent pas fléchir.

La distribution Joy (fig. 85) n'a pas d'excentrique. Un levier GH est articulé en un point G de la bielle motrice, point qui décrit une courbe voisine d'une ellipse, et à l'extrémité H d'une tige HF oscillant autour d'un point fixe F. Le point H parcourt un arc de cercle voisin d'une droite perpendiculaire à l'axe OX du cylindre. Un second levier EPK est articulé en un point E de GH; le point P de ce levier est astreint à se mouvoir dans une coulisse fixe CC', et le point K conduit la bielle KB du tiroir. La coulisse fixe CC', peut se déplacer à volonté et occuper toutes les positions entre C_{AV} C'_{AV} , correspondant à la marche avant, et C_{AR} C'_{AR} , correspondant à la marche arrière, en pivotant autour de son milieu J.

Le point P du levier venant se placer au milieu J de la coulisse dans la position de la figure, quand la manivelle motrice est à ses points morts, on peut alors déplacer la coulisse sans que le tiroir bouge : les avances linéaires sont constantes.

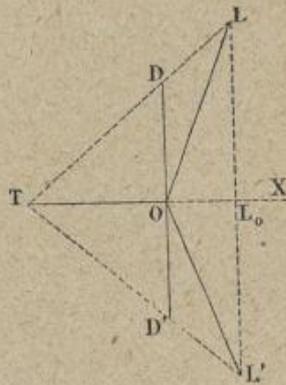


Fig. 83. — Excentriques fictifs de la distribution Marshall : les centres de ces excentriques se rangent sur la droite LL'.

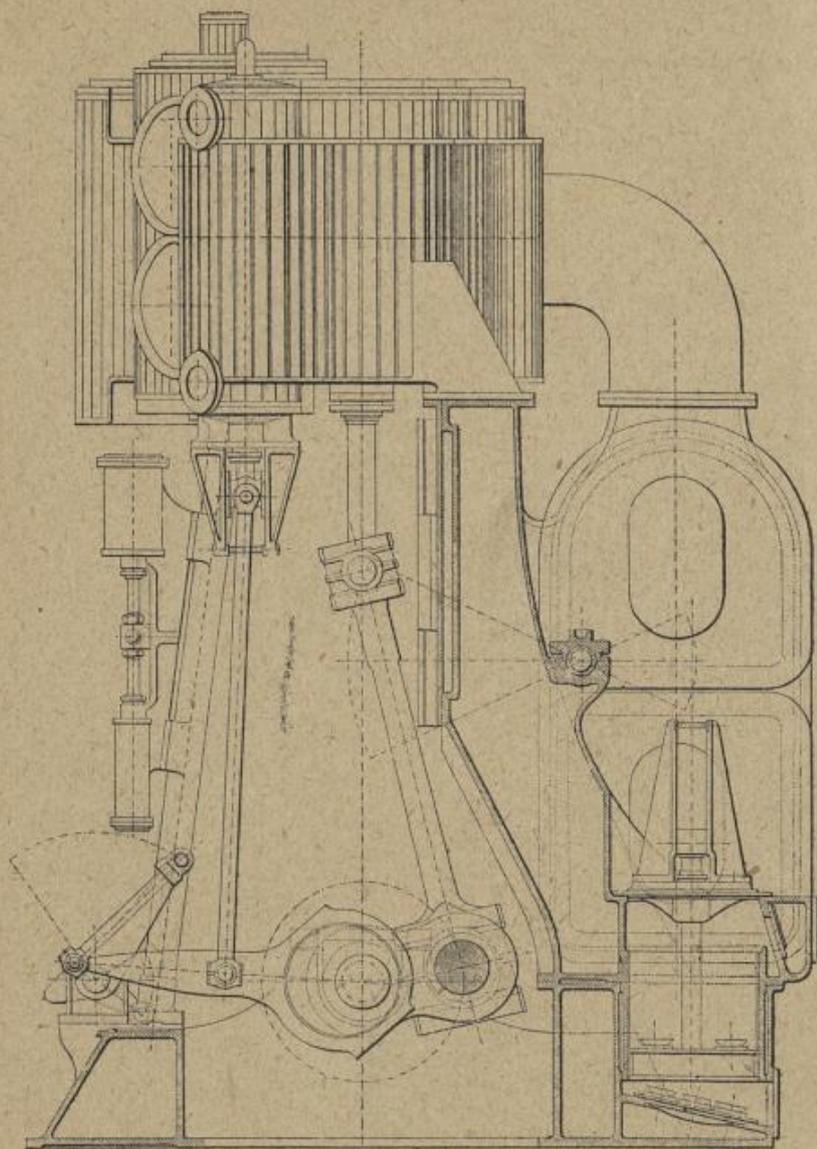


Fig. 84. — Distribution Marshall : excentrique calé à peu près à l'opposé de la manivelle motrice; l'extrémité de la barre (à gauche) oscille autour d'un centre qu'on déplace par la manœuvre de l'arbre de relevage.

Bien d'autres appareils pour changement de marche se

rapprochent des types qui viennent d'être décrits. D'une manière générale, on peut dire que les divers systèmes de

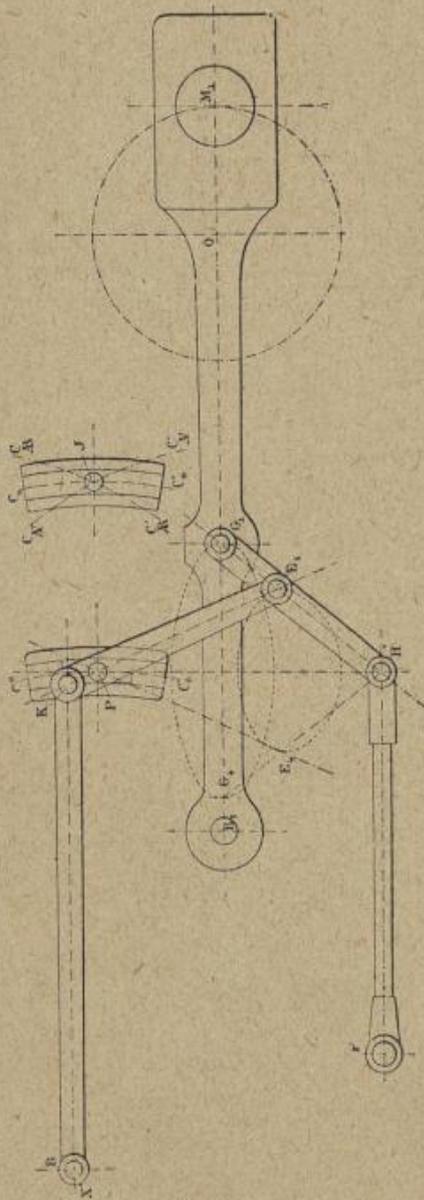


Fig. 85. — Distribution Joy : FH, levier oscillant autour du point fixe F ; HEG, levier articulé en H, et en G sur la bielle motrice ; EPK, levier articulé en E, et portant en P le coulisseau qui glisse dans la coulisse ; $C_{AV}C'_{AV}$, $C_{AB}C'_{AB}$, positions extrêmes de la coulisse, qu'on peut faire tourner avec l'arbre de relevage J, et fixer dans une position intermédiaire quelconque ; K B, bielle du tiroir. Les excentriques fictifs se déterminent comme pour la distribution Marshall ; l'extrémité E du levier EPK décrit une courbe voisine d'un cercle, dont le rayon est à chaque instant parallèle à la manivelle motrice, comme le rayon de l'excentrique OT de la distribution Marshall.

coulisses réalisent des distributions à peu près équivalentes : les différences les plus importantes résultent de la

constance ou de la variation des avances linéaires. Ce sont surtout les facilités de l'installation sur chaque machine qui font choisir un système. Par exemple, lorsque la place est suffisante pour que les tiroirs se logent commodément à côté des cylindres, de telle sorte que l'axe du tiroir se trouve dans le plan formé par l'axe du cylindre et l'axe de l'arbre moteur, les distributions de Stephenson, de Gooch, d'Allan conviennent. Au contraire, si le tiroir doit être monté au-dessus ou au-dessous du cylindre d'une machine horizontale, ou latéralement dans une machine verticale, c'est-à-dire quand l'axe du tiroir et l'axe du cylindre sont dans un plan perpendiculaire ou oblique sur l'axe de l'arbre moteur, les distributions de Walschaerts, Marshall, Joy sont, en général, plus commodes.

On demande aux coulisses deux genres de service différents : ou bien la coulisse n'est qu'un simple appareil de changement de marche : l'arbre de relevage est toujours placé dans l'une ou l'autre de ses positions extrêmes; ou bien la coulisse sert en outre à faire varier la distribution de la vapeur et fonctionne dans ses positions intermédiaires.

43. **Commande de l'arbre de relevage.** — On manœuvre l'arbre de relevage des petites machines à l'aide d'un levier, qu'un verrou, pénétrant dans les encoches d'un secteur denté, permet d'arrêter dans une série de positions. Souvent on préfère une vis que fait tourner un volant de manœuvre; cette vis déplace un écrou qui pousse ou qui tire une tringle articulée à l'extrémité d'un levier calé sur l'arbre de relevage. C'est une disposition fréquemment adoptée pour les locomotives.

Quand l'effort à produire dépasse une certaine valeur, la manœuvre à bras devient difficile ou impossible. Une machine auxiliaire commande alors les mécanismes de relevage. Un piston, pressé par la vapeur dans l'un ou l'autre sens, convient pour la manœuvre de la tringle, qui fait tourner l'arbre de relevage; pour régler l'action de ce piston, on

conserve la vis manœuvrée à la main, dans l'appareil à contre-poids de vapeur (fig. 86) : le pas de la vis est assez faible pour qu'elle ne soit pas réversible, de telle sorte qu'il est nécessaire de la faire tourner à la main pour que le piston se déplace.

On conjugue aussi le piston moteur de l'arbre de relevage avec un frein à huile, formé d'un piston qui se meut dans un

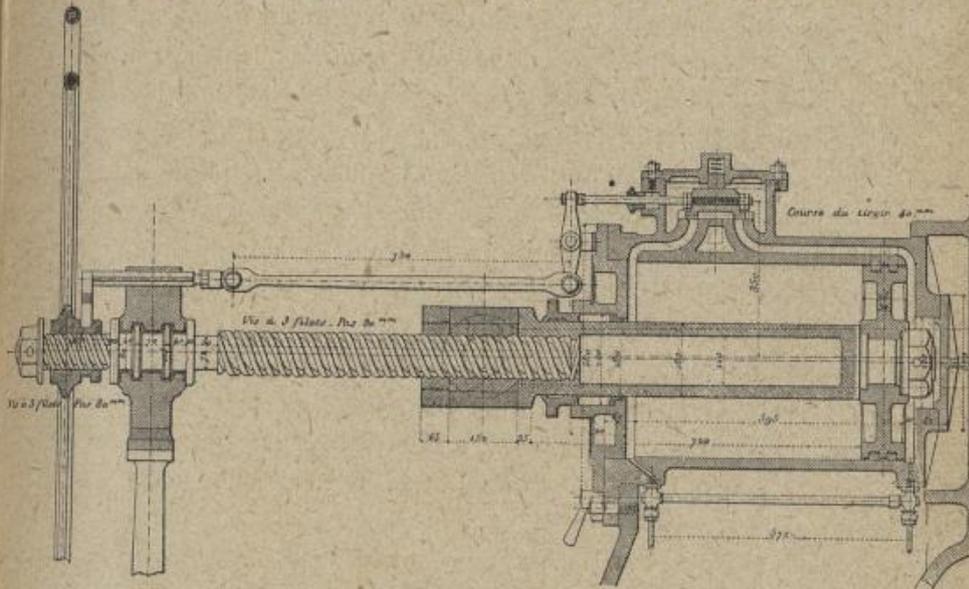


Fig. 86. — Changement de marche à contre-poids de vapeur, pour machine marine, construite en 1879 : un petit déplacement préliminaire du volant de manœuvre ouvre l'admission sur une des faces du piston, qui déplace l'arbre de relevage quand on fait tourner la vis.

cylindre rempli d'huile, dont les deux côtés peuvent communiquer par un tuyau muni d'un robinet. Tant que ce robinet est fermé, le mouvement est impossible : avec une faible ouverture du robinet, le mouvement est lent et on reste facilement maître de l'appareil.

On fait aussi usage d'un *servo-moteur*, dont le piston poussé par la vapeur reproduit exactement le déplacement donné par la main à un levier de manœuvre. La vapeur est distribuée dans le cylindre par un tiroir sans recouvrements.

En déplaçant le levier de manœuvre à partir de sa position moyenne, on admet la vapeur dans le cylindre : le piston se met en marche, mais alors il ramène le tiroir vers sa position moyenne, qu'il atteint quand la course du piston correspond à celle du levier de manœuvre. L'appareil s'arrête alors.

44. **Mécanismes divers de changement de marche.** — Les distributions, obtenues à l'aide des mécanismes de changement de marche, se rapprochent de celles que donnerait un *excentrique fictif*, de calage et de rayon variables. En réalisant cet excentrique fictif, on obtient les mêmes effets.

Le centre de l'*excentrique sphérique Tripier* peut se déplacer suivant TT' (fig. 87), parce que la poulie est articulée en K sur un axe porté par l'arbre moteur. Dans ce déplacement, le centre parcourt, au lieu d'une ligne droite, un arc de cercle, TT', ce qui a obligé à donner la forme sphérique à l'extérieur de la poulie et au collier d'excentrique.

L'excentrique mobile porte une seconde articulation, en D, avec une bielle, qui le rattache à un manchon S pouvant glisser le long de l'arbre. Il est facile de déplacer ce manchon et de l'arrêter dans une position quelconque; sa surface extérieure présente deux joues, entre lesquelles est monté un second manchon S' qui l'entoure. Ce second manchon, fileté sur sa face extérieure, ne participe pas à la rotation de l'arbre de la machine, et on peut lui imprimer à volonté un déplacement longitudinal en le faisant tourner dans un écrou fixe E, à l'aide du volant V¹.

La *transmission hydraulique* des pressions donne un moyen simple en principe de réaliser les excentriques fictifs d'une coulisse : la poulie d'excentrique est fixée sur un piston, qui joue dans un cylindre fixé à l'arbre moteur (ou inversement, c'est le cylindre qui se déplace sur le piston); la

¹L'emploi du manchon coulissant sur un arbre, comme intermédiaire entre des pièces tournantes et d'autres à déplacement rectiligne, est fréquent. Voir notamment § 57.

course est égale et parallèle à la droite (TT') que doit parcourir le centre de la poulie. L'appareil de manœuvre consiste en un cylindre pareil avec piston; deux conduits réunissent deux à deux les extrémités des cylindres. Tout l'appareil étant plein d'un liquide, un piston entraîne l'autre. Pour qu'il ne se produise pas de jeu dans la transmission, il faut que le fluide remplisse toujours complètement les cylindres et les conduits. Mais si le principe est simple, il est assez difficile d'établir la double communication étanche entre le cylindre mobile, qui tourne avec l'arbre de la machine, et le cylindre fixe.

45. Distributions à deux tiroirs. — Avec un tiroir conduit par un excentrique, ou par une coulisse, qui donne à peu près

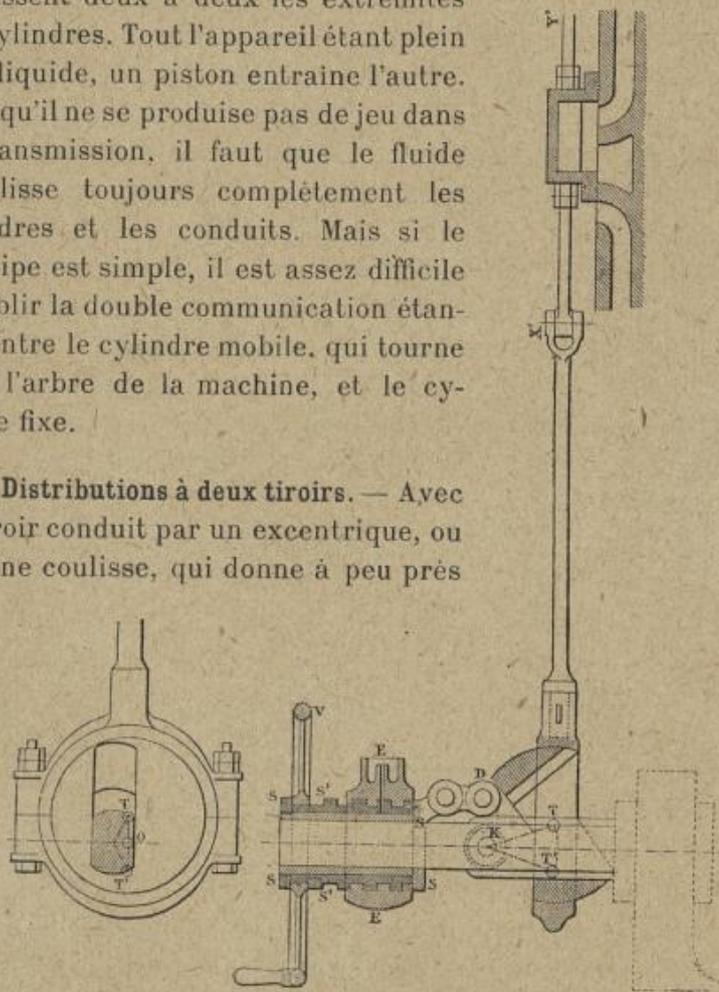


Fig. 87. — Excentrique sphérique Tripier.

la même distribution que des excentriques fictifs, on ne peut obtenir une courte période d'admission qu'en augmentant beaucoup les périodes d'échappement anticipé et de compression. Les distributions à deux tiroirs combinent

une grande détente et une compression modérée; elles sont généralement disposées pour que cette détente soit variable à volonté.

Dans le système de *Gonzenbach*, un tiroir de distribution ordinaire (fig. 88) se meut dans une boîte à vapeur aussi petite que possible. La vapeur pénètre dans cette boîte par un orifice, que peut fermer, à un moment convenable, la *plaque*, la *glissière*, le *taquet*, la *tuile* ou le *tiroir de détente*, pièce conduite par un excentrique spécial. La détente commence au moment où cette fermeture se produit, mais

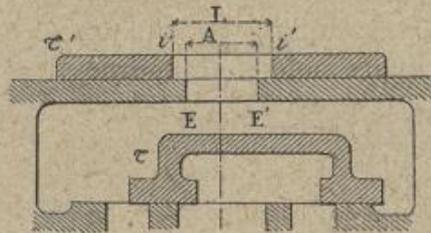


Fig. 88. — Coupe schématique de la distribution Gonzenbach : C, tiroir principal; C', tiroir de détente venant fermer l'entrée de vapeur EE' dans la boîte du tiroir principal.

l'espace libre, comprenant la boîte à vapeur du tiroir principal, est à ce moment agrandi.

Pour que l'appareil fonctionne convenablement, l'ouverture de la boîte à vapeur doit être déjà démasquée quand le tiroir principal découvre la lumière d'admission; une fois cette ouverture refermée, elle ne doit plus se rouvrir avant que ce tiroir n'ait recouvert la lumière d'admission; enfin la section de passage, offerte à la vapeur par l'ouverture de la boîte, doit être, autant que possible, supérieure à la section d'entrée dans la lumière donnée par le tiroir principal, pendant la plus grande partie de l'admission.

On voit sur la coupe schématique de la glissière (fig. 88) que l'admission est interrompue par le contact des bords *i* et *E'* et *i'* et *E*, et que, pour passer d'une de ces positions à l'autre, la glissière doit se déplacer d'une longueur $L + A$.

On peut aussi disposer le taquet de détente pour qu'il ferme, dans sa position moyenne, l'ouverture de la boîte à vapeur; il détermine l'admission par le déplacement de ses bords extérieurs. Le taquet de détente a souvent la forme d'une *grille*, formée d'une série de barrettes jouant sur des lumières multiples; on obtient ainsi une bonne section de passage sans exagération de la course.

On réduit presque à rien l'espace libre supplémentaire dans la détente que donne la glissière Gonzenbach, en supprimant la cloison sur laquelle se meut la glissière et en la posant directement sur le tiroir principal; ce tiroir

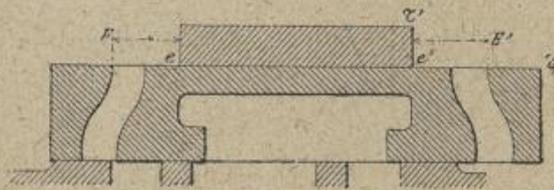


Fig. 89. — Montage de la glissière sur le dos du tiroir.

est muni de deux lumières spéciales, ajoutées au delà de ses bords extérieurs (fig. 89), et la face supérieure en est dressée. L'admission est interrompue quand la glissière vient fermer la lumière spéciale du tiroir.

L'étude de la distribution exige la détermination du mouvement *relatif* des deux tiroirs. On détermine approximativement ce mouvement avec une grande facilité, quand on peut négliger l'obliquité des bielles des tiroirs. OT et OT' (fig. 90) étant les rayons des deux excentriques, dans une position quelconque, un point de l'un des tiroirs se meut contre la projection t de T et un point de l'autre comme la projection t' de T' ; en construisant OT'' égal et parallèle à Tt' et en prenant la projection t'' de T'' , les distances Ot'' et tt' sont égales. Le mouvement relatif de t' par rapport à t est donc le même que le mouvement absolu du point t'' par rapport au point fixe O .

Si l'excentrique OT'' convenait avec une glissière sur une

plaque fixe, c'est en réalité l'excentrique OT'' , diagonale du

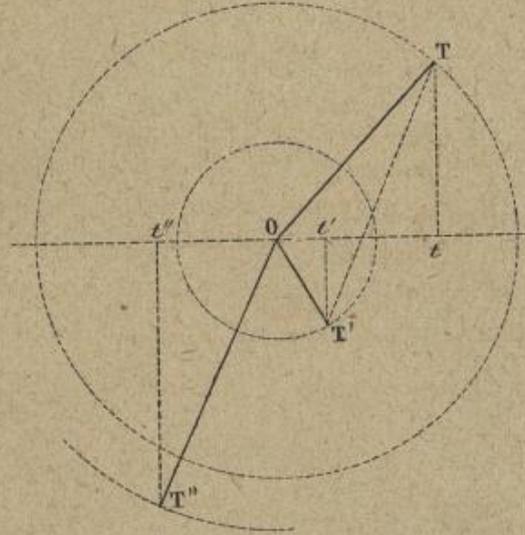


Fig. 90. — Composition des excentriques : le mouvement du point t' , commandé par l'excentrique OT' , par rapport à t , commandé par OT , est le même que le mouvement absolu de t'' par rapport au centre fixe O ; QT'' étant égal et parallèle à TT' .

parallélogramme construit sur OT et OT'' , qui donne la

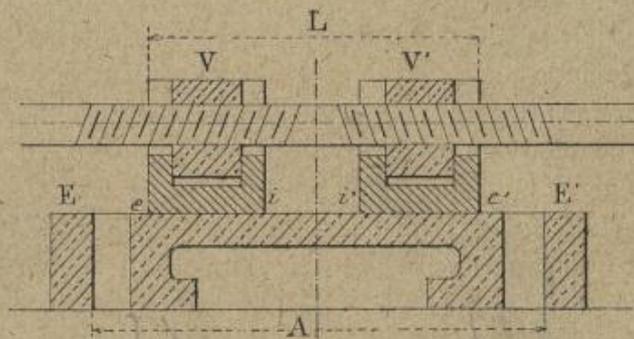


Fig. 91. — Détente Meyer : la rotation de la tige de commande, qui porte deux vis à filets opposés, éloigne ou rapproche les deux parties ei et $e' i'$.

même distribution, quand la glissière se meut sur le dos du tiroir.

En faisant conduire la glissière par une coulisse ou par un mécanisme équivalent, on obtient de grandes variations dans la période d'admission.

Dans la détente Meyer, le rayon et l'angle de calage de l'excentrique qui conduit la plaque de détente ne changent pas ; mais c'est la distance des bords de cette plaque qui peut varier. Elle se compose de deux parties ei , $e'i'$ (fig. 91) qui sont entraînées par deux écrous V , V' , taraudés en sens contraires, et vissés sur la tige de commande. La rotation

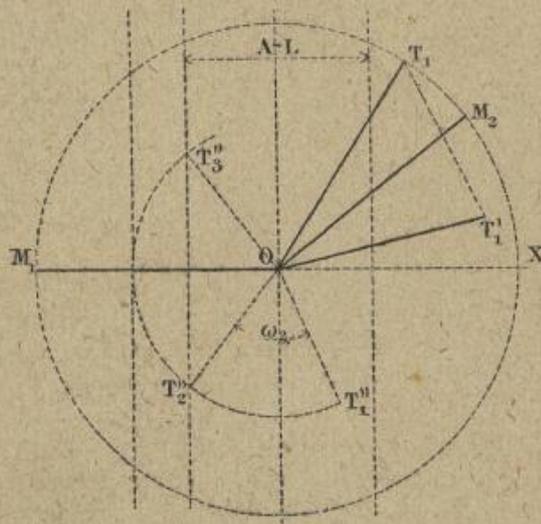


Fig. 92. — Épure approchée de la distribution Meyer : l'admission a lieu pendant le parcours angulaire variable T''_1, T''_2 .

de cette tige éloigne ou rapproche les deux écrous et modifie la longueur ee' . Cette rotation peut se faire pendant la marche : d'une part, la tige est reliée au mécanisme, qui lui donne le mouvement de va-et-vient, par un joint qui en permet la rotation, et, d'autre part, elle glisse dans un manchon carré fixe, qu'on peut faire tourner à volonté. Chacun des taquets doit être assez long pour que jamais les bords i et i' , qui ne jouent aucun rôle dans la distribution, ne découvrent les lumières du tiroir principal.

Soit OT''_1 (fig. 92) l'excentrique fictif qui représente le mou-

vement relatif de la plaque de détente sur le tiroir. On mène deux perpendiculaires à l'axe OX , distantes de la longueur $EE' - ee'$ ou $A-L$. L'admission cesse quand l'excentrique fictif passe en OT''_2 , c'est-à-dire après une rotation depuis le point mort égale à $T''_1OT''_2$. Cet angle augmente quand la distance $EE' - ee'$ augmente, c'est-à-dire quand on rapproche les deux taquets. Le taquet découvre la lumière du tiroir quand OT'' passe en OT''_3 : il faut qu'à ce moment le tiroir principal ait interrompu l'admission. Quand la direc-

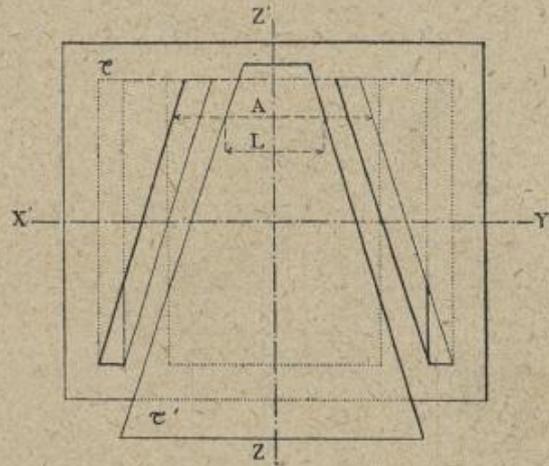


Fig. 93. — Glissière à bords obliques, avec manœuvre transversale suivant ZZ' .

tion de OT''_2 se rapproche de OM_1 , la fermeture de la lumière devient lente, et le *laminage* augmente.

Souvent on cale exactement à l'opposé de la manivelle motrice l'excentrique des plaques de détente Meyer, qui peuvent alors s'appliquer sur le tiroir des machines à changement de marche.

Au lieu de composer la plaque de détente de deux parties dont on modifie l'écartement, on obtient le même effet avec une plaque unique de forme trapézoïdale (fig 93), qu'on déplace suivant une perpendiculaire ZZ' à l'axe du mouvement $X'Y'$: ce déplacement transversal modifie la cote $A - L$ qui contrôle la période d'admission. Les bords des lumières,

ouvertes sur le dos du tiroir, sont parallèles à ceux de la plaque.

En enroulant sur un cylindre de révolution, autour de l'axe X'Y' du mouvement de va-et-vient, les deux surfaces du tiroir et de la plaque qui frottent l'une contre l'autre (fig. 94), les bords obliques deviennent des hélices ; et l'effet

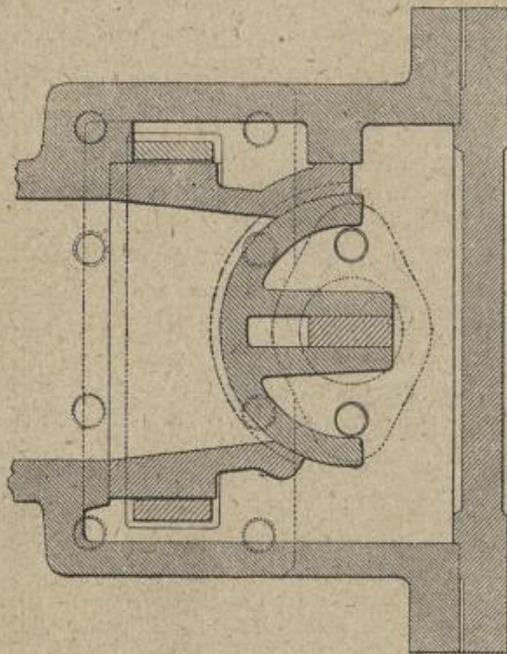


Fig. 94. — Détente Rider, coupe transversale : la surface extérieure du tiroir principal est cylindrique et porte deux lumières à bords en hélice, sur lesquelles se meut le tiroir de détente.

du déplacement transversal s'obtient par une rotation de la plaque, devenue cylindrique, autour de son axe. Telle est la disposition de Rider, d'une manœuvre commode, car un faible déplacement angulaire du taquet cylindrique produit les variations de détente, qui exigent plusieurs tours de la vis à filets opposés de Meyer.

Au lieu de commander directement par un excentrique les taquets, qui viennent interrompre l'admission donnée par le tiroir principal, on peut les déplacer sur le tiroir à l'aide

de butées, dont on change la position quand le degré d'admission doit varier. C'est ainsi que, dans l'ancienne distribution Farcot, les taquets sont entraînés par le tiroir principal, jusqu'à ce que la butée les arrête : l'admission ne peut être ainsi interrompue que si le tiroir n'est pas arrivé à fond de course, c'est-à-dire pour une rotation, à partir du point mort, intérieure au complément de l'angle d'avance, δ . Des butées fixes font découvrir de nouveau les lumières d'admission du tiroir en temps utile.

Farcot a augmenté la période d'admission, en plaçant entre les taquets et le tiroir principal un tiroir spécial, commandé par un excentrique calé à 60° environ en avant de la manivelle motrice ; ce tiroir ne sert qu'à étendre la période pendant laquelle les taquets peuvent se fermer ; il porte des canaux constamment en communication avec les deux conduits d'admission du tiroir.

D'autres systèmes, notamment ceux de Hertay et d'Is. Claeys¹, présentent des dispositions analogues en principe.

46. Distributions Corliss. — Le nom de l'Américain George H. Corliss est attaché à une catégorie de machines caractérisées par des dispositions ingénieuses, ayant trait surtout à la distribution de la vapeur.

Dans ces machines, les espaces libres sont petits ; l'admission se fait sans laminage ; les périodes d'échappement anticipé et de compression sont courtes. Les diagrammes d'indicateur se rapprochent des tracés théoriques (fig. 95). On obtient ainsi le plus grand travail que puisse produire, avec un degré de détente déterminé, un cylindre de volume donné.

Le faible volume des espaces libres tient principalement à ce que les lumières sont courtes. En outre, le diamètre du

1. Voir *La machine à vapeur*, par E. Sauvage, t. 1, p. 328, et pour plus de détails, *Annales de l'Association des ingénieurs sortis des Ecoles spéciales de Gand*, t. XV, 4^e livraison.

cylindre est petit relativement à la course, ce qui réduit le vide dû au jeu indispensable laissé par le piston à fond de course. En même temps, la surface des parois se trouve diminuée et ne dépasse guère celle de l'enveloppe cylindrique, avec quatre bases planes (plateaux et piston).

La vapeur est distribuée par quatre obturateurs ou distributeurs, un pour l'admission et un pour l'échappement à chaque bout du cylindre (fig. 96); dans les machines horizontales, les distributeurs d'échappement sont placés à la

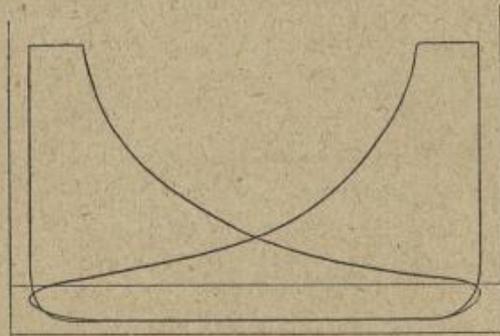


Fig. 95. — Diagrammes d'indicateur relevés sur une machine Corliss.

partie inférieure, pour assurer l'écoulement de l'eau condensée.

Chaque obturateur est un véritable tiroir oscillant, porté par une table cylindrique, sur laquelle s'ouvre une lumière. Les axes d'oscillation des obturateurs sont perpendiculaires à l'axe du cylindre. Un tourillon, sur chacun de ces axes, sort de la boîte à vapeur, de manière à recevoir le mouvement de commande. La pression de la vapeur, aidée par des ressorts, applique sur sa table l'obturateur, qui ne fait pas corps avec l'axe d'oscillation. Pour que l'obturateur d'échappement soit ainsi pressé contre sa table, il est monté à l'intérieur du cylindre, dans l'espace libre.

Souvent les obturateurs sont commandés par un plateau monté au milieu de la longueur du cylindre (fig. 97); un excentrique calé sur l'arbre de la machine fait osciller ce

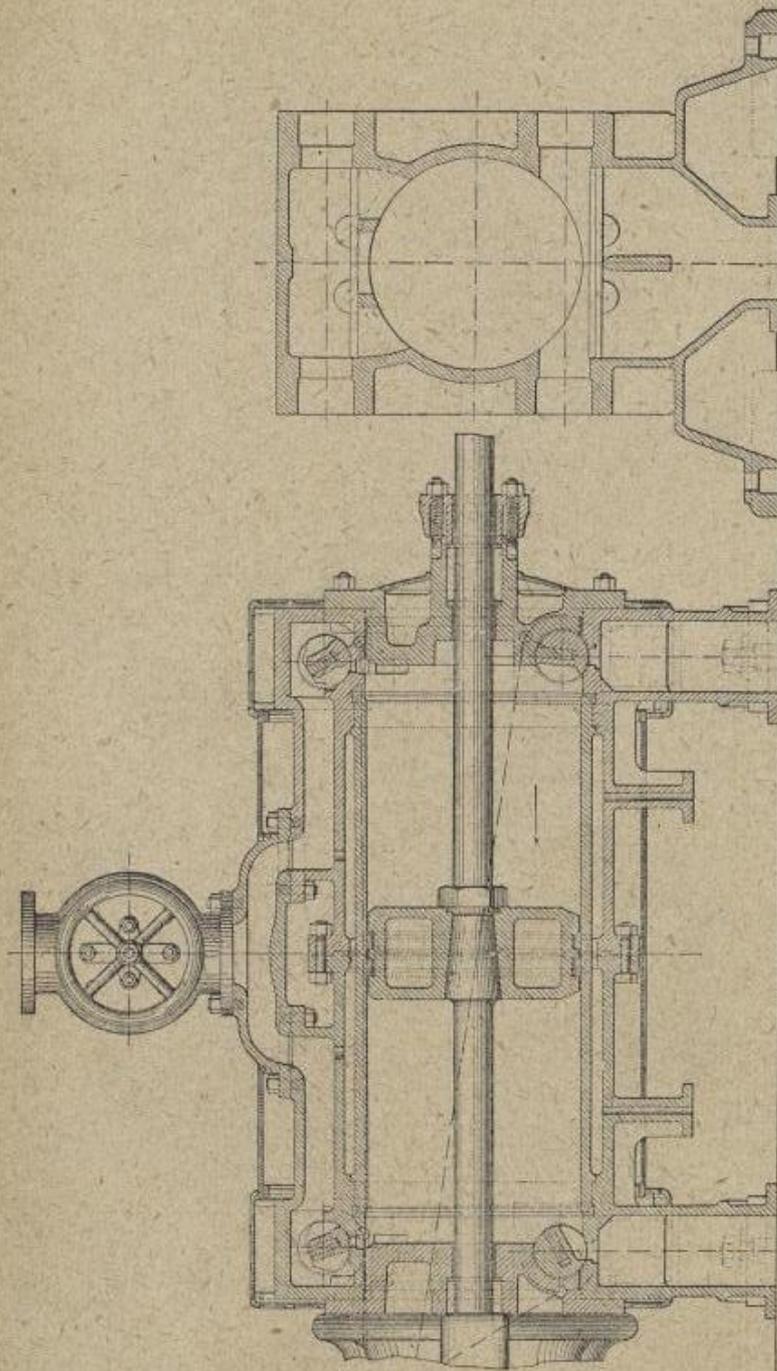


Fig. 96. — Cylindre de machine Corliss, construite en 1889 par E. Garnier; coupe longitudinale et coupe transversale par les axes de deux distributeurs; distributeurs d'admission à la partie supérieure, et d'échappement à la partie inférieure.

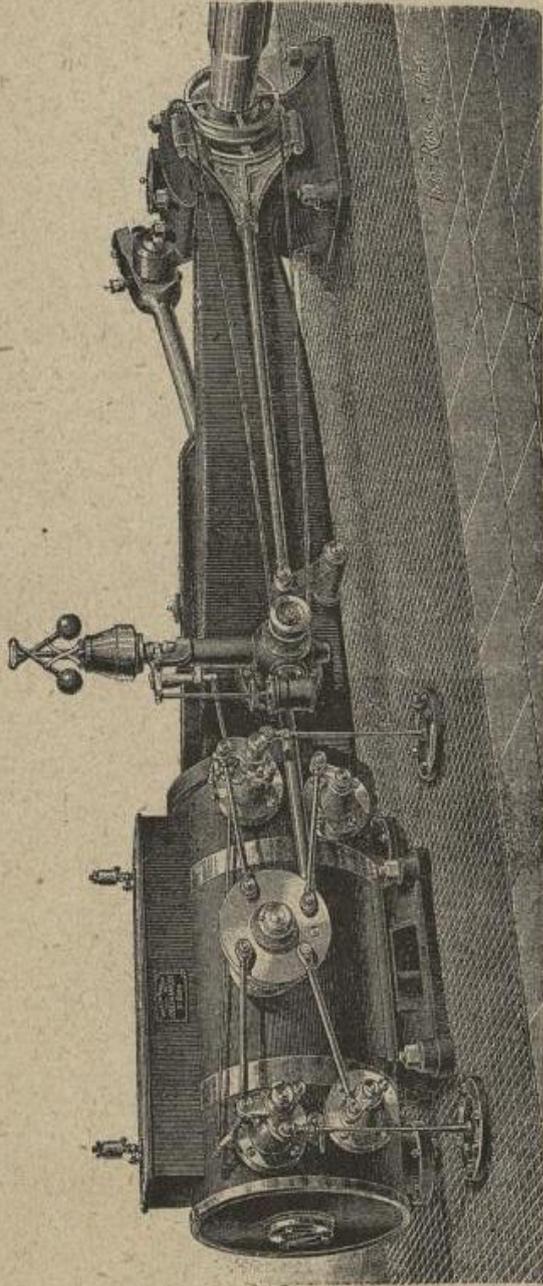


Fig. 97. — Machine Corliss construite par Farcot.

plateau. Malgré la complication des renvois, on voit facilement que l'excentrique commande les obturateurs à peu près comme un tiroir unique ; pour deux écarts symétriques du rayon d'excentrique, par rapport à l'axe du mouvement de la petite tête de la barre d'excentrique¹, on retrouve les obturateurs dans les mêmes positions ; les phases de la distribution commencent et prennent fin quand le bord actif de chaque obturateur vient en contact avec le bord de la lumière ; enfin on peut compter, suivant la section circulaire des tables cylindriques, des longueurs équivalentes aux recouvrements extérieurs (pour les obturateurs d'admission) et intérieurs (pour les obturateurs d'échappement). L'excentrique est calé à 180° de sa position normale, quand le plateau agit comme un balancier de renvoi.

L'angle d'avance de l'excentrique est habituellement petit : aussi les périodes d'échappement anticipé et de compression sont très courtes ; en outre, la période d'admission se prolongerait pendant presque toute la course du piston, si des mécanismes de rappel et des déclics ne provoquaient la fermeture brusque des obturateurs d'admission, réalisant une longue détente. Pour cette fermeture brusque, l'obturateur se sépare du mécanisme de commande qui l'entraînait ; il est repris par ce mécanisme pendant le retour du piston, afin de fonctionner de même pendant la course suivante.

C'est un ressort puissant, ou un système équivalent, qui produit le mouvement rapide de l'obturateur pour la fermeture, quand la rencontre d'une butée le déclenche. Un tampon pneumatique ou *dash-pot* arrête l'obturateur, une fois la lumière fermée.

En général, la butée n'est pas invariablement fixe, mais

1. Cette petite tête est habituellement articulée à l'extrémité d'un levier calé sur un arbre oscillant, de sorte qu'elle décrit un arc de cercle au lieu d'une ligne droite : les positions correspondantes du rayon d'excentrique pour lesquelles la petite tête se retrouve à la même place ne sont pas rigoureusement symétriques par rapport à l'axe considéré, mais cela ne modifie pas sensiblement la loi du mouvement.

elle est en relation avec un régulateur, qui la déplace de manière à modifier la période d'admission, et, par suite, le travail donné par coup de piston.

Corliss et ses imitateurs ont beaucoup varié les mécanismes qui produisent ces effets. On ne trouvera dans le

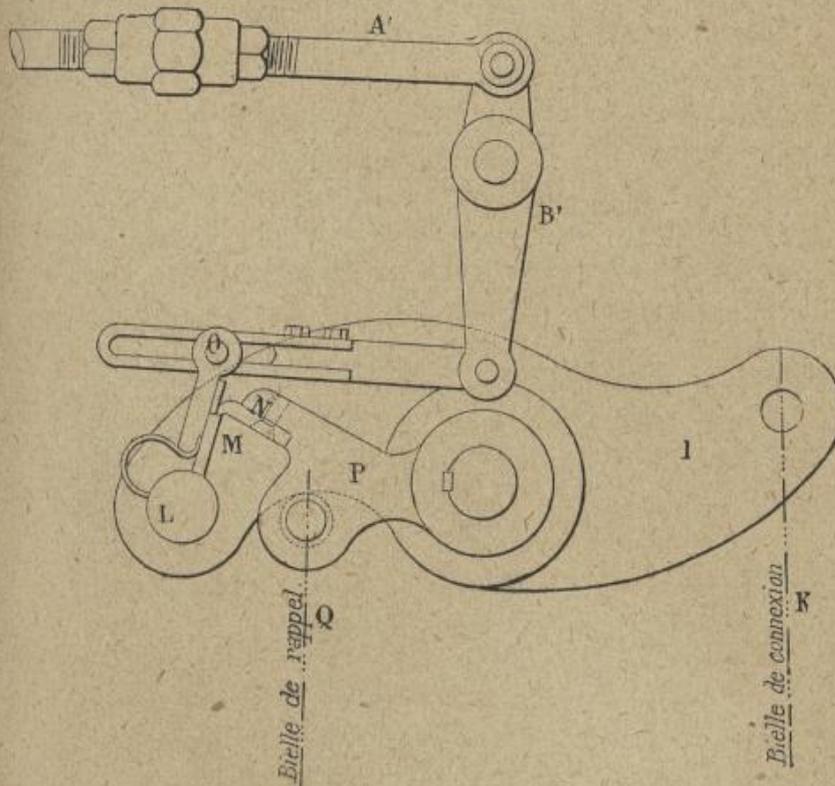


Fig. 98. — Machine Corliss construite au Creusot en 1882; commande de l'obturateur d'admission.

A', tige en relation avec le régulateur, déplaçant le balancier B' et par suite la coulisse au fond de laquelle bute O.

présent paragraphe que quelques exemples de ces dispositions nombreuses.

Dans la disposition adoptée par le Creusot en 1882 (fig. 98), la bielle de commande (ou de connexion), K, entraîne l'obturateur d'admission, par l'intermédiaire du balancier IL et de la touche M, jusqu'à ce que la butée de O au fond de la

coulisse fasse échapper le levier P, tiré par la bielle de rappel Q.

Dans le type à « lames de sabre » (fig. 99), le plateau oscillant, conduit par l'excentrique, est rapproché de

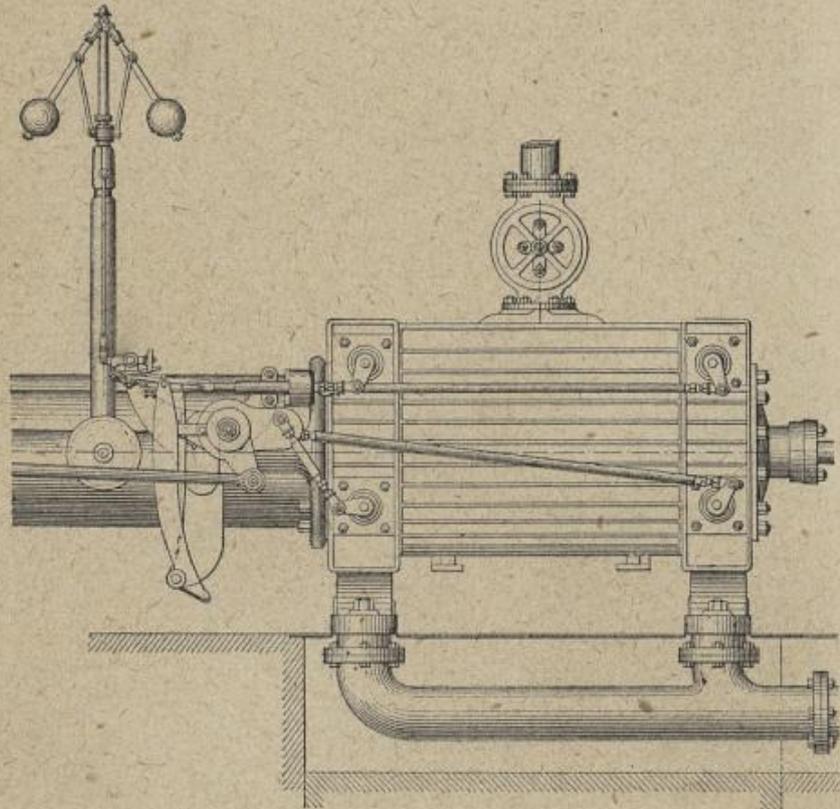


Fig. 99. — Machine Corliss à ressorts *en lames de sabre*, construite par E. Garnier.

l'arbre de la machine; les distributeurs d'admission sont commandés par deux tringles que rappellent deux lames de ressort, quand une butée vient soulever le taquet qui les pousse.

Dans le système Harris Corliss (fig. 100), la fourchette J, articulée en *m* sur la tige E de commande de l'obturateur, s'abaisse quand elle rencontre l'ergot R; le talon O laisse

alors échapper le levier L, et la tige P, sollicitée par un ressort dans le sens de la flèche, ferme l'obturateur. La tige NM, commandée par le régulateur, peut modifier la position de l'ergot R. Le ressort S relève la fourchette et assure la reprise du talon O à la fin de la course de retour de la tige E.

La machine de Farcot (fig. 101) est remarquable par la position des obturateurs dans les fonds du cylindre, ce qui réduit au strict minimum la capacité des lumières.

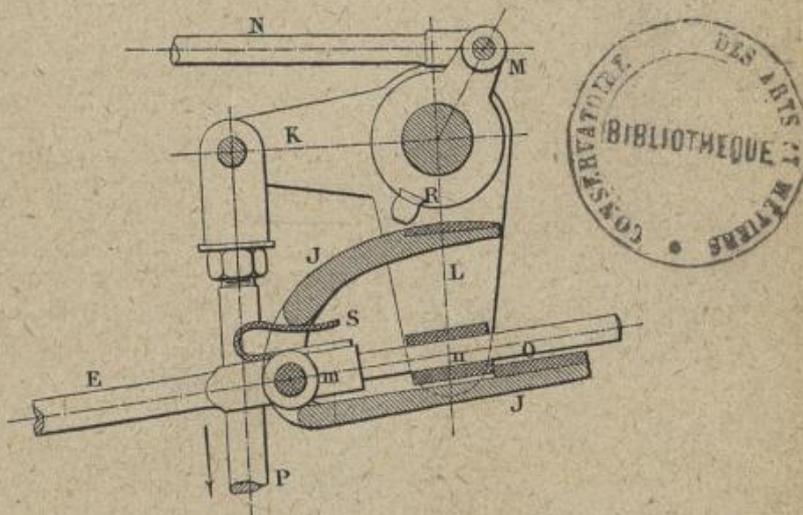


Fig. 100. — Déclie Harris Corliss.

Pour la fermeture brusque des obturateurs d'admission, on emploie des ressorts en acier ou pneumatiques. Le ressort pneumatique est un piston chargé par l'atmosphère; on le combine avec le *dash-pot* (fig. 102), qui sert de tampon d'arrêt : le réglage et l'entretien sont un peu plus difficiles qu'avec le ressort en acier. Quelquefois la pression de la vapeur est substituée à celle de l'atmosphère.

Cet amortissement de la vitesse ne présente, en principe, aucune difficulté, puisqu'une fois la fermeture de la lumière produite on dispose d'un excès de course aussi grand qu'il est utile pour l'arrêt graduel de l'obturateur.

La position d'arrêt doit être telle que la reprise par le mécanisme de commande se fasse sans choc.

Il est clair que la fermeture n'est jamais *instantanée*, mais

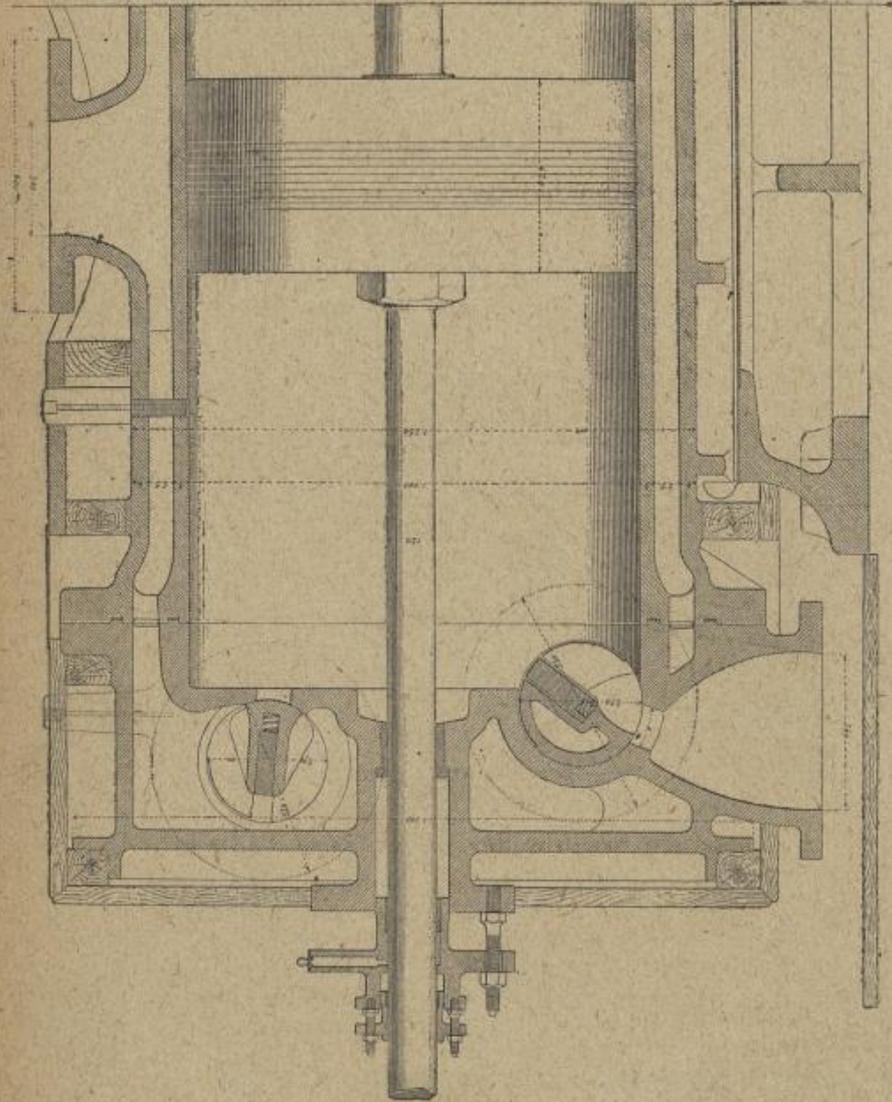


Fig. 101. — Distributeurs de la machine de Farcol, placés dans les fonds du cylindre : la vapeur pénètre d'abord dans l'enveloppe par une tubulure placée à la partie supérieure ; l'échappement se fait à la partie inférieure du cylindre ; l'obturateur d'échappement pénètre en partie à l'intérieur du cylindre, à la place occupée par le piston à fond de course.

demande un certain temps, pendant lequel la vapeur se lamine. Cette durée peut être réduite à un centième de seconde, de sorte que le laminage est faible dans les ma-

chines à rotation lente. Toutefois, même avec la vitesse

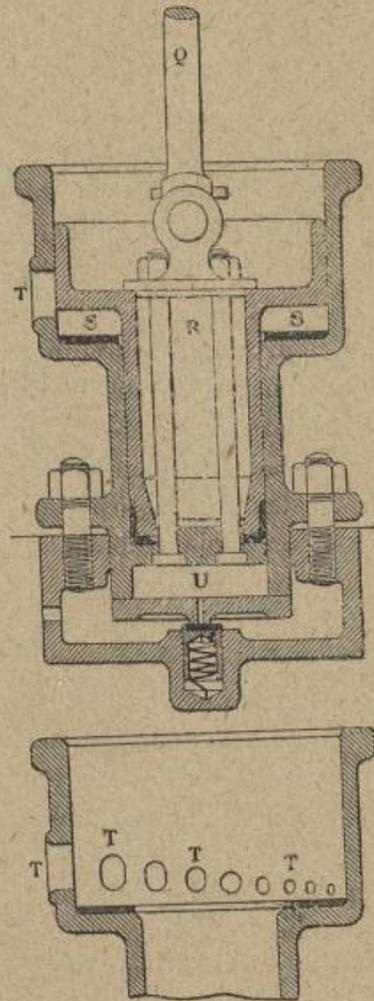


Fig. 102. — Dash-pot de machine Corliss, formant ressort pneumatique (construction du Creusot) : quand les pistons sont soulevés par la tige Q, le vide se fait dans le cylindre U. Lorsque le déclenchement se produit, la pression atmosphérique fait descendre les pistons : le grand cylindre S amortit progressivement la vitesse, l'air devant s'échapper par les trous T de plus en plus petits. Une bande de cuir arrête enfin le système ralenti. La petite soupape placée à la base du cylindre U sert à l'échappement de l'air qui pourrait y pénétrer accidentellement.

modérée de 60 tours par minute, une course simple du pis-

en partie à l'intérieur du cylindre, à la place occupée par le piston à fond de course.

ton demande 50 centièmes de seconde ; pendant la durée de la fermeture le déplacement du piston est donc appréciable.

La fermeture par déclenchement n'existe pas pour les obturateurs d'échappement, cette fermeture ne se produisant qu'en fin de course du piston, c'est-à-dire au moment où sa vitesse s'annule. La commande des obturateurs est d'ailleurs

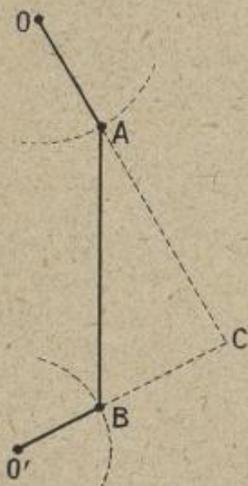


Fig. 103. — Transmission par bielle entre deux manivelles non parallèles.

disposée de manière à en produire rapidement l'ouverture et la fermeture, puis à les déplacer le moins possible. On profite à cet effet d'une propriété de la transmission par bielle entre deux manivelles non parallèles ; lorsqu'une des manivelles se place dans le prolongement de la bielle, l'un des axes reste presque immobile pour un déplacement angulaire important de l'autre¹.

Pour apprécier, d'une manière générale, les divers mécanismes des machines Corliss, on cherchera la plus grande valeur qu'ils peuvent donner à l'admission. Souvent le déclenchement du déclit n'est possible

que pendant le parcours de l'angle T_1OX' (fig. 104) par le rayon de l'excentrique : les pièces commandées par l'excentrique prennent leurs plus grands écarts quand le rayon OT atteint la direction OX' , puis reviennent en sens inverse quand ce rayon dépasse OX' . Si la butée est trop éloignée

1. Soient deux axes O et O' (fig. 103), avec manivelles OA et OB, reliées par la bielle AB. Le rapport des vitesses angulaires ω' et ω est donné par la relation

$$\frac{OA \times \omega}{O'B \times \omega'} = \frac{CA}{CB}$$

ou

$$\omega' = \frac{OA}{O'B} \times \frac{CB}{CA} \times \omega$$

C étant le centre instantané de rotation de la bielle. Le rapport $\frac{CB}{CA}$ peut varier beaucoup pendant l'oscillation.

pour que la pièce, qu'elle doit déclencher, l'atteigne pendant ce parcours angulaire T_1OX' , elle n'est plus rencontrée pendant le reste de la course : l'admission peut varier depuis une faible valeur jusqu'à un maximum, qui correspond à une rotation un peu inférieure à T_1OX' ; elle a lieu au plus pendant les 30 ou 35 centièmes environ de la course du piston, et encore grâce à la petitesse de l'angle d'avance δ . Au delà, on n'obtient plus qu'une admission prolongée pendant

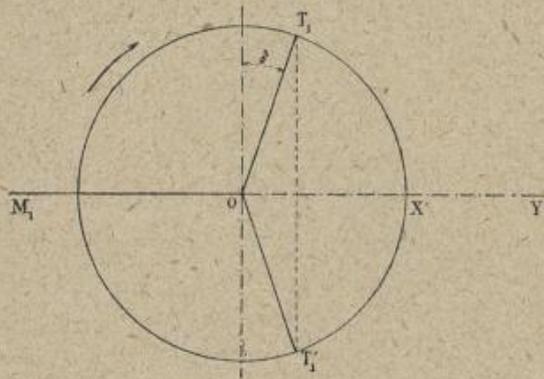


Fig. 104. — Calage de l'excentrique et périodes de déclenchement des machines Corliss; les mécanismes commandés par le centre de l'excentrique T se retrouvent dans les mêmes positions quand ce centre occupe deux positions symétriques telles que T_1 et T_1' ; avec les mécanismes ordinaires, le déclenchement ne peut se produire que pendant le parcours $T_1 X'$.

presque toute la course, qui ne peut convenir pour la marche régulière de la machine. Dans bien des cas, cette admission de 30 à 35 p. 100 au maximum suffit amplement. D'autres fois, surtout pour les machines compound, cette limite est trop basse : aussi a-t-on imaginé des mécanismes de déclenchement qui fonctionnent aussi bien pendant le retour des pièces à déclencher que pendant l'aller, de sorte que l'admission peut durer pendant une fraction quelconque de la course du piston.

Le déclenchement, pour l'un et pour l'autre sens du mouvement de la barre d'excentrique, s'obtient en munissant l'obturateur d'admission de deux déclics, pouvant fonction-

ner l'un pendant l'aller, l'autre pendant le retour ; la touche du second déclat doit être articulée de manière à s'effacer, pendant l'aller, sous la butée qu'elle rencontrera en rebrousant chemin, si le premier déclat n'a pas agi ; la machine représentée figure 99 est munie de cette disposition.

Cette double butée n'est pas complètement satisfaisante, car, si la période d'admission donnée par la première est

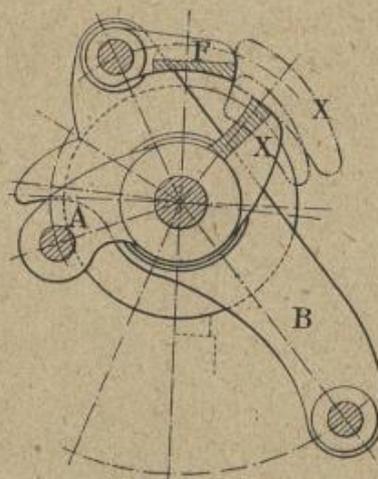


Fig. 105. — Déclenchement Frikart. En A, agit la tige du ressort de rappel, pour la fermeture de l'obturateur. Les courbes X représentent les deux trajectoires extrêmes de l'extrémité du cliquet F. Dans la position représentée, l'obturateur est fermé et non encore repris par le cliquet.

trop courte, c'est en général une admission un peu plus longue seulement qu'il faudrait ; c'est donc quand le rayon d'excentrique est voisin de son point mort, en OX' (fig. 104), que le déclenchement devrait se produire. Or, dans le voisinage de cette position, ni l'une ni l'autre butée ne fonctionne avec précision.

Dans le système Frikart, l'obturateur est entraîné par le cliquet oscillant F (fig. 105), monté à l'extrémité du bras B, commandé par l'excentrique. Le mouvement d'oscillation du cliquet varie sous l'action du régulateur, et il laisse échapper l'obturateur en un point de la course du piston

variable jusqu'à 60 p. 100. Des mécanismes analogues existent dans les machines à soupapes¹.

Enfin, on peut employer deux excentriques séparés, pour les obturateurs d'échappement et pour ceux d'admission, en donnant au second un angle d'avance négatif : l'angle T_1OT' est alors un angle obtus (fig. 106), qui correspond, pour la manivelle motrice, à un parcours suffisamment grand, pendant lequel la fermeture par déclenchement peut se produire. Avec ce système, il est nécessaire que le déclenchement interrompe l'admission, qui autrement resterait ouverte

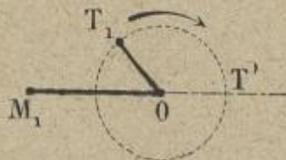


Fig. 106. — Rayon d'excentrique avec avance angulaire négative.

pendant un parcours angulaire égal au double de l'angle obtus T_1OX' , correspondant à plus qu'une course simple du piston.

Dans les machines compound, l'admission au petit cylindre est variable par l'action d'un régulateur ; mais l'admission au grand cylindre se fait souvent par l'action d'une butée réglable à la main. Le volume admis dans le grand cylindre doit en effet être à peu près égal au volume du petit cylindre, ce qui exclut une grande variation de la période d'admission.

47. Distributeurs oscillants sans déclit. — Certaines machines à rotation rapide ont les distributeurs séparés et oscillants des Corliss, mais sans déclit : ils restent constamment sous la dépendance de l'excentrique, pour l'admission comme pour l'échappement. On fait souvent usage d'excentriques séparés (fig. 107). Un obturateur oscillant unique peut aussi remplacer le tiroir plan.

1. On trouvera la description de ce mécanisme dans le cours de mécanique appliquée aux machines de Boulvin, 5^e fascicule.

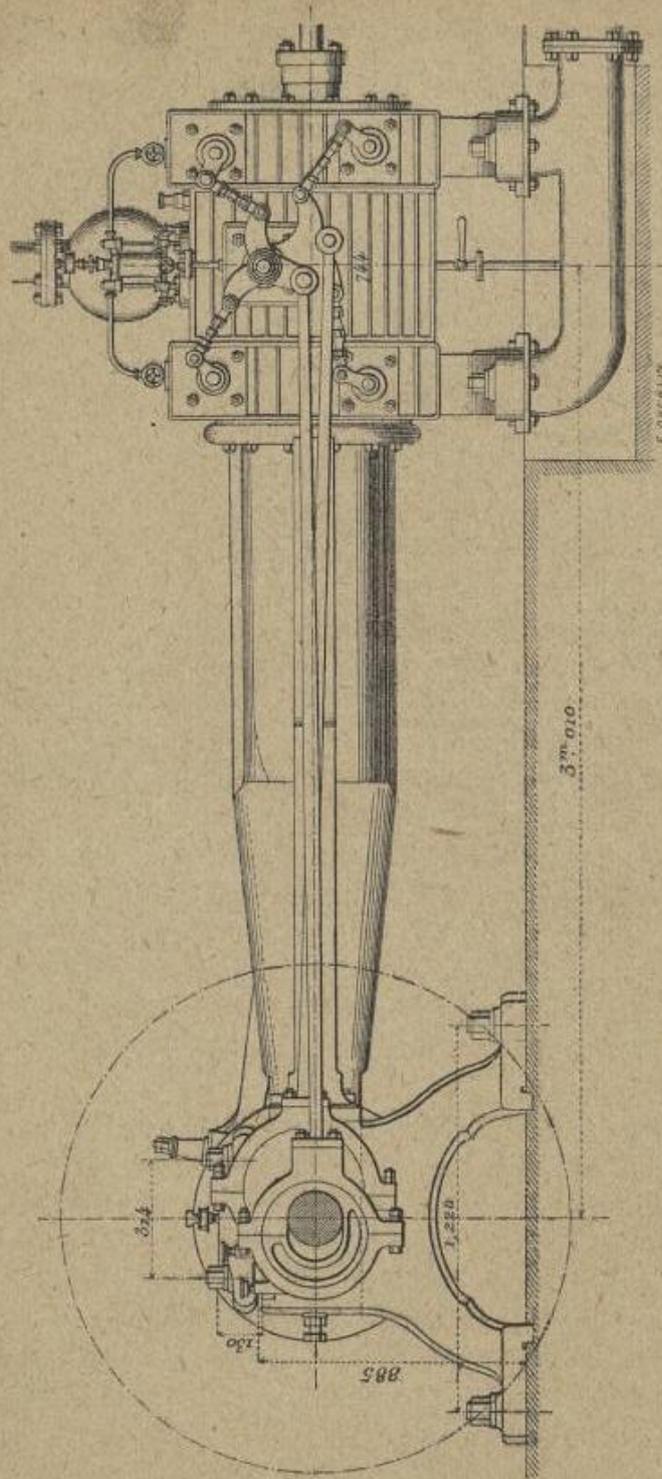


Fig. 107. — Machine rapide à quatre distributeurs sans déclenchement, construite par E. Garnier en 1889; nombre de tours par minute, 180; régulateur de Porter, non représenté sur la figure, agissant sur une soupape placée à l'arrivée de vapeur; excentrique à calage variable commandant les distributeurs d'admission; excentrique à calage fixe pour les distributeurs d'échappement.

48. Distributions à soupapes. — La soupape simple est un disque qui recouvre un orifice circulaire et qu'on peut soulever perpendiculairement au plan de cet orifice : des guides empêchent le déplacement transversal. Elle supporte la différence des pressions sur ses deux faces ; aussi ne

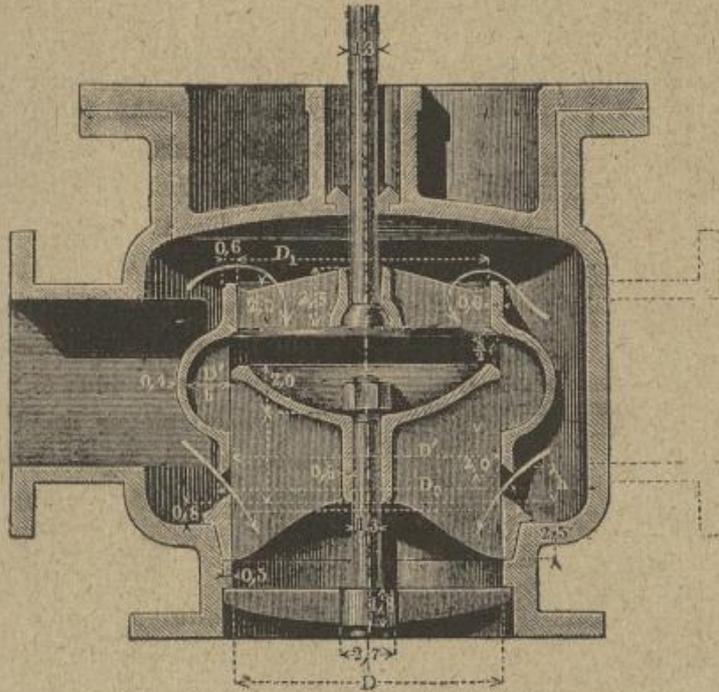


Fig. 108. — Soupape de Cornouailles, à double siège.

convient-elle pas pour la machine à vapeur, parce que l'effort nécessaire pour la soulever serait en général excessif. On préfère la soupape à double siège, ou de *Cornouailles* (fig. 108), chargée seulement par les pressions verticales qui s'exercent sur les sièges (surface comprise entre deux cercles concentriques de diamètres D_1 et D_0 sur la figure). La petite différence de diamètre des deux sièges permet la mise en place et l'enlèvement ; une certaine charge est d'ailleurs utile pour assurer la fermeture.

La disposition de la soupape et des sièges est intervertie

dans le type de la figure 109, plus fréquemment employé : la vapeur a librement accès à l'intérieur de la soupape ; le siège supérieur a le plus grand diamètre.

Comparée à la soupape simple, la soupape à double siège ouvre une section de passage deux fois plus grande, pour une même levée. On em-

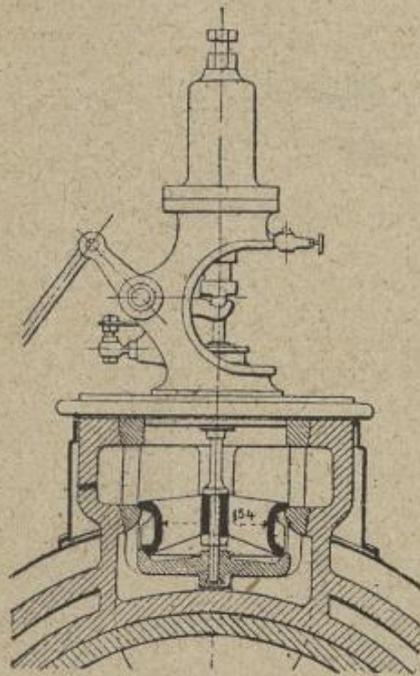


Fig. 109 — Soupape à double siège, type tubulaire, avec ressort et dash-pot (dans l'enveloppe cylindrique supérieure).

ploie même des soupapes à quadruple siège, formées par la réunion de deux soupapes creuses à double siège, fondues en une seule pièce (fig. 118 et 119).

Une exécution très précise est nécessaire pour que la soupape porte également sur les deux ou sur les quatre sièges. De plus, cette portée égale, obtenue à froid, doit se maintenir en service à chaud, malgré les dilatations. Cela conduit à l'emploi du même métal pour la soupape et pour le siège ; souvent siège et soupape sont coulés en même temps.

Comme organe de distribution, la soupape présente deux particularités importantes. Elle ne sert qu'à une fonction unique, et ne peut produire alternativement l'admission et l'échappement, comme le tiroir : il faut des soupapes séparées pour ces deux phases de la distribution, c'est-à-dire quatre soupapes pour un cylindre à double effet. D'autre part, au moment de la fermeture, la soupape est arrêtée et reste immobile pendant toute la durée de cette fermeture, tandis que les tiroirs et les obturateurs oscillants peuvent continuer leur course.

Les mécanismes de commande des soupapes présentent trois dispositions principales. Un arbre à cames soulève la tige de la soupape et la laisse descendre (par l'effet de son poids et d'un ressort); le petit rayon de la came correspond à la fermeture, le grand rayon à l'ouverture complète, et les courbes de raccordement au soulèvement et à l'abaissement. La tige de la soupape n'est pas directement au-dessus de la came, dont le mouvement est transmis par des tiges articulées sur des balanciers ou des équerres de renvoi.

Une seconde solution comporte l'emploi d'un levier roulant (fig. 110). L'extrémité A du levier est articulée sur la tige XY de la soupape, guidée en ligne droite; l'extrémité B reçoit un mouvement de commande d'une tige BC. Le levier s'appuie, par une surface courbe de grand rayon, sur un plan fixe (ou sur une surface présentant aussi une courbe légère).

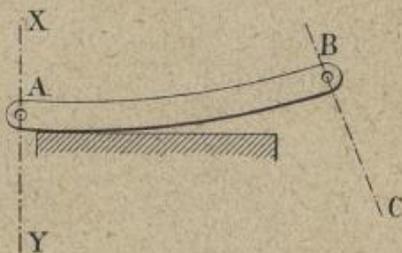


Fig. 110. — Levier roulant, pour la commande d'une soupape suivant XY.

La fermeture de la soupape ne gêne nullement le mouvement de l'extrémité B du levier, qui se soulève au-dessus de son support. Au moment de l'ouverture, le point d'appui du levier est très voisin de l'extrémité A, de sorte que la commande, en B, s'exerce sur un grand bras de levier, et la résistance, en A, sur un petit bras; une fois la soupape décollée, le point d'appui se rapproche de l'extrémité B, ce qui augmente la vitesse de soulèvement. Pendant la fermeture, la marche de la soupape, approchée rapidement du siège, puis fermée avec douceur, est également satisfaisante.

La figure 118 montre l'application de ce système à une soupape d'admission et à une soupape d'échappement; les plans fixes ont une disposition de réglage.

Une variante de ce mécanisme (fig. 114) comporte deux

leviers articulés en O et O', l'un commandé par la tige BC, l'autre agissant sur la tige XY de la soupape par une articulation A qui présente un léger jeu transversal; ces deux leviers se touchent par des faces à courbure de grand rayon.

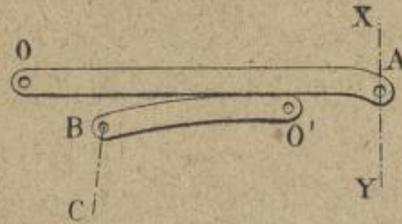


Fig. 111. — Leviers roulants avec deux articulations fixes. O et O'.

En troisième lieu, les mécanismes à déclic se prêtent à la commande des soupapes d'admission : au moment voulu, la tige de commande abandonne la soupape, qu'un ressort referme brusquement, et la reprend plus tard. Cette fermeture brusque comporte

une difficulté spéciale, qui n'existe pas avec les obturateurs Corliss, libres de continuer leur course après la fermeture : il faut éviter un choc destructeur sur les sièges. On cherche

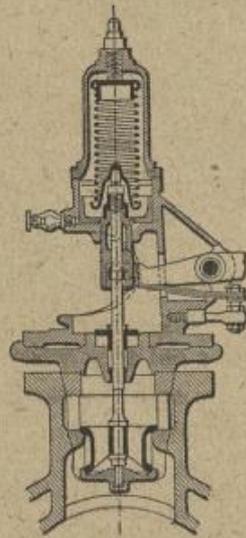


Fig. 112. — Dash-pot à air, pour fermeture à déclic de soupape.

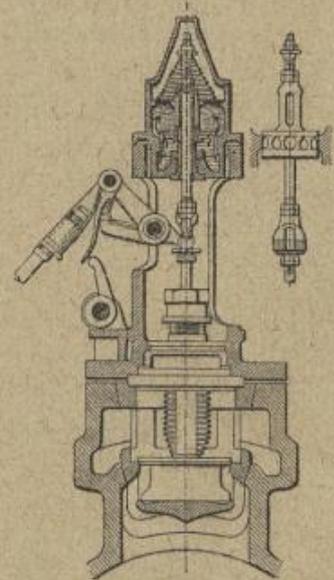


Fig. 113. — Amortisseur à huile pour soupape à déclic (machine Collmann).

une difficulté spéciale, qui n'existe pas avec les obturateurs Corliss, libres de continuer leur course après la fermeture : il faut éviter un choc destructeur sur les sièges. On cherche

à la fois à fermer rapidement la soupape, et à la poser doucement sur son siège. On y arrive par l'emploi d'amortisseurs, qui ralentissent la soupape pendant un très petit parcours avant la fermeture complète. C'est souvent un dash-pot à air (fig. 112) ¹, c'est-à-dire un piston dans un cylindre. L'air comprimé sous le piston s'échappe par un robinet dont l'ouverture est réglable : une petite soupape, contenue dans ce robinet, laisse rentrer l'air librement pendant la levée du piston. Une enveloppe commune enferme le ressort qui accélère le mouvement de fermeture et le piston qui l'amortit.

L'amortisseur peut être un piston dans l'huile, avec ouvertures ne laissant qu'un passage très réduit vers la fin de la course (fig. 113).

La vapeur peut servir d'amortisseur (fig. 114) ; la soupape est surmontée d'un disque qui s'engage comme un piston dans un logement cylindrique voisin du siège, un instant avant la fermeture. La vapeur est emprisonnée par ce piston annulaire ; elle s'échappe par le jeu qui peut exister tout autour du disque et par un trou dont on peut régler la section. Il faut ajouter que la soupape est munie, en outre, de parties cylindriques formant pistons qui s'engagent dans des logements alésés dans les sièges un instant avant le repos de la soupape sur ces sièges.

La soupape ne donne lieu à aucun frottement, sauf celui de la tige de commande dans sa garniture. Elle peut faire

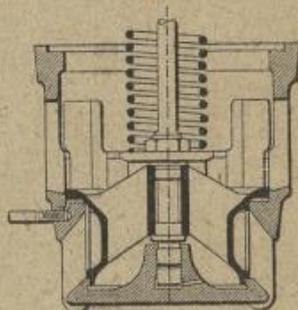


Fig. 114. — Soupape avec amortisseur à vapeur : un disque, fondu avec la soupape, s'engage dans un cylindre correspondant, en emprisonnant la vapeur, qui s'échappe par une ouverture réglable (figurée à gauche).

1. Cette figure, ainsi que les figures 113 et 114, est empruntée à l'ouvrage de M. Carl Leist (*die Steuerungen der Dampfmaschinen*), où ces questions sont étudiées avec grand détail.

un long service, pourvu que des chocs répétés à la fermeture ne produisent pas le mattage des portées. Elle convient pour l'emploi de vapeur fortement surchauffée.

La distribution par soupapes a été employée dans l'ancienne *machine de Cornouailles* (fig. 115), qui a remplacé la

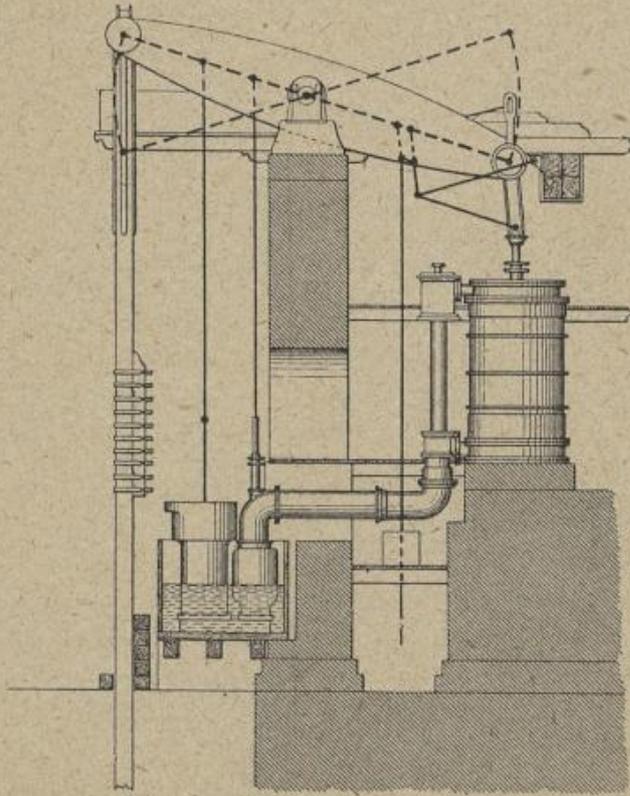


Fig. 115. — Machine de Cornouailles, pour l'épuisement des mines.

machine primitive de Newcomen. Le piston travaille à simple effet pour soulever une maitressetige, qui redescend par son poids en refoulant l'eau dans les pompes. La vapeur est distribuée par une *soupape d'admission*, au-dessus du piston ; une *soupape d'équilibre*, qui fait communiquer les deux faces du piston ; une *soupape d'échappement*, qui met le bas du cylindre en relation avec le condenseur.

Le piston étant en haut de sa course et la machine arrêtée,

les trois soupapes sont fermées ; celles d'échappement et d'admission s'ouvrent et le piston se met en marche. Quand il a parcouru une fraction de sa course, la soupape d'admission se ferme et la détente commence. Lorsque le piston arrive vers le bas de sa course, la soupape d'échappement se ferme, puis celle d'équilibre s'ouvre ; le piston remonte sans produire de travail, la vapeur passant d'un côté à l'autre du piston. Quand il approche du fond de course supérieur, la soupape d'équilibre se ferme et la vapeur est comprimée pendant le reste du parcours. Après un arrêt plus ou moins long, la machine repart de même.

La distribution de la plupart des machines à soupapes actuelles comporte un arbre auxiliaire placé auprès du cylindre et tournant avec la même vitesse que l'arbre principal, qui le commande par engrenages.

Cet arbre porte des cames ou des excentriques, quelquefois les deux à la fois (cames pour l'échappement, excentriques pour l'admission avec déclic). Souvent il y a des excentriques séparés pour l'admission et l'échappement, soit quatre excentriques sur l'arbre.

Les cames peuvent donner l'admission variable et le changement de marche. Par exemple dans la machine Audemar (fig. 116), la soupape est soulevée pendant que

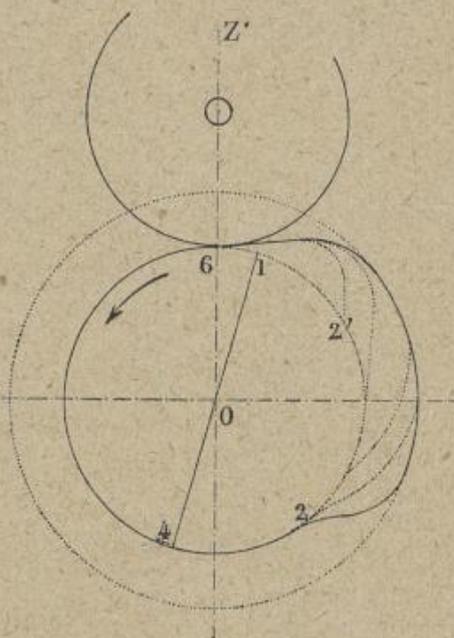


Fig. 116. — Cames pour soupape d'admission de la distribution Audemar : l'admission a lieu pendant le parcours angulaire variable 1 à 2 (admission anticipée, 6-4).

l'arbre tourne de l'angle $\delta-2$. Qu'on imagine, pour l'admission, une série de cames voisines présentant des angles $\delta-2$ ayant tous un point de départ δ commun, mais une ouverture variable; en substituant ces cames l'une à l'autre, on changera la période d'admission. Or la substitution des cames est aisée: en les plaçant l'une à côté de l'autre, on forme un manchon à profil continu, qu'il suffit de faire glisser sur l'arbre.

En réduisant l'angle $\delta-2$, on arrive à un *point mort* où il est nul: au delà, on peut reproduire un tracé symétrique, correspondant à la marche en sens contraire. Les manchons qui commandent les deux soupapes d'échappement se déplacent avec les deux autres: ils ne présentent de changement de profil qu'au point mort.

Les excentriques employés dans les machines à soupapes présentent des combinaisons variées. Dans l'application usuelle de l'excentrique à la commande du tiroir, et des obturateurs Corliss, on utilise le mouvement rectiligne alternatif de l'extrémité A de la barre d'excentrique (fig 117), guidée suivant une droite XY qui passe par le centre de rotation O, ou suivant un arc de cercle voisin. Mais, au lieu de se limiter à l'extrémité A, on peut utiliser le mouvement d'un point quelconque de la barre d'excentrique situé sur l'axe de la barre, en B ou en B', ou bien en dehors, par exemple en B''. Chacun de ces points décrit une courbe fermée. Le point ainsi choisi commande une bielle dont l'autre extrémité décrit une droite d'orientation quelconque, telle que X'Y', X''Y''. Mais le point A n'est pas nécessairement guidé suivant XY; on peut l'astreindre à décrire une droite oblique X₁Y₁ (ou un arc de cercle voisin), ce qui modifie le mouvement communiqué par le point B, B' ou B''. Enfin on peut faire varier l'orientation de la droite X₁Y₁. Cette combinaison est celle de la distribution Marshall (p. 133). Cette variation de la droite X₁Y₁ peut être obtenue par l'action d'un régulateur, pour modifier les périodes d'admission.

Dans tous les cas, le mouvement obtenu se rapproche de celui que donnerait un excentrique fictif, qu'il est assez facile de déterminer.

Les distributions par soupapes donnent des périodes d'admission variables : aucune variation n'est nécessaire pour l'échappement.

Comme pour la commande d'un obturateur Corliss d'admission, l'excentrique d'une soupape d'admission à déclic peut être calé avec une avance angulaire négative (fig. 106).

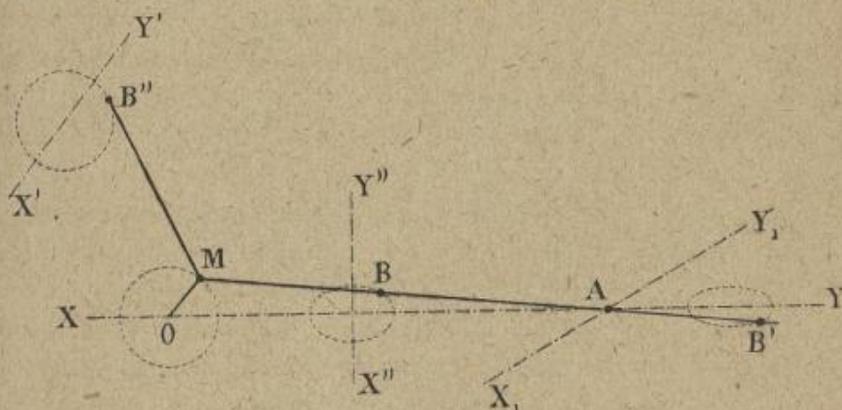


Fig. 117. — Commande d'une tringle par un point quelconque d'une barre d'excentrique, sur l'axe de la barre (B ou B') ou hors de l'axe (B''). L'extrémité A se meut sur une droite d'orientation quelconque.

A titre d'exemple, les figures 118 et 119 représentent la distribution d'une machine compound tandem ayant figuré à l'exposition universelle de 1900.

Sur la figure 118, on voit comment l'extrémité de la barre d'excentrique, dont la poulie est calée sur l'arbre auxiliaire (à droite sur la figure) commande, par un levier roulant, la soupape d'échappement, au-dessous du cylindre. Un point voisin du collier du même excentrique commande la soupape d'admission, non directement, mais par l'intermédiaire d'un renvoi qui est sous la dépendance du régulateur de la machine. Le régulateur, non figuré, agit sur un arbre placé vers la partie inférieure du mécanisme : cela revient à

modifier la position du point de l'excentrique qui commande l'admission. L'amortisseur à air de la soupape, au lieu d'être

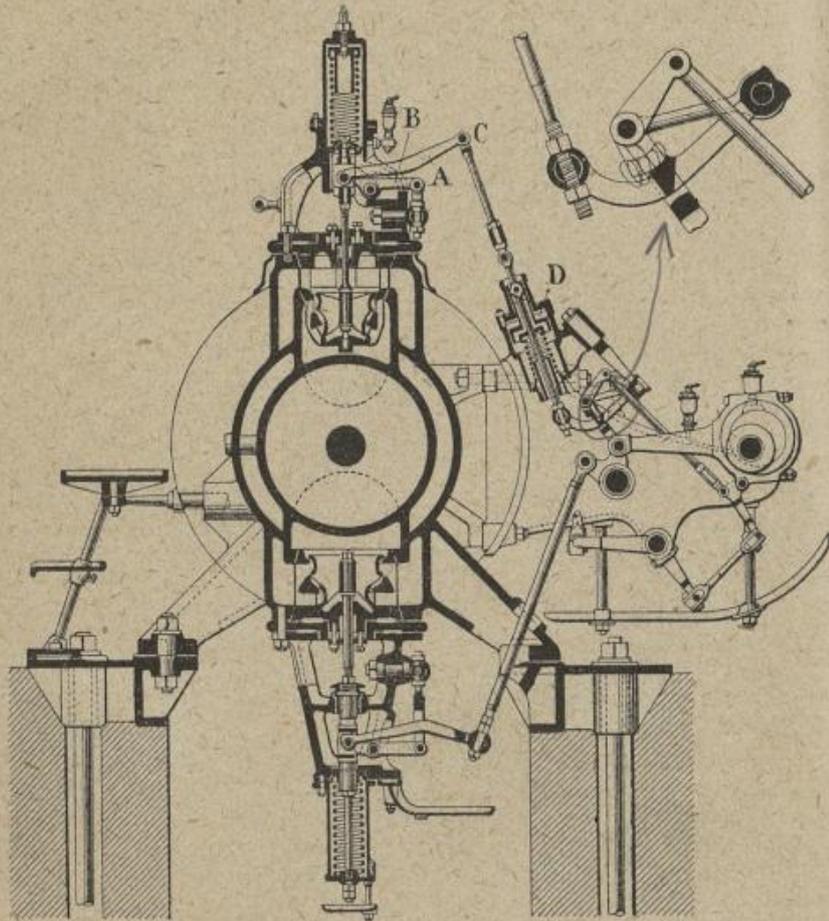


Fig. 118. — Machine tandem de 750 chevaux indiqués, par les frères Sulzer : coupe transversale par le cylindre à haute pression, et détail du mouvement de déclic. Diamètre, 525 mm; course, 1 100 mm; nombre de tours par minute, 100; soupapes à quadruple siège: commande par leviers roulants, avec déclic à la soupape d'admission.

monté sur sa tige verticale, à la manière habituelle, est placé en D sur une tringle qui actionne la soupape par un levier roulant CA : le petit excès de course qui en résulte

pour le piston de l'amortisseur lui permet d'aspirer une

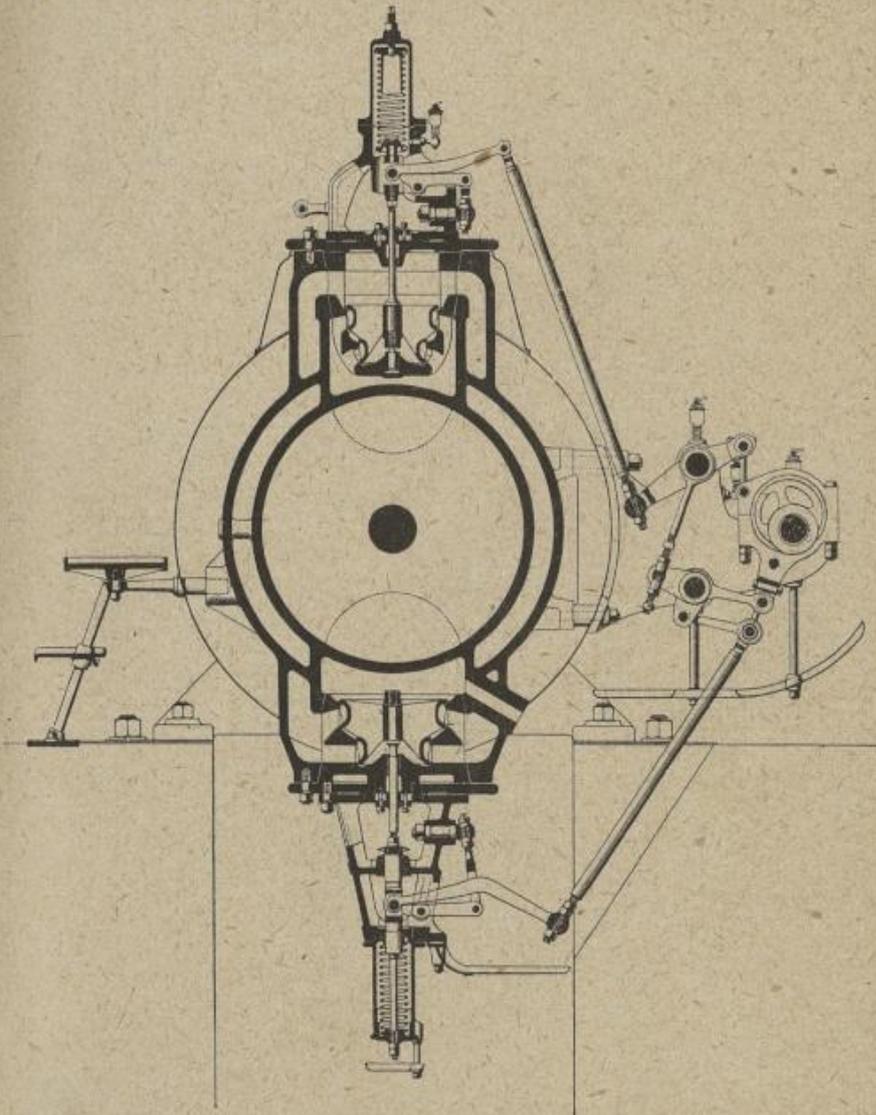


Fig. 119. — Machine tandem des frères Sulzer : coupe transversale par le cylindre à basse pression ; diamètre, 875 mm. Commande des deux soupapes par deux points différents d'une même barre d'excentrique, un à l'extrémité, l'autre sur le collier.

quantité d'air suffisante, même avec les plus courtes admissions.

La figure 119 montre la commande, par un même excentrique, de la soupape d'admission et de la soupape d'échappement correspondante du cylindre à basse pression, par l'intermédiaire de leviers roulants.

Le constructeur Van den Kerchove a remplacé les soupapes par des tiroirs cylindriques, jouant devant des lumières annulaires : on réalise ainsi des fermetures rapides sans choc, le piston continuant sa course une fois la fermeture produite.

49. **Machines équilibrant.** — Les machines dites équilibrant, dont le principe a été indiqué par T.-J. Todd en 1883 et par Rateau en 1894, sont aujourd'hui assez répandues. L'échappement de ces machines se fait par des ouvertures démasquées en fin de course (fig. 120) par le piston moteur, dont la longueur est égale aux neuf dixièmes de la course. Il en résulte une phase d'échappement anticipé pendant le dernier dixième de la course, et une phase égale d'échappement. La compression est, par suite, fort longue puisqu'elle se produit pendant le reste de la course de retour. Aussi cette disposition exige une condensation donnant une très faible pression; on peut même réduire beaucoup l'espace libre, qui n'est que de 2 p. 100 environ du volume théorique du cylindre, de manière à relever la pression de la vapeur jusque vers sa valeur initiale. Pour la marche occasionnelle à échappement libre, ou avec une condensation médiocre, on dispose un espace libre supplémentaire mis en communication avec le cylindre ou bien des soupapes d'échappement spéciales.

Les avantages attribués à cette disposition sont une atténuation de l'action des parois et le bénéfice d'une forte compression, combinée avec une longue détente. Par suite de l'éloignement des orifices d'admission et des orifices d'échappement, les parois du côté de l'admission paraissent moins se refroidir pendant l'échappement, dont la durée est d'ailleurs fort courte : on doit tenir compte de cette circonstance

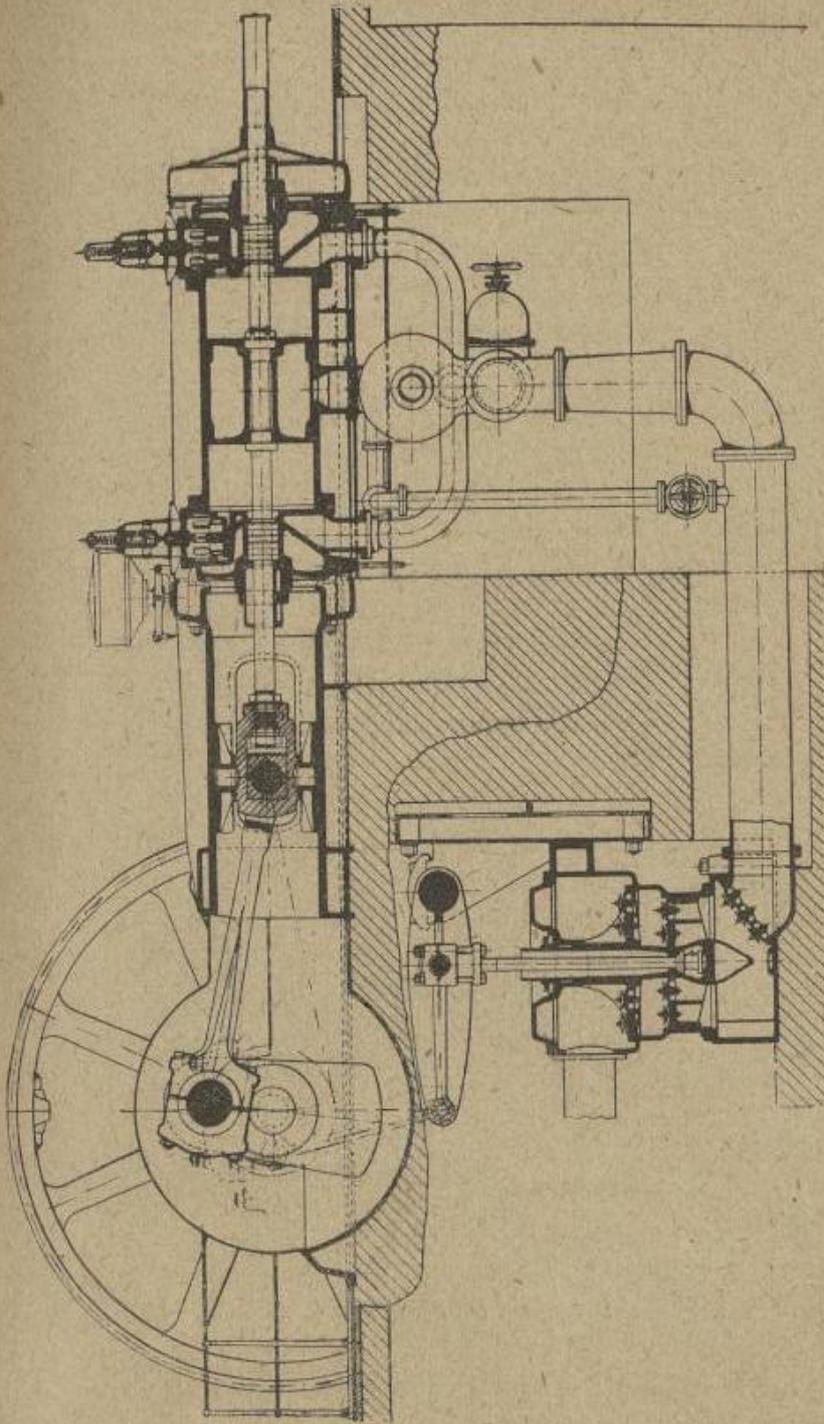


Fig. 120. — Machine équilibre de la Société alsacienne de constructions mécaniques.

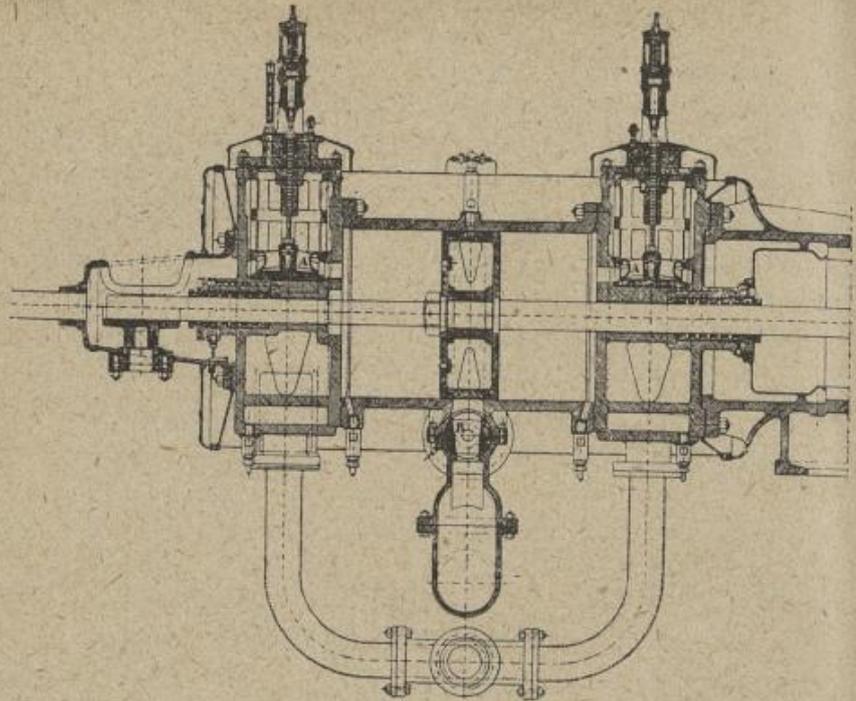


Fig. 121. — Machine équicourant Smal ; coupe longitudinale.

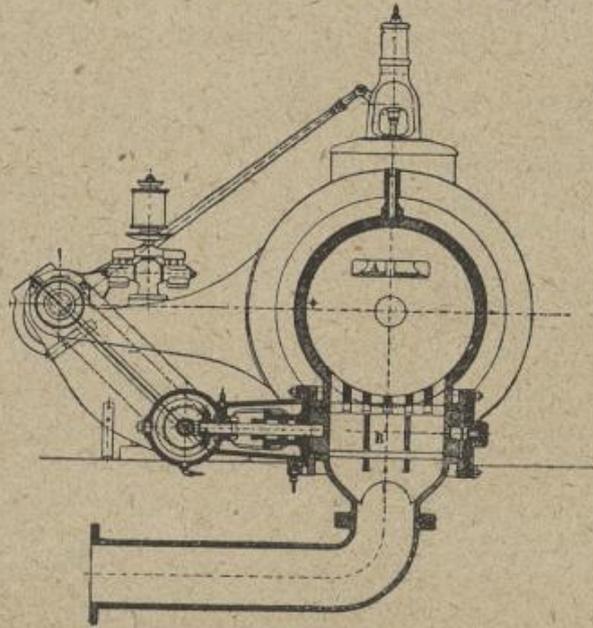


Fig. 122. — Machine équicourant Smal ; coupe transversale.

dans l'alésage du cylindre qui, à froid, n'a pas une section uniforme, mais est renflé vers le milieu.

Quant à la compression, outre l'avantage qu'elle peut avoir au point de vue de l'économie de vapeur, elle évite les changements brusques d'efforts sur les pièces du mécanisme.

Fonctionnant à vapeur surchauffée, certaines de ces machines ont donné de très faibles consommations par kilowatt-heure, qui s'expliquent par un ensemble de circons-

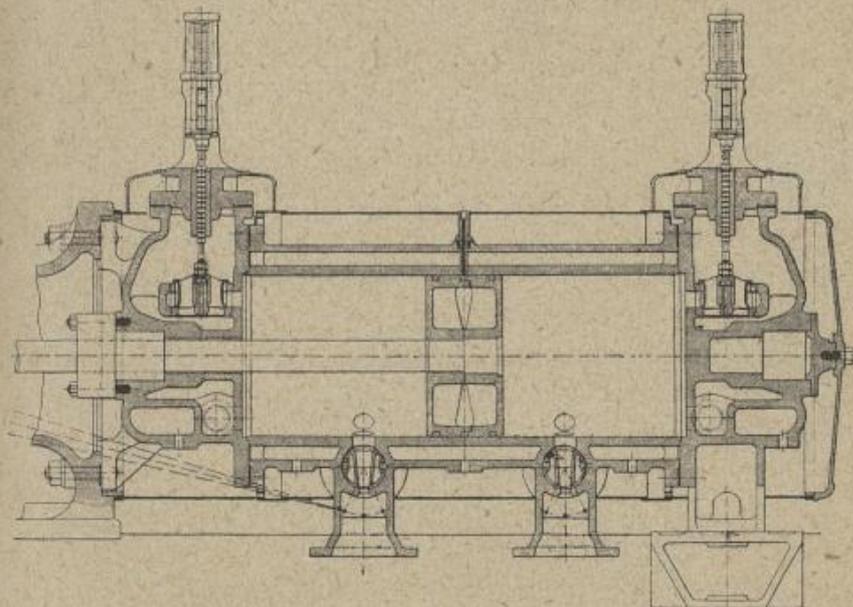


Fig. 123. — Machine équivourant Bollinckx.

tances, parmi lesquelles on peut comprendre le principe même de la disposition à équivourant.

On peut toutefois reprocher à cette machine la grande longueur du piston ; la disposition Smal (fig. 121 et 122) conserve le piston ordinaire, mais les ouvertures d'échappement doivent être fermées par un obturateur tournant. La longueur de la période de compression peut être diminuée, tout en restant supérieure à la demi-course.

Enfin la disposition Bollinckx concilie le piston ordinaire et les ouvertures d'échappement en fin de course (fig. 123) :

il y a deux séries d'ouvertures, avec obturateurs tournants. La compression peut être réduite autant qu'on le juge utile. La figure montre une enveloppe de vapeur complète.

50. Machines sans mouvement de rotation. — On emploie fréquemment, pour commander des pompes ou des compresseurs d'air, les machines à *action directe* sans arbre tournant, où le piston à vapeur et le piston foulant sont montés sur une tige unique. La distribution diffère alors de celles qui viennent d'être examinées (à l'exception de la machine de Cornouailles), qui empruntent leur mouvement à l'arbre animé d'une rotation continue. On fait encore usage du tiroir, qu'il s'agit de déplacer quand le piston arrive à ses fonds de course : la détente de la vapeur est en effet souvent sacrifiée dans ces appareils, où la résistance est à peu près constante pendant toute la course et qui n'ont pas de volant.

Dans quelques appareils (petits chevaux alimentaires) le tiroir est manœuvré par un levier contre lequel bute la tige de piston à fond de course ; mais l'arrêt de la machine est à craindre, si la vitesse est insuffisante pour pousser complètement le tiroir, qui peut rester arrêté dans sa position moyenne. Aussi préfère-t-on commander le tiroir par un piston à vapeur auxiliaire, jouant dans un cylindre où le piston principal distribue la vapeur, en manœuvrant un organe de petites dimensions ; tel est le cas de certaines pompes et des compresseurs montés sur les locomotives pour actionner les freins à air comprimé.

La machine élévatoire de Worthington se compose de deux groupes pareils réunis sur un bâti commun ; le piston d'un groupe commande le tiroir de l'autre d'un mouvement continu : lorsqu'un piston est au milieu de sa course, l'autre piston est au fond de la sienne, et le tiroir de ce second piston, au milieu de sa course, est sur le point d'ouvrir l'admission.

Chaque lumière est divisée en deux conduits, servant l'un pour l'admission, l'autre pour l'échappement. Le conduit

d'échappement débouche à une certaine distance du fond du cylindre, ce qui laisse une chambre où le piston com-

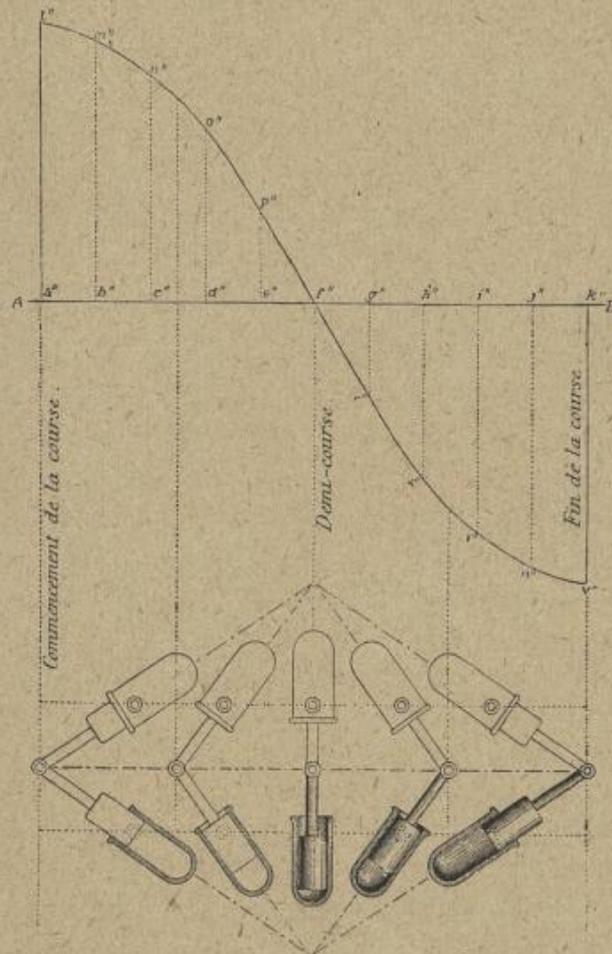


Fig. 124. — Positions diverses du compensateur Worthington. La courbe placée à la partie supérieure de la figure indique, par rapport à la base AB, d'abord l'excès, puis le défaut de la force motrice par rapport à la force résistante constante. La différence de travail qui en résulte est absorbée, puis restituée par les pistons compensateurs, entrant dans leur cylindre et en sortant.

prime la vapeur : il est ainsi arrêté, même en cas de retard dans la manœuvre de son tiroir. Un obturateur oscillant se trouve sur le conduit d'admission : il est relié à la tige du

piston même qu'il dessert, qui le ferme en un certain point de sa course et le rouvre en temps utile, avant le commencement d'une course nouvelle, en repassant au même point. On obtient ainsi la détente de la vapeur. On peut être surpris de la précision avec laquelle les deux groupes croisent leurs mouvements, sans être réunis par une liaison mécanique, telle qu'un arbre avec deux manivelles à angle droit : on s'explique aisément cette précision en remarquant que si l'un des pistons arrive un peu trop tôt à fond de course, il ne repart qu'au moment où son tiroir et par conséquent l'autre piston passent par une position déterminée.

Dans certaines machines Worthington, la même distribution est réalisée à l'aide de quatre obturateurs oscillants par cylindre; deux de ces obturateurs remplacent le tiroir ordinaire et sont commandés de même par le piston de l'autre cylindre. La machine est souvent compound ou à triple expansion, avec deux groupes de deux ou trois cylindres en tandem. L'emploi de la détente, avantageuse pour l'économie de vapeur, présentait une difficulté dans ces machines : la détente diminue la force motrice du commencement à la fin de la course, tandis que la force résistante, due à l'aspiration et au refoulement de l'eau, reste à peu près constante. On n'a plus de volant pour emmagasiner puis restituer le travail résultant de l'excès de la force motrice au début de la course.

Le *compensateur* (fig. 124) remplace le volant : il se compose de deux cylindres oscillants, munis de pistons dont la tige s'articule sur la tige commune du moteur et de la pompe. L'axe de ces cylindres oscillants, à mi-course du moteur, se place perpendiculairement à l'axe du mécanisme principal ; les pistons de ces cylindres sont soumis à la pression de l'eau refoulée par les pompes ou à une pression plus forte ; pendant la première moitié de la course, ils marchent contre cette pression, qui les pousse pendant la seconde moitié.

51. *Contre-vapeur*. — On fait fonctionner à *contre-vapeur*, pour produire un travail résistant, les moteurs à changement de marche, notamment les locomotives et les machines d'extraction. Le tiroir est alors conduit par l'excentrique de marche arrière, tandis que la machine tourne en avant. Pour déterminer la distribution obtenue dans cette marche, il suffit d'appliquer les tracés qui servent à l'étude de la distribution normale, avec un excentrique dont l'angle d'avance δ dépasse l'angle droit (fig. 125). Ces tracés montrent, sur une face du piston, l'*admission* pendant le parcours angulaire 1 — 2, la *détente* pendant 2 — 3, l'*échappement anticipé* pendant 3 — 4, l'*échappement* pendant 4 — 5, la *compression* pendant 5 — 6, et l'*admission anticipée* pendant 6 — 1. Les lettres accentuées s'appliquent à l'autre face du piston. Les périodes d'échappement anticipé et d'admission anticipée occupent alors une fraction importante de la course.

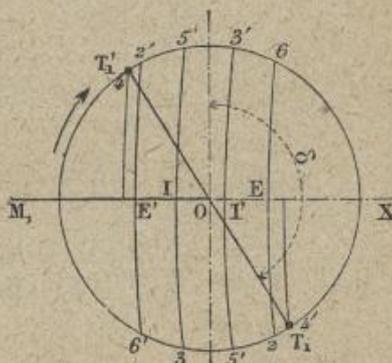


Fig. 125. — Etude de la distribution dans la marche à contre-vapeur, par le tracé ordinaire : l'angle d'avance δ de l'excentrique est plus grand qu'un angle droit.

En comparant cette distribution anormale à celle que donne le même excentrique pendant la marche arrière, on reconnaît que les phases s'intervertissent, pendant les mêmes parcours du piston, effectués en sens contraires : ce qui était admission devient admission anticipée; ce qui était détente devient compression; ce qui était échappement devient échappement anticipé et vice-versa.

Pour prévoir le travail absorbé par la contre-vapeur, on trace d'abord le diagramme d'indicateur sans laminage (tracé 1-2-3-3-4-5-6-6-1 de la figure 126, puis avec laminage (trait ponctué). Le laminage réduit la surface du diagramme

de sorte que le travail résistant par tour diminue quand la vitesse augmente.

En comparant ce travail résistant au travail moteur donné

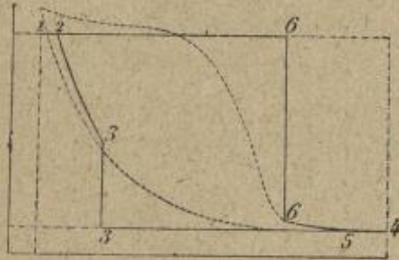


Fig. 126. — Diagrammes de contre-vapeur, sans laminage (trait plein), et avec laminage (trait ponctué).

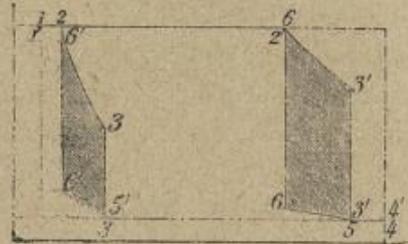


Fig. 127. — Diagrammes comparés de la contre-vapeur (1, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 6, 1), et de la marche normale (1', 2', 3', 3', 4', 5', 6', 6', 1'). sans laminages; les hachures montrent la différence des deux surfaces.

par le même excentrique en marche normale (fig. 127), on trouve souvent qu'il est moindre, aussi bien sans laminages qu'avec laminages.

La manœuvre de l'arbre de relevage déplace le centre de l'excentrique fictif de T à T' (fig. 128) :

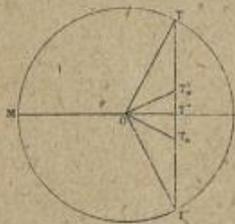


Fig. 128. — Excentriques fictifs de la marche directe (T à T₀) et de la marche à contre-vapeur (T₀ à T'). Dans l'autre sens de rotation, T' à T'₀ et T'₀ à T.

la période d'admission diminue à mesure qu'il se rapproche de la position médiane T''. La distribution donnée par l'excentrique fictif T'' (point mort de la coulisse) est remarquable; les périodes d'admission et d'admission anticipée, d'échappement anticipé et d'échappement, deviennent égales et correspondent aux mêmes parcours du piston en sens contraires. Le diagramme sans laminage est 1-2-3-3-4-5-6-2-1 (fig. 129); le diagramme avec laminage est couvert de hachures. Ce diagramme ne se produit que si le tiroir présente une avance linéaire, qui est la plus grande ouverture de la

lumière à l'admission. L'excentrique fictif OT'' , exactement opposé à la manivelle motrice, donne la même distribution, avec même travail moteur, pour la marche avant et pour la marche arrière.

Quand le centre de l'excentrique fictif dépasse T'' en se rapprochant de T' (fig. 128), la surface du diagramme diminue, mais elle représente encore un travail moteur, jusqu'à une position T_0 où cette surface s'annule algébriquement :

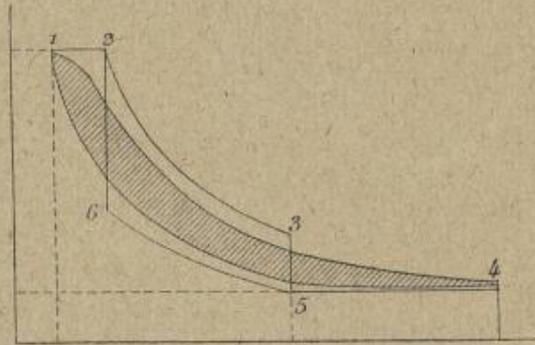


Fig. 129. — Diagramme de la distribution par un excentrique avec avance angulaire de 90° .

le travail résistant pendant le retour du piston compense alors le travail moteur de l'aller. Au delà de T_0 , les différences changent de sens et l'excentrique donne un travail résistant de plus en plus grand à mesure qu'il se rapproche de T' .

Pour l'autre sens de marche, on a de même une zone $T'T_0$ de la coulisse qui donne un travail moteur et une zone plus courte, T_0T , qui donne un travail résistant¹.

52. Démarrage. — Pour qu'une machine se mette en marche il ne suffit pas que la vapeur pénètre dans le cylindre et en presse le piston; il faut que l'effort sur l'arbre, produit par cette pression, soit suffisant pour surmonter

1. Les circonstances spéciales qui accompagnent la marche à contre-vapeur des locomotives sont étudiées dans *La machine locomotive*, par E. Sauvage.

les résistances, fort variables, qui s'opposent à son mouvement. Tantôt ce ne sont guère que les résistances passives des appareils; tel est le cas des laminoirs, de l'hélice des bateaux; tantôt, au contraire, il faut, dès le premier instant de la mise en marche, produire un effort considérable; c'est ainsi qu'une machine d'extraction enlève une charge au bout d'un câble tendu, qu'une locomotive entraîne un train dont les attelages sont serrés.

Il faut aussi, dans certains cas, que le démarrage se fasse immédiatement et sans hésitation dans toutes les positions

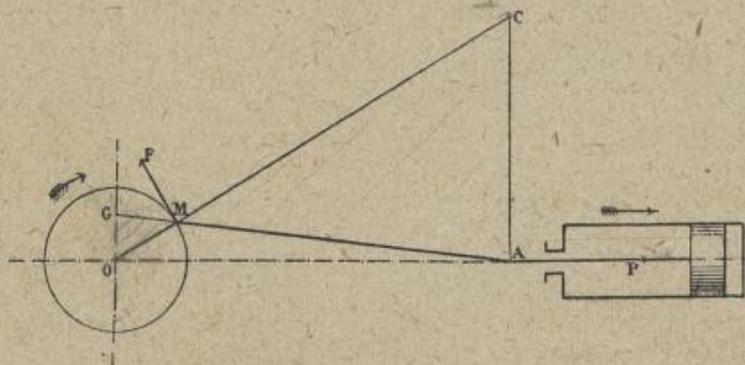


Fig. 130. — Equilibre de l'effort du piston et de la résistance à l'extrémité de la manivelle : la force F est égale à la force P sur le piston multipliée par le rapport $\frac{OG}{OM}$.

de la machine; ou il suffit qu'il soit facile dans la plupart des positions, sans qu'une difficulté de mise en marche, qui se produira quelquefois, ait un très grand inconvénient; ou bien enfin on est libre de placer d'avance la machine dans la position la plus favorable pour le démarrage : ainsi les moteurs d'ateliers, qui ne sont mis en marche que deux ou trois fois par jour, sont arrêtés dans une position favorable, ou déplacés au préalable à l'aide de *vireurs*, commandés à bras d'hommes ou par un moteur auxillaire, agissant sur la jante du volant. Ces appareils doivent être disposés de manière que les hommes ne risquent pas d'être blessés au moment où la machine se met en marche. Ils sont surtout

utiles pour la manœuvre à froid des appareils, lors des réparations.

La connaissance de la distribution d'une machine permet d'apprécier exactement les conditions de démarrage. Cette distribution est ici supposée faite par tiroir ordinaire; les mêmes considérations conviennent d'ailleurs pour les autres mécanismes.

L'effort moteur est transmis à un arbre tournant; la résistance à vaincre peut être assimilée à une force tangentielle agissant à l'extrémité du rayon R de la manivelle. Dans une position quelconque de la machine (fig. 130), on démontre que la force tangentielle F , qui fait équilibre à une poussée ou à une traction P agissant sur le piston, est égale à $P \times \frac{OG}{R}$, OG étant la longueur interceptée par l'axe de la bielle AM sur une perpendiculaire en O à l'axe du cylindre¹, et R le rayon de la manivelle, OM . Quand P est constant, la force F est précisément proportionnelle à la longueur OG .

Lors de la mise en marche d'une machine, la force P , qui pousse le piston, est égale à la pression de la vapeur admise dans le cylindre, multipliée par la surface du piston, moins la contre-pression sur l'autre face, qui sera généralement due à l'atmosphère. Dans une machine à condensation, il arrive souvent que le condenseur ne donne pas encore une pression réduite à la mise en marche. Cette force P n'existe pas si le piston est arrêté dans une position telle que la vapeur ne pénètre pas dans le cylindre. Elle peut même être de sens contraire à celle qui produirait la rotation qu'on veut obtenir, si la machine est dans la position d'admission anticipée.

Un seul cylindre ne produisant aucun effort, ou seulement un faible effort, lorsque la manivelle est arrêtée dans le voisinage de ses points morts, on voit que la facilité du

1. C étant le *centre instantané* de rotation de la bielle, $F \times CM = P \times CA$,
et, dans les triangles semblables CAM et OGM , $\frac{CA}{CM} = \frac{OG}{OM}$.

démarrage exige au moins deux cylindres, dont les pistons attaquent deux manivelles calées à angle droit. En appliquant la règle qui vient d'être indiquée, on détermine aisément, pour une série de positions de la machine, le *moment moteur* $F \times R + F' \times R$, qui résulte de l'action des deux pistons produisant respectivement les forces F et F' .

La position la plus défavorable est celle où le piston d'une des manivelles cesse de recevoir la vapeur : cette manivelle n'agit plus et l'autre ne produit pas encore son plus grand effort. Les distributions qui donnent de longues périodes d'admission réduisent cet effet fâcheux.

Pour le démarrage, comme pour le travail produit en marche, c'est le *volume* seul du cylindre, ou produit de la surface du piston par sa course, qui importe. A égalité de volume, la force P , qui est proportionnelle à la surface du piston, est en raison inverse de la course ou bien du rayon de manivelle; la force F varie de même, mais le produit $F \times OM$ reste constant.

Quand les deux cylindres, qui attaquent les manivelles calées à 90° , sont ceux d'une machine compound, les conditions de démarrage se modifient. Si la manivelle du cylindre à haute pression est arrêtée dans une position telle qu'il n'entre pas de vapeur dans ce cylindre, ou si l'effort de ce piston est insuffisant, on introduit directement la vapeur dans le réservoir intermédiaire, à une tension réduite. Le cylindre à basse pression se trouve alors placé, pour le démarrage, comme le serait le second cylindre de la machine à deux cylindres simples; mais l'introduction de vapeur dans le réservoir réagit sur le premier piston; elle pénètre par l'échappement du cylindre à haute pression et y augmente la contre-pression. Si le piston du petit cylindre est arrêté dans la zone de l'échappement anticipé sur une face, et de la compression sur l'autre, la vapeur qui afflue du réservoir exerce une action motrice. Mais si ce piston se trouve dans la zone de détente, non seulement il ne reçoit pas l'action motrice de la vapeur de

la chaudière, mais encore il est poussé à contre sens par la vapeur du réservoir. Le moment moteur peut alors se trouver beaucoup réduit.

Plusieurs dispositifs, évitant cette difficulté de démarrage, ont été imaginés, surtout pour les locomotives compound.

On peut isoler complètement les deux cylindres en donnant un échappement indépendant au cylindre à haute pression : c'est le dispositif de M. Mallet. Un tiroir spécial ou un appareil équivalent établit à volonté la communication de l'échappement du cylindre à haute pression avec le réservoir ou avec l'extérieur ; on emploie souvent dans ce cas un *détendeur* pour établir dans le réservoir une pression convenablement réduite.

On se contente quelquefois d'un clapet qui peut fermer la communication du réservoir avec l'échappement du cylindre à haute pression : ce clapet empêche la vapeur envoyée dans le réservoir de refluer au cylindre à haute pression, et se rouvre automatiquement par l'effet de l'échappement de ce cylindre.

Dans certaines machines on peut établir à volonté, à l'aide d'un tuyau muni d'un robinet, ou autrement, une communication entre les deux côtés du cylindre à haute pression ; on annihile ainsi complètement l'effet de ce cylindre.

Les difficultés de démarrage disparaissent ou se réduisent beaucoup quand l'admission dans chaque cylindre peut se faire pendant la course presque entière.

53. Comparaison des systèmes de distribution. — L'étude géométrique des distributions, au moyen d'épures, permet de tracer le tableau de la distribution, indiquant, en centièmes de la course, les parcours du piston pendant les diverses phases. Mais ces tableaux ne suffisent pas pour apprécier la distribution réelle, affectée par les laminages plus ou moins forts, qui dépendent de la vitesse de la

machine, de la section des passages de vapeur et de la nature du mouvement des obturateurs. D'une manière générale, on peut considérer deux types de diagrammes, le diagramme avec laminage, donné par les distributions à tiroirs, surtout sur les machines rapides, et le diagramme sans laminage des Corliss et des machines à soupapes à marche lente.

La figure 131 montre deux diagrammes de ce genre : AB est l'admission sans laminage, AB' l'admission avec lami-

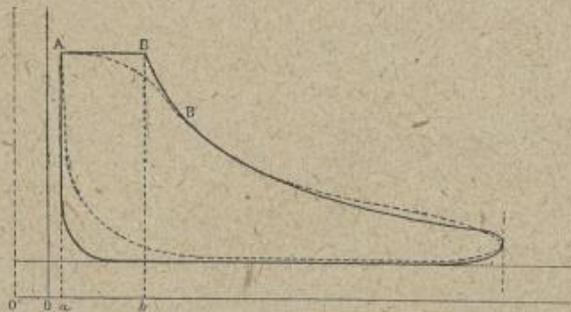


Fig. 131. — Comparaison des diagrammes donnés par les mécanismes de distribution à déclenchement et à mouvement continu : en trait plein, diagramme sans laminage, avec espace libre égal à Oa ; en ponctué, diagramme avec laminage : espace libre $O'a$. Même admission apparente dans les deux cas, bien qu'elle cesse respectivement en B et en B'.

nage, notablement plus longue, et cependant ne correspondant pas à une plus grande quantité apparente¹ de vapeur. Les espaces libres sont Oa et $O'a$, le plus grand étant celui de la machine à tiroir. C'est à cause de cet espace libre plus grand, que la courbe de détente en ponctué, de la machine à laminage, est figurée au-dessus de la courbe en trait plein ; le volume de vapeur qui se détend, comprenant l'espace libre, est plus grand dans la seconde machine. Le diamètre et la course étant les mêmes dans les deux machines, on voit que le laminage réduit le travail par coup de piston.

1. Par quantité apparente on entend celle que montre le diagramme pendant l'admission : il s'y ajoute une certaine quantité condensée sur les parois.

CHAPITRE VI

RÉGULARISATION DU MOUVEMENT

54. Pièces à mouvement alternatif. — Pour connaître l'effort moteur exercé à chaque instant par une machine, il faut d'abord savoir quelle est la force qui agit sur le piston dans chacune de ses positions; on suppose ici qu'il s'agit d'une machine à un seul cylindre. Cette force se détermine facilement par le relevé des diagrammes aux deux extrémités du cylindre: pour une position quelconque du piston, les diagrammes font connaître la pression sur ses deux faces; la différence de ces deux pressions (kg par cm^2), multipliée par la surface du piston (cm^2), donne la force cherchée¹.

Mais la *force d'inertie* des masses à mouvement rectiligne, piston, tige, crosse de piston, petite tête de bielle, vient modifier la force ainsi calculée, surtout dans les machines rapides. Ces masses ont un mouvement tantôt accéléré et tantôt ralenti: une certaine force est absorbée pour produire cette accélération, puis restituée pendant le ralentissement. Cette force, ainsi absorbée et restituée au passage, diminue et augmente périodiquement celle qui résulte des pressions de la vapeur. On la calcule aisément, quand l'arbre tourne avec une vitesse uniforme, condition souvent réalisée à peu près.

En désignant par M la masse des pièces à mouvement rectiligne, on obtient une première approximation de la valeur de la force d'inertie en négligeant l'effet de l'obli-

1. Ce calcul suppose même surface utile des deux faces du piston; la présence de la tige d'un des côtés, ou d'une tige et d'une contre-tige de sections différentes, introduit une légère différence, dont il est facile de tenir compte.

quité de la bielle, ce qui revient à supposer que le piston se meut comme la projection du point M sur XY (fig. 132) ; cette valeur approchée est $-M\omega^2 R \cos \alpha$ (ω , vitesse angulaire, R rayon de la manivelle, α angle dont la manivelle a tourné depuis le point mort M_0). Cette expression montre que la force d'inertie prend sa plus grande valeur absolue quand le piston est à son fond de course ; le signe — indique que cette force d'inertie diminue la force P résultant de l'action de la vapeur quand $\cos \alpha$ est positif, c'est-à-dire

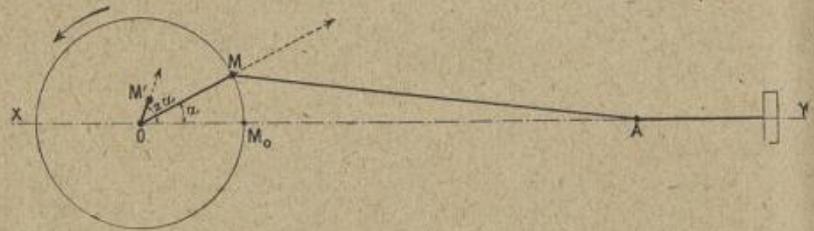


Fig. 132. — Manivelle fictive pour le calcul de la force d'inertie du piston.

pendant la première moitié de la course, et l'augmente pendant la seconde moitié.

Une seconde expression plus approchée, tenant compte de l'obliquité de la bielle, est $-M\omega^2 R \left(\cos \alpha + \frac{R}{L} \cos 2\alpha \right)$, L étant la longueur de la bielle. Les deux valeurs maxima, en fond de course, sont différentes, puisqu'elles sont $-M\omega^2 R \left(1 + \frac{R}{L} \right)$ quand le piston est à son fond de course le plus éloigné de l'arbre, et $M\omega^2 R \left(1 - \frac{R}{L} \right)$ à l'autre fond de course.

On représente graphiquement l'expression de la force d'inertie en supposant une force centrifuge $M\omega^2 R$ appliquée au point M dans la direction de la manivelle, et projetée sur XY (fig. 132), et la même force à l'extrémité d'une manivelle fictive OM', de longueur $R \times \frac{R}{L}$, tournant deux fois plus vite que la première, les deux manivelles partant en même

temps de la direction OM_0 ; cette force est projetée de même sur XY , et les deux projections s'ajoutent. Cette représentation est commode pour certaines applications¹.

La machine est supposée horizontale; quand elle est verticale, le poids des pièces mobiles diminue la force motrice pendant la course montante, et l'augmente pendant la course descendante.

Avec les données suivantes :

Diamètre du piston	370 mm
— de la tige	57 —
Course du piston	330 —
Nombre de tours par minute . . .	300 —
Vitesse angulaire :	
$\left(\omega = 2\pi \frac{300}{60}\right)$	31,4
Longueur de la bielle	825 mm
Poids du piston avec tige et tête.	125 kg
Poids de la bielle	80 kg

205
32

} dont 32 kg
attribués
au piston.

On trouve que les deux maxima de la force d'inertie sont, en valeurs absolues :

$$\frac{157}{9,81} 31,4^2 \times 0,165 \left[1 \pm \frac{165}{825} \right], \text{ soit } 3180 \text{ et } 2120 \text{ kg.}$$

La force tangentielle, qui fait tourner l'arbre, se déduit de la force qui vient du piston, correction faite de l'effet de la force d'inertie, par la règle indiquée au § 52, c'est-à-dire en multipliant la force après correction par le rapport $\frac{OG}{OM}$ (fig. 130).

55. Volants. — La force tangentielle, qui fait tourner l'arbre d'un moteur, est loin d'être uniforme pendant un

1. La vitesse angulaire, exprimée en radians par seconde (radian, angle mesuré par un arc de longueur à son rayon) est égale au nombre de tours par seconde multiplié par 2π . La masse se calcule en divisant le poids en kg par l'accélération due à la pesanteur, 9,81.

+ règle

tour. A certains moments, elle s'annule et peut même devenir négative ou résistante. La figure 133 représente les variations de cette force pendant un tour : la circonférence entière est développée suivant la base $0^\circ - 360^\circ$ et la force en chaque point est représentée par une perpendiculaire à cette base : on obtient ainsi une courbe, qui passe en dessous de la base quand la force devient négative. La surface comprise entre cette courbe et la base représente, à une échelle facile à déterminer, en déduisant les parties négatives en dessous de la base, le travail produit pendant un tour.

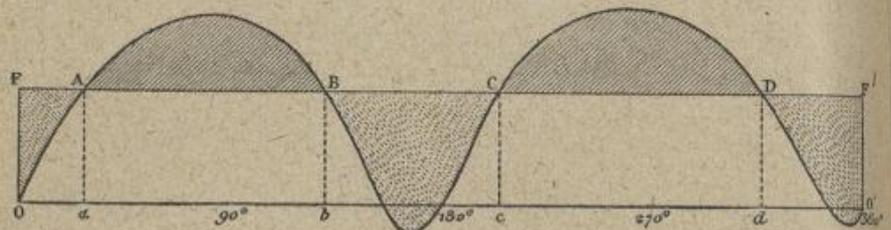


Fig. 133. — Efforts, moteur et résistant, sur l'arbre d'une machine à un cylindre; la force tangentielle est représentée par des perpendiculaires à la base $0^\circ - 360^\circ$, qui figure la circonférence développée; la courbe montre les variations de cette force. La force tangentielle résistante, supposée invariable, est figurée en chaque point de la base par une hauteur aA .

Le travail résistant des appareils commandés, auquel s'ajoute celui des résistances passives du moteur, peut de même varier suivant une loi connue pendant un tour : une surface limitée par une courbe et par l'axe OO' le représentera. Parfois à peu près uniforme, il est figuré par un rectangle $OFF'O'$.

Dans la marche à l'état de régime, le travail moteur pendant un tour est égal au travail résistant : les surfaces $OFF'O'$ et $OABCD O'$ ont même valeur algébrique.

Lorsque la force motrice surpasse la force résistante, la vitesse de la machine, et de tous les mécanismes qu'elle entraîne, augmente, pour se ralentir quand la différence des forces est en sens inverse. Cette augmentation ou cette

diminution de vitesse dure tant que la différence des forces reste de même sens. C'est donc pour les positions de la manivelle correspondant aux points A et C (fig. 133) qu'auront lieu les *minima*, et aux positions B et D les *maxima* de vitesse.

L'uniformité de la vitesse de rotation de l'arbre, supposée plus haut, serait donc loin d'être réalisée, si on n'ajoutait à l'arbre des masses tournantes, constituant le *volant*, qui régularisent le mouvement autant qu'on le désire.

L'effet utile d'un volant dépend de ce qu'on appelle son *moment d'inertie*¹. Le moment d'inertie, fonction de la masse et du carré du rayon, sera le même pour un volant lourd de petit rayon, et pour un volant de grand rayon et relativement léger. Or le poids du volant est supporté par les paliers dans lesquels tourne l'arbre, et il en résulte une perte de travail par frottement. Il y a donc intérêt à employer le volant léger, qui donne moins de travail de frottement par tour. Mais avec le rayon, pour une vitesse angulaire donnée, augmente la vitesse à la circonférence, qui ne peut dépasser une certaine limite, sous peine de soumettre le métal à des tensions excessives et dangereuses. Avec la fonte, généralement employée, on ne doit pas dépasser une vitesse linéaire de 25 à 30 m par seconde à la circonférence. Les tensions dans le métal augmentent comme le carré de la vitesse, qu'il serait par suite dangereux de trop laisser s'accroître. Cet accroissement de vitesse peut se produire quand la résistance vient à disparaître : la machine, tournant à vide, risque alors de s'emballer, si des dispositions spéciales de sécurité ne s'y opposent.

1. Si m est la masse d'une portion du volant, située à une distance r du centre la somme de tous les produits tels que mr^2 est le moment d'inertie.

ω' étant la vitesse angulaire minima, en A, ω'' la vitesse maxima, en B, T le travail moteur excédant de A en B, figuré par l'aire couverte de hachures, on a la relation

$$T = MK^2 \omega (\omega'' - \omega')$$

où $MK^2 = \sum mr^2$ est le moment d'inertie du volant et ω la vitesse moyenne $\frac{\omega' + \omega''}{2}$.

En employant un métal plus résistant que la fonte, on peut augmenter la vitesse de marche des volants.

Quand la machine a deux cylindres agissant sur deux manivelles, on évalue l'effort produit par chacun deux au même instant, puis on ajoute ces efforts simultanés (fig. 134). Un volant beaucoup plus faible suffit à donner la même régularité, à cause de la moindre variation de l'effort moteur.

Des tracés analogues s'appliquent aux machines à trois manivelles (machines marines, moteurs de laminoirs réver-

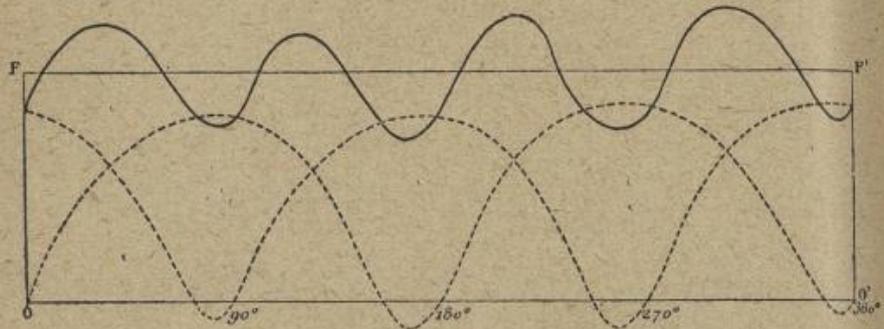


Fig. 134. — Machine à deux cylindres avec manivelles à angle droit; tracé des variations de l'effort moteur pendant un tour.

sibles, par exemple), qui, même sans volant, tournent assez régulièrement.

Les volants ne servent pas seulement de régulateurs de vitesse angulaire; dans certains cas, on les emploie comme accumulateurs du travail, qu'ils restituent en se ralentissant. Cet emploi est fréquent dans les machines de laminoirs à rotation continue, où les résistances, autres que les frottements, sont intermittentes : pendant que la barre se profile entre les cannelures du laminoir, la résistance est très grande, et le volant, en se ralentissant, vient en aide à la machine; il s'accélère de nouveau et recueille le travail disponible dans les intervalles entre les passages des barres. En principe, le fonctionnement reste le même : la différence tient à la valeur des écarts de la vitesse.

Par exemple, un volant ayant une jante de 20.000 kg avec

un rayon moyen de 2,50 m, en se ralentissant de la vitesse de 120 tours par minute à celle de 80 tours, restitue environ 500.000 kgm.

56. Action des régulateurs. — Certaines machines, telles que les locomotives, les machines marines, les machines d'extraction, les moteurs de treuil, tournent à des vitesses

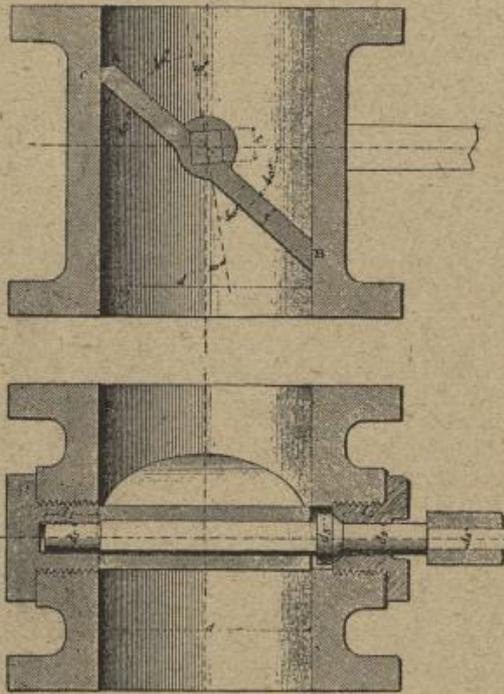


Fig. 135. — Papillon commandé par un régulateur.

variables, réglées par le conducteur, qui agit sur la prise de vapeur et sur l'organe de distribution. Mais la plupart des machines fixes doivent tourner à une vitesse déterminée à l'avance sans trop s'en écarter. Cet effet s'obtient automatiquement par l'action d'un *régulateur*.

Le régulateur fait varier le travail par tour de l'arbre, soit en réduisant la pression de la vapeur amenée au cylindre de la machine, soit en modifiant la longueur de l'admission.

La pression de la vapeur est réduite par un *papillon* tournant autour d'un axe (fig. 135), ou par une *lanterne équilibrée* (fig. 136), qu'un faible effort suffit à manœuvrer. Lorsque ces appareils sont voisins de leur position de fermeture complète, un petit déplacement produit une variation considérable de la pression, tandis qu'ouverts en grand ils sont moins sensibles.

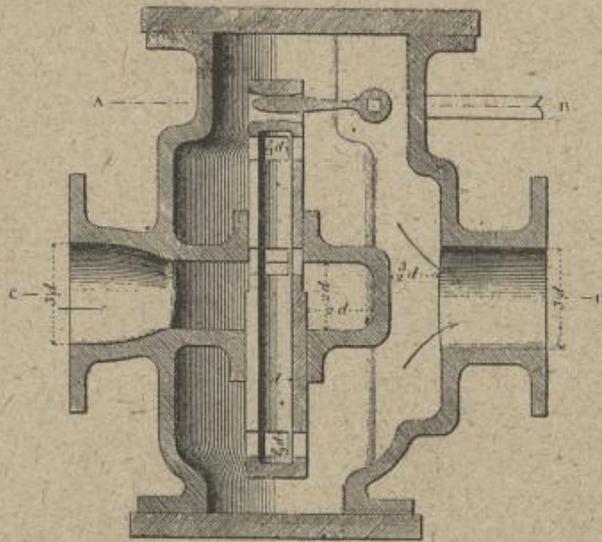


Fig. 136. — Lanterne équilibrée commandée par un régulateur (d'après G. Marié).

Les mécanismes, qui font varier l'admission de vapeur dans le cylindre, et par suite donnent une détente variable, se voient sur la plupart des machines à déclenchement, telles que les Corliss, et sur certaines machines à tiroirs superposés, Rider, Farcot et autres.

Au point de vue de l'utilisation de la vapeur, la détente variable est en principe préférable au laminage de la vapeur. Mais si les variations de la puissance nécessaire sont faibles, de sorte que la perte de pression par laminage ne soit jamais grande, la consommation de vapeur reste pratiquement la même avec les deux systèmes. On peut donc tirer un bon parti d'une machine réglée par papillon, et munie d'un

mécanisme de détente variable à la main, tel que le système Meyer : le régulateur produit les petites variations de puissance, et on ajuste la détente à la main pour les grandes.

Dans le cas exceptionnel où on demande à un moteur une puissance très inférieure à celle qu'il donne normalement, il peut être préférable de ne pas recourir à une admission très réduite suivie d'une détente trop prolongée, et au contraire d'abaisser par laminage la pression initiale.

57. Régulateurs de Watt et de Porter.

Un régulateur ancien, et fréquemment encore employé, est celui de *Watt*, à force centrifuge. Il consiste (fig. 137) en un axe vertical, tournant avec

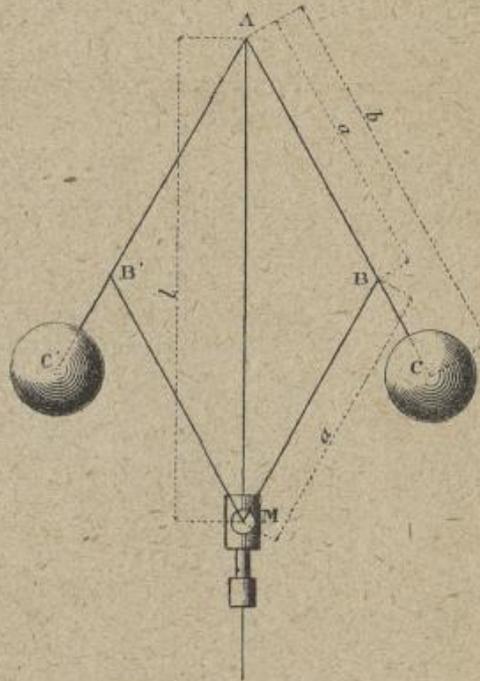


Fig. 137. — Régulateur de Watt.

le moteur qu'il s'agit de régulariser, et qui porte deux bras articulés, AB, AB', avec les masses C et C'. Les tiges BM et B'M rattachent ces bras au manchon M, qui peut coulisser sur l'axe. Quand les boules C et C' s'écartent de l'axe, le manchon M s'élève, et il descend quand les boules se rapprochent. Le manchon, par son mouvement longitudinal, le mouvement de rotation se trouvant éliminé, commande l'organe de réglage du moteur, papillon ou mécanisme de détente.

L'arbre du régulateur est commandé par l'arbre du moteur, à l'aide d'engrenages ou de courroies, de manière à tourner constamment avec une vitesse proportionnelle.

Pour une certaine vitesse, choisie comme normale, les boules s'écartent d'une quantité déterminée de l'axe du régulateur. Si la vitesse augmente, les boules s'écartent davantage, et prennent une nouvelle position. En s'écartant, les

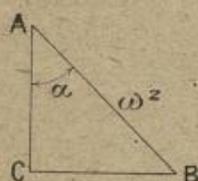


Fig. 138. — Représentation par le vecteur AB du carré de la vitesse angulaire ω .

boules soulèvent le manchon et agissent sur l'organe de réglage du moteur, de manière à réduire le travail moteur par coup de piston. L'accélération de la machine indique en effet que la puissance motrice est trop forte par rapport à la puissance résistante.

Le ralentissement de la machine, qui résulte d'une insuffisance de puissance motrice, produit le rapprochement des boules du régulateur, l'abaissement du

manchon et l'augmentation de la pression de la vapeur ou de la période d'admission¹.

On voit que ce régulateur ne maintient pas une vitesse constante, mais empêche seulement les écarts de la vitesse, de part et d'autre de la normale, de dépasser certaines valeurs, fixées suivant les cas. Quand une très grande régularité est nécessaire, par exemple pour l'éclairage électrique, la filature, on demande que ces écarts, dans un sens ou dans l'autre, ne dépassent pas 1 à 2 p. 100 de la vitesse normale; la plus grande vitesse correspond à la marche à vide de la machine, la plus petite à la charge la plus grande. Pour

1. La formule qui relie la vitesse angulaire ω et l'angle α que fait le bras du régulateur avec l'axe vertical est

$$\omega^2 = \frac{g}{P} \frac{P + \frac{a}{b} Q}{b \cos \alpha}$$

P étant le poids d'une boule et Q celui du manchon, a et b représentant les longueurs indiquées sur la figure 137.

On en déduit un tracé graphique simple : sur la figure 138, la longueur AB, faisant avec la verticale l'angle α , représente le carré de la vitesse angulaire (ω^2), AC figurant le nombre.

$$\frac{g}{P} \frac{P + \frac{a}{b} Q}{b}$$

d'autres applications, on admet des variations jusqu'à 5 p. 100 en plus ou en moins de la normale.

Ces variations dépendent des proportions données aux organes du régulateur, et aussi de l'amplitude utilisée des écarts des boules ; elles sont faibles quand une petite différence dans l'écartement des boules correspond à la course complète de l'organe de réglage.

En réalité, pour une très faible variation de la vitesse angulaire, l'angle des bras peut ne pas changer ; une certaine résistance, provenant des frottements des organes du régulateur et de ceux qu'il commande, s'oppose au déplacement du bras, et n'est surmontée que lorsque les forces qui tendent à faire varier l'angle atteignent une valeur suffisante. R étant la valeur de la résistance supposée appliquée au manchon de poids Q , c'est comme si le poids du manchon était $Q + R$ quand il s'élève et $Q - R$ quand il descend¹.

On appelle *sensibilité* du régulateur le rapport de la vitesse angulaire moyenne à la différence des vitesses extrêmes,

$\frac{\omega}{\omega' - \omega''}$ ², entre lesquelles le manchon reste immobile.

1. La formule de la vitesse angulaire devient alors

$$\omega'^2 = \frac{g}{P} \frac{P + \frac{a}{b}(Q + R)}{b \cos \alpha}$$

et

$$\omega''^2 = \frac{g}{P} \frac{P + \frac{a}{b}(Q - R)}{b \cos \alpha}$$

La vitesse peut varier entre ω' et ω'' sans que l'angle α change.

2. Comme la vitesse moyenne ω est égale à $\frac{\omega' + \omega''}{2}$, la sensibilité a pour expression $\frac{1}{2} \frac{\omega' + \omega''}{\omega' - \omega''}$ ou $\frac{1}{2} \frac{(\omega' + \omega'')^2}{\omega'^2 - \omega''^2}$, soit approximativement, vu le faible écart de ω' et ω'' , $\frac{\omega'^2 + \omega''^2}{\omega'^2 - \omega''^2}$.

Avec la formule donnée pour le régulateur de Watt, cette expression devient

$$\frac{P + \frac{a}{b}Q}{\frac{a}{b}R}$$

Elle reste constante pour toutes les positions du manchon pourvu que la valeur de la résistance R ne varie pas.

Un excès de sensibilité serait nuisible, car le volant laisse subsister pendant chaque tour de petites variations de vitesse, que le régulateur ne peut évidemment pas corriger.

On remarquera que la sensibilité n'est pas une qualité intrinsèque d'un régulateur, mais qu'elle dépend aussi de la résistance du système qu'il commande.

Le travail que peut produire un régulateur pour manœuvrer l'organe de réglage est minime : aussi dispose-t-on cet organe et ses transmissions pour que la manœuvre n'exige qu'un faible effort ; la course est d'ailleurs toujours petite.

Pour la bonne marche de la machine, il importe que l'action du régulateur soit très prompte : c'est une condition que ne réalise pas le *régulateur à embrayage*, qui se contente de mettre l'organe de réglage, par exemple la vis à filets opposés de la distribution Meyer, en relation avec les pièces en mouvement de la machine : la manœuvre est beaucoup trop lente ; le retard qui en résulte dans la modification du travail moteur permet des écarts notables de vitesse et peut donner de grandes irrégularités de marche. S'il est nécessaire de faire produire de grands efforts à un régulateur, on doit lui adjoindre un servo-moteur à action rapide, qui n'a pas les inconvénients de l'embrayage.

Il importe que l'action de l'organe de réglage soit aussi très prompte ; toutefois certaines causes de retard sont inévitables. Dans une machine Corliss, dès que l'obturateur d'admission sur un côté du piston vient de se refermer, la vapeur est engagée dans le cylindre et y produit un travail déterminé ; il n'y a plus de réglage que sur l'admission suivante, de l'autre côté du piston. Un papillon ne modifie pas instantanément la pression en aval, car une certaine quantité de vapeur l'a déjà dépassé au moment où il agit : aussi importe-t-il que le volume compris entre le papillon et le cylindre soit aussi réduit que possible. Dans les machines à plusieurs cylindres successifs, avec réservoirs intermédiaires, un effet analogue prend une grande importance,

quel que soit le mode d'action du régulateur avant l'admission au premier cylindre; la quantité de vapeur engagée dans la machine et qui doit y terminer son évolution est considérable. On n'évite cet effet que par une action simultanée sur l'admission dans chacun des cylindres.

Quand le régime de marche de la machine varie, ce qui

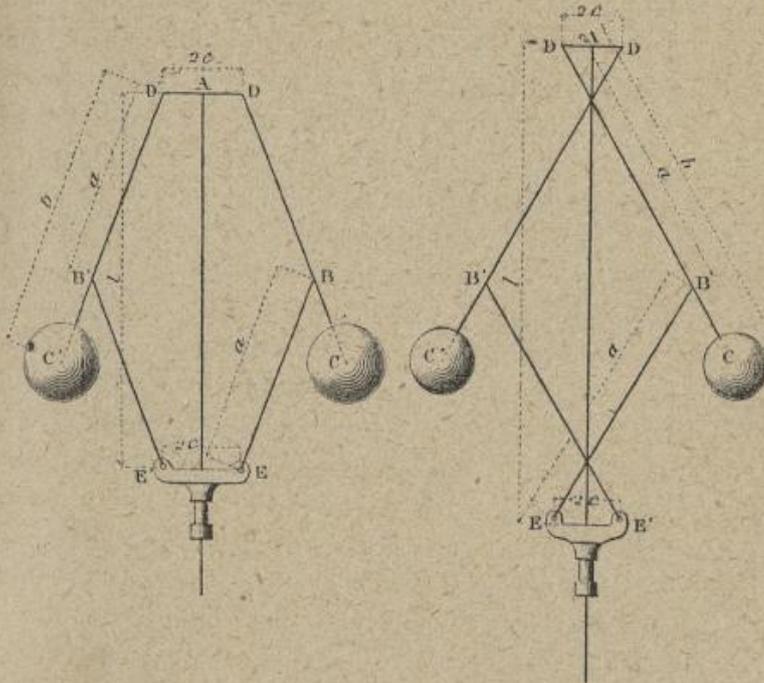


Fig. 139. — Régulateur de Watt avec bras articulés à distance de l'axe vertical tournant.

Fig. 140. — Régulateur de Watt à bras croisés.

correspond à un petit changement de vitesse, un bon régulateur doit passer rapidement et sans oscillations prolongées d'une position de ses boules à une autre; pour éteindre les oscillations on emploie souvent un *frein à huile*, consistant en un piston non jointif dans un cylindre plein d'huile, dont la résistance empêche les mouvements saccadés, sans gêner les déplacements plus lents.

Le régulateur de Watt a été modifié de diverses manières;

notamment les deux bras s'articulent non pas en A sur l'axe vertical, mais en D et D', à quelque distance de cet axe (fig. 139 et 140). La première de ces dispositions augmente les variations de vitesse qui correspondent à une même différence dans l'écartement des boules; la seconde, celle à *bras croisés*, diminue cette variation.

Le régulateur de *Porter* est caractérisé par l'importance de la masse du manchon (fig. 141). Il doit tourner plus vite

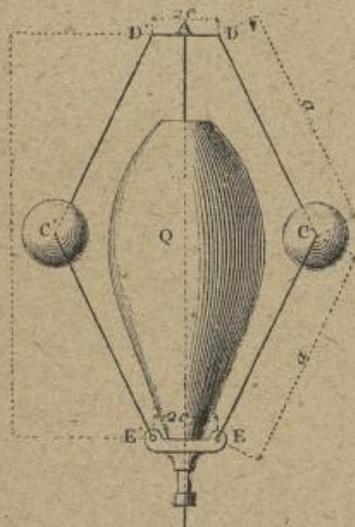


Fig. 141. — Régulateur de Porter, caractérisé par la grande masse du manchon (Q), relativement aux boules C, C'.

que le régulateur de Watt équivalent : la transmission est installée en conséquence. Avec des dimensions restreintes, il peut exercer en se déformant un travail assez grand. Comme le manchon demeure suspendu par l'action des masses tournantes, action qui est proportionnelle au carré de la vitesse angulaire, de petites masses tournant très vite supporteront un lourd manchon, tandis qu'avec une rotation lente, de grosses boules ne tireront qu'un petit manchon. La résistance des mécanismes commandés s'ajou-

tant au poids du manchon et s'en retranchant, on conçoit qu'elle troublera le fonctionnement de l'appareil d'autant moins que ce poids sera plus fort : la sensibilité sera plus grande.

58. Types divers de régulateurs. — En faisant varier le poids du manchon d'un régulateur à force centrifuge, on modifie la vitesse de marche qui correspond à l'écartement moyen des boules. La variation directe du poids du manchon

exigerait l'arrêt de l'appareil; mais il est facile d'ajouter un poids supplémentaire sur un levier commandé par le manchon (fig 142). L'action de ce poids, modifiée par l'effet du levier, est la même que celle du manchon : toutefois l'augmentation de l'effort qui se développe entre le manchon tournant et la fourche qu'il entraîne est une cause de frotte-

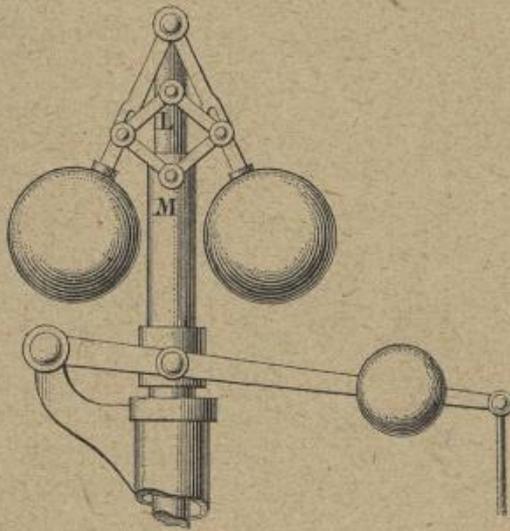


Fig. 142. — Régulateur Andrade, avec manchon à poids réglable par une masse extérieure.

ment supplémentaire. L'emploi d'un poids curseur, qui modifie le bras de levier, permet un réglage facile.

Au poids du manchon on peut substituer un ressort généralement en hélice (fig. 143), moins encombrant. L'axe du régulateur n'est plus alors nécessairement vertical, ce qui permet de monter directement le régulateur sur l'arbre (horizontal) des machines rapides. Le poids des boules n'entre plus en jeu, mais son action est minime à côté de la force centrifuge.

La seule différence d'effet qui résulte de la substitution du ressort au poids du manchon est une légère variation de la tension quand l'angle des bras change, tandis que le poids

beaucoup trop étendues. Il convient donc de disposer l'appareil de manière qu'il ne soit pas rigoureusement isochrone.

Dans le régulateur Hartung (fig. 144), le ressort est directement opposé à la force centrifuge. Au point de vue des frottements, il est avantageux d'équilibrer ainsi les forces sans intermédiaires¹.

Cette disposition permet d'obtenir l'isochronisme. Avec l'isochronisme, la vitesse angulaire reste constante quelle que soit la position de la masse tournante; la force centrifuge est alors proportionnelle à la distance de l'axe au centre de gravité de cette masse. D'autre part, la tension du ressort est proportionnelle à son allongement : on peut donc rendre constamment égales les deux forces opposées. Pour

¹ Voir *Revue de mécanique*, avril 1912, p. 359.

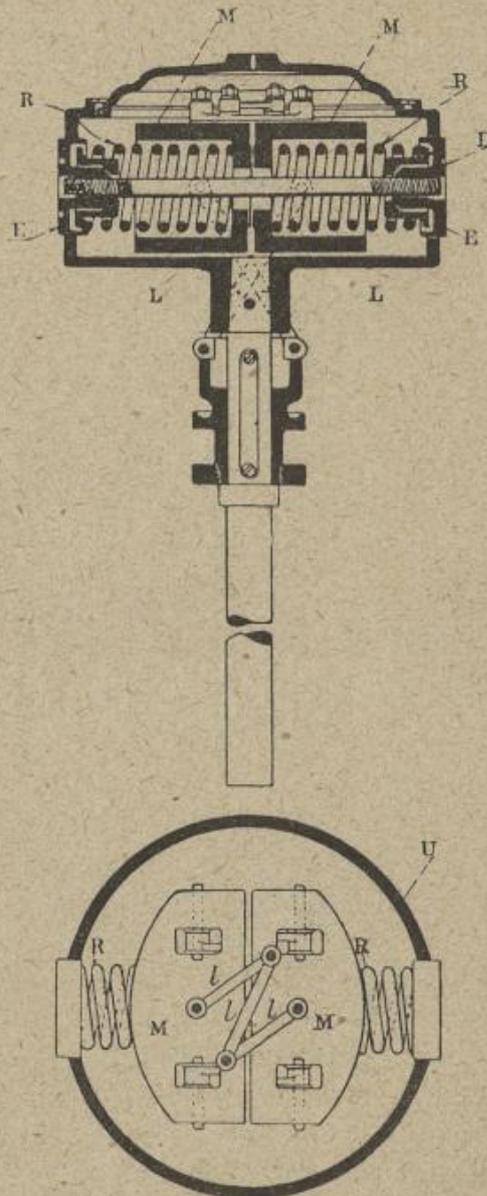


Fig. 144. — Régulateur Hartung. Les masses M agissent sur le manchon par des leviers croisés; elles sont guidées horizontalement par les leviers *l*. Les ressorts prennent appui sur des douilles à rotule D.

l'application, il conviendra de modifier le montage de manière à créer une certaine variation de vitesse angulaire.

59. Régulateurs agissant sur l'excentrique. — Le tiroir des machines rapides est souvent commandé par un excentrique à rayon et calage variables, en relation directe avec un régulateur (fig. 145) : O étant le centre de l'arbre, il s'agit de déplacer le centre de la poulie d'excentrique de T_1 à T_0 ,

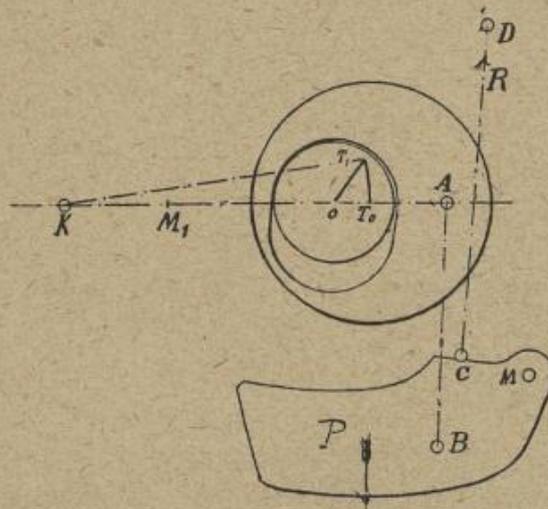


Fig. 145. — Régulateur agissant sur le calage de l'excentrique : le centre de l'excentrique peut se déplacer de T_1 à T_0 , sous l'action combinée de la masse P et du ressort R .

quand on veut passer du maximum au minimum d'admission. Cette poulie est articulée autour d'un centre K , qui tourne avec l'arbre. Une masse P , articulée autour d'un axe M , tend à s'écarter du centre O pendant la rotation du système, en entraînant le centre de la poulie d'excentrique vers T_0 ; mais un ressort antagoniste la rappelle en sens contraire, en tirant suivant CD .

Pour chaque vitesse de rotation, entre deux limites voisines, il s'établit une position d'équilibre relatif du système, et le centre T de l'excentrique s'arrête en un point déter-

miné entre T_1 et T_0 . A la plus petite vitesse correspond la

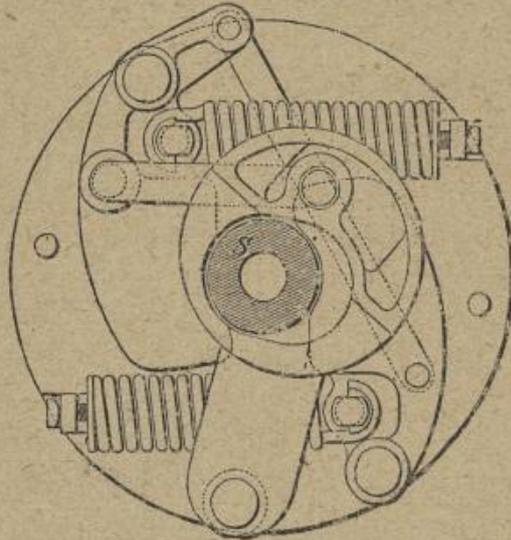


Fig. 146. — Régulateur de la machine Westinghouse : admission la plus grande ; vitesse minima.

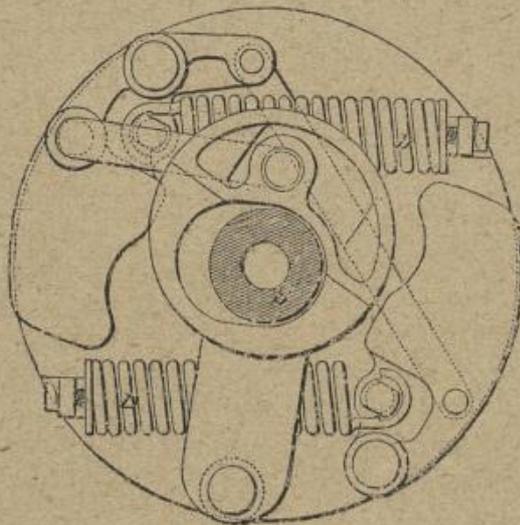


Fig. 147. — Régulateur de la machine Westinghouse : admission la plus petite ; vitesse maxima ; les poids articulés sont aussi écartés et les ressorts aussi tendus que possible.

position T_1 du centre, qui donne la plus grande admission ;

à la plus grande vitesse, la position T_0 , qui donne la plus petite admission.

On ajoute une seconde masse P' avec son ressort R' , symétrique par rapport à l'axe O , afin de doubler les forces en jeu et d'éviter le *balourd* de l'arbre. On peut aussi ne monter qu'un seul ressort, réunissant les deux poids et n'ayant pas d'attaches fixes.

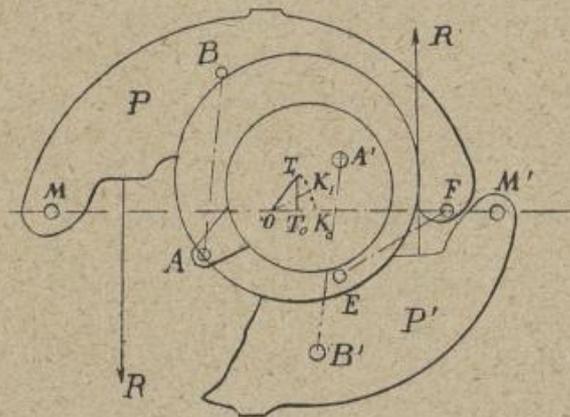


Fig. 148. — Régulateur agissant sur le calage de l'excentrique, à deux poulies superposées : une première poulie peut tourner sur l'arbre, de K_1 à K_0 ; la seconde tourne sur la première, ce qui en amène le centre de T_1 à T_0 . Ces deux poulies sont en relation avec les deux masses symétriques P , P' , articulées en M , M' qui s'écartent quand la vitesse augmente, et sont rappelées par les ressorts R , R' . L'une de ces masses tire la première poulie par une bielle $B'A'$; l'autre masse tire la seconde poulie par BA .

Les figures 146 et 147 donnent un exemple du système avec deux ressorts.

D'autres dispositions donnent des effets analogues : parfois on fait usage de deux poulies superposées (fig. 148), pouvant être déplacées en sens inverse sous l'action des masses rappelées par ressorts. Le collier d'excentrique est monté sur la poulie extérieure, dont le centre peut se déplacer de T_1 à T_0 , tandis que le centre de la poulie intérieure, montée sur l'arbre, va de K_1 à K_0 .

Pour que les systèmes de ce genre fonctionnent bien, il faut que l'action du régulateur soit très puissante par rap-

port à la résistance du tiroir : cette résistance pourrait, en effet, agir sur l'excentrique dont elle modifierait le calage, et la distribution en serait troublée. Aussi fait-on usage de tiroirs équilibrés ou cylindriques. La masse doit en être aussi faible que possible, pour atténuer l'effet des forces d'inertie ; on cherche aussi à réduire au minimum le frottement de la tige dans la garniture.

Quelquefois on munit le régulateur d'un frein à huile, monté dans le volant qui l'entraîne, frein qui s'oppose à tout déplacement brusque des pièces, et notamment au décalage de la poulie par suite de la résistance du tiroir.

60. Régulateurs à inertie. — On a utilisé, pour la régularisation de la vitesse des machines, d'autres actions que la force centrifuge. Le régulateur à inertie se compose d'un volant spécial, entraîné par la machine à régulariser par l'intermédiaire de pièces lui communiquant le mouvement par un faible frottement : dès qu'une variation un peu rapide dans la vitesse se produit, ce frottement est surmonté, le volant conserve sa vitesse et son déplacement relatif commande un organe de réglage. Mais ce système simple ne peut régulariser une machine à vapeur, parce que, d'une part il ne détermine aucune valeur de la vitesse moyenne, et d'autre part il est insensible à une variation de vitesse assez lente pour que le frottement du mécanisme de liaison ne soit pas surmonté. Mais il peut s'allier à un appareil à force centrifuge.

Le régulateur Lentz (fig. 149) combine la disposition centrifuge agissant sur le calage de l'excentrique avec une masse tournante dont l'inertie entre en jeu. A cet effet, le ressort opposé à la force centrifuge est rattaché aux masses A par l'intermédiaire d'un anneau C, l'autre extrémité de ce ressort étant fixé sur l'arbre qui tourne avec le moteur. Si on supposait négligeable la masse de cet anneau C, le système fonctionnerait exactement comme ceux qui viennent d'être décrits au paragraphe précédent, la réaction du ressort augmentant à mesure qu'il se referme, lorsque les masses A, articulées en D,

s'écartent de l'axe de rotation. Mais, en réalité, dès que la vitesse de la machine varie dans un sens ou dans l'autre, l'inertie de l'anneau C accélère le déplacement des masses A, et les amène dans leur nouvelle position d'équilibre relatif: si la vitesse de la machine augmente, l'anneau C reste en arrière,

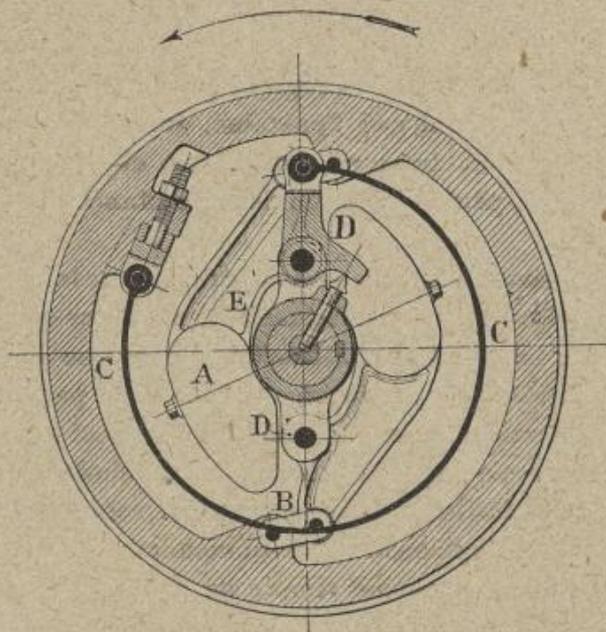


Fig. 149. — Régulateur Lentz construit par la Société générale de constructions mécaniques, anciens Établissements E. Garnier et Faure-Beaulieu; coupe transversale.

augmentant ainsi la tension du ressort et l'écartement des masses A; l'effet inverse se produit quand la vitesse diminue.

Le déplacement relatif de l'anneau C sur l'arbre change le calage et le rayon des excentriques, qui dans l'espèce commandent des soupapes d'admission.

On peut faire varier à la main, pendant la marche de la machine, la tension du ressort et, par suite, le vitesse de régime, en agissant, à l'aide d'une transmission non visible sur la figure, sur la pièce d'attache du ressort, articulée en D.

CHAPITRE VII

PRINCIPAUX ORGANES DES MACHINES A PISTON

61. **Bâtis et fondations.** — Les bâtis des machines ont, pour la transmission des forces, la même importance que les pièces mobiles. Le piston avec sa tige, la bielle, l'arbre avec la manivelle, d'une part, le palier, le bâti, et le cylindre, d'autre part, forment un ensemble qui reçoit l'action de forces développées par la pression de la vapeur sur le piston et sur le fond du cylindre. La déformation élastique du bâti, sous l'action de ces forces, doit être très faible.

Certaines fondations portent seulement le poids de la machine, et empêchent qu'elle ne vibre et ne se déplace petit à petit. D'autres fois, la fondation joue aussi un rôle essentiel dans l'ensemble, en transmettant une partie des forces intérieures. Ainsi, dans la machine à balancier, le cylindre, le support du balancier et le palier de l'arbre ne sont reliés que par la fondation; il est vrai que les efforts exercés par ces trois pièces ne s'écartent pas beaucoup de la verticale. Dans les machines horizontales, avec manivelle en porte-à-faux, le palier le plus éloigné de la manivelle n'est généralement rattaché au reste du bâti que par la fondation : la fosse, où se loge la partie inférieure du volant, empêche toute liaison plus directe. Au contraire, le bâti est directement rattaché aux deux paliers quand la bielle motrice s'articule sur un coude au milieu de l'arbre.

Les anciennes machines horizontales comportent une plaque de fondation ou bâti plat, sur laquelle se boulonnent le cylindre et le palier. Le bâti Corliss ou à baïonnette (fig. 450) rattache directement le cylindre au palier. Ce bâti n'est pas

exactement opposé à l'effort transmis par la bielle motrice :

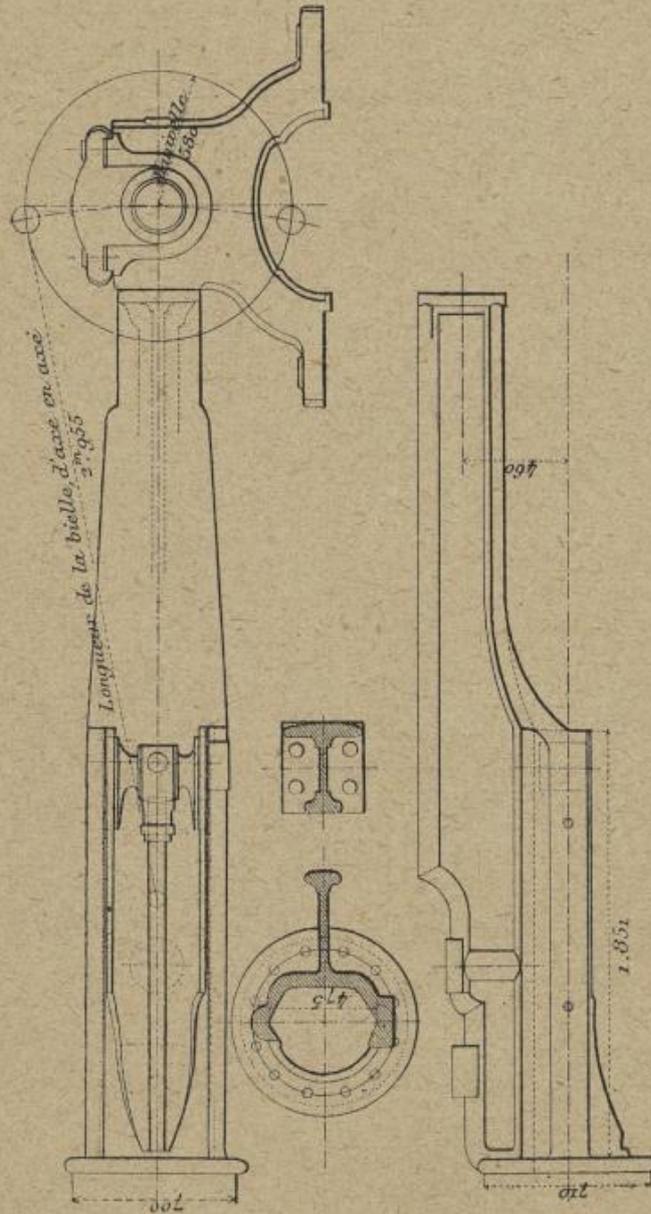


Fig. 150. — Bâti à baïonnette de machine Corliss (cylindre de 508 sur 1 160 mm), avec palier de l'arbre.
Le bâti est boulonné sur la face du cylindre et sert de glissières.

il en résulte une tendance au déplacement transversal du cylindre, avec flexion du bâti. La rigidité même du bâti et

les boulons qui fixent le cylindre et le palier sur la fondation s'opposent à ce mouvement.

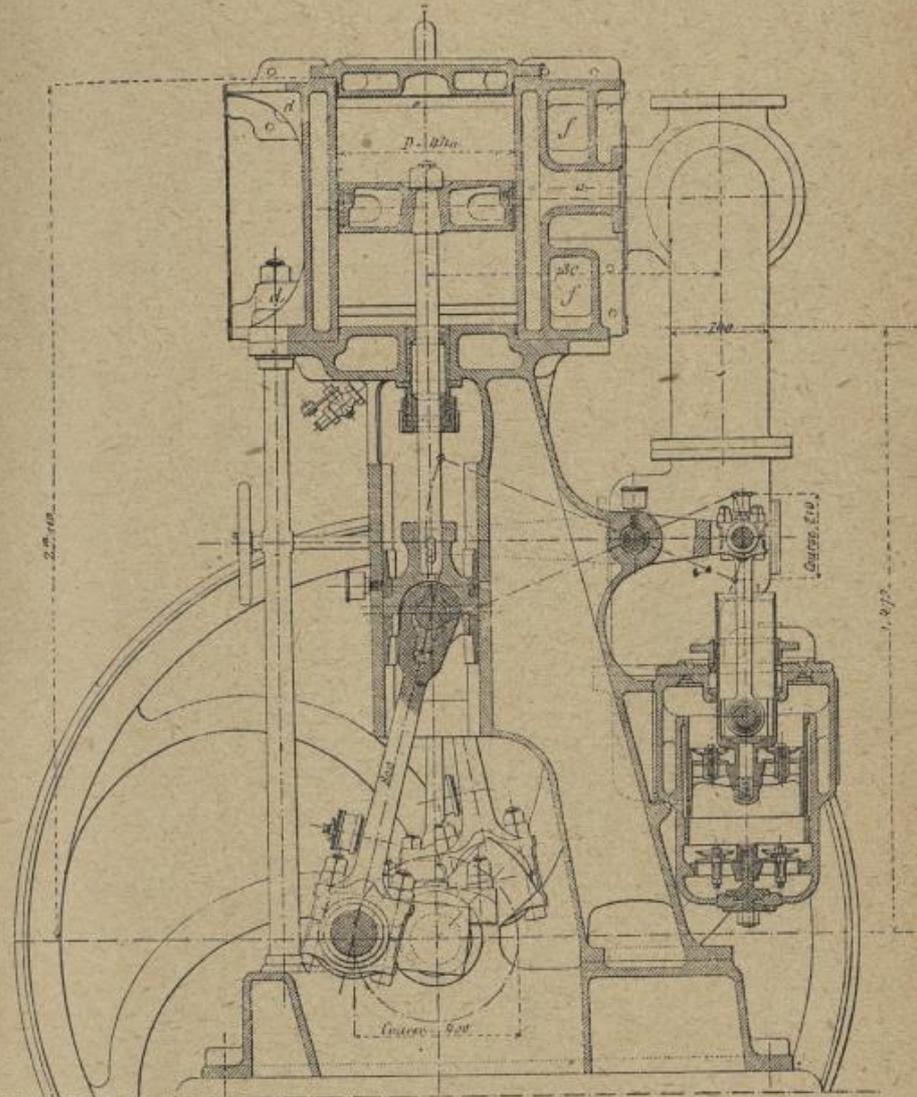


Fig. 151. — Machine pilon avec bâti à un jambage en fonte et colonnettes d'acier.

Lorsqu'on met en marche une machine, la vapeur échauffe un peu le bâti, qui se dilate : la dilatation tend à éloigner

le cylindre et le palier ; on monte quelquefois le cylindre sur une glissière longitudinale, qui en permet le déplace-

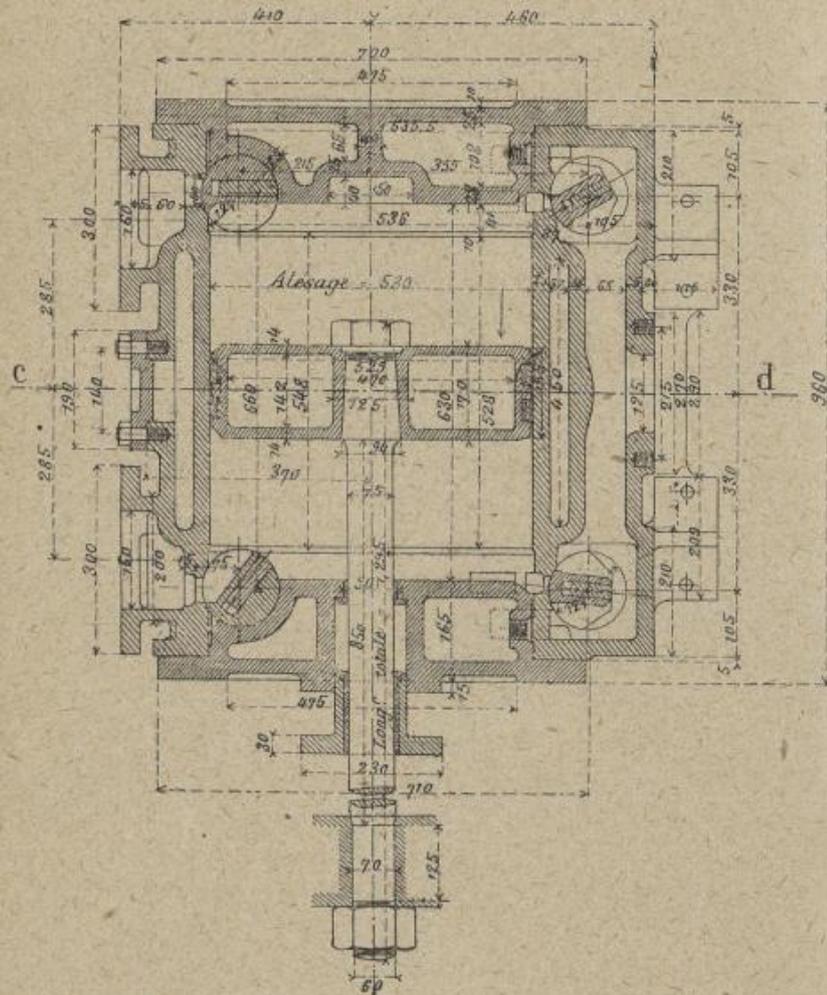


Fig. 152. — Cylindre de machine pilon à quatre distributeurs, fondu avec enveloppe de vapeur ; coupe verticale (constructeur, E. Garnier).

ment : souvent on se contente de donner un peu de jeu dans leurs trous aux boulons de fixation du cylindre.

Dans les machines-pilon, le bâti n'est fixé qu'à sa partie inférieure ; la dilatation de la partie supérieure et du

cylindre est libre. Mais il ne faut pas d'assemblage trop rigide entre les divers groupes d'un grand appareil à plusieurs cylindres; l'arbre et ses supports ne se dilatent pas comme la partie supérieure de la machine, et, par suite des détentes successives, la température moyenne des divers cylindres n'est pas la même.

Les bâtis sont communément en fonte. Pour donner plus de légèreté aux machines-pilon, et en faciliter la visite, on remplace souvent, par de gros boulons ou des colonnettes en fer, les montants en fonte, sur une des faces de la machine (fig 151), ou même sur les deux faces. On réduit aussi le poids des bâtis en les coulant en acier, notamment dans certaines machines marines.

La disposition de la figure 151 est d'ailleurs logique à divers point de vue. L'arbre tournant dans un sens, tout le reste de la machine tend à tourner en sens inverse, et le bâti doit résister à un moment de rotation égal au moment moteur. Ce moment résulte de l'effort que la tête de piston exerce sur la glissière. Par suite, un des côtés du bâti, coulé en fonte et portant les glissières, est plus chargé que l'autre, pour lequel les tiges de fer suffisent.

Les fondations des machines fixes se composent de massifs en maçonnerie, construits avec des pierres de taille ou en béton. Les machines marines sont boulonnées sur les membrures du bâtiment.

Les fondations des machines fixes transmettent au sol des vibrations parfois gênantes : on peut les amortir en faisant reposer le bâti sur des plaques de caoutchouc. Ces plaques doivent être disposées de manière à porter 4 à 6 kg par cm^2 ; de plus, les boulons de fixation doivent être entourés de caoutchouc, comme si on voulait réaliser un isolement contre le passage de l'électricité.

62. Cylindres. — Les cylindres sont fondus en une seule pièce, même avec une enveloppe de vapeur (fig. 152), ou bien on rapporte une chemise intérieure (fig. 153). L'exécu-

tion du joint étanche aux deux bouts de la chemise a une grande importance. La table des tiroirs plans, ou la che-

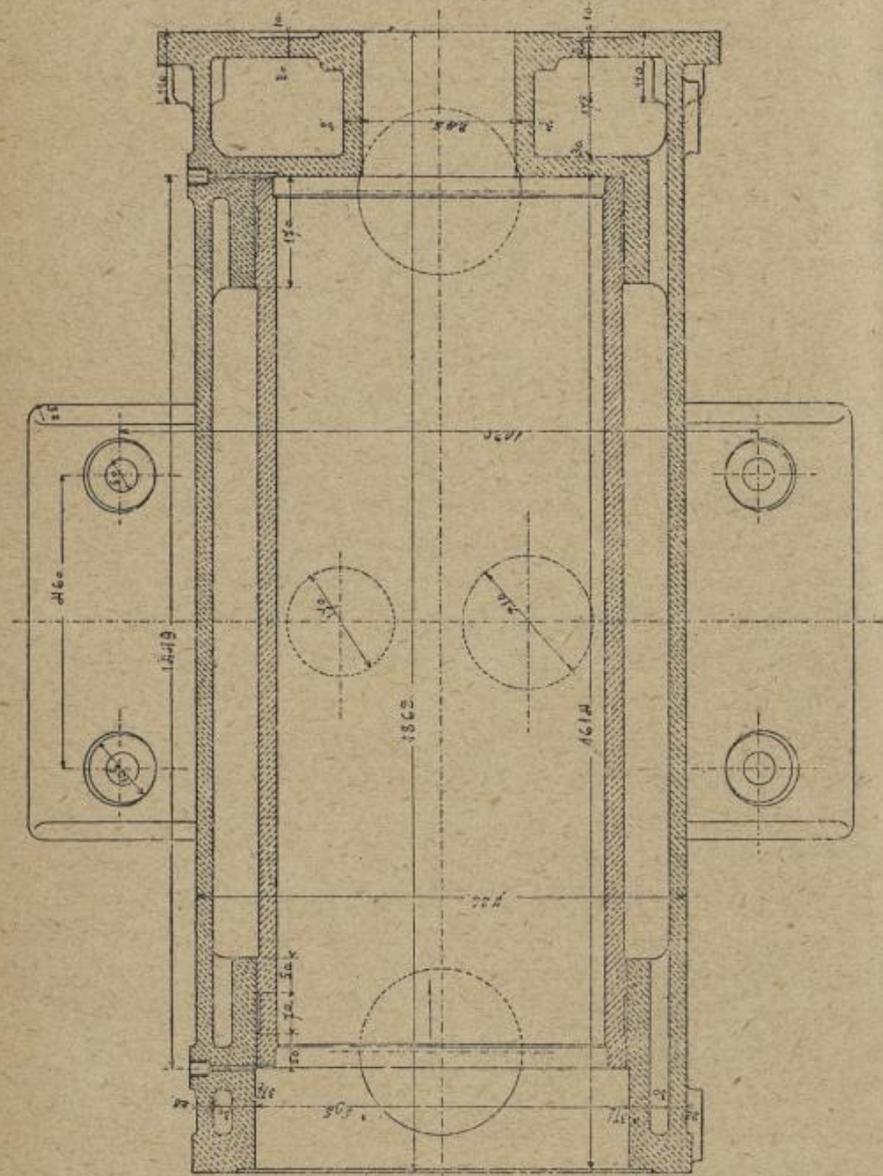


Fig. 153. — Cylindre avec chemise rapportée, pour machine à distribution par soupapes, construite par Carels; coupe horizontale.

mise du logement des tiroirs cylindriques, ou même la boîte à vapeur entière peuvent également être rapportées.

La base du cylindre qui regarde l'arbre peut être fondue avec le cylindre, ou rapportée comme le plateau opposé.

Les cylindres sont presque toujours en fonte ; cependant on a quelquefois coulé de grands cylindres en acier, en y rapportant des chemises de fonte, et même d'acier.

Les plateaux des petits cylindres, en fonte, sont formés d'une toile raidie par des nervures. La double toile donne plus facilement une résistance suffisante pour les grands diamètres et permet l'enveloppe de vapeur.

Les cylindres sont munis de robinets purgeurs, quand l'échappement ne se fait pas à la partie inférieure, et parfois de soupapes de sûreté, pour éviter les ruptures résultant de *coups d'eau*.

63. Pistons et garnitures. — Le piston est soumis à la pression de la vapeur, que de fortes compressions peuvent exagérer. La toile du piston est simple (fig. 167) ou double (fig. 152). La *hauteur* ou l'*épaisseur* du piston dépend surtout de la place nécessaire pour les bagues de la garniture ; elle entraîne une égale augmentation de la longueur du cylindre.

Il est bon d'alléger le piston, pour réduire les effets de l'inertie, les vibrations qui en résultent, et l'usure des cylindres horizontaux.

La forme creuse, souvent raidie par des nervures intérieures, permet de concilier la légèreté et la résistance. La forme conique, ou en *chapeau chinois* (fig. 167), est de même favorable au bon emploi de la matière ; dans les machines-pilon, elle réduit la hauteur du cylindre au-dessus de l'arbre.

Le piston est forgé en fer, ou coulé en fonte ou en acier. Pour atténuer l'effet thermique des parois, il convient que la surface en contact avec la vapeur soit aussi faible que possible, comme sur le type à bases plates de la figure 152 ; la surface des fonds de cylindre, qui sont également plats, est réduite de même.

On est tenté de croire que le piston creux sépare mieux la vapeur, admise d'un côté, de la vapeur d'échappement, qui se trouve de l'autre. Mais si l'on remarque que les variations de la température du métal, pendant une course, aller et retour, ne se font sentir que jusqu'à une profon-

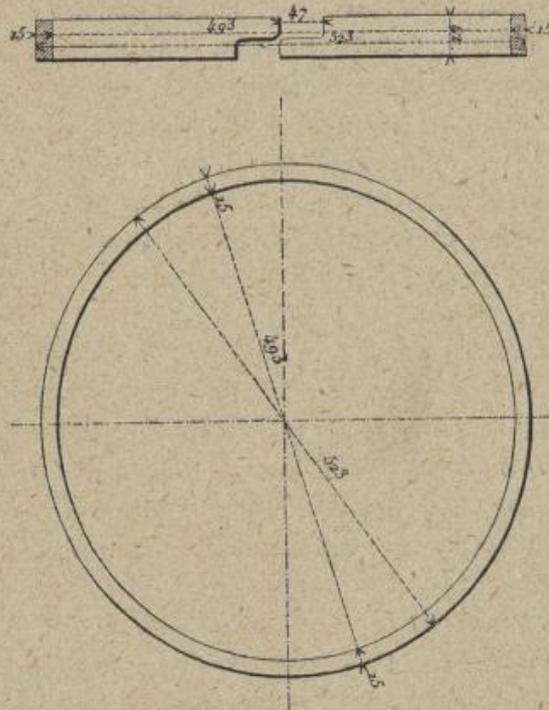


Fig. 154. — Bague de piston à joint brisé ; diamètre d'alésage du cylindre, 508 mm. Le plan représente la bague tournée et alésée, avant la coupure, figurée sur la coupe ; à la mise en place, les deux bouts coupés sont rapprochés.

deur de quelques millimètres au plus, et que la masse du métal doit prendre la même température moyenne dans le piston creux et dans le piston plein, on voit que l'avantage du piston creux, sous ce rapport, est illusoire. Il n'existe que si on y fait circuler la vapeur, comme dans l'enveloppe, ce qui est possible, mais au prix de complications excessives.

L'emmanchement de la tige doit être très solide et garanti

contre le desserrage en service, que les vibrations pourraient provoquer.

Le joint étanche, entre le piston et le cylindre, s'obtient à l'aide de bagues élastiques ou *segments*, presque toujours en fonte. Pour les diamètres ne dépassant pas 700 ou 800 mm, l'élasticité de la bague fendue, puis resserrée et tournée extérieurement au diamètre du cylindre, suffit généralement pour l'appliquer contre les parois. Pour les grands diamètres, une série de ressorts assure la portée des bagues. Le joint étanche doit exister non seulement au contact de la bague et du cylindre, mais aussi entre le plat de la bague et la gorge tournée sur le piston. La pression de la vapeur l'appuie contre cette gorge. On monte généralement deux bagues sur un piston.

Lorsque la bague bâille par l'usure, elle laisse un petit passage à la vapeur : la coupure en trait brisé (fig. 154) substituée à la coupure droite n'empêche pas complètement la fuite de vapeur, qui passe sous la bague : pour l'arrêter, on fait usage de pièces de joint. Il faut d'ailleurs laisser un peu de jeu entre les extrémités d'une bague neuve, afin qu'elle ne se coince pas dans le cylindre si elle s'échauffe par suite du frottement.

Les bagues ne constituent pas seulement une garniture étanche, mais souvent, dans les machines horizontales, elles portent une partie du poids du piston; dans les machines verticales, surtout dans les machines marines, elles ont à résister aux déplacements transversaux.

Il est intéressant d'examiner comment le piston est supporté dans une machine horizontale. A l'extérieur, la tige est emmanchée dans la *tête* ou la *crosse du piston*, portée par les *glissières*. La tige sort du cylindre à travers une *garniture*, en traversant des bagues en bronze, qui sont généralement disposées de manière à la guider et à la supporter; certaines garnitures, au contraire, assurent seulement un joint étanche, mais permettent un déplacement transversal de la tige. Le piston peut porter sur le fond du cylindre soit

directement, soit en appuyant sur l'intérieur de la bague. Dans certaines machines, une *contre-tige* sort du cylindre, du côté opposé à l'arbre, à travers une seconde garniture; elle peut même s'emmancher dans un patin supporté par des glissières.

Dans ce dernier cas (et spécialement pour des pistons de machines soufflantes, qui atteignent de très grandes dimensions), on fait supporter tout le poids par les deux glissières extrêmes: le piston, monté au milieu de la tige, qui relie

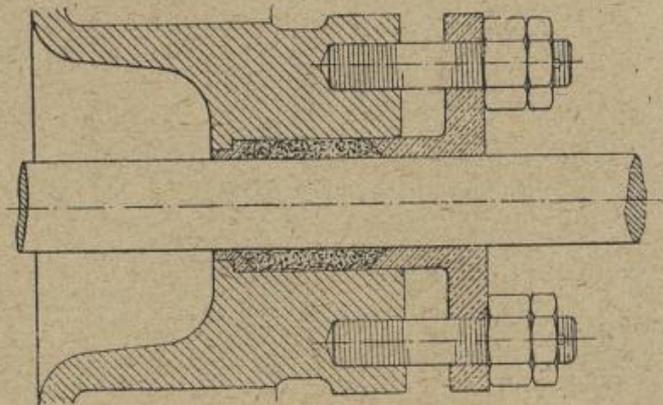


Fig. 155. — Garniture de tige de piston (avec bague de fond et presse-garniture en une seule pièce).

les deux patins, la fait fléchir; les garnitures de tige permettent un déplacement transversal, et le piston ne doit pas poser sur ses bagues.

D'autres fois, on se sert des garnitures de la tige et de la contre-tige pour porter le poids du piston: comme la tête du piston sert aussi nécessairement de guide, cette disposition a l'inconvénient général du guidage en trois points, qui peuvent ne pas rester exactement en ligne droite par suite d'usures inégales ou de déformations des pièces.

Dans tous les cas il est bon de se rendre compte du rôle imposé aux garnitures des tiges; si on leur fait porter le poids du piston, les bagues doivent avoir une largeur suffisante; si elles servent seulement à empêcher les fuites, un

petit jeu transversal est utile pour que les flexions et déplacements de la tige soient libres.

La garniture ordinaire (fig. 155) comporte la *bague de fond* et le *presse-garniture*, serré sur des goujons, de manière à comprimer la matière molle qui assure le joint; bague et presse-garniture sont en deux pièces, si la tige porte des saillies qui ne peuvent les traverser lors du montage. Les

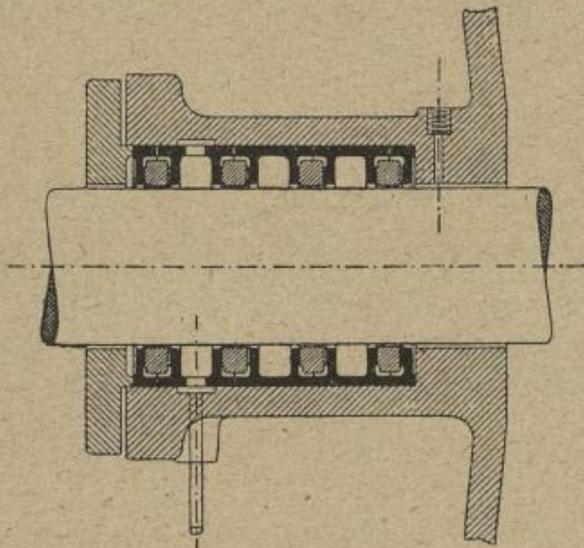


Fig. 156. — Garniture Lentz.

deux moitiés du presse-garniture sont alors emboîtées dans une gaine, dont le diamètre intérieur est suffisant pour le passage de la saillie.

L'étoupe primitive a été généralement remplacée par des tresses d'amiante ou de fils métalliques, ou par des bagues de métal blanc tendre, diversement combinées.

La garniture Lentz (fig. 156) se compose d'une série de boîtes annulaires empilées autour de la tige et serrées à bloc par une bride; une boîte sur deux contient une bague en fonte que la tige traverse à frottement doux. Il se produit autour des bagues une légère fuite de vapeur, qui se détend dans les boîtes vides. A la dernière bague la fuite

est nulle ou insignifiante. Le principe est le même que pour les garnitures d'arbres de turbines.

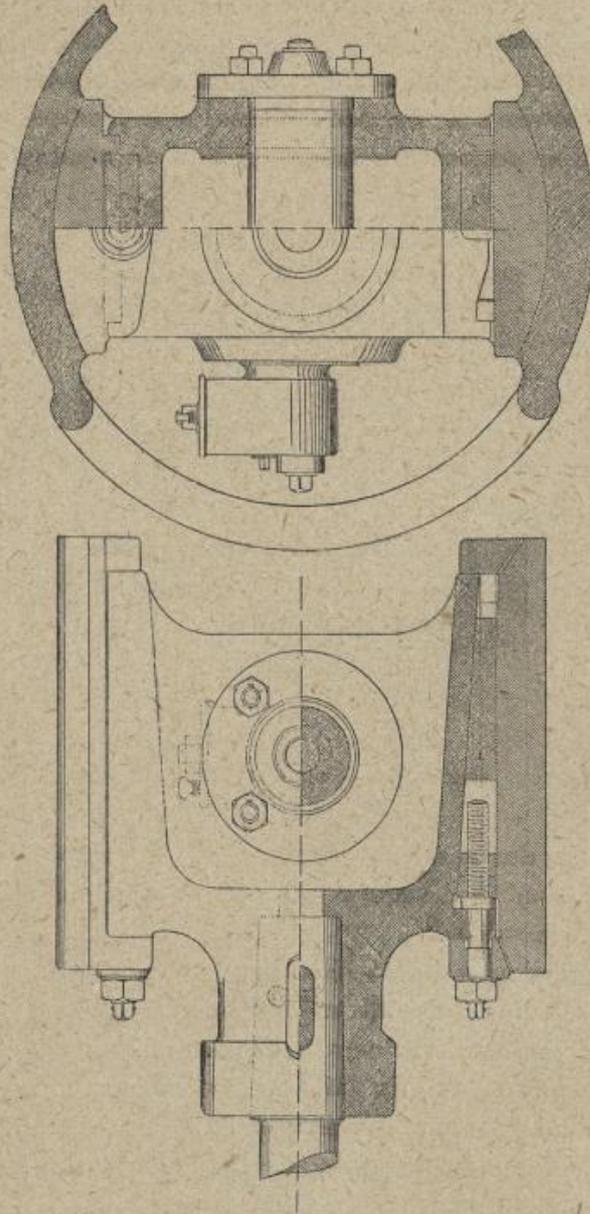


Fig. 157. — Tête de piston, avec rattrapage de jeu à coin. Coupe longitudinale et élévation : coupe transversale, montrant les glissières.

Il est important de graisser la tige, qu'on entoure à cet effet d'une mèche alimentée par un godet.

La tige s'emmanche dans la *tête* ou la *crosse du piston* (fig. 157), qui porte les *patins* coulissant dans les *glissières*, et le tourillon, sur lequel s'articule la bielle. Dans les grandes machines, confiées à un personnel spécial, on prévoit des moyens de réglage des patins, pour compenser l'usure. Les appareils de réglage non seulement compliqueraient trop les petites machines, mais risqueraient d'être maladroitement manœuvrés.

Quand les machines tournent indifféremment dans les deux sens, les glissières fonctionnent également des deux côtés de la tête du piston; la pression sur les glissières est à peu près constamment dirigée dans la même direction, lorsque la rotation n'a lieu que dans un sens.

La surface de portée des glissières peut rarement être aussi rapprochée de l'axe du cylindre qu'il serait désirable : le patin doit être assez long pour qu'il n'en résulte pas une augmentation excessive de charge sur l'une de ses extrémités. L'*arc-boutement* pourrait se produire avec un patin trop court, éloigné de l'axe du cylindre.

64. *Bielles*. — La bielle se compose de deux *têtes* et du *corps* qui les relie. Elle est soumise à des efforts alternatifs de traction et de poussée, qu'on peut calculer : on détermine en conséquence la section à lui donner en chaque point.

La *petite tête* ou le *piéd de bielle* s'articule sur la tête de piston et la *grosse tête* sur le tourillon de la manivelle. Les deux tourillons que relie la bielle ont des dimensions suffisantes pour supporter sans flexion appréciable les efforts qu'ils transmettent, et aussi pour offrir une surface de portée ou de contact assez grande pour assurer un graissage constant et éviter l'usure rapide, et le *grippement* des surfaces.

Les tourillons sont en acier, ou en fer cémenté et trempé; les parties de la bielle qui portent sur les tourillons sont garnies de bronze ou d'alliages dits *métaux blancs*. La forme la plus simple consiste en bagues solidement encastrées dans

la bielle, et frottant sur les tourillons. Cette disposition, fréquente pour les bielles d'accouplement des locomotives, est rarement employée pour les bielles, dites *motrices*, dont il est question ici.

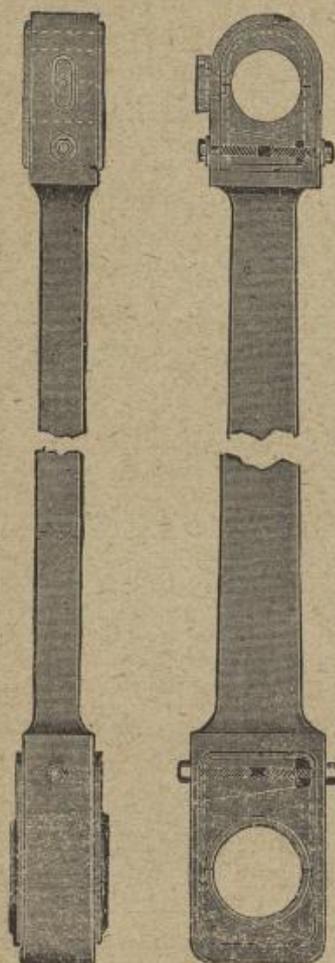


Fig. 158. — Bielle motrice; têtes simples avec réglage à coin (d'après Thurston).

On préfère, en général, employer deux coussinets demi-cylindriques, qui, réunis dans une *cage*, et serrés l'un contre l'autre, forment une bague complète : la bielle porte des dispositifs permettant le serrage de ces coussinets. L'usure, qui se produit principalement dans la direction de l'axe de la bielle, ovalise les coussinets : on peut alors, en les démontant et en limant leurs surfaces de contact (ou bien en retirant des cales minces disposées d'avance entre ces surfaces), se rapprocher de la surface cylindrique primitive, dont le diamètre dépasse très légèrement celui du tourillon. C'est ce qu'on appelle rattraper le jeu des articulations. Cette opération, bien faite, prolonge la durée du service de la machine sans grande réparation.

La petite tête est simple (fig. 158), ou à fourche (fig. 159).

Cette seconde disposition simplifie la tête de piston, mais complique la bielle ; la transmission ne se fait bien que si les deux tourillons portent également sur les deux branches de la fourche.

La petite tête peut présenter une disposition de réglage

comme la grosse tête ; mais ce réglage est moins utile, car elle s'use moins, parce qu'elle n'a qu'un mouvement d'oscillation de faible amplitude sur son tourillon.

Le réglage d'une tête augmente ou raccourcit la longueur de la bielle, suivant la disposition adoptée. On tient compte de cette variation en donnant primitivement au piston un espace libre un peu plus fort du côté où le réglage de la bielle diminuera le jeu.

65. Arbres et manivelles.
— L'arbre d'un moteur, soumis à la poussée et à la traction des bielles, à la traction des courroies, au poids des volants, à la réaction de ses coussinets de support, travaille à la flexion et à la torsion.

* La manivelle est rapportée à l'extrémité de l'arbre (fig. 160), ou l'arbre est coudé, quand les manivelles sont comprises entre les paliers ; l'arbre est forgé avec ses coudes, ou bien il est composé de plusieurs parties assemblées.

La manivelle rapportée, plus simple que le coude, se trouve placée *en porte-à-faux* à l'extrémité de l'arbre ; il en résulte une augmentation de l'effort sur les paliers ; on doit la disposer de manière à rapprocher autant que possible

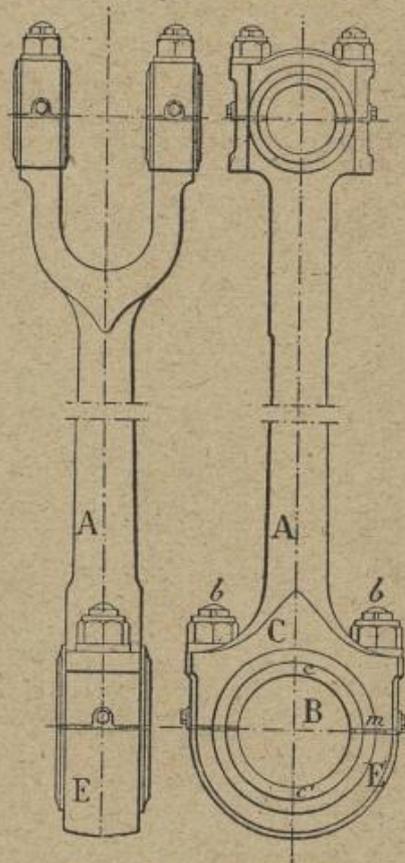


Fig. 159. — Bielle à fourche, pour machine marine ; le chapeau E porte deux parties filetées, sur lesquelles se vissent, en *b, b*, les écrous de serrage (d'après M. Demoulin).

du palier l'axe de la bielle (fig. 160). La manivelle est parfois remplacée par le *plateau-manivelle*, mieux équilibré et moins dangereux pour le conducteur de la machine.

L'arbre tourne dans des pièces cylindriques en bronze ou en métal blanc, composées en général de deux coussinets demi-cylindriques, contenus dans des paliers, souvent munis de dispositions de réglage.

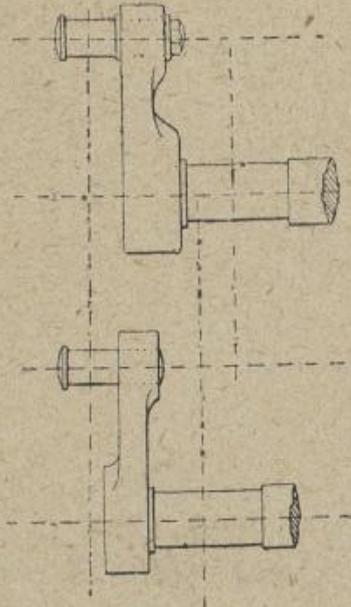


Fig. 160. — Deux dispositions de manivelle (d'après Raffard); la seconde a l'avantage de placer l'axe de la bielle plus près du palier.

Les arbres doivent parfois résister à une poussée longitudinale. On peut équilibrer la poussée en terminant l'arbre par un *pivot* ou surface plane, qui tourne sur une *crapaudine*. Mais ces pivots ne sont pas toujours applicables : on doit alors recourir à des *collets* sur l'arbre qui appuient contre des butées fixes. Les arbres d'hélice de navire offrent un exemple typique de cette disposition, toute la poussée de l'hélice étant transmise longitudinalement par l'arbre qui la fait tourner. Ils sont munis de plusieurs collets qui appuient contre les coussinets du *palier de butée*, placé entre l'hélice et la machine motrice. Le

grand frottement, inévitable dans ce palier de butée, est une cause importante de perte de travail.

Exceptionnellement les arbres des machines sont verticaux, et doivent alors porter sur un pivot ou des collets.

66. Graissage des mécanismes. — Le graissage a pour objet de réduire au minimum les frottements des pièces des ma-

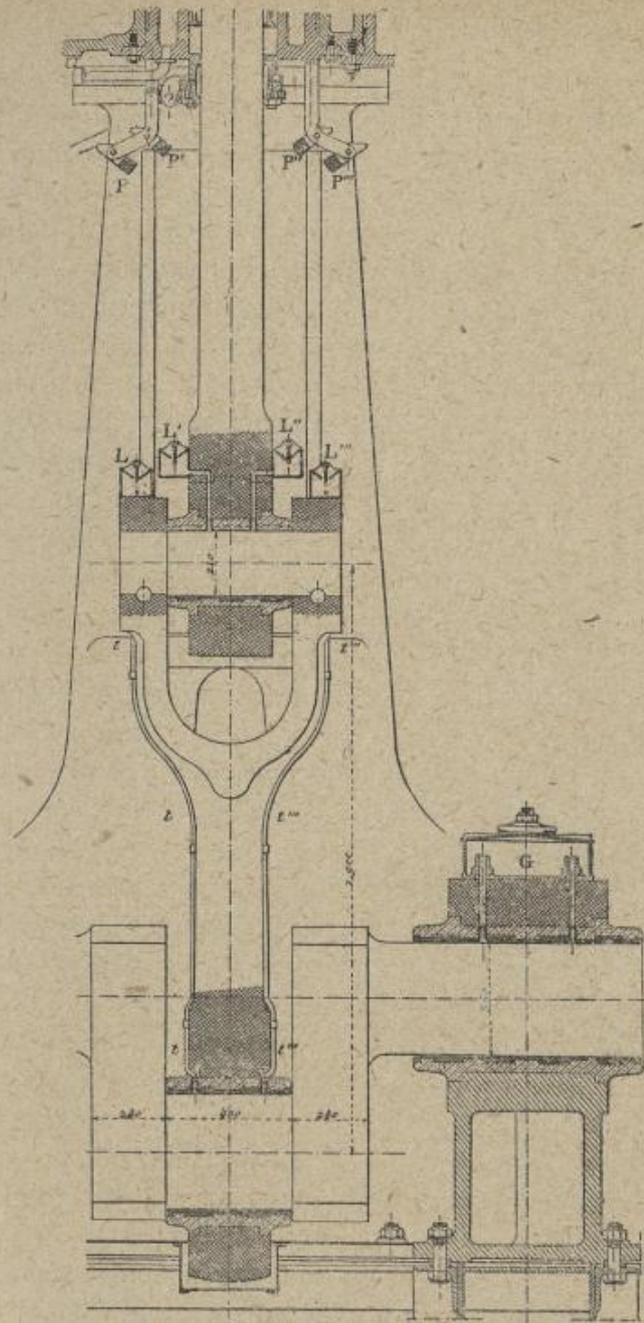


Fig. 161. — Graissage des deux têtes de la bielle motrice d'une machine marine piston par les lècheurs L, L', L'', L''', et par les pinceaux P, P', P'', P''', et graissage d'un palier par le godet G, muni de mèches non figurées.

chines. Il est nécessaire d'abord que les surfaces frottantes soient bien exactement ajustées sur toute leur étendue ; ensuite la charge qui les appuie l'une sur l'autre ne doit pas dépasser certaines limites. En divisant la charge totale par la surface de portée, mesurée en cm^2 , on obtient la charge par cm^2 . Lorsque les pièces sont constamment appuyées l'une sur l'autre, il convient que cette charge par cm^2 ne dépasse pas, autant que possible, 20 kg. Mais, lorsque le sens des portées se modifie constamment, par exemple pour une tête de bielle montée sur un tourillon de manivelle, on admet des charges bien plus fortes, par exemple 80 kg par cm^2 . Dans ce second cas, l'huile pénètre plus facilement entre les surfaces frottantes.

Le graissage théorique parfait maintiendrait constamment une mince couche de lubrifiant entre les surfaces métalliques, qui ne se toucheraient jamais. Mais il est difficile d'obtenir un effet aussi complet.

Les huiles de graissage sont d'origine animale, végétale ou minérale, ces dernières étant souvent les moins coûteuses. L'huile doit pénétrer sur toutes les surfaces frottantes. On ménage à cet effet, sur l'une des surfaces, des canaux ou *patte d'araignée*¹. Lorsqu'une portion de ces surfaces est toujours découverte, on l'entretient garnie d'huile ou on la plonge dans un bain d'huile : telles sont les glissières des têtes de piston, les fusées des essieux de chemin de fer, qui ne portent de coussinets qu'à leur partie supérieure.

Pour les petits appareils et pour les articulations qui ne transmettent pas de grands efforts, comme les mécanismes de distribution, on se contente souvent d'un simple trou de graissage, qui débouche sur les surfaces frottantes de l'articulation : on verse un peu d'huile dans ce trou. En l'agrandissant, on peut y loger un morceau de mèche en coton, qui conserve une petite provision de matière lubrifiante.

1. Les expériences de Beauchamp Tower ont montré que les patte d'araignée, mal placées, peuvent servir à l'expulsion de l'huile. Voir *le graissage et les lubrifiants*, par L. Archbutt et R. M. Deeley, traduction par Richard, p. 86.

Les articulations importantes sont munies de *godets graisseurs*, d'où part un conduit qui débouche dans les *patte d'araignée*. Ce conduit s'élève jusqu'à la partie supérieure du godet, et une mèche de graissage, formant siphon, débite l'huile goutte à goutte. On fait varier le débit en serrant plus ou moins les mèches. Ce système est d'un réglage un peu délicat, et a le défaut de débiter l'huile pendant les arrêts de la machine. Les graisseurs sans mèches sont plus commodes; on fait souvent usage d'une épinglette jouant

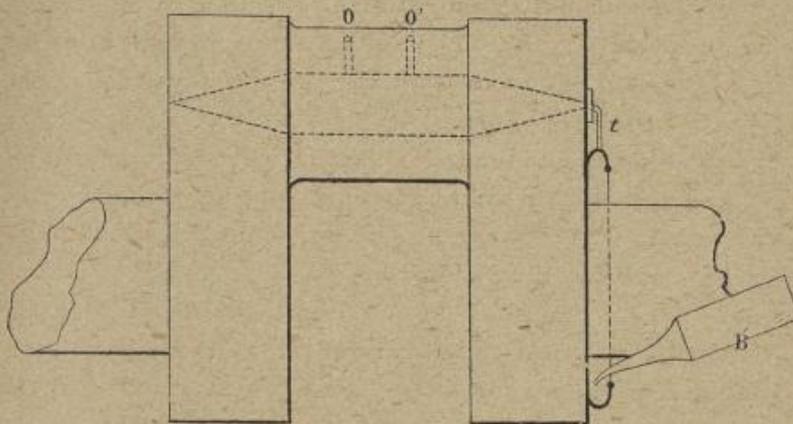


Fig. 162. — Graissage par canaux intérieurs de tourillon d'arbre coudé.

dans un petit trou ou même d'un simple trou de très petit diamètre. Ces deux dispositions ne conviennent que pour des articulations soumises à des secousses : elles exigent une fermeture étanche des godets.

Lorsque les machines doivent tourner longtemps sans arrêt, comme les machines marines, il faut assurer un graissage continu des articulations mobiles, telles que les têtes de bielles; les *lécheurs* (fig. 161), montés sur ces articulations, prennent à chaque révolution un peu d'huile sur des pinceaux fixes constamment imbibés. En pareil cas, un réservoir central dessert par une série de tuyaux diverses articulations.

On alimente aussi les surfaces frottantes par des canaux

percés dans l'intérieur des pièces et débouchant à la surface du tourillon. Le tourillon creux de l'arbre coudé de la figure 162 est alimenté par la burette B, versant l'huile dans

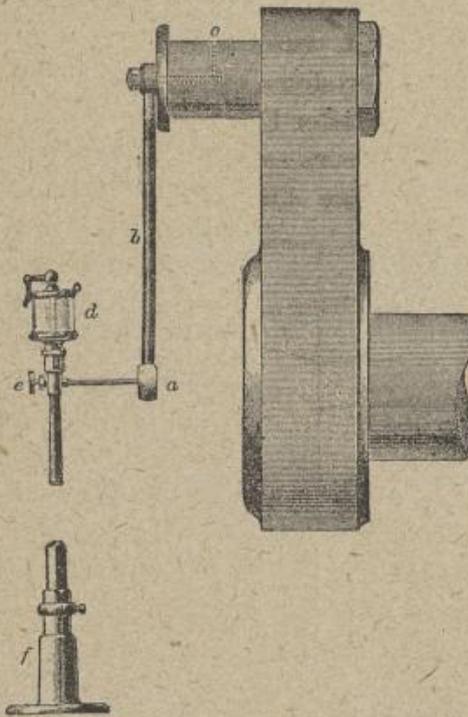


Fig. 163. — Graissage de manivelle de machine horizontale. L'huile, contenue dans le réservoir *d*, est versée dans la coupe *a*, avec un débit réglé par le robinet *e*. De *a*, l'huile est envoyée dans le tuyau *b*, par suite du mouvement de rotation, puis dans un canal percé dans l'axe du tourillon de la manivelle, et débouche enfin par les orifices *o*, entre le tourillon et le coussinet.

dans des godets, avec couvercle à vis formant piston, qui refoule la graisse dans les conduits et les pattes d'araignée quand on le tourne. Ce graissage, très propre, semble inférieur à celui qu'on obtient avec l'huile.

A la partie inférieure des machines, des récipients reçoivent

une gouttière circulaire, qui entoure l'arbre, et d'où part le tuyau *t*; l'huile s'échappe à la surface du tourillon par les trous *o*, *o'*.

Les manivelles des machines horizontales sont souvent lubrifiées par un tuyau *b* (fig. 163), formant contre-manivelle et terminé par la coupe *a*: cette coupe reçoit l'huile, débitée par le godet *d*, que porte le pied *f*.

Au lieu d'huile, on emploie quelquefois des graisses pâteuses, qui se répandent moins que l'huile sur les diverses parties de la machine: cette graisse est contenue

vent l'huile en excès. Cette huile, après filtrage, est utilisée de nouveau. Dans les machines rapides, un graissage très abondant est nécessaire; il en résulte des projections désagréables, qu'on supprime en enfermant les bielles dans une caisse close, contenant un bain d'huile.

Les têtes de bielle prennent à chaque tour un peu d'huile dans ce bain.

Le graissage le plus efficace s'obtient en refoulant entre les surfaces frottantes, à l'aide d'une pompe, un courant d'huile continu. Lorsqu'une des pièces est fixe, telle qu'un palier, l'arrivée d'huile ne présente aucune difficulté, puisqu'il suffit d'un conduit immobile. Pour les articulations mobiles, comme les têtes de bielle, l'huile est parfois amenée par des conduites articulées et coulissantes. Un canal percé dans l'arbre, avec ramifications jusqu'aux diverses surfaces à lubrifier, est préférable. Si une extrémité de l'arbre est accessible, on amène l'huile par un tuyau fixe, dans l'axe, avec garniture étanche. Sinon, on peut alimenter le canal à l'aide de branches venant déboucher contre les coussinets d'un palier, avec refoulement d'huile au palier assez abondant pour subvenir en outre à la fuite entre tourillon et coussinets.

67. Graissage des pistons et des distributeurs de vapeur. — Il est presque toujours nécessaire de graisser les pistons et les distributeurs de vapeur, qui frottent contre la fonte des cylindres, bien que l'eau condensée puisse réduire le frottement. Les matières employées pour ce graissage doivent conserver leurs propriétés lubrifiantes à la température de la vapeur qui travaille dans le cylindre : quand cette température est très élevée, comme dans les machines à vapeur surchauffée, certaines huiles se décomposent, d'autres deviennent extrêmement fluides. Les huiles minérales sont les meilleures pour cet usage.

On graisse séparément le piston et le tiroir ou les distributeurs de vapeur, ou bien on se contente d'introduire un

peu d'huile dans le courant de vapeur qui lubrifie successivement les diverses surfaces frottantes.

Les petites machines sont graissées par intermittences, en faisant communiquer le cylindre avec un petit réservoir d'huile à deux robinets.

Pour les machines de quelque importance, le graisseur continu est meilleur et dépense moins d'huile. Les graisseurs

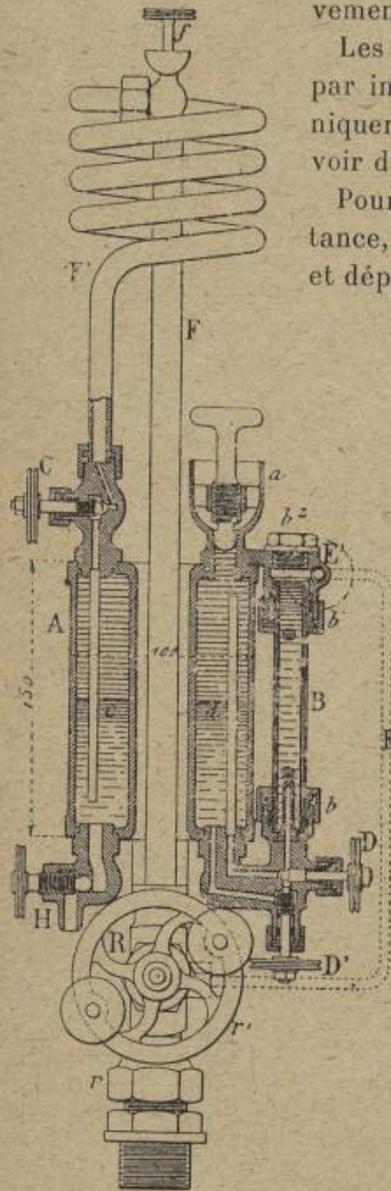


Fig. 164. — Graisseur à condensation Bourdon et Hamelle.

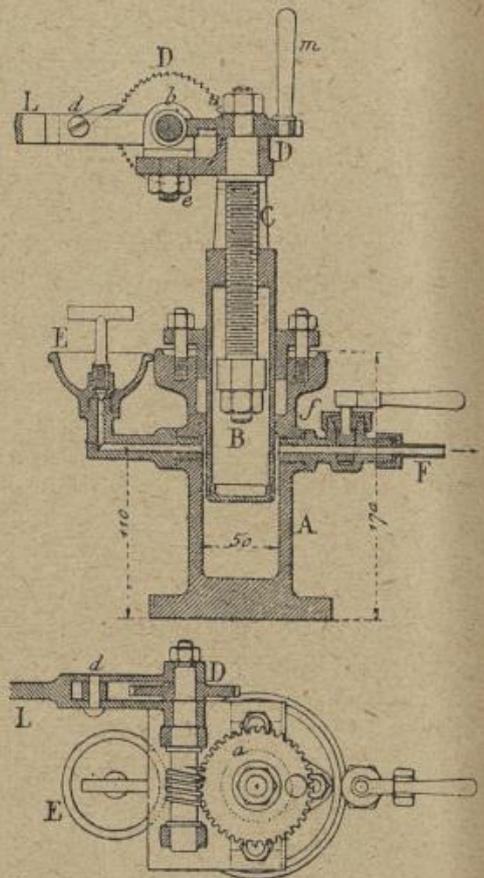


Fig. 165. — Graisseur Mollerup.

à condensation reçoivent l'eau provenant de la liquéfaction

de la vapeur, prise sur le cylindre à lubrifier ou directement à la chaudière; cette eau déplace l'huile petit à petit et la chasse dans les conduits de graissage. Les dispositions de détail de ces appareils sont assez variées : souvent on fait passer l'huile dans un tube en verre qui la montre goutte à goutte; ces gouttes s'élèvent dans l'eau qui remplit le tube. Des robinets permettent de régler le débit (fig. 164).

Les *graisseurs mécaniques* sont des pompes dont on règle le débit : le graisseur Mollerup (fig. 165) est rempli, par l'entonnoir E, d'huile, que déplace le plongeur B : la descente est commandée avec une vitesse très faible, qu'on règle à volonté, à l'aide de la roue à rochet D, entraînée par le levier L, dont l'extrémité est rattachée à une pièce mobile du moteur.

D'autres graisseurs sont constitués par une petite pompe aspirante et foulante, à marche continue.

CHAPITRE VIII

DISPOSITIONS D'ENSEMBLE DES MACHINES A PISTON

68. **Classification.** — Il est commode, pour l'étude des moteurs, de grouper ceux qui rendent les mêmes services. C'est ainsi qu'on réunit en grandes familles :

- Les moteurs fixes, à petite et à moyenne vitesse ;
- Les moteurs fixes, à grande vitesse ;
- Les locomobiles et les machines demi-fixes ;
- Les machines qui servent à l'élévation de l'eau ;
- Les machines d'extraction ; les machines soufflantes, les compresseurs ; d'autres moteurs destinés à des applications spéciales ;
- Les locomotives ;
- Les machines de bateaux.

On peut faire rentrer dans ces familles la plupart des appareils employés. Dans cette classification tout artificielle, une même famille comprend souvent des types de machines différents, tandis que, d'une famille à l'autre, il existe de grandes analogies : c'est ainsi que des souffleries et des élévations d'eau sont commandées par des moteurs fixes qui ne présentent guère de dispositions spéciales pour cet emploi.

Dans chaque famille, on peut subdiviser les machines en tenant compte de la vitesse de marche, de la pression de la vapeur à l'admission et à l'échappement, du nombre de cylindres successifs, du mécanisme de distribution, de la direction de l'axe des cylindres, de la disposition des bâtis, de la forme des principaux organes.

69. Moteurs fixes à vitesse modérée. — En parlant de la *vitesse* des moteurs, on entend la *vitesse angulaire* de l'arbre qu'ils commandent, habituellement définie par le nombre de tours en une minute. La *vitesse moyenne du piston*, en mètres par seconde, calculée en divisant par 60 le produit du nombre de tours en une minute par le double de la course en mètres, ne varie pas comme la vitesse ainsi entendue, car les machines lentes ont généralement une course plus longue que les machines rapides.

Au-dessous de 70 à 80 tours par minute, le moteur est dit à *petite vitesse*. La *moyenne vitesse* comporte de 80 à 160 tours : au-dessus, les machines sont dites à *grande vitesse*. Pour un fonctionnement prolongé, c'est encore la petite vitesse et la moyenne qu'on préfère généralement, comme donnant les moindres consommations et la marche la plus sûre. Dans les machines à moyenne vitesse, la distribution se fait généralement par tiroirs. Pour la petite vitesse, les obturateurs Corliss et les soupapes sont d'un emploi fréquent. On les applique même, avec le déclenchement, jusqu'à 150 tours par minute.

La *machine à balancier*, monocylindrique ou du système Woolf, est un type ancien et célèbre, qu'on ne construit plus aujourd'hui, sauf pour certains usages spéciaux qui justifient le balancier. La tête du piston est guidée en ligne droite par le *parallélogramme de Watt* ou par des *glissières* : cette dernière disposition est usitée aux États-Unis. La machine est d'habitude très lente : elle fait 30 à 50 tours par minute. Jusque vers l'année 1860, la machine à balancier a été recherchée comme le meilleur moteur des filatures et de tous les établissements qui exigent une puissance motrice régulière et une vitesse uniforme : puis la simplicité et le prix moindre des *machines horizontales* les ont fait accueillir avec une faveur croissante. L'usure presque nulle de certaines machines à balancier n'est pas due à l'emploi de cet organe de transmission, mais à des conditions de marche qu'on pourrait retrouver dans les machines horizontales, si on ne

craignait pas d'en augmenter le prix d'achat et la dépense de combustible : une marche lente et une pression modérée de vapeur sont d'excellentes conditions pour ménager les appareils.

Pour les puissances ne dépassant pas 200 ou 300 kilowatts, un cylindre unique peut suffire. Avec une bonne distribution à déclenchement, la consommation de vapeur n'en est pas exagérée. Mais pour des puissances plus fortes il convient en général d'employer soit deux cylindres, de préférence compound, en tandem ou avec deux manivelles à angle droit, soit trois cylindres, dont deux en tandem, avec la triple expansion, soit même quatre cylindres formant deux groupes tandem.

La machine-pilon, qui occupe peu de place en plan, est généralement compound ou à triple expansion, soit avec trois cylindres et trois manivelles, soit avec quatre cylindres sur deux manivelles, et quelquefois à quadruple expansion.

70. Moteurs fixes à grande vitesse. — On voit certains avantages aux machines à grande vitesse : à égalité de puissance, elles sont plus petites et moins coûteuses que les machines lentes; la rapidité de l'évolution de la vapeur y réduit l'influence des parois; leur vitesse même est, dans bien des cas, plus convenable pour l'application, par exemple quand elles doivent commander des machines dynamo-électriques.

Pour ces motifs, les moteurs à grande vitesse ont été fréquemment employés. Cependant, dans la plupart des installations permanentes, lorsque les dépenses de premier établissement ne sont pas impérieusement limitées, on préfère les moteurs plus lents. En marche courante, ces derniers consomment moins de vapeur, dont la dépense est augmentée par les laminages, inévitables dans les machines rapides. Celles-ci exigent, en outre, plus de matières grasses; l'entretien en est plus dispendieux, et elles sont plus exposées aux avaries et aux chômages.

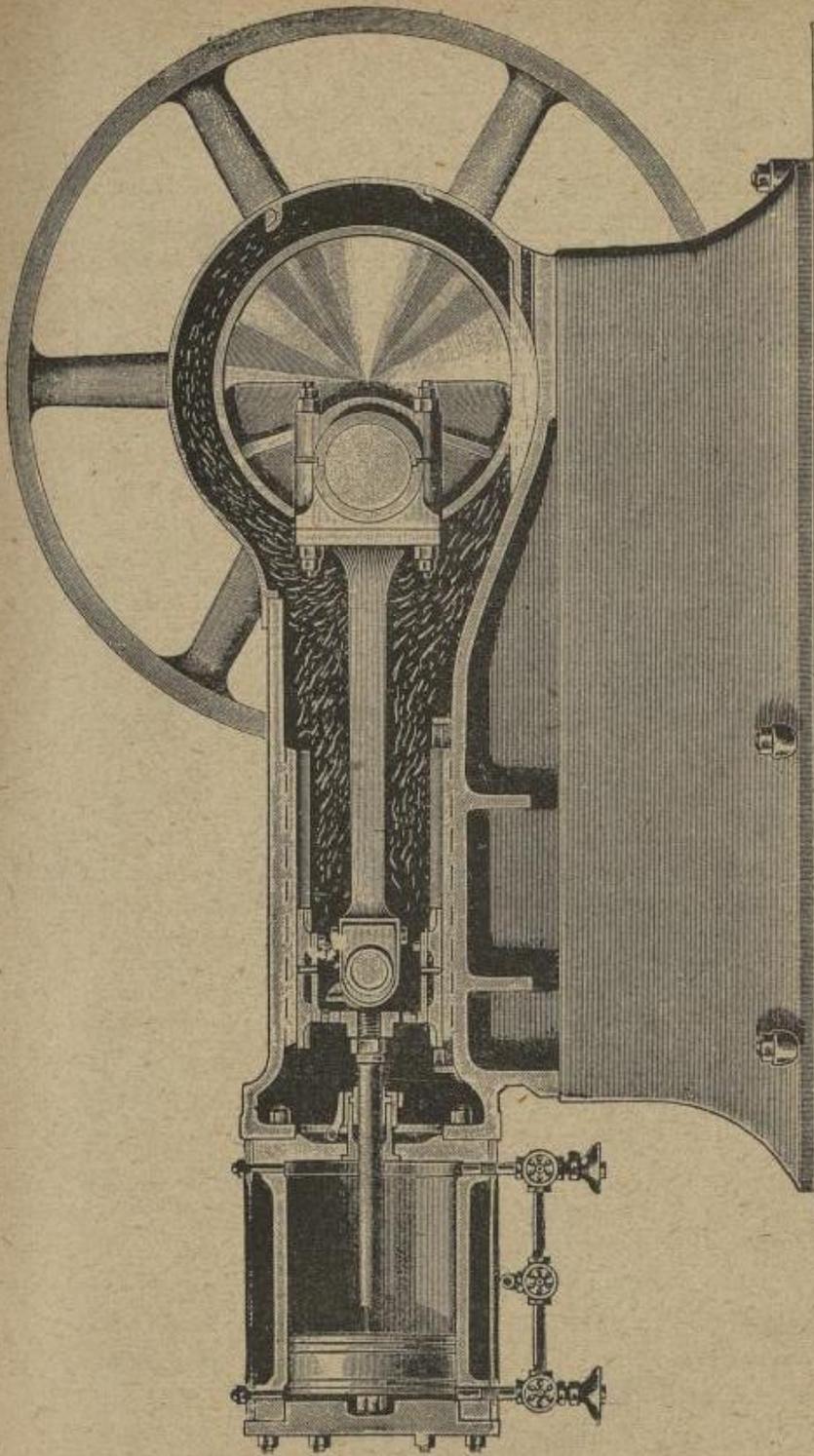


Fig. 166. — Machine américaine Ide. La puissance des diverses machines de ce type varie de 8 à 250 chevaux, et le nombre de tours par minute de 500 à 225. Montage du cylindre en *porte-à-faux*.

Les moteurs rapides, comme les moteurs lents, sont horizontaux (fig. 166) ou pilon (fig. 167). D'ailleurs les deux genres

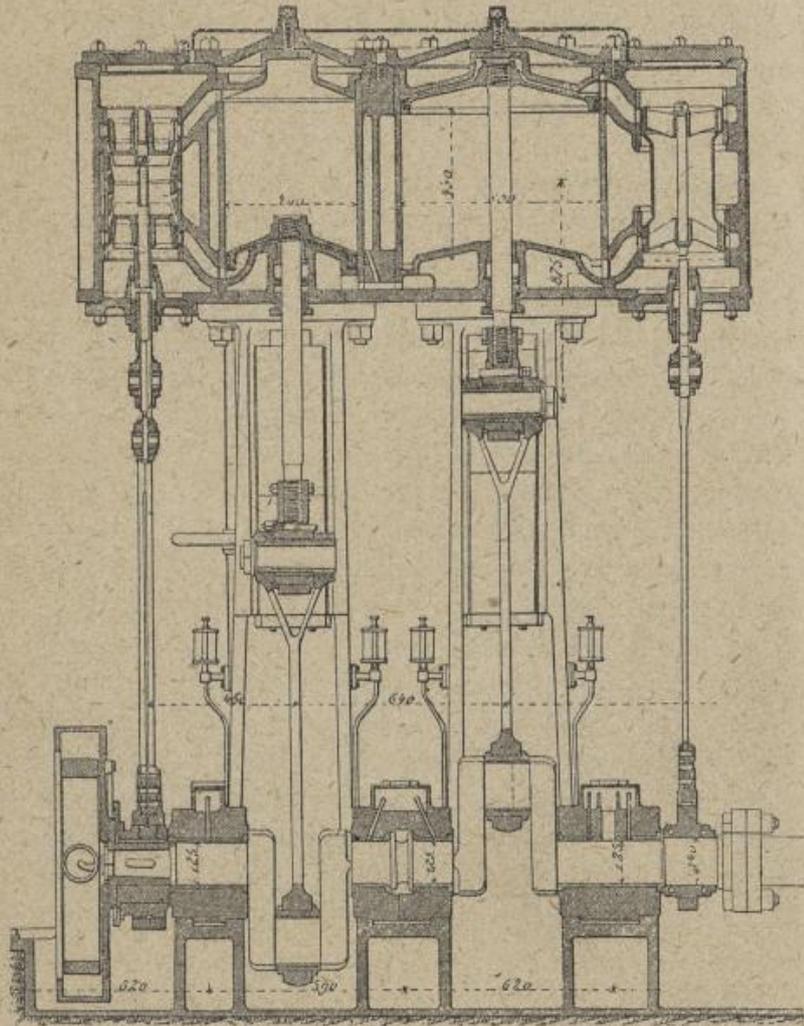


Fig. 167. — Machine compound pilon à grande vitesse, avec manivelles à 180°, système Hoffmann. Les tiroirs concentriques du petit cylindre donnent une admission de 5 à 50 p. 100 ; 200 à 300 tours par minute.

de machines ne se distinguent pas nettement, les vitesses adoptées croissant en série continue; certaines machines

rapides ne diffèrent guère des machines plus lentes que par leur régulateur.

Le tiroir équilibré, plan ou cylindrique, est fréquemment employé dans les moteurs à grande vitesse. Certains sont munis de tiroirs superposés ou concentriques; d'obturateurs oscillants, comme ceux des machines Corliss, mais sans déclit.

Ces machines sont monocylindriques, compound, ou à triple expansion. Fréquemment le régulateur agit en modifiant le calage de l'excentrique.

Pour équilibrer, en partie, les pièces animées d'un mouvement rectiligne alternatif, on fait parfois agir les pistons des machines rapides à deux cylindres sur deux manivelles calées à l'opposé l'une de l'autre, et non à angle droit comme d'habitude (fig. 167).

La marche à *simple effet* permet d'éviter les chocs, qui résultent du changement de sens des efforts dans la machine à *double effet*. Avec le simple effet, la même face du piston est toujours pressée par la vapeur : les efforts transmis à la bielle et à la manivelle peuvent conserver une direction constante, pourvu que les forces d'inertie ne dépassent pas la contre-pression résistante sur le piston pendant la seconde moitié de la course de retour.

Pour réaliser cette condition, de longues périodes de compression sont nécessaires; la résistance qui en résulte risquerait d'être insuffisante dans une machine à condensation : on fait alors usage d'un piston spécial refoulant un matelas d'air.

Les types de machines rapides à simple effet sont nombreux, monocylindriques, compound, du système Woolf, c'est-à-dire avec un seul organe de distribution sur le trajet de la vapeur entre les deux cylindres successifs. Souvent les manivelles sont calées à l'opposé l'une de l'autre. La bielle peut être articulée sur le piston même, assez long pour être bien guidé en ligne droite, malgré la suppression des glissières de tête de piston.

71. **Locomobiles et machines demi-fixes.** — Des roues portent les *locomobiles*, propres aux emplois temporaires, en agriculture et pour les constructions; on peut aisément les faire voyager sur les routes. La chaudière est du type locomotive (fig. 168), ou bien cylindrique avec *tubes en retour*. Le mécanisme, à un cylindre ou compound à deux cylindres, est porté par une selle qui pose sur la chaudière : la distribution se fait par un tiroir, ou par deux tiroirs, du système Meyer. Quelquefois elle comporte un changement de marche par coulisse.

Les roues d'une locomobile, installée à demeure, deviennent inutiles ; cette suppression donne la *machine demi-fixe*, souvent employée comme moteur d'ateliers; le montage en est facile et moins coûteux que pour un appareil équivalent formé d'une chaudière et d'une machine séparées. Le moteur demi-fixe peut d'ailleurs fonctionner aussi économiquement que bien des machines fixes de même puissance ; la position des cylindres supprime même la perte de chaleur dans la tuyauterie et permet une alimentation facile des enveloppes.

La chaudière, qui porte la machine, repose sur une fondation simple.

Depuis quelques années, la puissance des machines demi-fixes exécutées par certains constructeurs a été constamment en augmentant ; on a dépassé la puissance de 500 kilowatts. Par l'emploi de mécanismes compound avec distribution perfectionnée, de la vapeur surchauffée, et de la condensation, on est arrivé à des consommations extrêmement faibles par kilowatt et par heure. C'est ce qui permet à la chaudière unique, dont la grille ne dépasse guère deux mètres carrés dans les plus grands appareils, de fournir la quantité de vapeur nécessaire pour les fortes puissances.

Pour les faibles puissances, on construit des *machines portatives*, dont la chaudière est souvent verticale; le moteur lui est accolé.

Pour la commande des appareils tels que les grues, les

treuils, et autres engins de manœuvre, on fait un fréquent

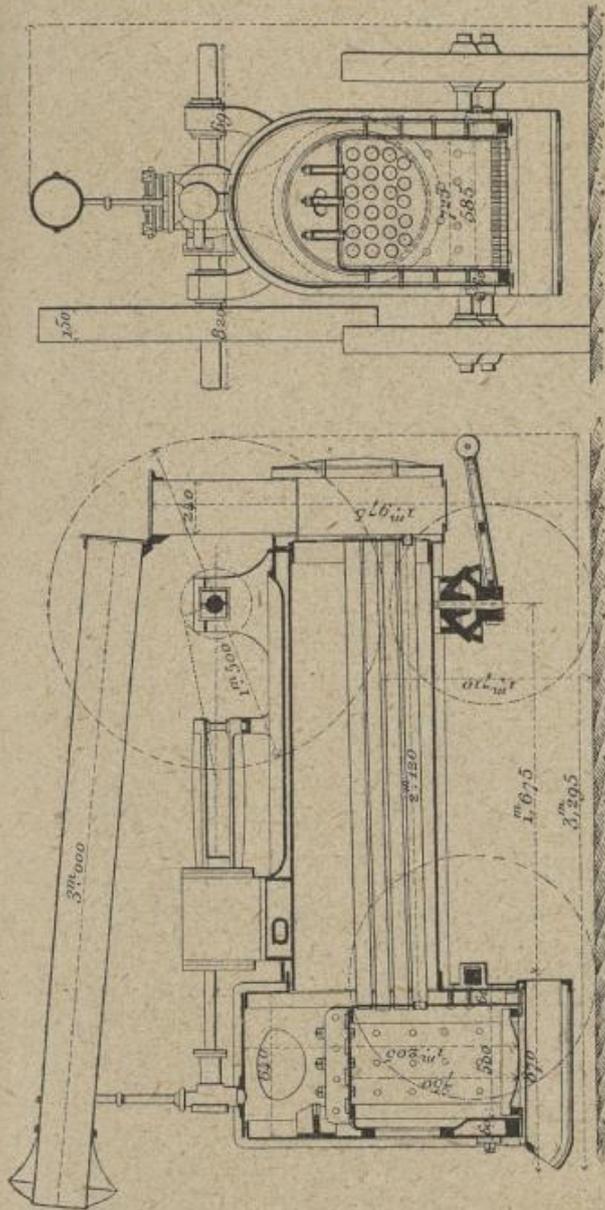


Fig. 468. — Locomobile construite par Chaligny.

Timbre de la chaudière.	6 kg	Nombre de tours par minute.	115
Capacité	750 litres	Course du piston	0,300 m
Surface de chauffe (à l'in- térieur).	1,600 m ²	Diamètre.	0,190 m
	8,950 m ²	Poids total.	3900 kg
	10,550 m ²	Puissance normale	8 chevaux.

usage de petits moteurs à deux cylindres sur manivelles calées à angle droit, souvent à changement de marche par

coulisse. Lorsqu'il y a plusieurs mouvements à produire, comme dans une grue, ou bien on les commande par embrayages à l'aide d'un moteur unique, ou bien on installe un moteur séparé pour chaque mouvement.

En reliant par une transmission l'arbre moteur aux roues, convenablement construites, on transforme la locomobile, munie d'un changement de marche à coulisse, en *locomotive routière* et en *rouleau compresseur*.

72. **Élévations d'eau.** — Les *machines d'épuisement* servent à extraire les eaux gênantes, et les rejettent hors des mines ou des terrains inondés, tandis que les *machines élévatoires* amènent l'eau aux endroits où elle est utile.

Avec les pompes qu'elles commandent, les machines qui servent à élever l'eau constituent un ensemble, dont on mesure le travail utile, en jaugeant la quantité d'eau élevée à une hauteur connue. Lorsque le refoulement se fait par de longues conduites, les moteurs produisent en outre un travail qui correspond à la *perte de charge* dans la conduite et qu'il est utile d'évaluer à part; la perte de charge est comme une hauteur supplémentaire à laquelle l'eau serait élevée.

L'épuisement des mines s'est fait longtemps à l'aide des machines de Cornouailles (fig. 113).

Les pompes à piston anciennement employées ne fonctionnaient convenablement qu'à une faible vitesse, souvent limitée à 30 tours par minute. Un progrès est l'emploi des pompes rapides, qui se prêtent à la commande directe par une machine à vapeur à moyenne vitesse, et par conséquent de dimensions restreintes. Aujourd'hui il y a tendance à remplacer les pompes à piston par des pompes centrifuges, même pour les grandes hauteurs; la rotation est plus rapide et la commande se fait souvent par moteurs électriques.

Pour les élévations d'eau des villes, on emploie fréquemment des machines à mouvement de rotation, horizontales ou verticales, commandant les pompes en tandem. La marche

de ces machines est souvent très lente, ce qui a l'inconvénient d'en exagérer les dimensions,

Le mouvement circulaire de l'arbre n'est évidemment pas indispensable, puisque le piston de la pompe, comme le piston moteur, a un mouvement rectiligne. La distribution des machines élévatoires à *action directe*, telle que celle de Worthington, a été mentionnée p. 178.

73. Machines d'extraction. — La machine d'extraction manœuvre, dans les puits de mine, les cages qui portent les wagonnets. Ces cages, l'une montante, l'autre descendante, sont suspendues à des câbles, qui, après avoir passé sur des *molettes* ou poulies de renvoi placées au-dessus du puits, s'enroulent en sens inverses sur deux bobines ou tambours montés sur l'arbre de la machine motrice. Suivant le sens de rotation de cet arbre, les cages montent et descendent alternativement.

Les mines importantes donnent un fort tonnage à extraire; le poids de chaque cage, avec son chargement, atteint parfois 10 tonnes, et la vitesse d'ascension dépasse 12 *m* par seconde, dans des puits profonds de 500 et même de 1 000 *m*. Les manœuvres, au fond et au jour, doivent être rapides.

La machine d'extraction est, avant tout, établie en vue de la commodité et de la simplicité du service; elle doit obéir docilement et sans retard à son conducteur, démarrer sans hésitation dans toutes les positions, tourner à volonté dans les deux sens, et exercer des efforts parfois très variables dans le cours d'une manœuvre. Elle a deux cylindres, dont les pistons commandent deux manivelles calées à angle droit sur l'arbre, qui porte les bobines ou les tambours, sur lesquels s'enroulent, en sens inverses, les deux câbles des cages. Quelquefois verticale, elle est généralement horizontale.

La distribution se fait par tiroirs, soupapes, obturateurs oscillants; le changement de marche exige souvent un servomoteur.

74. **Machines soufflantes, compresseurs, machines de laminoirs.** — Il n'y a pas de différence essentielle entre la *machine soufflante* et le *compresseur*; seulement la première de ces machines refoule l'air à des pressions ne dépassant pas beaucoup celle de l'atmosphère (par exemple une pression effective de $0,5 \text{ kg par cm}^2$), tandis que les compresseurs donnent des pressions plus élevées.

Les moteurs de ces appareils n'offrent guère de dispositions spéciales résultant de leur application particulière : ce sont des machines horizontales ou pilon, avec commande directe du cylindre à vent monté en tandem et arbre à volant; généralement deux cylindres moteurs, simples ou de préférence compound, attaquent deux manivelles à angle droit. Le volant est utile, parce que le travail résistant croît du commencement à la fin de la course, tandis que le travail moteur décroît par suite de la détente de la vapeur : le cylindre à vent est même un instant moteur au début, lorsque l'air comprimé dans l'espace libre se détend. Une grande uniformité de rotation est d'ailleurs inutile.

Les machines de laminoirs sont de deux sortes. Si le laminoir tourne toujours dans le même sens, le moteur qui l'actionne doit avoir un fort volant, qui agit comme accumulateur de travail plus que comme régulateur de vitesse.

Les laminoirs *réversibles* sont actionnés par des machines à changement de marche par coulisse, à deux cylindres sur manivelles à angle droit, machines remarquables par la rapidité de la mise en train et du renversement de la rotation, malgré des dimensions considérables. Un servomoteur commande l'arbre de relevage; les tiroirs cylindriques conviennent pour réduire la fatigue de la distribution. On emploie aussi trois cylindres commandant trois manivelles calées à 120° : l'effort moteur est alors très régulier. Le volant est d'ailleurs inadmissible, parce qu'il générerait le renversement de la marche. Aux cylindres simples on substitue des groupes tandem de deux cylindres compound.

75. Locomotives. — La machine locomotive fonctionne à haute pression, sans condensation, avec de grandes variations de puissance et de vitesse. Les dispositions en ont été reproduites dans beaucoup d'autres moteurs; elles sont caractérisées par la simplicité et la grande solidité des pièces, obtenue sans en exagérer le poids. C'est pour les locomotives que Séguin a imaginé la chaudière tubulaire (à tubes de fumée).

Le mécanisme usuel de la locomotive à simple expansion comprend deux cylindres, dont les pistons attaquent un essieu par deux manivelles calées à angle droit : une coulisse de Stephenson ou un mécanisme équivalent conduit le tiroir.

La double expansion est d'un emploi fréquent dans les locomotives, souvent avec quatre cylindres. Les locomotives modernes emploient la vapeur surchauffée, et les tiroirs en sont cylindriques¹.

76. Machines de bateaux. — Les appareils destinés à la grande navigation doivent brûler peu de charbon pour produire le kilowatt-heure; il importe que le poids total en soit modéré et qu'ils n'occupent pas trop de place à bord; il est nécessaire qu'ils soient assez robustes et assez simples pour fonctionner d'une manière continue et régulière, parfois pendant plusieurs semaines sans arrêt. Certains appareils de ce genre sont remarquables par leur colossale puissance.

On peut leur demander une puissance toujours à peu près uniforme, soit pour les paquebots à grande vitesse, soit pour les bateaux de charge à marche lente. Au contraire, la marine militaire exige des moteurs qui puissent fonctionner à des allures très différentes, ce qui est une difficulté sérieuse.

Les organes de propulsion, commandés par les moteurs,

1. On trouvera des détails sur les locomotives, dans « La machine locomotive », par Ed. Sauvage, 7^e éd. (Paris, 1923, Béranger).

consistent en hélices ou en roues à aubes ; celles-ci, exclusivement usitées au début de la navigation à vapeur, ont généralement cédé la place à l'hélice. Cependant on en construit encore, pour des paquebots à courtes traversées maritimes et pour la navigation fluviale.

En montant deux et même trois hélices, conduites chacune par un moteur spécial, on évite, dans de très grands bâtiments, les dimensions excessives qu'aurait une machine unique. En outre, les évolutions sont plus faciles et une avarie de machine ne paralyse pas le bâtiment.

La commande directe de l'arbre des roues exige une machine à marche lente. Le *balancier supérieur* est depuis longtemps en usage aux États-Unis. Le cylindre, vertical et à longue course, est souvent unique. Pour les grandes puissances, on fait usage de deux cylindres contigus avec détente de Woolf.

Pour la navigation maritime, les anciennes machines avaient des *balanciers inférieurs*, placés de part et d'autre du cylindre vertical, et commandés par des *bielles en retour* (voir fig. 7).

On s'est bientôt débarrassé de l'attirail lourd et encombrant de ces balanciers, pour appliquer la connexion directe. Mais, en conservant la position verticale des cylindres, on était gêné par le manque de hauteur disponible sous l'arbre des roues : avec les *cylindres oscillants* (fig. 469), la tige du piston s'articule directement sur le tourillon de la manivelle, et le cylindre oscille sur deux tourillons creux : l'un sert à l'arrivée et l'autre à l'échappement de la vapeur : des garnitures s'opposent aux fuites. Un renvoi spécial commande le tiroir, porté par le cylindre oscillant.

Dans les constructions récentes des bateaux à roues, les cylindres sont souvent inclinés ou même horizontaux, disposition qui se prête à l'emploi d'une roue unique à l'arrière, commode pour la navigation fluviale.

Pour la commande des arbres d'hélice, la disposition pilon,

à connexion directe, est de beaucoup la meilleure. En exceptant de très petits appareils, les machines marines sont presque toutes à triple expansion, avec des pressions ini-

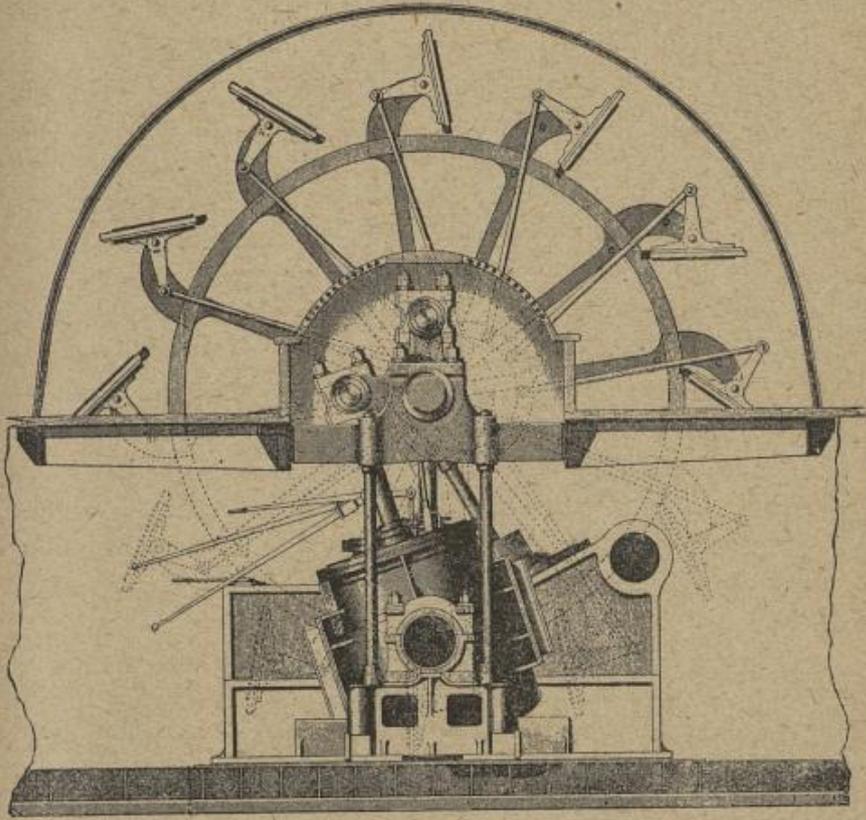


Fig. 169. — Machine à cylindres oscillants, construite par J. et G. Thompson à Glasgow, pour bateau à roues; coupe longitudinale (Steamer « Iona »; deux cylindres de 1,17 m sur 1,22 m; nombre de tours par-minute, 42).

tiales qui dépassent parfois 14 kg par cm^2 . La machine la plus simple a trois cylindres et trois manivelles. Pour éviter un diamètre excessif de cylindre, et surtout pour équilibrer les pièces à mouvement alternatif, on fait souvent usage de quatre manivelles calées suivant des angles convenables (disposition Yarrow-Schlick-Tweedy), en dédoublant le dernier cylindre.

Pour les machines de très grands paquebots, le montage des cylindres en tandem a été souvent adopté.

La quadruple expansion est rare.

La distribution des machines marines se fait toujours par tiroirs, de préférence cylindriques. Afin d'obtenir des sections de passage suffisantes, on est conduit à monter sur les grands cylindres deux et même plusieurs tiroirs. Une distribution à changement de marche est nécessaire; celle de Marshall est commode pour la commande des tiroirs placés latéralement.

Les pompes de condenseur sont actionnées soit par le moteur principal, soit par un moteur auxiliaire.

Les vitesses de rotation sont de 80 tours environ par minute pour les hélices des grands paquebots et des bateaux de charge; de 120 à 150 pour certains paquebots, et enfin de 300 à 400 pour les torpilleurs.

77. Applications diverses. — On dresserait une longue liste des applications diverses de la puissance motrice de la vapeur, autres que celles qui viennent d'être examinées. Parmi les plus importantes, on peut citer le *marteau-pilon*, où la vapeur soulève simplement une masse pour la laisser retomber, quand le marteau est à simple effet. Dans le marteau à double effet, on ajoute au poids de la masse tombante la pression de la vapeur au-dessus du piston.

Les organes de distribution, commandés à la main, doivent se manœuvrer aisément; aussi fait-on usage de soupapes à double siège ou de tiroirs cylindriques. Pour les petits marteaux, la commande de la distribution est quelquefois automatique. Il importe que le mécanisme automatique n'admette pas la vapeur, pour relever le piston, avant que la masse frappante n'ait bien donné son coup.

La vapeur travaille seulement à pleine pression dans ces appareils, et avec l'inconvénient d'un vaste espace libre au-dessous du piston, correspondant à l'épaisseur de la pièce forgée. Si le piston est à double effet, il y a aussi un

grand espace libre au-dessus du piston quand on ne l'élève pas de toute sa course. Pour économiser la vapeur, on a construit des marteaux à double effet du type Woolf, où la vapeur qui a soulevé le piston agit pendant la descente sur un piston supérieur de plus grand diamètre.

78. Machines rotatives. — Les machines rotatives, que l'imagination de nombreux inventeurs a produites, sous des formes indéfiniment variées, en apparence du moins, forment une classe de moteurs peu intéressants en pratique. En théorie, le travail de la vapeur reste exactement le même dans une machine rotative et dans une machine à piston; la disposition cinématique n'est d'ailleurs pas plus simple, et Reuleaux¹ a montré que souvent elle possédait en principe la même chaîne d'organes. En pratique, la capacité variable, qui reçoit la vapeur, comporte des pièces frottantes nombreuses; il est bien plus difficile de les tenir étanches que les simples pistons dans des cylindres. L'avantage des pièces enfermées, peu encombrantes, et à peu près équilibrées, se retrouve dans certains types de moteurs à pistons ordinaires, à simple effet. D'ailleurs, la turbine à vapeur a les avantages de la machine rotative sans ses inconvénients.

1. Reuleaux, Cinématique, traduction par Debize.

CHAPITRE IX

TURBINES A VAPEUR

79. **Écoulement de la vapeur.** — En laissant écouler la vapeur par un orifice de forme convenable, de la chaudière où elle est produite, dans le condenseur où l'on maintient une faible pression (ou dans l'atmosphère si le condenseur n'existe pas), on obtient un jet animé d'une grande vitesse. On sait calculer la vitesse de ce jet, qui dépend de la pression initiale et de la pression finale, et aussi de l'état initial de la vapeur, humide, saturée sèche ou surchauffée. Le diagramme de Mollier (fig. 24) donne dans chaque cas la valeur de cette vitesse par la mesure, avec une échelle convenable, de la distance verticale depuis le point qui représente l'état initial de la vapeur jusqu'à la courbe de la pression finale : cette distance est proportionnelle au carré de la vitesse.

En considérant l'écoulement d'un kilogramme de vapeur, la force vive de cette masse, animée de la vitesse v , est, en kilogrammètres, $\frac{v^2}{2g}$. Ce nombre de kilogrammètres représente exactement la quantité de travail que produirait, dans la machine à vapeur théoriquement parfaite, le kilogramme de vapeur prise au même état, et fonctionnant entre les mêmes limites de pression. Si l'on dispose un appareil capable de recueillir l'énergie contenue, sous forme de force vive, dans le jet de vapeur, en le supposant également parfait, il serait équivalent à la machine à piston : la dépense de vapeur, pour produire un kilowatt-heure, serait la même avec les deux modes d'emploi si différents l'un de l'autre. Cet appareil est une turbine à vapeur.

Théoriquement, au point de vue de la consommation, la turbine équivaut donc exactement à la machine à piston. Il ne s'ensuit pas nécessairement que les machines réelles, qui dépensent davantage, soient également équivalentes. En fait, les meilleures machines à piston et les meilleures turbines, dépensant à peu près une fois et demie la quantité de vapeur théoriquement nécessaire, sont encore équivalentes.

Voici quelques exemples des vitesses théoriques d'écoulement de la vapeur en mètres par seconde (valeurs approximatives mesurées sur le diagramme) :

PRESSION initiale (kg par cm ²).	ÉTAT INITIAL.	PRESSION FINALE (kg par cm ²).		
		1	0 1	0.05
20	Saturée sèche	1 000	1 260	1 320
	Surchauffée de 100°	1 060	1 310	1 370
15	Saturée sèche	980	1 240	1 300
	Surchauffée de 100°	1 020	1 300	1 360
10	Saturée sèche	890	1 170	1 230
	Surchauffée de 100°	930	1 230	1 300
5	Saturée sèche	730	1 080	1 130
	Surchauffée de 100°	800	1 150	1 220
1	Saturée sèche	»	850	920
	Surchauffée de 100°	»	890	980

Lorsque la pression finale est assez élevée et dépasse certaines limites comprises entre les 3 et 6 dixièmes de la pression initiale, un ajutage convergent ordinaire suffit pour réaliser le jet de vapeur animé de la vitesse calculée comme il vient d'être dit. Mais pour des valeurs plus faibles de la pression finale, l'ajutage doit avoir une forme plus compliquée, et surprenante à première vue : il est d'abord convergent, puis divergent, suivant des proportions déterminées dans chaque cas. Il semblerait que la forme divergente doive diminuer la vitesse de sortie : cela serait vrai

pour l'eau, mais pour la vapeur, à mesure que la pression s'abaisse, le volume spécifique (volume occupé par 1 kg) augmente, de sorte que, malgré l'épanouissement de la veine, la vitesse augmente, parce que le fluide devient de moins en moins dense. Au moment où la vapeur quitte la tuyère, la pression est descendue à la valeur finale qui règne dans l'enceinte où elle s'écoule, et on réalise la plus grande vitesse possible.

80. Utilisation du jet de vapeur. — Les projets de turbines à vapeur sont fort anciens; c'est même la première forme de moteur à vapeur qui ait été proposée. Ces projets, souvent fantaisistes, mais parfois fort ingénieux, se sont multipliés dans le cours du XIX^e siècle¹. Toutefois, ce n'est que vers la fin du siècle que des machines capables de fonctionner industriellement ont été créées par de Laval et Parsons. D'assez nombreux types ont été réalisés par d'autres ingénieurs et constructeurs, et la turbine à vapeur a pris une très grande importance.

Si on faisait agir la vapeur en la dirigeant perpendiculairement sur des palettes radiales disposées autour d'une roue, l'utilisation serait défectueuse, d'une part parce que le choc entraîne une perte de travail importante et d'autre part parce que la vapeur, après son action sur la roue, conserverait une vitesse encore assez grande, égale à la vitesse linéaire des palettes. Dans ces conditions, le rendement maximum n'est que la moitié de la puissance disponible, à cause de ces deux pertes, et encore notablement moindre en réalité, à cause d'autres pertes accessoires.

Il faut donc faire agir la vapeur sur une aube disposée de telle sorte qu'il n'y ait pas de choc à l'entrée, et qu'elle soit abandonnée avec une faible vitesse. Cela est possible en dirigeant convenablement la vapeur par un *distributeur* fixe (ou *ajutage*) sur des aubes courbes. Ces aubes sont dispo-

1. Voir Sosnowski, roues et turbines à vapeur.

sées à la circonférence d'une roue et tournent de telle sorte qu'elles soient animées d'une vitesse linéaire u (fig. 170). La vapeur est animée de la vitesse v , représentée par le vecteur AB. AC étant la vitesse linéaire de l'aube, u , au point d'entrée, la vitesse *relative* w , dont la vapeur paraîtrait animée à un observateur entraîné par la roue, est le troisième côté, CB, du triangle ABC.

Pour que l'entrée se fasse sans choc, il suffit que cette vitesse relative CB soit tangente en B à l'aube BD.

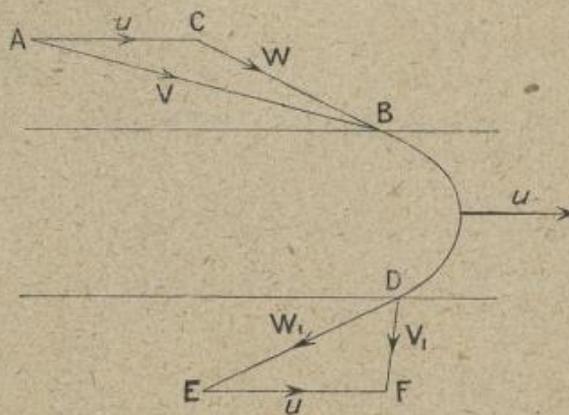


Fig. 170. — Triangles des vitesses à l'entrée et à la sortie de la roue.

Le jet de vapeur traverse la roue entre l'aube BD et l'aube suivante : suivant la disposition du conduit formé par ces aubes, la vitesse relative w reste à peu près constante ou varie : à la sortie, en D, la vapeur est animée d'une vitesse relative w_1 représentée en grandeur et direction par DE. La vitesse *absolue* de sortie de la vapeur, v_1 , est figurée par le vecteur DF, qui résulte de la composition des vitesses DE et EF. Si ces vitesses DE et EF ont à peu près la même grandeur et font un angle très aigu, la vitesse absolue de sortie DF est faible.

Avec la disposition dite axiale, où le point d'entrée B et le point de sortie D sont à égale distance de l'axe de rotation, les vitesses tangentielles de la roue à l'entrée et à la sortie, AC et EF, sont égales.

81. **Dispositions des turbines.** — L'admission est *totale* quand le distributeur envoie la vapeur sur la circonférence entière de la couronne; elle est *partielle* dans le cas contraire; parfois le distributeur n'a qu'un seul orifice.

La turbine est dite à *impulsion* (ou à *action*) quand la pression dans le jet de vapeur, à la sortie du distributeur, au moment où il pénètre dans la roue, est tombée jusqu'à la valeur finale d'échappement; la vitesse du jet correspond alors à la chute totale de pression depuis la chaudière jusqu'au condenseur.

N'était l'action du frottement, la vitesse relative de la vapeur serait la même à l'entrée et à la sortie de la roue de la turbine à impulsion axiale.

Dans la turbine à *réaction*, la pression du jet, qui sort du distributeur, n'a pas encore atteint sa valeur finale, et la vitesse du jet est moindre. La pression s'abaisse jusqu'à la valeur finale pendant la traversée de la roue.

En désignant par T l'énergie totale correspondant à la chute de pression, par T' l'énergie sous forme de force vive du jet sortant du distributeur, on définit le *degré de réaction* par le rapport $\frac{T - T'}{T}$. Ce rapport est souvent égal à 0,5.

Il est nul dans la turbine à impulsion.

Suivant la direction générale du fluide, on distingue les turbines *axiales* (ou *hélicoides*), où le jet reste toujours à peu près à égale distance de l'axe de rotation, et les turbines *radiales*, divisées en *centrifuges* et en *centripètes*, suivant que le jet s'éloigne ou se rapproche de l'axe de rotation.

La figure 171 donne le tracé des aubes fixes et mobiles pour l'impulsion et la réaction. Les turbines sont supposées du genre axial, de sorte que la vitesse tangentielle u est la même à l'entrée et à la sortie : les triangles des vitesses sont placés sur cette vitesse commune comme base.

La réalisation de la turbine à impulsion, avec une seule roue, est difficile. On trouve en effet que pour satisfaire aux conditions d'entrée et de sortie, la vitesse linéaire de la tur-

bine, u , doit être la moitié de la vitesse absolue de la vapeur à l'entrée, v . Comme cette vitesse est souvent de 1000 à 1200 m par seconde, cela conduirait pour la roue à des vitesses à la circonférence de 500 à 600 m par seconde, qui soumettent le métal à des efforts dépassant ce que les meilleurs aciers peuvent supporter.

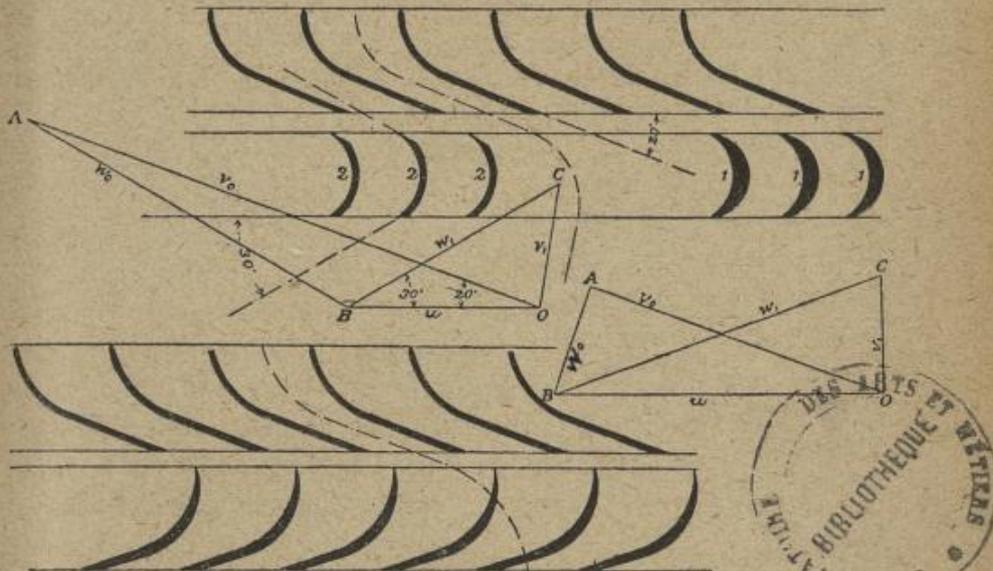


Fig. 171. — Tracé schématique des aubes directrices fixes et des aubes mobiles des turbines à impulsion (moitié supérieure de la figure), et à réaction (moitié inférieure); dans chaque tracé, le distributeur fixe est au-dessus de la partie mobile (d'après M. Rateau).

Triangles des vitesses correspondants, à l'entrée et à la sortie :

AO (v_0), vitesse absolue de la vapeur à la sortie du distributeur; — BO (u), vitesse linéaire de la turbine; — AB (w_0) et CB (w_1), vitesses relatives de la vapeur par rapport à la turbine, à l'entrée et à la sortie; — CO (v_1), vitesse absolue de la vapeur à la sortie de la turbine.

Pour tourner cette difficulté, une des solutions consiste à employer les *étages de vitesse*. La vitesse maxima de la vapeur, v_1 , est reçue par une première roue, T_1 (fig. 172), animée d'une vitesse relativement faible u , et abandonnant par suite la vapeur avec une vitesse absolue v_2 encore grande. Cette vitesse v_2 est reçue par un second distribu-

teur, D_2 , qui en change la direction, et l'envoie agir sur une seconde roue T_2 tournant avec la première sur un axe commun ; cette seconde

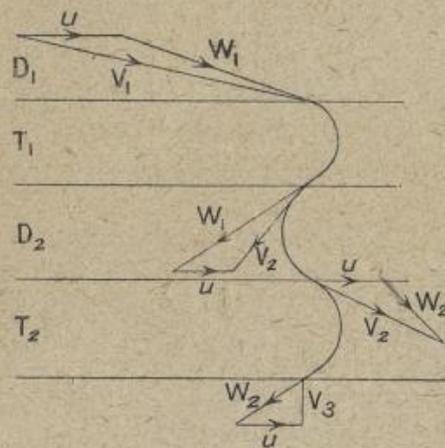


Fig. 172. — Turbine à deux étages de vitesse.

roue l'abandonne avec la vitesse absolue v_3 . Les triangles des vitesses, dans l'hypothèse théorique où les vitesses relatives ne varient pas à la traversée de T_1 et de T_2 , non plus que la vitesse absolue à la traversée de D_2 , sont rapprochés les uns des autres sur la figure 173.

Au lieu d'étages de vitesse, on peut faire usage d'étages de pression : entre la chaudière, à la pression p_1 , et le condenseur, à la pression p_2 , on établit des enceintes successives, où règnent des pres-

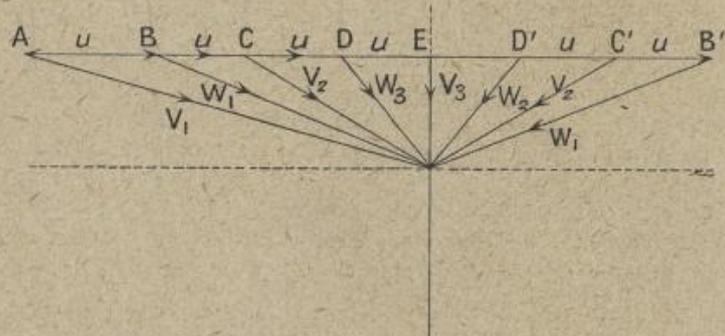


Fig. 173. — Triangles des vitesses de la turbine à deux étages de vitesse : $BE = EB'$ $CE = EC'$ $DE = ED'$.

sions décroissantes, p' , p'' ... La vapeur s'écoule d'une enceinte à la suivante, en actionnant chaque fois une roue, toutes ces roues tournant ensemble avec un axe commun. Le fonctionnement de chacune des turbines partielles reste

à impulsion, ou à réaction, mais, à cause de la moindre différence des pressions, les vitesses de la vapeur sont réduites.

On combine enfin les deux systèmes en disposant des étages de pression, avec turbines à étages de vitesse à chaque étage de pression.

Il convient toutefois de ne pas trop multiplier les étages de vitesse, qui donnent lieu à des pertes assez grandes par frottement.

Pour comparer les divers genres de turbines, il convient de supposer qu'elles sont munies de roues de mêmes diamètres, tournant à la même vitesse. Avec ces conditions, un étage de pression de la roue à impulsion remplacera deux étages de la roue avec degré de réaction d'un demi; une roue à deux étages de vitesse remplacera 8 roues à réaction.

Les turbines à réaction fonctionnent avec de nombreux étages de pression. Elles comportent une série de roues séparées par des distributeurs fixes; la vapeur sortant d'une roue entre immédiatement dans le distributeur de la roue suivante.

Dans une turbine multiple, toutes les roues successives sont traversées dans le même temps par le même poids de vapeur. Mais à mesure que la pression diminue, le volume occupé par ce poids constant devient de plus en plus grand, si bien que les sections de passage doivent être de plus en plus larges. Il en est de même dans les turbines à étages de vitesse, où, à égalité de pression, la vitesse de la vapeur diminue progressivement. L'augmentation de section de passage est obtenue de plusieurs manières différentes, qui peuvent être combinées ensemble :

Les diamètres des turbines successives sont de plus en plus grands;

Avec le même diamètre on augmente la largeur des ailes, comptée dans la direction du rayon (turbines axiales);

L'admission partielle, sur des roues de mêmes dimensions, se fait suivant des arcs de plus en plus étendus, jusqu'à l'admission totale;

En augmentant l'angle de sortie DEF (fig. 170), on augmente la vitesse de sortie v_1 et par conséquent le débit sur une surface donnée.

La condensation a une très grande importance pour les turbines à vapeur et il importe que la pression dans le condenseur soit aussi réduite que possible. Un petit abaissement de cette pression (amélioration du vide au condenseur) augmente notablement la vitesse de la vapeur et le travail

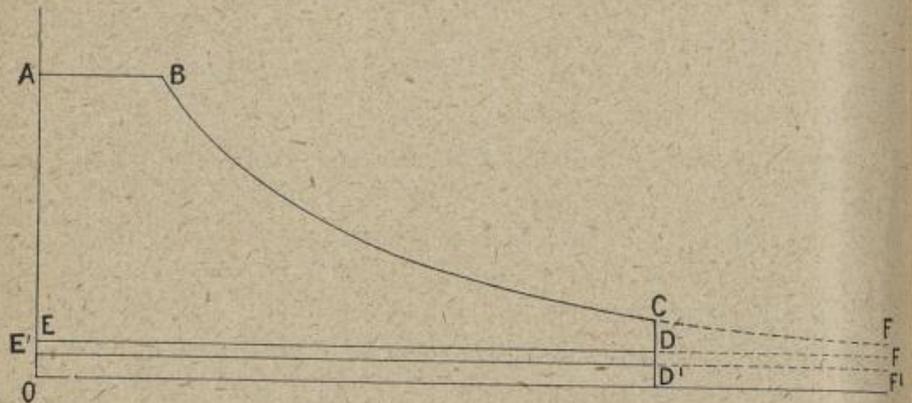


Fig. 174. — Effet de la condensation, dans un moteur à piston et dans une turbine.

donné par la turbine : l'effet est beaucoup plus sensible que sur un moteur à piston.

Soit un moteur à piston, marchant à condensation, et donnant le diagramme ABCDE (fig. 174); on améliore le vide du condenseur, et on obtient le diagramme ABCDE', qui donne un supplément de travail représenté par le rectangle EDD'E', dont la hauteur est très faible. La turbine à vapeur utilise au contraire toute la détente, c'est-à-dire le diagramme ABFE, dont le point F est très éloigné vers la droite. L'amélioration du vide donne ABF'E', et ajoute une bande de même hauteur que précédemment, mais beaucoup plus longue, plus une pointe, de F à F'.

L'emploi de vapeur surchauffée dans les turbines est avantageux : d'une part, la surchauffe augmente la vitesse

d'écoulement : d'autre part, l'absence d'eau dans la vapeur supprime des pertes de rendement dues aux chocs des gouttelettes. Dans la machine à piston, la surchauffe atténue l'action des parois, action nuisible qui n'existe pas dans la turbine, puisque chaque partie des parois est en contact avec la vapeur à température constante.

82. Pertes de rendement. — Dans l'étude théorique de la turbine, on suppose d'abord que le jet de vapeur est composé de filets ayant des directions parfaitement déterminées, et tous déviés de même par les aubes directrices et réceptrices. En réalité, le mouvement est moins régulier ; les divers filets se mêlent plus ou moins, des mouvements irréguliers et tourbillonnaires se produisent dans la masse de vapeur. Ces effets réduisent l'effet utile produit par le fluide. De même les frottements de la vapeur contre les parois fixes et mobiles qui la guident absorbent une partie de l'énergie du jet. Les vitesses de la vapeur quittant la roue sont des vitesses perdues, dont la force vive n'est pas utilisée, sauf quand ces vitesses sont recueillies dans un distributeur placé au débouché d'une roue et alimentant une roue suivante. A la sortie de la dernière roue, on peut placer un *diffuseur*, dont les aubes fixes réduisent progressivement la vitesse de la vapeur et diminuent la perte de force vive correspondante. Les fuites de vapeur s'écoulant sans agir sur une roue peuvent aussi avoir une certaine importance ; notamment, dans le fonctionnement à réaction, il se produit une perte spéciale de vapeur par la *fuite au joint* : comme la pression dans la veine qui sort du distributeur, pour entrer dans la roue, est plus élevée que la pression finale qui règne dans l'enceinte où tourne cette roue, une nappe de vapeur s'échappe par le vide ou *joint* qui existe nécessairement entre la partie fixe et la partie tournante.

Les frottements des disques des roues dans la vapeur qui les entoure et les frottements mécaniques de l'appareil consomment aussi du travail.

C'est pour ces raisons que les très bonnes turbines ne rendent environ que les deux tiers du travail théoriquement disponible.

Le travail perdu par les frottements, chocs, tourbillonne-

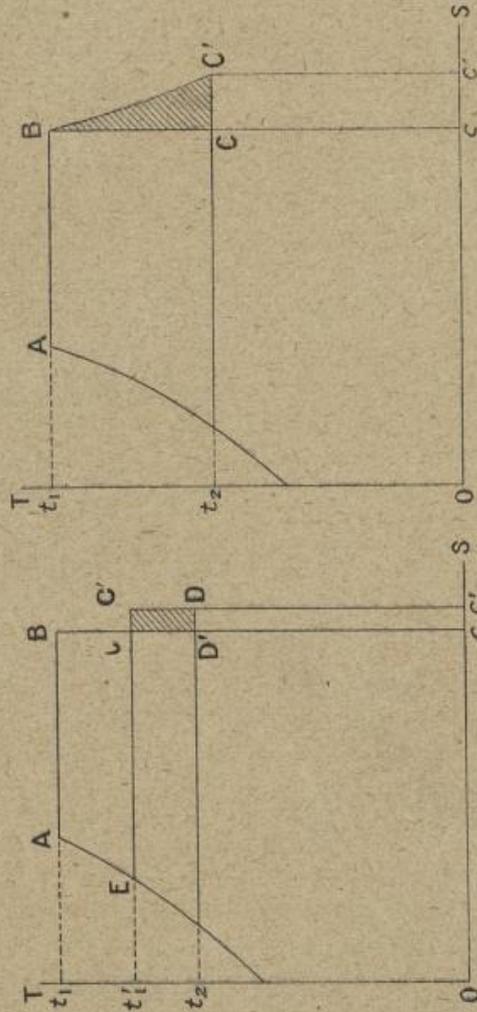


Fig. 175.

Fig. 175. — Diagramme entropique des pertes de la turbine. Une portion de la chaleur ABC'E, au lieu d'être transformée en travail, se retrouve en CC'E'c, dont la partie CC'DD' est récupérée dans la deuxième turbine.

Fig. 176. — Diagramme entropique des pertes dans une série nombreuse de turbines. BC'c'c; chaleur correspondant au frottement; BC'C, fraction récupérée.

ments de la vapeur se transforme presque entièrement en chaleur, qui reste, en grande partie, dans la vapeur même; tandis que, dans la machine parfaite, la détente serait adiabatique et représentée par une verticale sur le diagramme

entropique (fig. 175), le titre de la vapeur sortant d'une première turbine est un peu plus élevé; son état est représenté par le point C' au lieu de C . Il en résulte que, de la chaleur perdue $CC'cc'$, une seconde turbine récupère, en la transformant en travail, la fraction $CC'DD'$. La figure 31 montre un effet analogue dans les moteurs à cylindres successifs.

Avec un grand nombre de turbines successives on se rapproche d'une courbe de détente telle que BC' au lieu de l'adiabatique BC , avec récupération de la surface $BC'C$, $CC'c'c$ restant perdu (fig. 176).

83. Types de turbines. — La turbine de Laval¹ est à roue unique; elle fonctionne à impulsion, avec admission par-

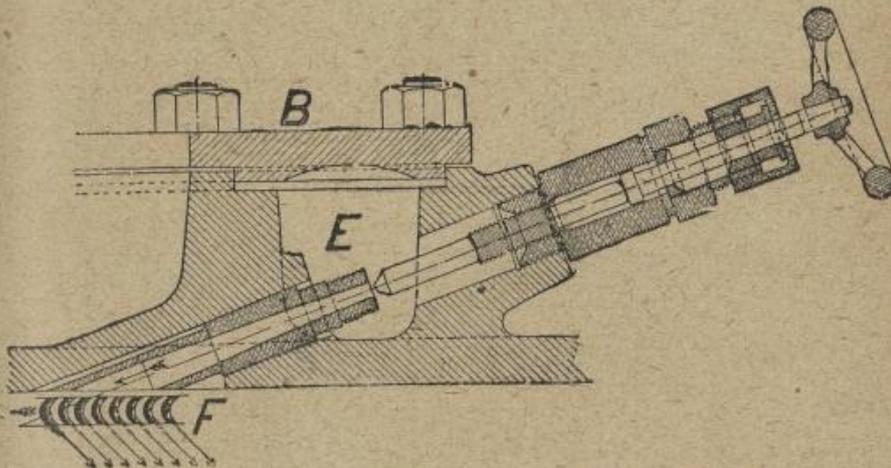


Fig. 177. — Coupe de l'ajutage distributeur de la turbine de Laval.
E, boîte à vapeur; — F, portion de la couronne tournante.

tielle. La vitesse à la circonférence de la roue est environ le tiers de la vitesse de la vapeur à la sortie de l'ajutage distributeur, au lieu de la valeur théorique de la moitié, et peut s'approcher de 350 m par seconde: il faut un disque

¹ Description et dessins dans la *Revue de mécanique*, février 1904, p. 153. On trouvera dans cette Revue de très nombreux documents sur les turbines; voir notamment avril 1910, p. 157.

d'une solidité exceptionnelle pour résister à cette vitesse. Cette réduction de la vitesse de la roue conduit à une vitesse absolue de sortie un peu grande.

La roue tourne dans une chambre en communication avec le condenseur : elle reçoit la vapeur d'un ajutage divergent

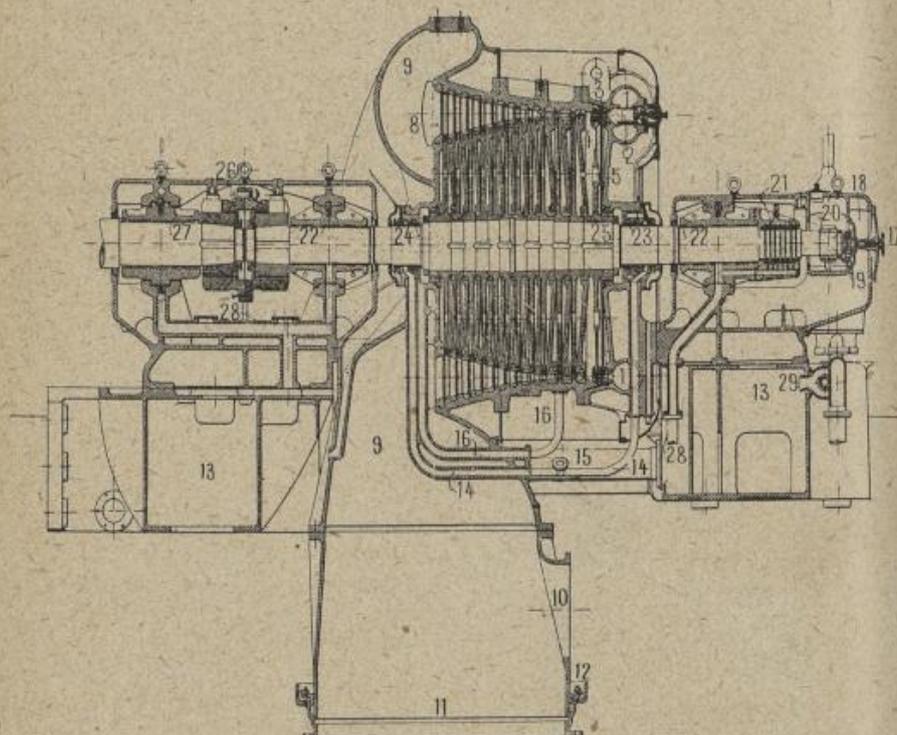


Fig. 178. — Turbine Rateau, de 10.000 à 15.000 kilowatts.

1, Tore d'admission. — 3, Tuyères d'admission. — 4, Première roue, à 2 étages de vitesse. — 8, Diffuseur. — 10, Echappement à air libre. — 21, Palier de butée. — 22, Paliers. — 24, Tuyau de communication des garnitures.

(fig. 177) ; on emploie aussi plusieurs ajutages, agissant sur la roue unique, pour augmenter la puissance.

La vitesse linéaire très grande, combinée avec le diamètre restreint du disque, conduit à une énorme vitesse de rotation (15 000 tours par minute, et même plus). Il est nécessaire de réduire cette vitesse. A cet effet, l'arbre de la turbine porte un pignon qui commande des roues dentées à

denture hélicoïdale, d'une exécution remarquable. La vitesse est réduite au dixième.

La turbine Rateau fonctionne à impulsion avec plusieurs

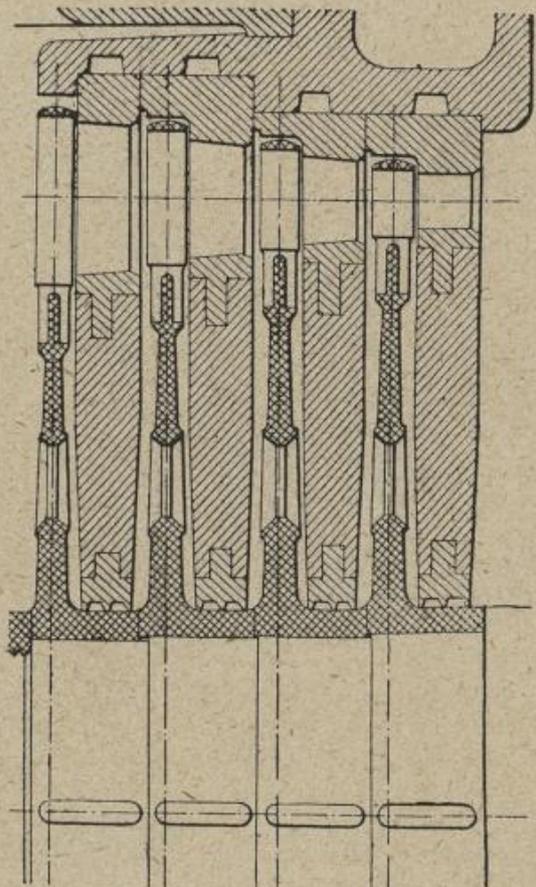


Fig. 179. — Détail des cellules des turbines Rateau : la figure montre le montage de 4 disques consécutifs sur l'arbre, et de 4 cloisons fixes venant toucher l'arbre par des arêtes. Les disques sont percés pour assurer l'égalité des pressions sur leurs deux faces.

étages de pression (fig. 178). La disposition est dite multicellulaire, chaque roue tournant dans une cellule séparée, limitée par deux disques fixes, qui s'étendent depuis l'enveloppe extérieure jusqu'à l'arbre (fig. 179).

Dans la turbine Curtis (fig. 180), les étages de vitesse et

de pression sont combinés. Chaque roue porte à sa jante deux ou trois couronnes d'aubages, avec un ou deux distributeurs intermédiaires. Une particularité est la position verticale de l'arbre. Le poids de la partie tournante, avec la dynamo qu'elle commande, est porté par un plateau qui

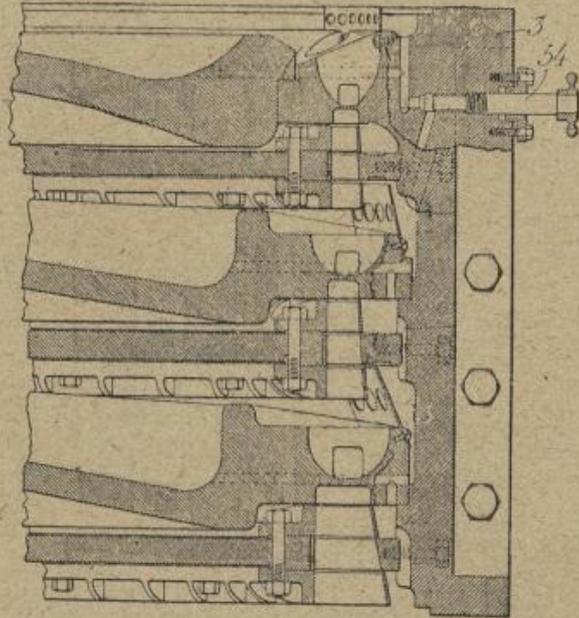


Fig. 180. — Turbine Curtis; coupe partielle par l'axe vertical de rotation; les cloisons fixes, portant les orifices distributeurs, adhèrent à l'enveloppe extérieure, à droite. (La coupe porte des parties hachurées qui semblent fermer ces orifices.)

tourne sur une mince couche d'huile, entretenue par une pompe.

La turbine Parsons primitive comprenait une série de roues à réaction, dont les ailettes étaient montées sur des tambours de diamètre croissant et tournaient entre les ailettes fixes portées par l'enveloppe (fig. 181). Mais à cause de la petitesse des ailettes des premières roues, et de la grande densité de la vapeur qui les traversait, les fuites y prenaient une grande importance, et le rendement de ces premières roues était médiocre; aussi les a-t-on ultérieurement

remplacées par une roue à action, à deux étages de vitesse (fig. 182 et 183), correspondant à une première chute de pression assez forte.

La turbine Ljungstrom¹ est un exemple rare de la disposition centrifuge d'une série de roues successives (fig. 184); disposition très compacte et qui se prête à l'accroissement des sections nécessaires

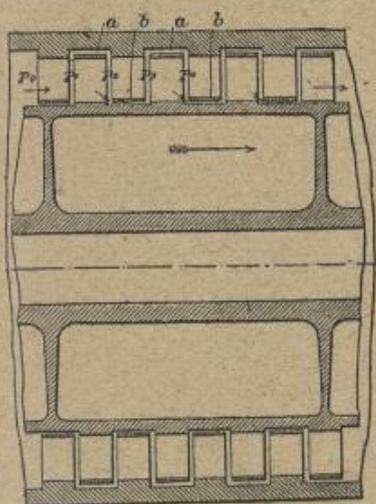


Fig. 184. — Turbine Parsons; schéma de la disposition du tambour.

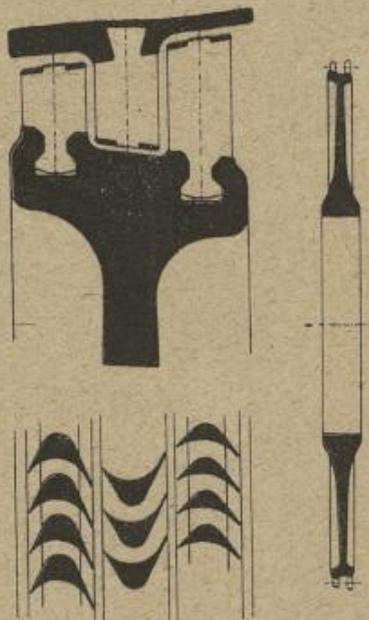


Fig. 182. — Roue à impulsion, avec deux étages de vitesse, des turbines Brown Boveri Parsons.

pour la vapeur de plus en plus détendue. Elle présente en outre cette particularité curieuse qu'au lieu d'aubes fixes directrices placées entre les aubes tournantes, on fait usage de deux roues à aubes alternées tournant en sens contraire. Chacune de ces roues commande un alternateur. Pour une même vitesse des deux roues, cette disposition augmente notablement la vitesse d'écoulement de la vapeur, et permet de réduire le nombre des étages de pression.

Les aubes sont tracées pour la réaction; grâce à la dis-

¹. Voir *Revue de mécanique*, juin 1912, p. 565.

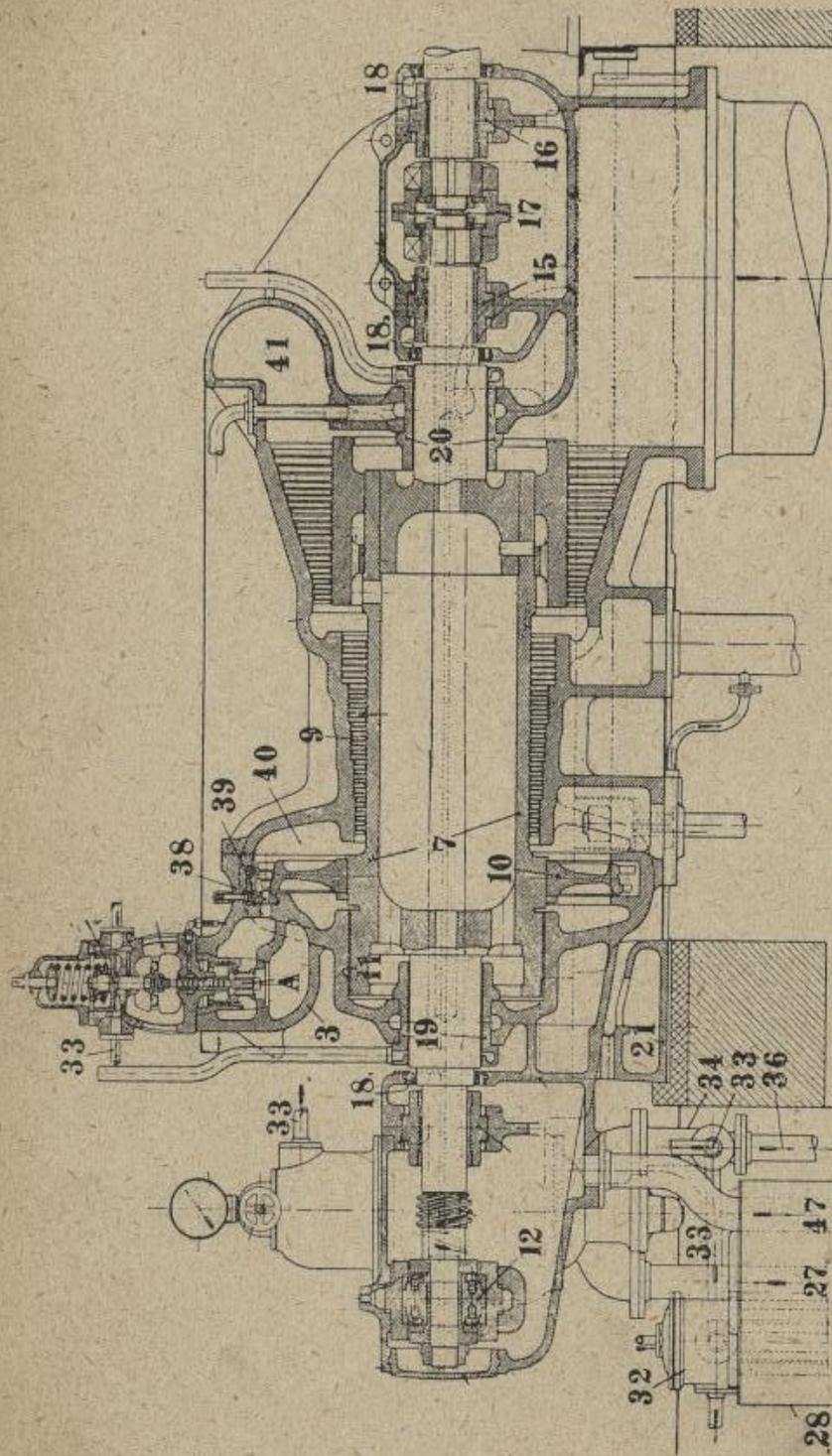


Fig. 183. — Turbine Brown Boveri Parsons; coupe longitudinale.

10, Roue à action. — 11, Joint à labyrinthe. — 12, Palier de butée à billes. — 17, Accouplement. — 18, Bague d'arrêt d'huile. — 19, Boîte étanche avant. — 20, Boîte étanche arrière. — 27, Aspiration de la pompe à huile principale. — 28, Réservoir d'huile. — 32, Turbo-pompe à huile auxiliaire. — 33, Tuyauterie d'huile sous pression de la distribution et des soupapes additionnelles automatiques. — 34, Tuyauterie de refoulement de la pompe à huile. — 36, Tuyauterie d'huile entre la pompe et le réfrigérant d'huile. — A, Soupape de distribution. — 38, Tuyères. — 39, Secteur d'aubes directrices. — 40, Chambre de la roue à action. — 41, Calotte d'échappement.

à huile. — 36, Tuyauterie d'huile entre la pompe et le réfrigérant d'huile. — A, Soupape de distribution. — 38, Tuyères. — 39, Secteur d'aubes directrices. — 40, Chambre de la roue à action. — 41, Calotte d'échappement.

position centrifuge, les premières ont des dimensions assez grandes pour que les fuites ne soient pas trop fortes.

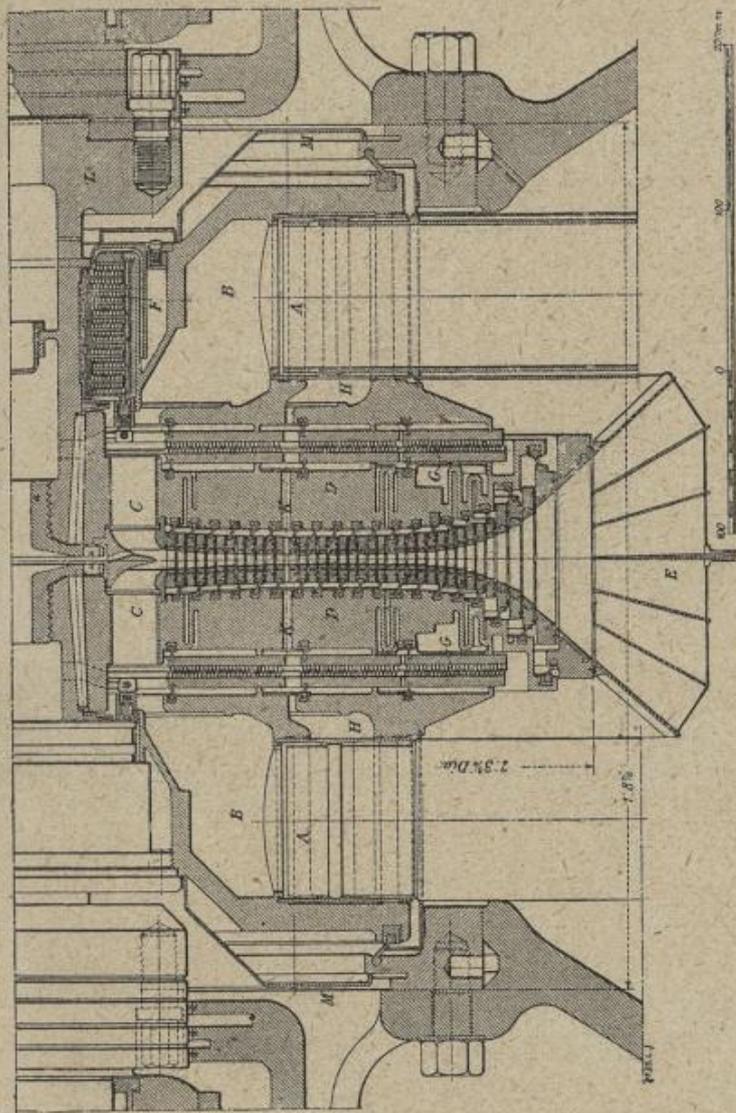


Fig. 184. — Turbine Ljungstrom de 1 000 kilowatts; demi-coupe par l'axe.

La vapeur, surchauffée, arrive par les tuyaux A, puis passe en B et en C (fig. 184); elle s'échappe au condenseur en traversant le diffuseur E; en K est une admission supplémentaire pour la marche en surcharge.

Des garnitures en labyrinthe très étendues entourent les deux arbres, et garnissent la surface extérieure de chacune des deux roues, ces dernières séparant l'admission et l'échappement.

84. Régularisation. — De même que la plupart des autres moteurs, la turbine à vapeur est établie pour une certaine puissance normale, mais il est nécessaire qu'elle puisse fonctionner à puissance réduite, et occasionnellement donner une puissance plus forte que la normale.

A cet effet, la turbine est munie d'un régulateur à force centrifuge, pareil à celui des moteurs à pistons, agissant le plus souvent sur la pression de la vapeur admise dans l'appareil : en réduisant cette pression, on diminue la puissance. Ce régulateur maintient la vitesse à peu près constante, avec des écarts déterminés dans chaque cas.

Lorsque l'admission est partielle, on peut aussi modifier la puissance par la variation du nombre d'orifices distributeurs ouverts, soit à la main, soit automatiquement par le régulateur. Ce procédé est meilleur parce qu'il utilise toute la pression de la vapeur, et surtout parce qu'il se prête bien à la marche en surcharge. Toutefois avec l'un et l'autre système les vitesses d'écoulement de la vapeur à la sortie de chaque distributeur sont modifiées lorsqu'on s'écarte de la marche normale.

La marche en surcharge s'obtient, dans les turbines à admission totale, par l'envoi de vapeur de la chaudière sur des roues qui normalement sont alimentées par l'échappement d'autres roues montées en amont.

Étant donnée la grande vitesse de marche qu'ont souvent les turbines, et la fatigue du métal qui en résulte, il importe d'éviter que cette vitesse ne puisse jamais être notablement dépassée : un régulateur de sûreté est souvent prévu, dont le rôle est de couper toute admission de vapeur si la vitesse vient à atteindre une limite fixée à l'avance.

85. **Détails de construction.** — La turbine comporte un arbre tournant dans une enveloppe fixe : les seules pièces soumises au frottement et devant être lubrifiées sont les paliers qui maintiennent l'arbre vers ses deux extrémités. On place ces paliers hors de l'enveloppe fixe où circule la vapeur, qui par suite n'est jamais en contact avec l'huile : il s'ensuit qu'en condensant la vapeur dans un condenseur à surface, on obtient de l'eau sans mélange de matières

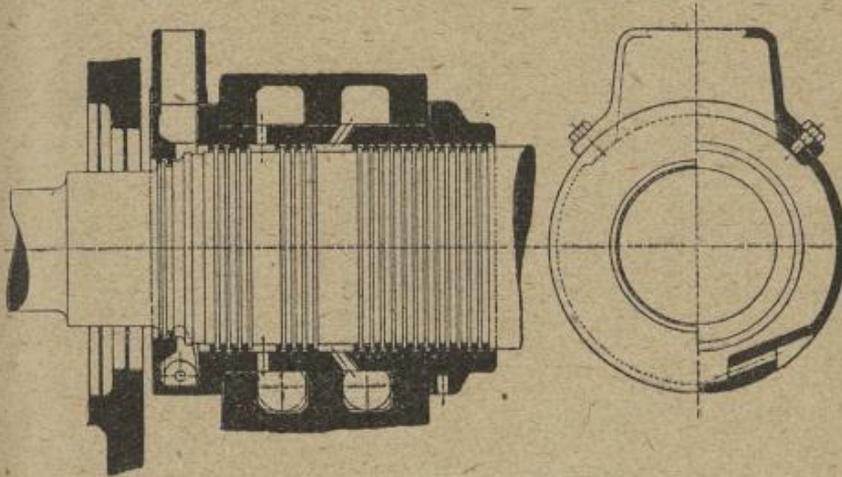


Fig. 185. — Labyrinthe de turbine Parsons.

grasses nuisibles pour les chaudières. L'arbre doit sortir de l'enveloppe fixe sans laisser fuir la vapeur du côté de l'admission et sans laisser entrer l'air du côté de l'échappement, toute rentrée d'air relevant la pression dans le condenseur.

On emploie fréquemment la garniture à *labyrinthe* (fig. 185), composée de deux séries de collets très voisins les uns des autres, alternativement portés par l'arbre et par l'enveloppe fixe. La fuite de vapeur est suffisamment réduite par cette disposition. La figure 186 donne le détail d'un élément de labyrinthe, à titre d'exemple. Pour éviter toute rentrée d'air du côté de l'échappement, on admet dans le labyrinthe, auprès de l'extrémité extérieure, de la vapeur sous une pres-

sion légèrement supérieure à celle de l'atmosphère : l'entrée de l'air est, par suite, impossible.

Quelquefois on fait usage de garnitures analogues à celles des tiges de piston, composées de bagues en trois pièces

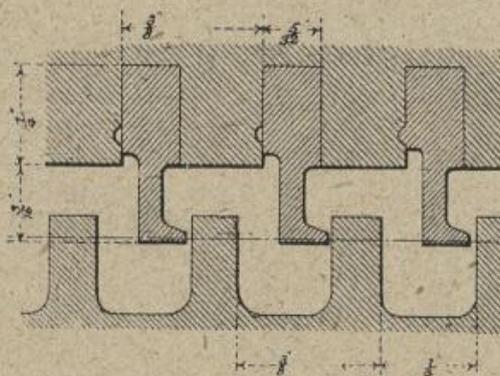


Fig. 186. — Détail d'un labyrinthe. Plusieures d'autres dispositions sont en usage.

serrées par un ressort contre l'arbre. La difficulté est d'éviter l'échauffement excessif de ces garnitures.

La garniture hydraulique Rateau (fig. 187) est une remar-

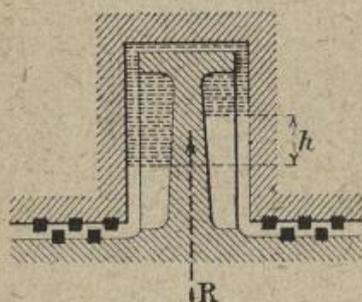


Fig. 187. — Garniture hydraulique Rateau.

quable application de la force centrifuge. L'arbre porte un disque muni d'ailettes qui entraîne dans sa rotation un anneau liquide, qui se loge dans une gorge ménagée dans l'enveloppe.

Étant donnée la différence des pressions de part et d'autre du disque, la hauteur de l'eau n'est pas la même sur ses deux faces. Mais grâce à l'intensité de la force centrifuge, une faible dénivellation correspond à une forte pression. Avec une vitesse de 3.000 tours par minute, la force centrifuge à 10 cm de l'axe de rotation est égale à 1.000 fois le poids, de sorte qu'une hauteur d'eau d'un centimètre correspond à

une charge statique de $10m$, c'est-à-dire à une pression de 1 kg par cm^2 .

Pour éviter les fuites, les parties tournantes doivent

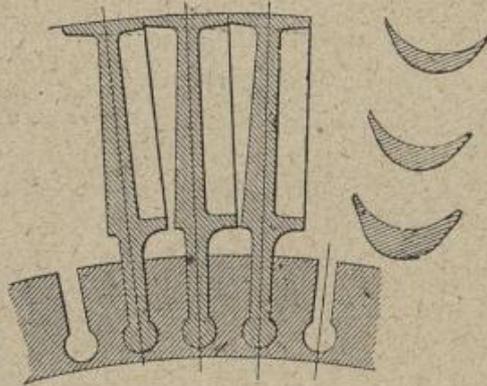


Fig. 188. — Aubes de Laval.

passer très près des parties fixes, mais tout contact entraînant des avaries très graves, il faut que la construction soit extrêmement précise; il faut aussi tenir compte dans

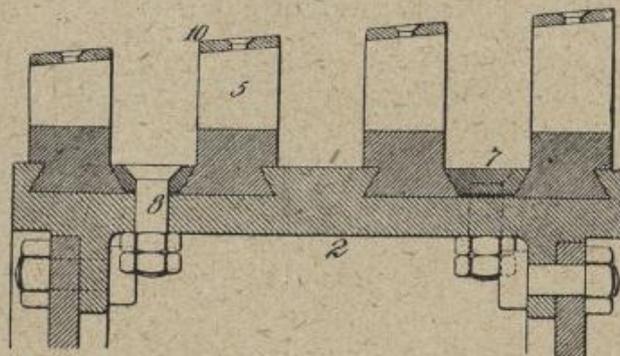


Fig. 189. — Turbine Curtis à aubes cerclées.

le montage des dilatations du métal par la chaleur, inégales pendant la période de mise en marche. L'usure des tourillons et coussinets doit être strictement limitée à une valeur déterminée.

La partie tournante est souvent soumise à une poussée

axiale résultant de l'action de la vapeur, soit sur les aubes motrices (dans le cas de la marche à réaction), soit sur

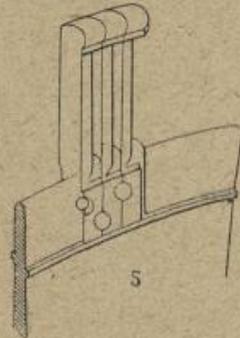


Fig. 190. — Fixation d'aubes Rateau, avec rivets.

certaines surfaces pressées par la vapeur, telles que la base des tambours de la turbine Parsons. Un palier de butée reçoit cette poussée, transmise par des collets que porte l'arbre. Mais il importe que la poussée reçue par ce palier de butée soit aussi faible que possible : à cet effet, le tambour de la turbine Brown-Boveri-Parsons (fig. 183) est muni, à son extrémité de gauche sur la figure, d'une garniture à labyrinthe, qui permet de soumettre

à une pression convenablement réduite une surface déterminée en vue de l'équilibre des poussées.

Quelquefois on monte sur le même arbre deux turbines complètement symétriques par rapport à un plan perpendiculaire au milieu de l'arbre, turbines dont les poussées s'équilibrent. Enfin si la turbine commande un appareil qui lui-même donne une poussée axiale, on peut l'opposer à celle que produit la turbine (commande d'une pompe centrifuge, d'une hélice de navire).

En dehors des mécanismes accessoires, les seules pièces importantes de la turbine, qui doivent être graissées, sont les deux paliers de support et le palier de butée.

Le graissage est assuré par une circulation d'huile produite par une pompe, avec refroidissement de l'huile à la sortie des paliers. Cette pompe est commandée par la turbine elle-même; pour la mise en marche, on fait usage d'une pompe supplémentaire avec petit moteur indépendant.

La circulation d'huile est parfois employée pour la com-



Fig. 191. — Fixation d'aubes Rateau, coupe transversale.

mande d'un servo-moteur actionnant l'organe de réglage, sous la dépendance du régulateur. L'arrêt de la machine doit se produire automatiquement si la pression de l'huile vient à tomber, ce qui interrompt le graissage.

Les aubes, de petite dimension et généralement très nombreuses, doivent être solidement fixées à la périphérie des roues. Quelquefois elles ont été découpées dans la masse d'un disque d'acier; mais généralement elles sont rapportées. Les figures 188 à 191 donnent quelques exemples de modes de fixation.

L'enveloppe fixe est en deux parties assemblées par boulons; une fois la partie supérieure démontée, toute la partie tournante est apparente, et peut être enlevée.

86. Applications. — Les turbines, souvent de très grande puissance, sont fréquemment employées pour la production du courant électrique, notamment du courant alternatif à 50 périodes par seconde : dans ce cas une dynamo bipolaire doit faire 3.000 tours par minute, une dynamo à quatre pôles 1.500 tours, ce qui détermine la vitesse des turbines les commandant directement.

Les grandes stations centrales ont récemment installé des unités de 40.000 et même de 50.000 kilowatts. Un groupe de 60.000 kilowatts à New-York se compose de trois éléments, commandant chacun une génératrice d'électricité, savoir une turbine à haute pression, dont la vapeur se divise entre deux turbines à basse pression.

La pression initiale de la vapeur est de plus en plus élevée, certaines chaudières la produisant à 24 kg par cm^2 . Le rendement thermique aurait atteint 19 p. 100 de la chaleur apportée par la vapeur¹.

La turbine à vapeur convient aussi pour la commande des pompes centrifuges, des ventilateurs, spécialement avec de fortes pressions de refoulement.

1. D'après une note de M. Sosnowski dans le Bulletin de la Société française des électriciens, 1919, p. 219.

Les turbines sont devenues d'un emploi fréquent pour la commande des hélices de navire, malgré les difficultés de cette application. Il a fallu d'abord prévoir une marche arrière comme une marche avant, ce qui exige l'emploi d'un second groupe de roues motrices. En outre, il est difficile de trouver une vitesse convenable à la fois pour le moteur et l'hélice : aussi, dans toutes les applications primitives, l'hélice tourne trop vite et le moteur trop lentement, ce qui nuit doublement au rendement.

Depuis quelques années, on a donné au problème de la vitesse une solution très hardie, en adoptant une transmission par engrenages réducteurs de vitesse entre les turbines et les hélices. Suivant les cas, on fait usage d'une simple réduction ou d'une double couple de roues dentées. Avec des roues bien étudiées et bien exécutées, on est arrivé à des marches très satisfaisantes, et les applications du système deviennent de plus en plus nombreuses.

Avec ces engrenages, on ne peut plus mettre en opposition les poussées axiales du moteur et de l'hélice.

Le bon fonctionnement des engrenages, montés sur les navires, incite à les employer également dans les appareils fixes, et on paraît ne plus craindre l'abandon de la commande directe, dès qu'on y voit quelque avantage.

Au point de vue de la consommation de vapeur par kilowatt-heure, il y a à peu près équivalence entre les moteurs à piston et les turbines. Toutefois les rendements indiqués un peu plus haut, pour des turbines de très grande puissance, sont notablement supérieurs. A égalité de puissance la turbine est en général moins lourde et moins encombrante que le moteur à piston ; elle dépense moins d'huile de graissage. La conduite et l'entretien de la turbine sont plus simples.

Enfin il serait pratiquement bien difficile de réaliser, avec des moteurs à piston, les puissances unitaires énormes qu'on donne aux turbines.

87. Turbines à vapeur d'échappement. — Les dernières roues d'une turbine, actionnées par la vapeur déjà détendue jusqu'à la pression atmosphérique, produisent une partie notable du travail moteur. Lorsqu'on dispose de vapeur à cette pression, provenant de l'échappement de moteurs à piston, on peut donc, en installant un condenseur, recueillir le travail dans une turbine réduite à ces dernières roues.

On pourrait aussi appliquer la condensation directement au moteur à piston : mais le travail supplémentaire obtenu est beaucoup moindre pour les raisons indiquées à la fin du § 81. En outre, si l'on doit amener l'échappement de plusieurs moteurs à un condenseur central, l'installation d'une tuyauterie étanche pour la vapeur à très basse pression est difficile ; enfin la condensation modifie le régime de marche des moteurs, ce qui est souvent gênant, notamment pour les machines d'extraction.

Ces turbines à vapeur d'échappement s'emploient surtout sur le carreau des mines et dans les usines métallurgiques, où des moteurs nombreux et puissants rejettent de grandes quantités de vapeur à la pression atmosphérique.

Une difficulté vient de la marche intermittente des moteurs à piston : pour alimenter la turbine d'une manière continue, on fait usage d'un *accumulateur de vapeur*, qui régularise le débit. L'accumulateur Rateau est un récipient en partie plein d'eau comme une chaudière, où la vapeur d'échappement surabondante se condense dans l'eau ; lorsque l'afflux diminue, la pression et la température de vaporisation baissent légèrement dans l'accumulateur ; l'eau restitue la chaleur qu'elle a reçue, en donnant naissance à un supplément de vapeur.

Les premiers accumulateurs étaient formés de masses métalliques, au milieu desquelles pénétrait la vapeur. L'eau a une capacité calorifique bien supérieure à celle du métal ; la difficulté était d'avoir des surfaces d'échange suffisamment étendues. Elle a été résolue en faisant barboter la vapeur dans l'eau de l'accumulateur.

Malgré l'accumulateur, il peut arriver que le débit de vapeur d'échappement devienne insuffisant pour entretenir la marche régulière de la turbine. Afin d'assurer cette marche, on prévoit une admission supplémentaire de vapeur venant des chaudières, et détendue jusqu'à la pression de l'atmosphère.

Lorsque l'emploi de vapeur vive en supplément est fréquent, il y a inconvénient à ne pas utiliser tout le travail qu'elle pourrait donner : d'où l'emploi des turbines mixtes, composée de deux parties successives, dont la première est actionnée, par intermittences, par la vapeur vive se détendant jusqu'à la pression de l'atmosphère ; la seconde, par cette vapeur détendue et par la vapeur d'échappement. Des appareils automatiques de régularisation contrôlent le débit des deux vapeurs, de manière à maintenir constante la vitesse de la turbine, quel que soit l'afflux de vapeur d'échappement.

En cas de surabondance de cette vapeur, une soupape de sûreté, montée sur l'accumulateur, la dégage dans l'atmosphère.

La figure 192 représente une turbine mixte où la vapeur à haute pression agit d'abord sur deux groupes de roues, puis, avec la vapeur d'échappement, sur un troisième groupe¹.

Les excellents résultats obtenus par l'addition de ces turbines à vapeur d'échappement ont conduit à envisager la combinaison a priori d'un moteur à piston utilisant la vapeur à haute pression, et d'une turbine fonctionnant à basse pression. L'analyse détaillée du fonctionnement des turbines multiples indique en effet que les derniers éléments, marchant à basse pression, ont un meilleur rendement que les premiers. Dans la zone des hautes pressions, le moteur à piston serait au contraire le plus avantageux.

Enfin la turbine se prête bien à la production de force

1. Voir *Revue de mécanique*, 1910, 2^e semestre, p. 269.

motrice à l'aide de vapeur servant au chauffage. Cette combinaison permet une utilisation complète du combustible. Un moteur seul ne transforme guère en travail que le dixième des calories apportées par la vapeur ; inversement, en enlevant à la vapeur de chauffage un dixième de ses calories, on obtient comme sous-produit le travail.

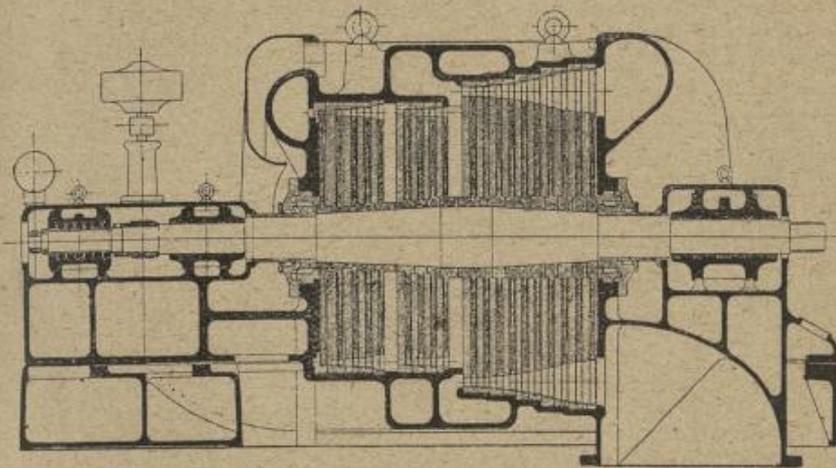


Fig. 192. — Turbine mixte, des ateliers d'Oerlikon. La vapeur d'échappement pénètre au milieu de l'enveloppe, et actionne le dernier groupe de roues (à droite sur la figure) ; la vapeur de la chaudière actionne les deux premiers groupes, à admission partielle, puis totale.

Deux combinaisons principales sont réalisées. Toute la vapeur, après avoir agi sur des turbines à haute pression où elle se détend jusqu'à une valeur convenable, se rend dans les appareils de chauffage ; ou bien, on prélève, en un point d'une turbine complète, une fraction de la vapeur pour le chauffage. Des appareils automatiques de régularisation contrôlent ce prélèvement suivant les besoins.

CHAPITRE X

TROMPES A VAPEUR; PULSOMÈTRES

88. Principe des trompes. — Dans les *trompes*, un fluide moteur entraîne un autre fluide qu'il aspire ou qu'il refoule en se mélangeant avec lui. On distingue dans l'appareil trois parties, que les fluides traversent successivement¹ : les *tuyères*, concentriques, par lesquelles arrivent les deux courants fluides ; le *mélangeur* dans lequel les deux courants se réunissent ; le *diffuseur* divergent dans lequel la vitesse du courant se ralentit et se transforme en pression.

Parfois le mélangeur et le diffuseur, formant un conduit unique, sont difficiles à distinguer nettement. Certains mélangeurs sont composés de plusieurs cônes emboîtés l'un dans l'autre.

89. Injecteurs. — A cette classe d'appareils appartient l'injecteur, qui sert à l'alimentation des chaudières. La figure 193 montre quelle simplicité il peut avoir : la vapeur motrice s'écoule par la *tuyère n*, quand on ouvre un robinet de prise ; l'eau pénètre autour de cette tuyère, et se trouve entraînée dans le *mélangeur o*, où la vapeur se condense, en partie du moins. Le jet rapide lancé par le mélangeur pénètre dans l'embouchure du *divergent p*, à embouchure évasée, dont la section va ensuite en augmentant. Entre le mélangeur et le divergent le jet fluide traverse un espace dit *trop-plein*, en libre communication avec l'atmosphère,

1. Voir dans la *Revue de mécanique* (sept. 1900, p. 265,) « Nouvelle théorie des trompes », par M. Rateau.

par une ouverture dans l'enveloppe de l'appareil (non visible sur la figure). Ce trop-plein est nécessaire pour le dégagement de la vapeur et de l'eau au moment de la mise en marche : sans cette ouverture, l'amorçage ne se produirait pas. Le jet sortant du mélangeur se trouve donc soumis à la pression de l'atmosphère. L'évasement du divergent en diminue la vitesse, par suite de l'augmentation de la section transversale ; en même temps, d'après une loi du mouvement des fluides, la pression augmente, de sorte qu'elle dépasse celle de la chaudière qu'on veut alimenter et y

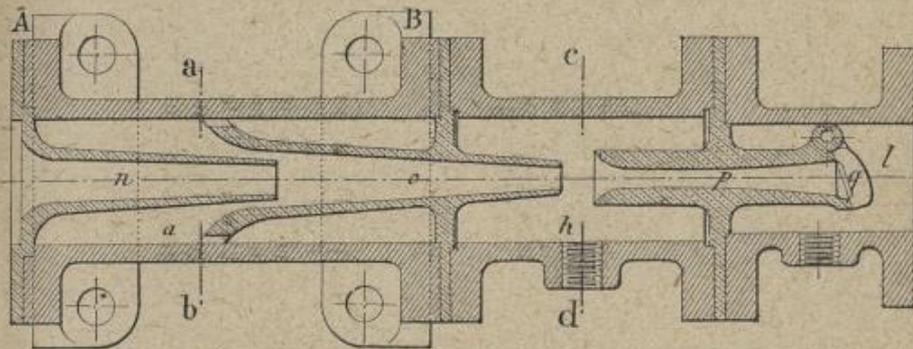


Fig. 193. — Ancien injecteur de locomotives des chemins de fer du Nord.

n, tuyère à vapeur; — arrivée de l'eau (non visible sur cette coupe) dans le plan *ab*; — *o*, mélangeur (chambre, cheminée); — trop-plein dans le plan *cd*; — *p*, divergent, avec clapet *q*.

pénètre, en soulevant le clapet *q*, qui empêche la vidange lors de l'arrêt de l'injecteur.

En lançant, à l'aide d'une pompe ordinaire, un jet d'eau froide suffisamment rapide dans l'embouchure du divergent, on pourrait faire pénétrer de même cette eau dans une chaudière à haute pression.

L'injecteur Giffard (fig. 194) est muni d'une *aiguille* centrale, réglable à la main, de manière à ouvrir plus ou moins le passage de la vapeur. En outre, la tuyère elle-même, avec l'aiguille, peut être déplacée de manière à faire varier, entre son extrémité et la paroi du mélangeur (dit aussi

chambre et cheminée), la section de passage de l'eau. Cet injecteur est de la catégorie des appareils *aspirants*, qui

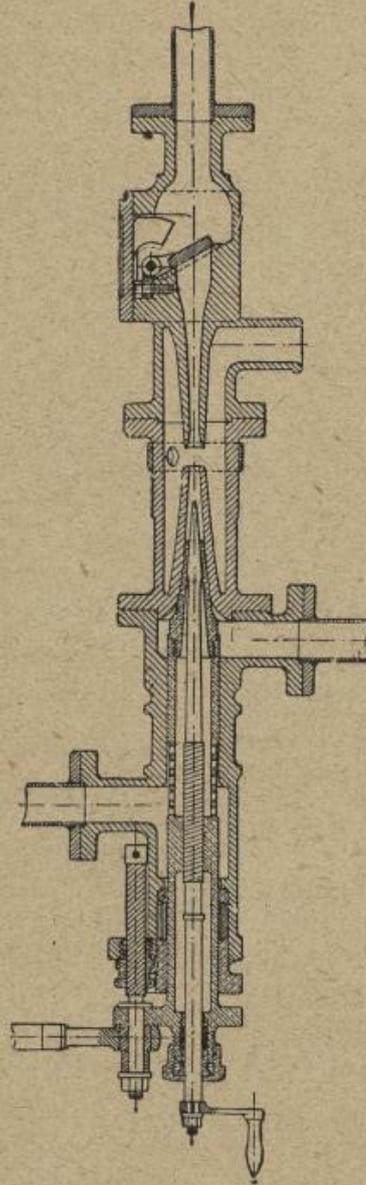


Fig. 494. — Injecteur Giffard : l'aiguille, manœuvrée par la petite manivelle (à gauche), ouvre plus ou moins la *tuyère* à vapeur, mobile elle-même à l'intérieur de la *chambre* ou *cheminée*, où accède l'eau par le tuyau inférieur (la vapeur arrive par le tuyau supérieur) ; à la sortie de la cheminée, la veine fluide traverse le trop-plein, en libre communication avec l'extérieur par un déversoir inférieur et par des trous qui permettent de la voir (ces trous peuvent être recouverts par une bague mobile), et s'engage dans le divergent, fermé par un clapet (vers la droite), puis dans le tuyau qui aboutit à la chaudière qu'il s'agit d'alimenter.

peuvent prendre l'eau dans une bache inférieure, tandis que d'autres ne fonctionnent que s'ils la reçoivent *en charge*.

Pour l'amorçage, on ouvre légèrement la tuyère à l'aide de l'aiguille, et le jet de vapeur commence par aspirer l'air, ce qui produit l'élévation de l'eau.

Un détail intéressant est l'évasement de la tuyère à vapeur de certains injecteurs, dont la raison a été indiquée plus haut. L'écoulement se fait ici à peu près sous la pression atmosphérique.

Dans l'injecteur Sellers (fig. 195), la soupape d'admission de

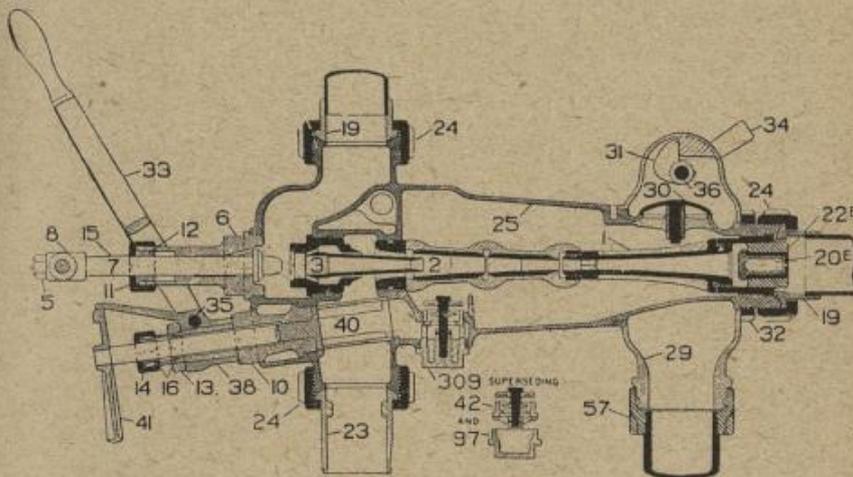


Fig. 195. — Injecteur Sellers.

Débit, indiqué par le constructeur, avec un diamètre de 10,5 mm au col du divergent : 14.800 litres par heure, l'aspiration étant de 1,50 m et la température de l'eau 16°.

19, arrivée de vapeur ; 23, arrivée d'eau ; 20, évacuation du trop-plein ; 309, soupape d'entrée d'eau supplémentaire avec variante 42 et 97 ; 40, robinet d'eau.

vapeur, manœuvrée par un levier, porte un téton cylindrique : quand on commence à l'ouvrir, elle découvre seulement de petits trous dans le siège, qui donnent une veine de vapeur autour de la tuyère principale pour l'aspiration.

Certains appareils comprennent deux injecteurs successifs recevant chacun la vapeur de la chaudière.

La dimension caractéristique d'un injecteur est le diamètre du divergent à sa partie la plus étroite, d'où dépend le débit.

Les qualités principales des injecteurs, dont il existe des types nombreux, sont les suivantes :

Facilité de la manœuvre et sûreté de l'amorçage ;

Fonctionnement avec de l'eau tiède : certains injecteurs prennent encore l'eau à 50° ;

Débit variable à volonté ;

Fonctionnement sous des pressions diverses ; toutefois, autant que possible, l'injecteur doit être établi pour la pression normale d'emploi ;

Simplicité de la construction et facilité de l'entretien.

Le débit de chaque injecteur est variable entre certaines limites, qui dépendent de la pression de la vapeur et de la température de l'eau d'alimentation. Sous une pression effective de 10 kg par cm^2 , l'eau étant froide, certains injecteurs, à divergent de 9 mm, atteignent des débits de 175 litres par minute.

L'ouverture du trop-plein donne lieu à une aspiration de l'air, qui est refoulé dans la chaudière. Cet air nuit au fonctionnement des machines à condensation ; c'est en outre une cause d'altération des tôles de chaudières. On évite cette aspiration, en munissant le trop-plein d'une soupape automatique qui ne s'oppose pas au dégagement extérieur de l'eau et de la vapeur, mais empêche la rentrée d'air en sens inverse.

L'injecteur ne perd par refroidissement extérieur qu'une très petite quantité de chaleur, quand le trop-plein ne laisse dégager ni eau ni vapeur : presque toute la chaleur de la vapeur qu'il reçoit échauffe l'eau d'alimentation, parfois à plus de 100°, et la refoule. Il ne faut pas conclure que l'injecteur est une machine thermique ayant un rendement extraordinaire : en réalité, l'injecteur dépense beaucoup de vapeur, mais sans la perdre parce qu'elle sert à échauffer l'eau d'alimentation. De même une machine élévatrice quelconque qui refoulerait son eau de condensation ne perdrait pas de chaleur.

Pour l'alimentation des chaudières ordinaires, non munies

de réchauffeurs, ce chauffage préalable de l'eau au moyen de la vapeur n'a pas d'inconvénient, puisqu'il faut toujours fournir à l'eau les calories nécessaires, soit après, soit avant l'entrée dans la chaudière; il y a même avantage, pour la conservation et la bonne marche des générateurs, à ce que l'eau y pénètre chaude. Mais avec un réchauffeur qui épuise toute la chaleur des gaz de la combustion, et qui chauffe l'eau à l'aide d'un *sous-produit* des foyers, autrement perdu, l'injecteur cesse d'être économique. Comme simple machine élévatoire, il serait détestable.

La pression de la vapeur, qui met en action un injecteur, peut être inférieure à la pression dans le générateur alimenté. Il suffit qu'elle produise avec l'eau d'alimentation une veine fluide animée d'une vitesse convenable. Si deux chaudières voisines fonctionnaient à des pressions différentes, la vapeur pourrait être prise, pour l'alimentation, sous la pression la plus faible.

Cette circonstance se présente rarement; mais le principe est appliqué dans l'*injecteur à vapeur d'échappement*. La vapeur, qui s'échappe d'une machine sans condensation, s'écoule avec une vitesse suffisante pour donner avec l'eau une gerbe qui peut pénétrer dans une chaudière dont la pression n'est pas trop élevée.

Une portion de la vapeur, rejetée par la machine, produit ainsi le travail de refoulement de l'eau dans la chaudière et l'échauffe.

Les injecteurs à vapeur d'échappement peuvent alimenter les chaudières à pression modérée, 5 à 6 kg par cm^2 . Pour les pressions plus élevées, on les complète par l'addition d'une tuyère supplémentaire recevant la vapeur de la chaudière. Ces appareils se sont peu répandus, parce que l'emploi de l'injecteur à vapeur d'échappement seule est assez limité, et parce que l'envoi dans les chaudières des matières grasses, entraînées hors des cylindres par la vapeur, est une cause d'altération des chaudières.

90. **Éjecteurs.** — L'éjecteur a une certaine analogie avec l'injecteur : il est disposé pour de grands débits avec de faibles hauteurs d'élévation. Le jet de vapeur (fig. 196) entraîne l'eau à élever et la lance dans un divergent, d'où part le tuyau de refoulement. L'échauffement assez fort de l'eau augmente beaucoup la dépense de vapeur. L'éjecteur n'est guère employé que comme appareil de secours, à cause de la grande facilité de la mise en marche.

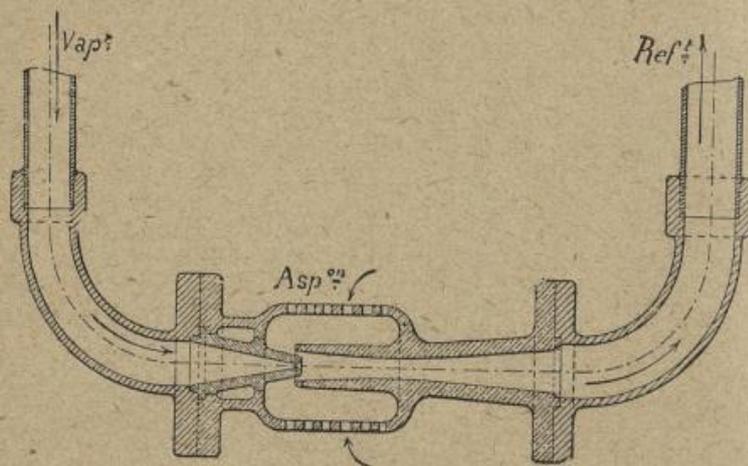


Fig. 196. — Éjecteur ; coupe longitudinale.

D'autres éjecteurs servent à l'aspiration de l'air par la vapeur ; les souffleurs et les échappements de locomotives sont analogues en principe. Le chapitre suivant mentionne des applications de ce genre d'appareils.

91. **Pulsomètres.** — Le pulsomètre (fig. 197) se compose de deux chambres, en forme de poire, placées debout, l'une contre l'autre, la pointe en haut. La vapeur entre par cette pointe, dans l'une ou l'autre chambre ; à cet effet, une bille ferme alternativement l'une et l'autre ouverture. Chacune des deux chambres porte un clapet d'aspiration et un clapet de refoulement, ou des organes équivalents, tels que les sphères de la figure 197 ; les deux clapets d'aspiration s'ou-

vient, de bas en haut, dans une cavité où débouche un tuyau d'aspiration, qui plonge dans l'eau qu'on veut élever; les deux clapets de refoulement envoient de même l'eau dans un tuyau de refoulement.

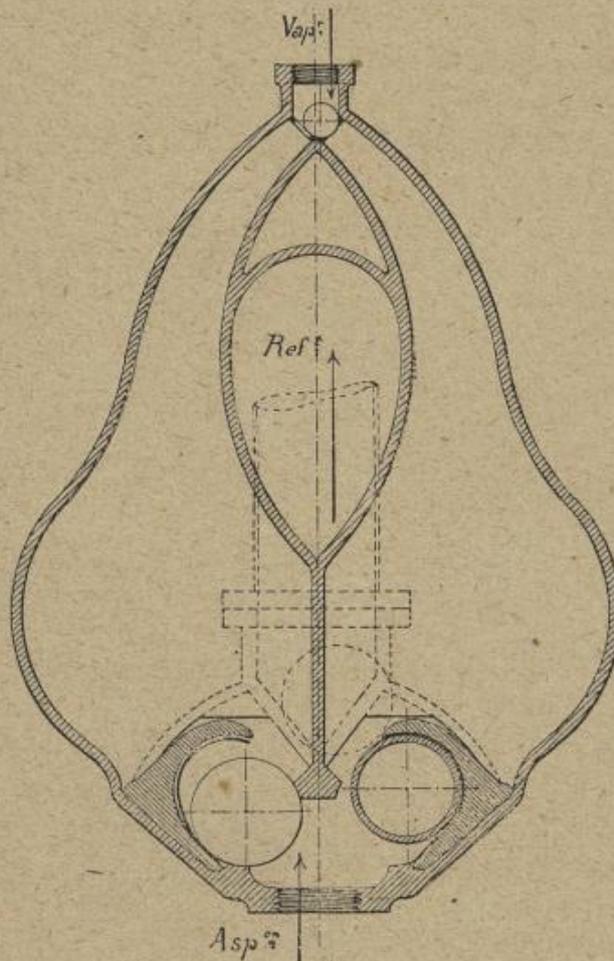


Fig. 197. — Pulsomètre; coupe verticale.

Quand le pulsomètre est en marche, l'une des chambres est pleine d'eau et reçoit la vapeur, dont la pression se transmet à l'eau, qui soulève le clapet et monte dans le tuyau de refoulement. En même temps, la vapeur, en contact avec

l'eau et avec la fonte des parois, se condense ; cette condensation devient de plus en plus importante à mesure que l'eau descend dans la chambre, parce que les surfaces de contact de la vapeur avec l'eau et avec les parois augmentent. Comme l'orifice d'entrée de vapeur est petit, il vient un moment où cette condensation croissante produit un appel de vapeur suffisant pour attirer sur son siège la bille de distribution : elle vient boucher cet orifice et démasque celui de l'autre chambre. Une fois la première chambre ainsi isolée, la vapeur achève de s'y condenser : la pression atmosphérique pousse l'eau dans le tuyau d'aspiration et remplit la chambre, en soulevant le clapet d'aspiration. Alors l'entrée de vapeur se ferme dans la seconde chambre, qui fonctionne exactement comme la première, puis les mêmes actions se reproduisent alternativement.

Chacune des chambres est munie d'un petit *renillard*, dont on peut régler l'ouverture, pour laisser entrer un peu d'air au moment où la condensation se produit : cette entrée d'air amortit les chocs que produirait dans la chambre la masse d'eau brusquement aspirée ; le renillard doit être d'autant plus ouvert que la hauteur de l'aspiration est moindre.

La pression atmosphérique fait équilibre à une colonne d'eau haute de 10 m, avec le vide par-dessus ; mais, par suite des résistances diverses au passage de l'eau et de la nécessité de la faire monter rapidement dans le tuyau d'aspiration, la hauteur pratique d'aspiration ne dépasse guère 5 ou 6 m. Quant à la hauteur du refoulement, comptée à partir de l'appareil, elle dépend de la pression de la vapeur, chaque kg par cm^2 de la pression effective correspondant à une hauteur de 10 m ; comme pour l'aspiration, cette hauteur est en réalité quelque peu réduite.

La dépense de vapeur des pulsomètres est très variable suivant les circonstances de l'emploi : des essais sur un pulsomètre, aspirant l'eau à une profondeur de 3 à 5 m, et la refoulant à une hauteur de 10 à 45 m, avec des débits de 30 à 11 m^3 par heure, ont donné des consommations com-

prises entre 135 et 340^{kg} de vapeur par kilowatt-heure effectif en eau élevée. L'eau se trouve en même temps plus ou moins chauffée par la vapeur.

S'il dépense beaucoup de vapeur, le pulsomètre a l'avantage de s'installer très facilement : on peut le descendre dans un puits avec une chaîne, en y rattachant des tuyaux flexibles. Il ne dégage pas de vapeur d'échappement. Il est clair que si l'eau élevée doit être chauffée, la vapeur dépensée est entièrement utilisée.

CHAPITRE XI

CONDENSATION

92. **Divers modes de condensation.** — La condensation abaisse la pression de la vapeur à l'échappement des machines. Le condenseur fonctionne par *injection*, ou *mélange*, quand on y liquéfie la vapeur au contact direct de l'eau froide, tandis que le *condenseur à surface* est extérieurement rafraîchi par l'eau.

Dans les grandes installations de machines, on n'hésite guère à installer la condensation, qui réduit la dépense de combustible. Pour les petits moteurs, l'avantage est moins évident. Au lieu d'ajouter un condenseur, on peut les munir d'un réchauffeur d'eau d'alimentation par la vapeur d'échappement. D'autre part, l'addition d'un condenseur augmente la puissance d'un moteur.

93. **Condensation par mélange.** — Le *condenseur à injection* ou à *mélange* reçoit la vapeur d'échappement et une injection d'eau qui maintient une température relativement basse, souvent de 30 à 40°; la pression correspondante de la vapeur saturée est de 43 à 75 g par cm^2 , pression mesurée par une colonne de mercure haute de 32 à 55 mm; la pression réelle dans le condenseur ordinaire est plus grande parce qu'il contient en outre de l'air; cet air y pénètre surtout avec l'eau d'injection, qui le renferme en dissolution¹ et le dégage,

1. À proprement parler, ce n'est pas de l'air qui est dissous dans l'eau, mais un mélange de gaz où la proportion d'oxygène est beaucoup plus forte et atteint le tiers du volume dissous.

en s'échauffant sous une faible pression. D'après la *loi de Dalton*, la pression dans le condenseur est la somme des pressions qu'auraient l'air seul et la vapeur saturée à la température qui règne dans l'appareil.

Il faut extraire du condenseur l'eau et l'air qui y pénètrent ainsi continuellement : c'est le rôle d'une pompe dite *pompe à air*, munie de clapets d'*aspiration*, s'ouvrant du condenseur dans la pompe, et de clapets de *refoulement*, s'ouvrant au dehors.

On compte en moyenne de 20 à 30 litres d'eau pour condenser un kilogramme de vapeur : cette quantité est variable suivant la température de l'eau disponible, et suivant la température qu'on veut maintenir dans le condenseur¹.

Le calcul de la proportion d'eau nécessaire est utile surtout pour assurer l'alimentation du condenseur : en marche, on règle la quantité d'eau admise, sans la connaître exactement, par la manœuvre d'un robinet d'injection, de manière à maintenir une température et une pression convenables.

La pompe à air doit extraire, avec chaque *kg* de vapeur condensée, les 20 à 30 *kg* d'eau de condensation et l'air amené dans le condenseur par l'eau injectée, par l'eau d'alimentation et par les fuites de la tuyauterie. Souvent on choisit, pour le volume de la pompe à air, la valeur assez large de 100 *l* par *kg* de vapeur à condenser : cela veut dire que le piston de cette pompe engendre un volume de 100 *l* par chaque *kg* de vapeur condensée². La quantité de vapeur peut d'ailleurs varier quelque peu sans inconvénient. Les

1. On estime la proportion d'eau nécessaire pour maintenir une température donnée en comptant que le condenseur doit absorber au plus 600 calories par *kg* de vapeur condensée : si l'eau disponible est à la température de 15°, et si on en emploie 30 *kg* par chaque *kg* de vapeur, chaque *kg* d'eau de condensation prendra 20 calories, et, par suite, s'échauffera de 15° à 35°.

2. Par exemple, si une machine envoie au condenseur 1 *kg* de vapeur par tour, et si la pompe à air, commandée par cette machine, et fonctionnant à simple effet, donne alors une course simple d'aspiration et une course simple de refoulement, le volume engendré par son piston devra être de 100 *l*, ce qui correspond à un diamètre de 450 *mm* avec une course de 628 *mm*.

100 l de la pompe recevront, pendant l'aspiration, dans la marche à 30 kg d'eau pour 1 kg de vapeur, 31 l d'eau, plus de l'air raréfié.

En augmentant la proportion d'eau injectée dans le condenseur, on abaisse la température finale et, par suite, la pression de la vapeur, de sorte qu'il semble qu'il y aurait avantage à employer le plus d'eau possible pour réduire au minimum la pression résistante de l'échappement; mais comme l'eau d'injection apporte de l'air, qui se dégage dans le condenseur, et dont la pression s'ajoute à celle de la vapeur, au delà d'une certaine quantité d'eau, la pression totale, qui est seule à considérer, vient à augmenter. Cette quantité limite dépend de la température de l'eau disponible et de la proportion d'air qu'elle contient; en général, il n'y a pas intérêt à dépasser le débit de 30 kg d'eau par kg de vapeur, et on peut même souvent se tenir bien en dessous.

D'autre part, l'eau de condensation sert à alimenter les chaudières; à ce point de vue, il y a intérêt à ce qu'elle ne soit pas trop froide. En outre, à mesure que la proportion d'eau augmente, le volume d'air extrait par la pompe diminue.

La pompe à air n'aspire l'air et l'eau dans le condenseur que par intermittences, tandis que l'afflux est presque continu : il en résulte des variations périodiques de la pression au condenseur, variations qui ne doivent pas dépasser une limite fixée. La capacité du condenseur n'a pas besoin d'être bien grande pour que ces variations soient minimales.

Il est facile de calculer le *travail utile* demandé à la pompe à air pour une excursion aller et retour de son piston. Ce travail peut s'élever aux 15 millièmes du travail indiqué produit par la vapeur, mais les frottements, les chocs du liquide l'augmentent, et on compte que le service du condenseur dépense 30 à 35 millièmes de la puissance indiquée d'un moteur.

94. Condenseurs à mélange. — Le condenseur (fig. 198, 199, 200 et 201) est une boîte en fonte, soumise extérieurement à la pression de l'atmosphère, et munie de plateaux de

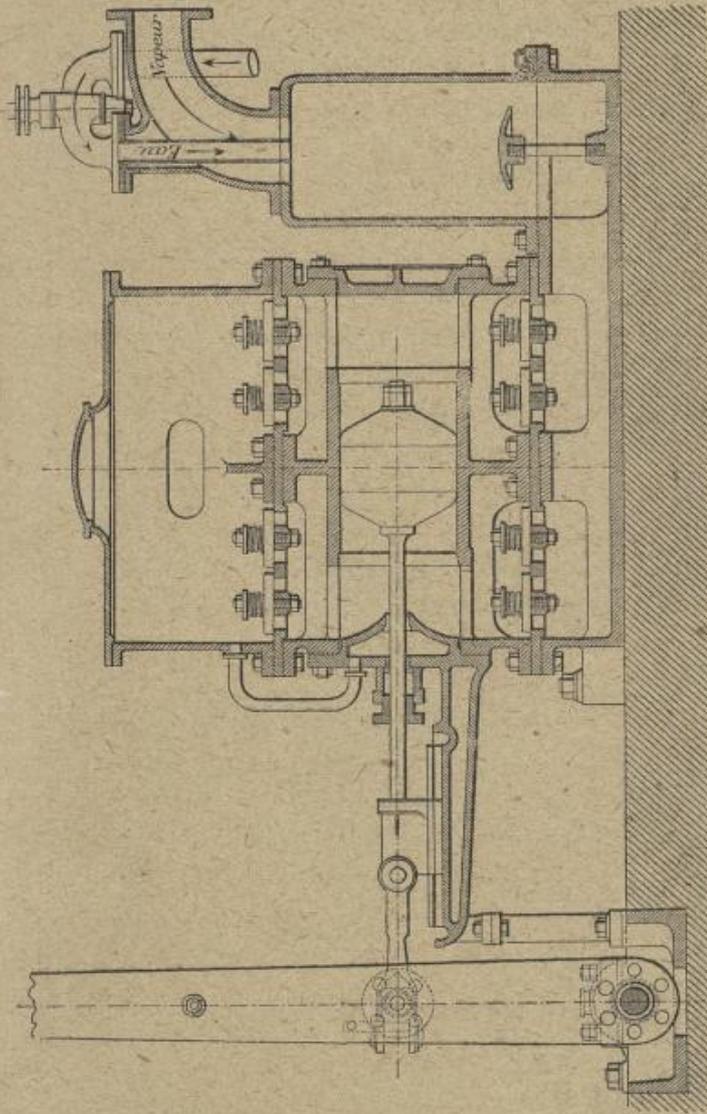


Fig. 198. — Condenseur par mélange avec pompe à air à piston plein, à double effet; l'ouverture des clapets d'aspiration laisse entrer l'eau, puis l'air dans la pompe, qui refoule l'air, puis l'eau dans la bêche placée à la partie supérieure.

visite et de robinets de vidange. Les joints doivent être peu nombreux, car ils peuvent laisser rentrer l'air, à moins qu'ils ne soient noyés dans une bêche pleine d'eau.

L'arrivée d'eau est généralement continue : elle peut être

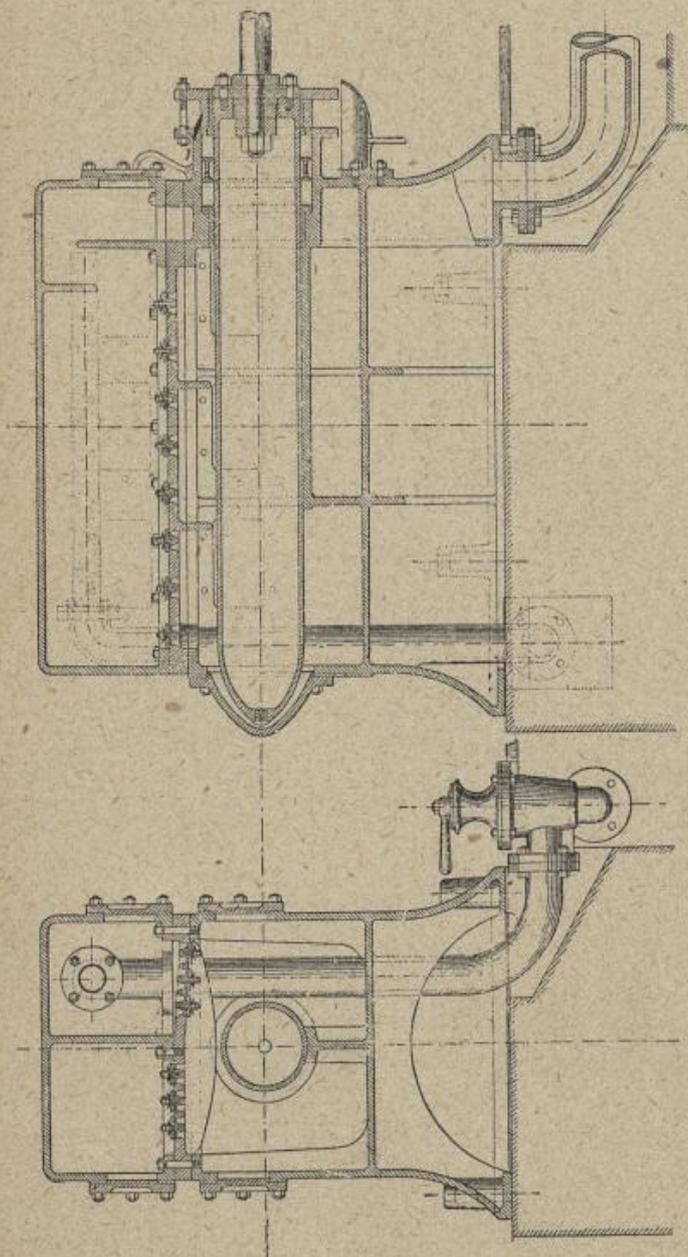


Fig. 199. — Pompe à air, avec piston plongeur, à simple effet, construite par E. Garnier ; coupes longitudinale et transversale ; la coupe transversale montre le condenseur proprement dit, à la partie supérieure et à droite ; l'eau d'injection y pénètre par un tuyau perforé, et le dessin montre le robinet de réglage. La pompe est en dessous ; le piston plongeur est commandé en tandem par une contre-tige du piston moteur. La coupe longitudinale et la coupe transversale (à gauche, à la partie supérieure) montrent la bêche de dégrèvement de l'eau et de l'air.

aspirée sur une hauteur de quelques mètres. Cette aspi-

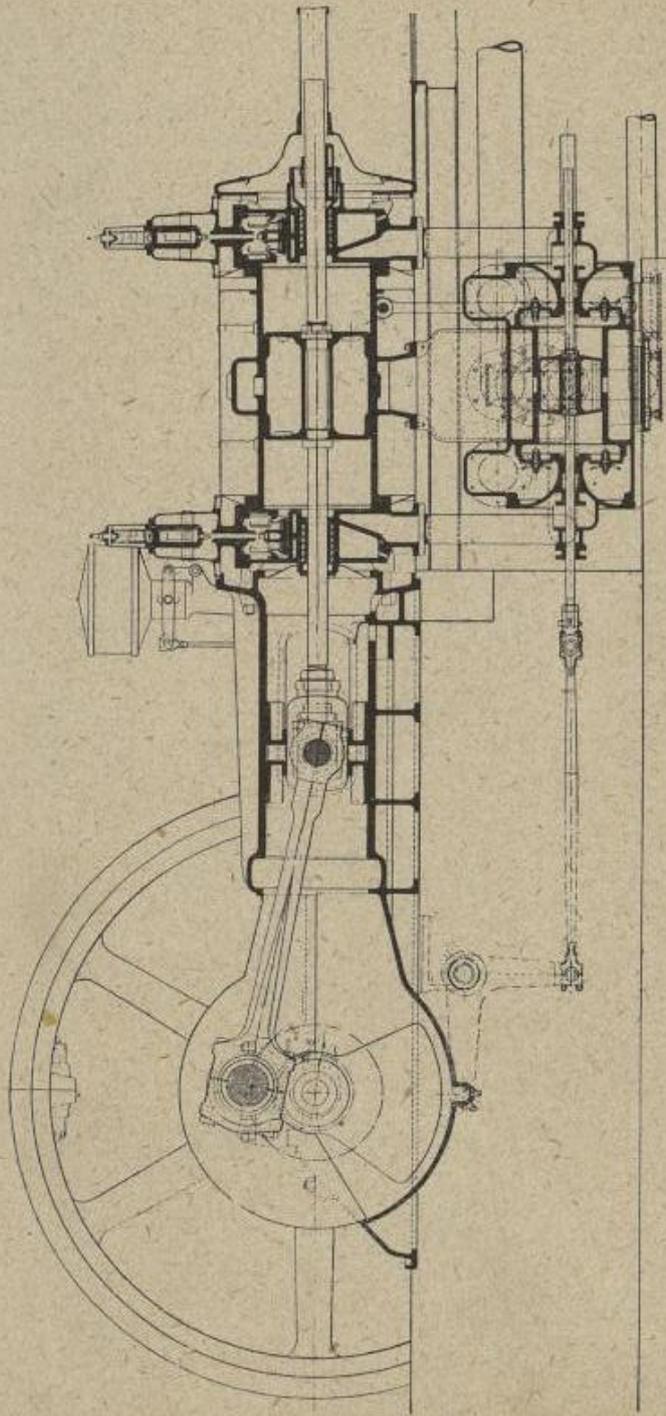


Fig. 200. — Machine équipourant de la Société alsacienne de constructions mécaniques ; coupe longitudinale.

ration est utile, en donnant un moyen simple de désamorcer le condenseur si l'eau s'y élève trop et risque de refluer au cylindre moteur : un flotteur ouvre une soupape de rentrée

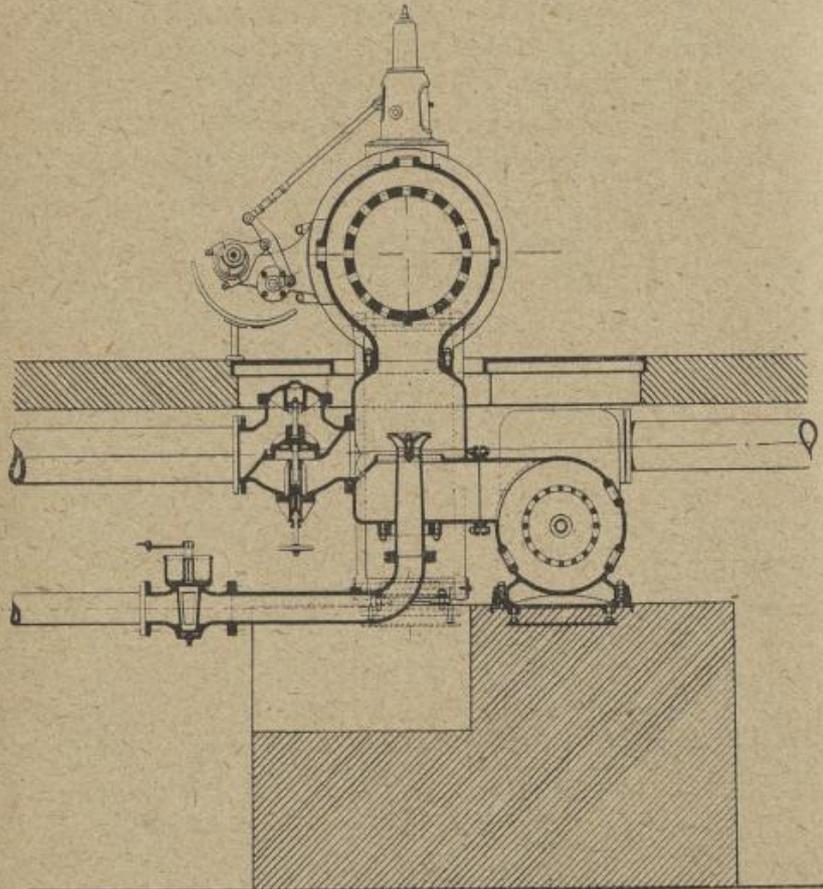


Fig. 201. — Machine équivourant de la Société alsacienne de constructions mécaniques; coupe transversale, montrant l'arrivée d'eau d'injection, et la soupape d'échappement dans l'atmosphère.

d'air dite *casse-vide*, lorsque le niveau de l'eau s'élève (fig. 207). Pour la mise en marche, il est commode de disposer d'eau en charge.

Avec un moteur auxiliaire pour commander la pompe à air d'un condenseur, qui peut servir à plusieurs machines différentes, il est possible d'en faire varier la vitesse suivant

l'afflux de vapeur et la température de l'eau de condensation. Les machines isolées, de puissance moyenne, commandent leur pompe à air; quand le cylindre est horizontal, le piston de cette pompe est souvent attelé en tandem à la contre-tige du piston; d'autres fois, le condenseur est placé en contre-bas; la pompe à air, horizontale ou verticale, est menée par un balancier ou une équerre de renvoi. Elle est noyée dans le condenseur, ou lui est accolée. Le piston ordi-

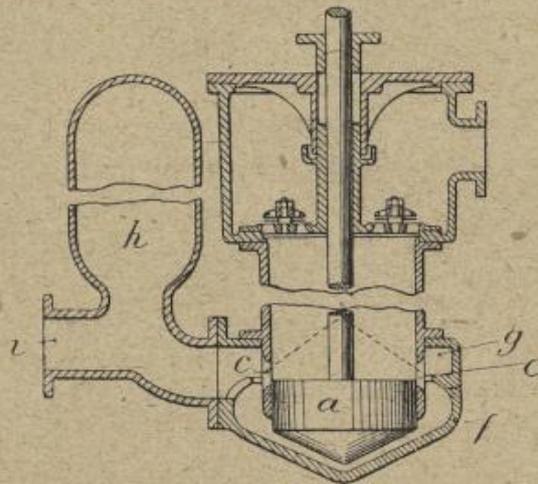


Fig. 202. — Pompe à air Edwards.

a, piston, découvrant en bas de sa course les lumières *c*, desservies par le canal *g*.

naire plein (fig. 198) se combine bien avec la disposition à double effet.

Le piston plongeur (fig. 199), à simple effet, est aussi fort usité. Il permet de plus grandes vitesses : pour la bonne marche des pompes, il faut que l'eau puisse suivre le piston; la force qui pousse l'eau dans le corps de pompe du condenseur pendant l'aspiration est relativement faible : l'accélération qu'elle reçoit de cette force ne peut être grande. Ce motif limite la vitesse de marche des pistons ordinaires, tandis que le plongeur peut, sans inconvénient, marcher rapidement, pourvu que les sections de passage de l'eau, à travers les clapets ou les soupapes, soient assez grandes.

Le volume de l'espace libre de la pompe, toujours plein d'eau, serait indifférent si cette eau ne retenait une certaine quantité d'air. Les clapets d'aspiration doivent être placés au fond du condenseur pour que le poids de l'eau s'ajoute à la faible pression qui la pousse. Il convient que ces organes soient légers.

Le fonctionnement des soupapes d'aspiration est parfois défectueux, les ouvertures et fermetures ne se produisant pas exactement au moment voulu. On peut supprimer ces organes en faisant communiquer le condenseur et la pompe à air par des ouvertures démasquées en fin de course du piston. Telle est la pompe Edwards (fig. 202) à simple effet ; pour le double effet, il suffit de donner au piston une longueur un peu inférieure à la course ; les ouvertures servent alternativement aux deux côtés de la pompe. Une pompe de ce genre se voit sur les figures 200 et 201.

Des appareils indicateurs simples permettent de suivre la marche du condenseur. Le plus commode de ces appareils est un *baromètre*, dont la hauteur peut être réduite, puisqu'il n'indique que des pressions bien inférieures à celles de l'atmosphère.

L'*indicateur de vide*, souvent employé, donne la différence entre la pression atmosphérique et la pression dans le condenseur : il faut quelque réflexion pour en comprendre l'indication, et la lecture d'un baromètre est en outre nécessaire pour connaître exactement la pression dans le condenseur. Un *thermomètre* plongeant dans l'eau évacuée fournit un contrôle utile.

95. Ejecto-condenseurs. — On remplace parfois le condenseur et sa pompe à air par l'*ejecto-condenseur* (fig. 203), analogue aux injecteurs qui alimentent les chaudières. La vapeur à condenser et l'eau froide s'écoulent par des tuyères concentriques ; il en résulte un jet d'eau rapide, qui s'engage dans un *divergent* où la vitesse se ralentit, tandis que la pression augmente. Cette augmentation est suffisante pour

que l'eau soit rejetée au dehors, malgré la pression atmosphérique. Cet appareil est applicable quand on dispose d'une grande quantité d'eau en charge.

Ces appareils sont d'ailleurs rarement employés, sinon sous les formes dérivées qui sont indiquées ci-après.

96. Condenseurs à vide élevé.

— Dans le condenseur ordinaire, la pression de l'air s'ajoute à celle de la vapeur, qui dépend de la température entretenue; on se rapproche du *vide théorique*, c'est-à-dire de la pression seule de la vapeur à cette température, en extrayant séparément l'air et l'eau, et en substituant à la pompe à piston des appareils plus efficaces.

* Le condenseur *barométrique* (fig. 204) est un cylindre vertical, recevant à sa partie supérieure l'eau de condensation, et à sa partie inférieure la vapeur à condenser. Une pompe à air seul exerce son aspiration en haut du condenseur, tandis que l'eau s'écoule par un tube vertical de 10 m de longueur plongeant dans une bache. L'air est ainsi enlevé au point le plus froid du condenseur, par conséquent avec une faible proportion de vapeur d'eau.

Pour éviter l'installation de ce condenseur à une grande

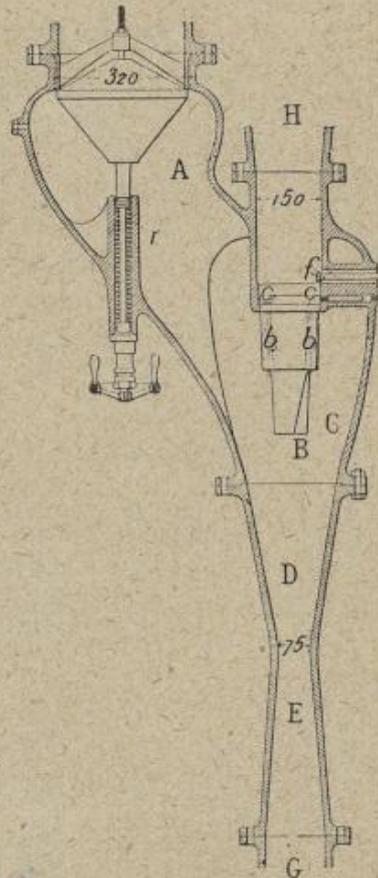


Fig. 203. — Ejecto-condenseur Rateau.

H, arrivée d'eau de condensation; B, tuyère à eau; A, arrivée de vapeur à condenser; D, mélangeur; E, divergent.

hauteur, on substitue au tube barométrique une pompe d'extraction qui est souvent centrifuge, en raison de la simplicité de ce genre de pompe et de la facilité de la commande directe par dynamo.

Toutefois, il est difficile, avec une pompe à air à piston, d'obtenir une pression très faible : l'entraînement direct de l'air par l'eau dans une trompe, ou par la vapeur dans un éjecteur, donne un meilleur vidé.

Le condenseur Allis-Chalmers (fig. 205) est une combinaison de l'éjecteur et du condenseur barométrique ;

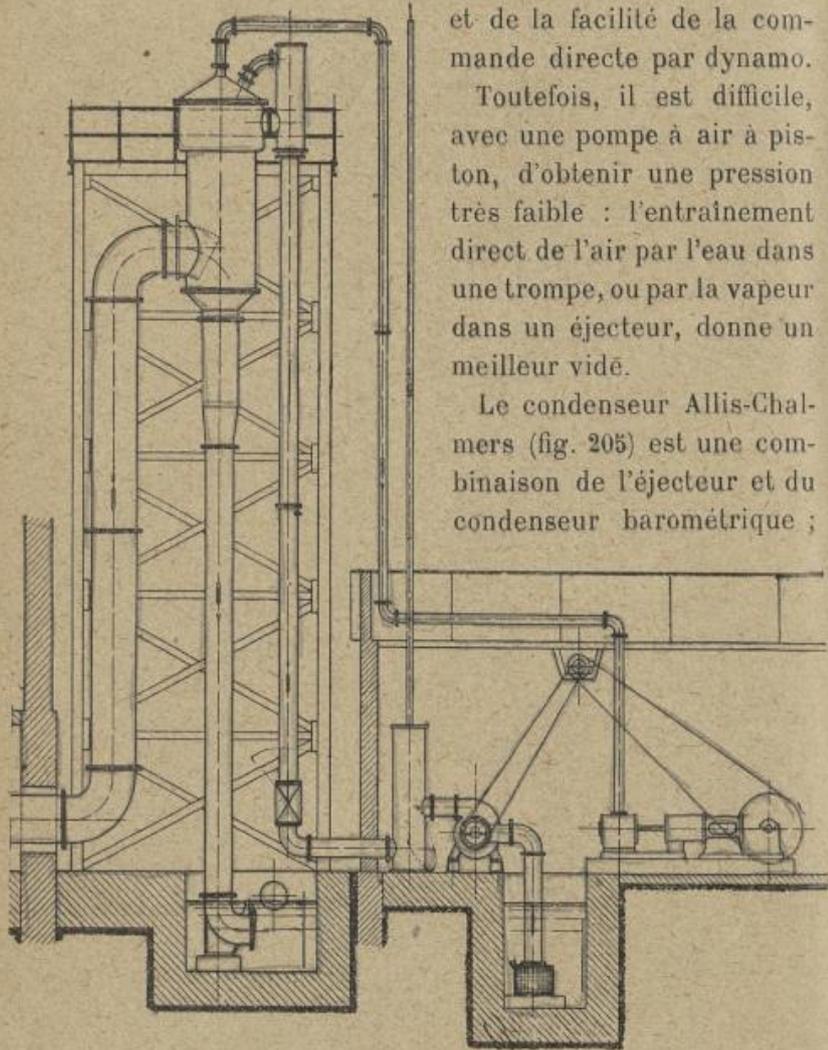


Fig. 204. — Condenseur barométrique : à gauche, tuyau d'arrivée de vapeur ; à droite, pompe à piston, à air seul, et pompe centrifuge, élevant l'eau de condensation.

un tuyau de trop-plein (*overflow pipe*) évite les retours d'eau aux moteurs.

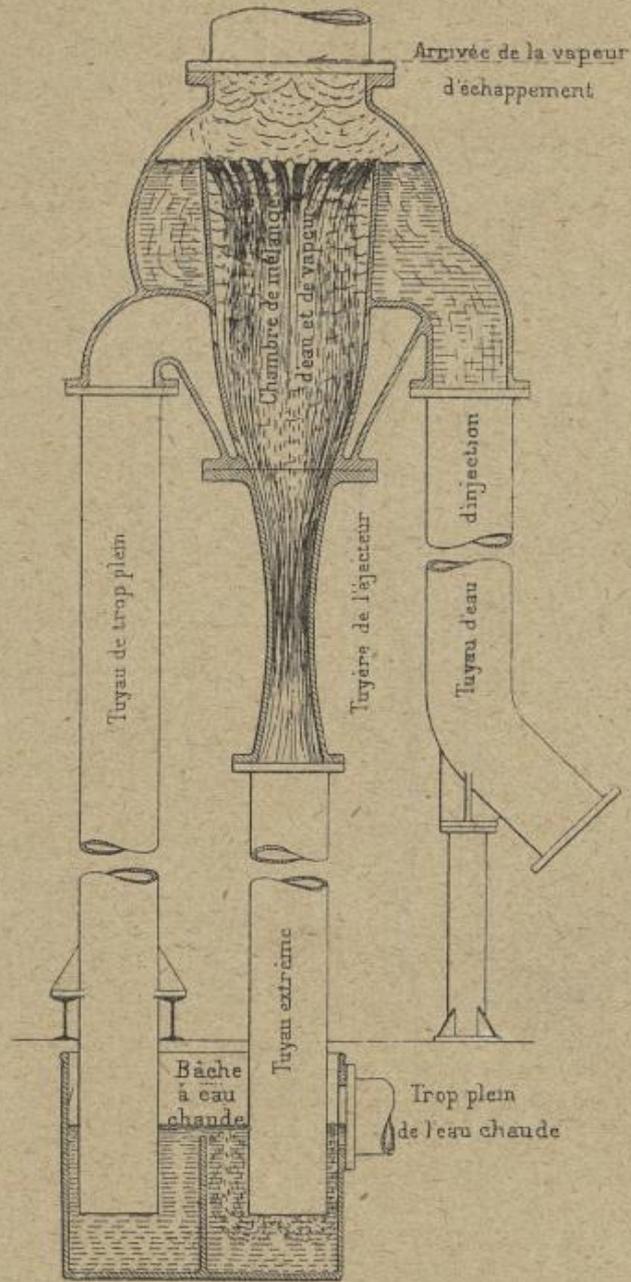


Fig. 205. — Condenseur barométrique Allis-Chalmers.

La pompe à air Westinghouse-Leblanc (fig. 206) est une trompe à eau très efficace, où l'eau est lancée en nappes divisées par une pompe centrifuge à débit partiel (sur une

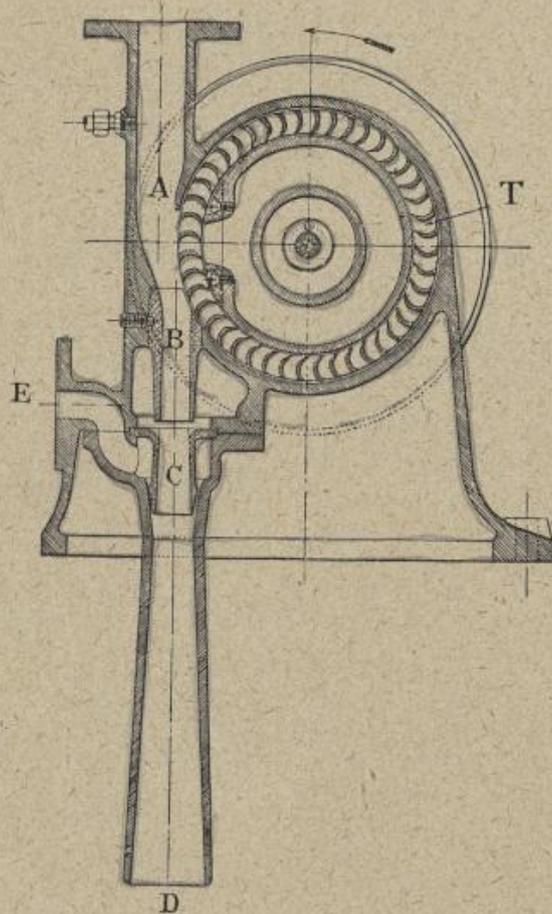


Fig. 206. — Pompe à air Westinghouse-Leblanc.

A, aspiration d'air. — E, arrivée de vapeur pour l'amorçage. — T, pompe centrifuge à débit partiel.

petite portion de sa circonférence). Ces nappes d'eau entraînent l'air dans le divergent, qui débouche à l'extérieur. L'air arrive en A par la tubulure supérieure. Autour de C, un éjecteur annulaire à vapeur sert seulement pour l'amorçage de l'appareil.

Cette trompe prend l'air à la partie supérieure du condenseur (fig. 207), l'eau étant extraite à la partie inférieure par une pompe centrifuge.

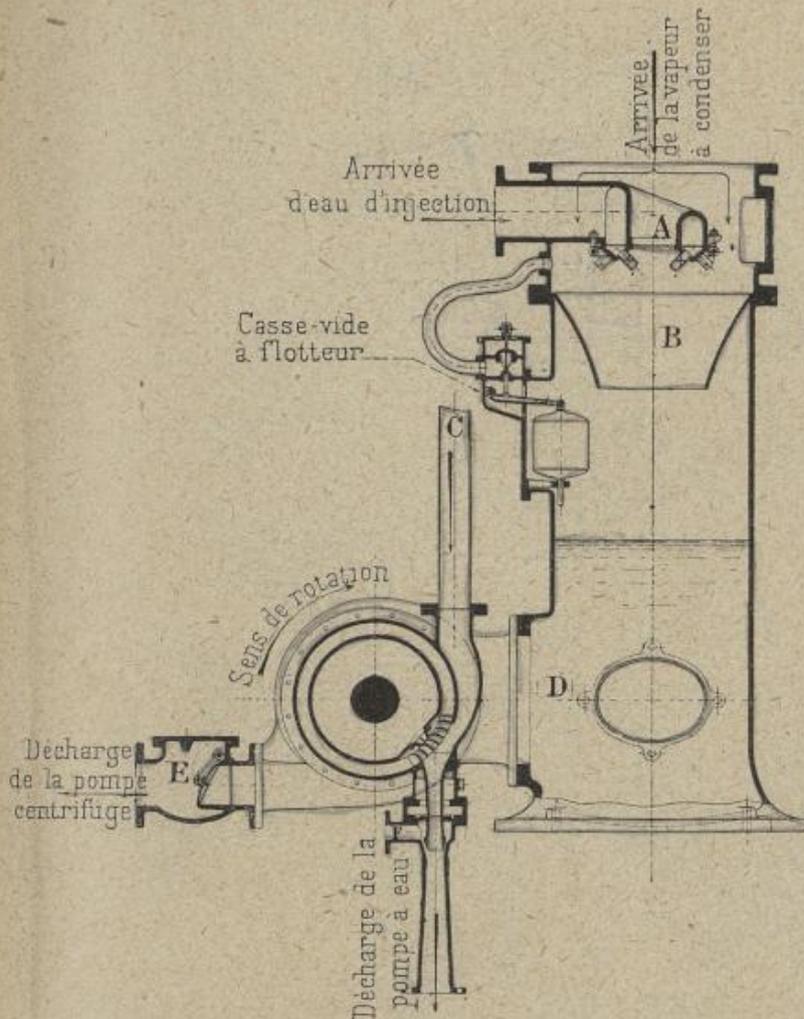


Fig. 207. — Condenseur à mélange Westinghouse-Leblanc.

Dans un condenseur à surface, si l'eau de condensation ne doit pas être utilisée, on peut supprimer cette pompe d'extraction, la trompe entraînant l'eau avec l'air.

On peut disposer de même le condenseur à mélange, mais

vu la grande quantité d'eau à enlever, la puissance dépensée

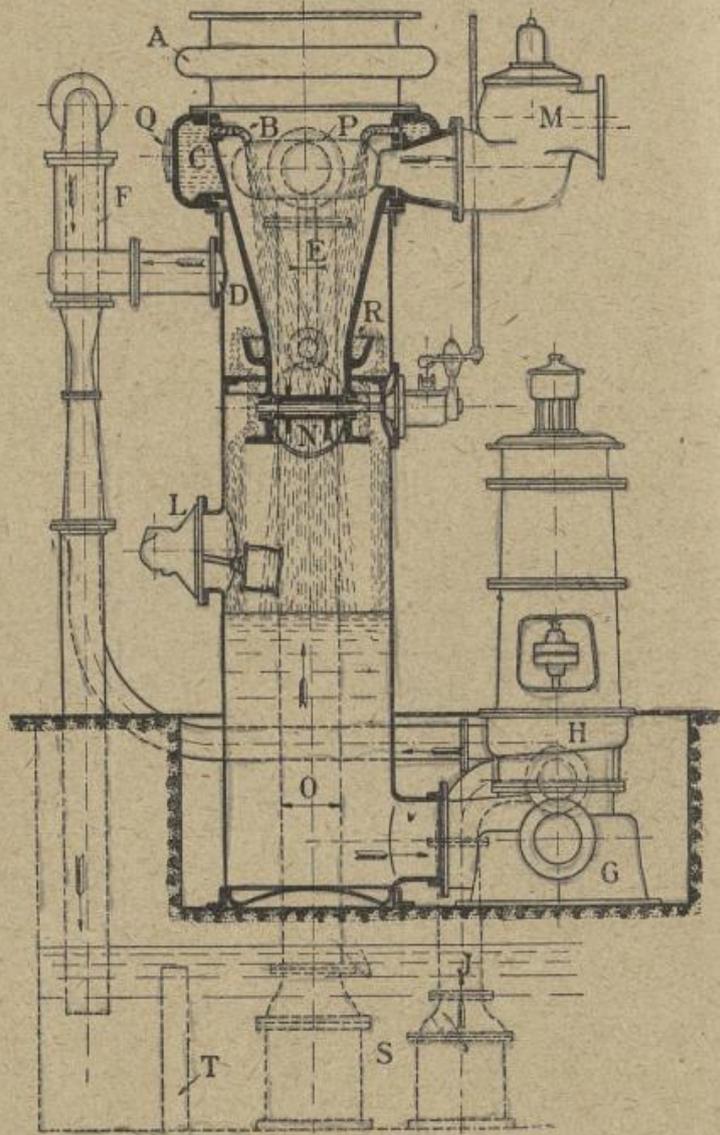


Fig. 208. — Condenseur à mélange de la C^{ie} électro-mécanique.

par la pompe centrifuge unique atteint les 5 centièmes de la puissance du moteur desservi.

Dans le condenseur à mélange de la Compagnie électro-

mécanique (fig. 208), l'air est aspiré en D par une trompe à eau F, alimentée par une pompe centrifuge H. Cette eau, qui s'échauffe fort peu au contact de l'air qu'elle entraîne, retourne à la bêche S. L'eau de condensation est distribuée par les tuyères B : l'arrivée supplémentaire en R refroidit l'air à la sortie du condenseur.

La figure 209 représente la trompe à eau de ce condenseur.

Aux trompes à eau on peut substituer, pour l'aspiration de l'air, des éjecteurs à vapeur. L'installation d'éjecteurs, conservant un fonctionnement stable malgré de fortes variations du débit de l'air aspiré, offre de grandes difficultés, qui ont été surmontées à la suite de savantes études¹.

L'extracteur d'air de la Société de condensation et d'applications mécaniques (fig. 210) comprend deux éjecteurs successifs H et D, avec condenseur intermédiaire qui retient la vapeur du premier éjecteur.

La vapeur du second éjecteur chauffe l'eau d'alimentation des chaudières. On peut aussi récupérer les calories de la vapeur du premier éjecteur : la dernière forme donnée par M. Maurice Leblanc à cet appareil (fig. 211), comporte deux condenseurs à surface, ce qui évite l'envoi de l'air dans l'eau d'alimentation. L'emploi d'éjecteurs multiples permet de proportionner le débit de vapeur à la quantité d'air à extraire.

L'éjecteur Bréguet (fig. 212), est stabilisé par une rentrée d'air entre les deux éjecteurs à vapeur qui le composent. Un petit

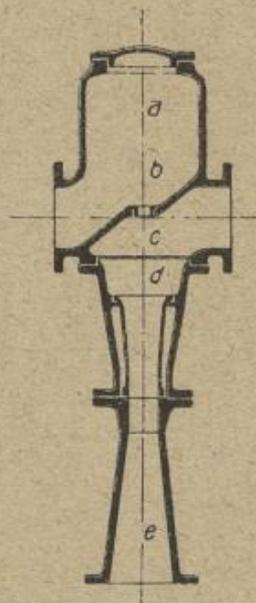


Fig. 209. — Trompe à eau du condenseur de la Cie électro-mécanique.

c, tuyère à eau motrice ;
d, mélangeur ; e, divergent.

1. Notamment par M. Delaporte et par M. Maurice Leblanc.

condenseur, au débouché du premier éjecteur, en liquéfie la vapeur.

Dans le condenseur à mélange Bréguet (fig. 213), l'arrivée de vapeur, à la partie supérieure, est entourée de busettes

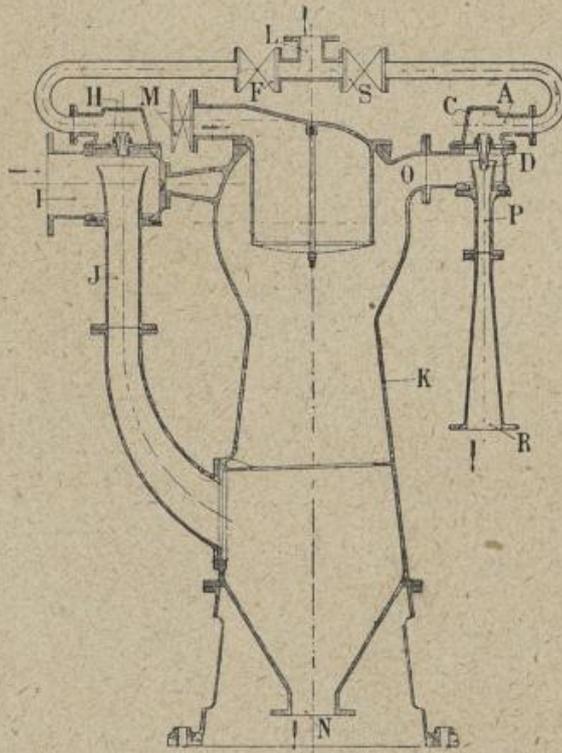


Fig. 210. — Extracteur d'air avec condenseur intermédiaire.

H, premier éjecteur; I, arrivée d'air; N, sortie d'eau du condenseur intermédiaire; O, reprise de l'air par le second éjecteur; D; M, arrivée d'eau du condenseur intermédiaire; R, divergent d'où part un tuyau conduisant la vapeur et d'air dans la bûche d'alimentation.

d'injection; une busette spéciale refroidit l'air aspiré par l'éjecteur. Une pompe centrifuge extrait l'eau.

97. Condenseurs à surface. — Dans le condenseur à surface, la vapeur, ne se mélangeant plus avec l'eau de condensation, donne de l'eau distillée, qu'on renvoie aux chaudières et qui sert indéfiniment; les pertes seules doivent

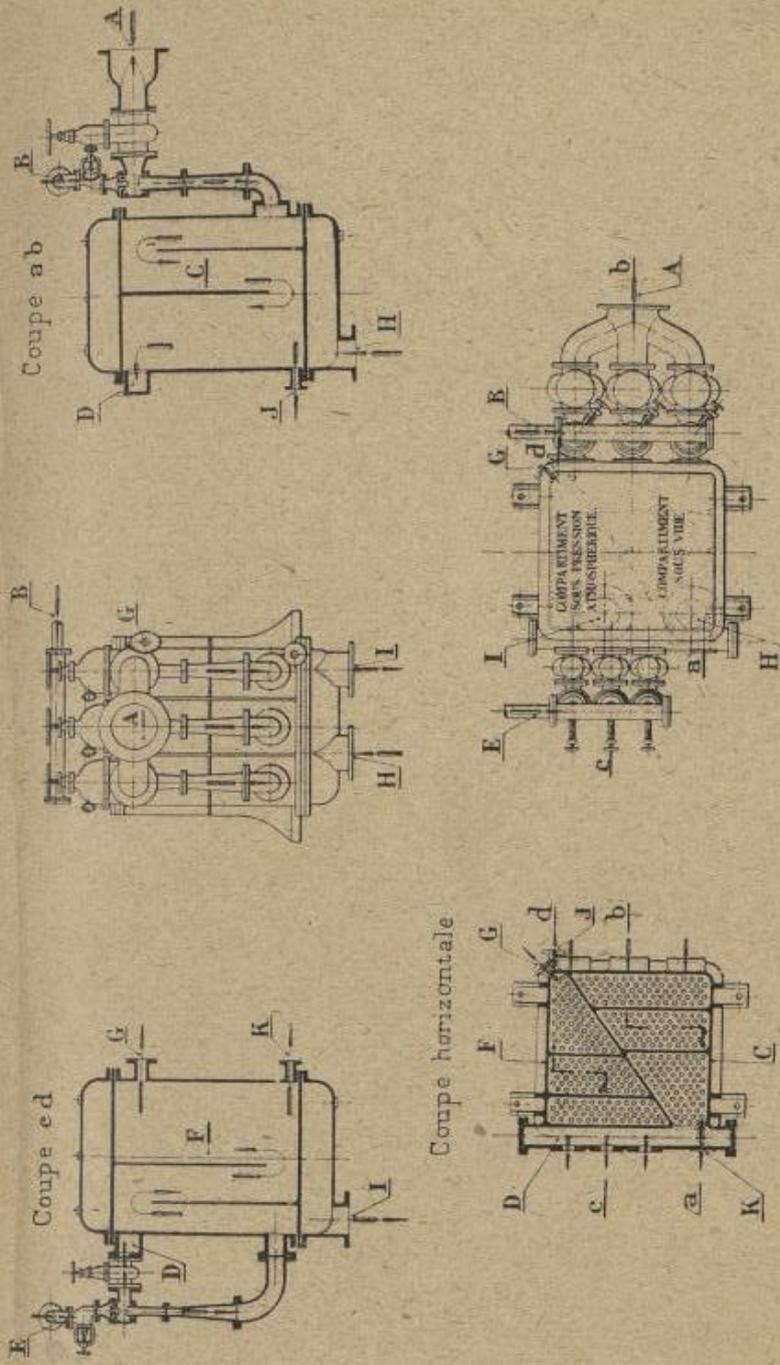


Fig. 211. — Ejecteurs à éléments multiples de la Société de condensation et d'applications mécaniques, avec double condenseur à surface.

A, aspiration d'air au condenseur desservi; B, arrivée de vapeur aux premières tuyères; C, premier condenseur à surface; D, sortie d'air; E, arrivée de vapeur aux secondes tuyères; F, second condenseur à surface; G, échappement de l'air au dehors; H, entrée d'eau de refroidissement; I, sortie, J et K, purges des condenseurs.

être remplacées. La surface condensante s'obtient à l'aide

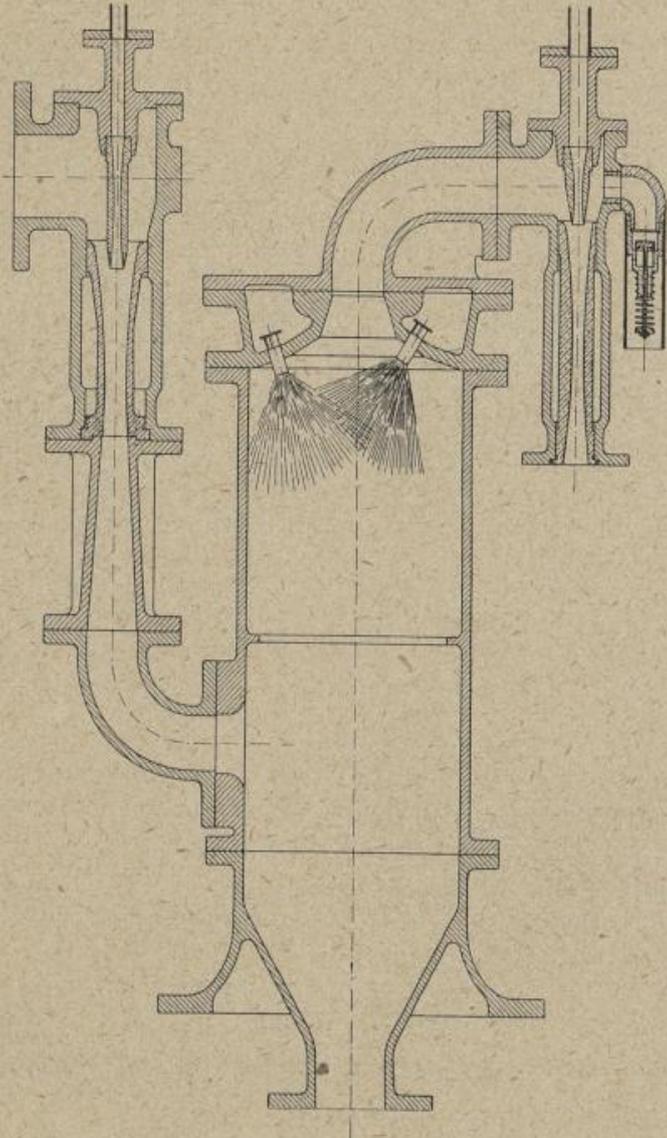


Fig. 212. — Ejectair Bréguet. La soupape de rentrée d'air est auprès du second éjecteur, à droite de la figure.

d'un grand nombre de tubes, dans lesquels circule l'eau.
Sous sa forme la plus simple, le condenseur est un réci-

vient cylindrique, avec deux *plaques de tête* où s'emmanchent les tubes ; pour occuper moins d'espace, on lui donne parfois des formes plus compliquées ; le plus souvent le courant

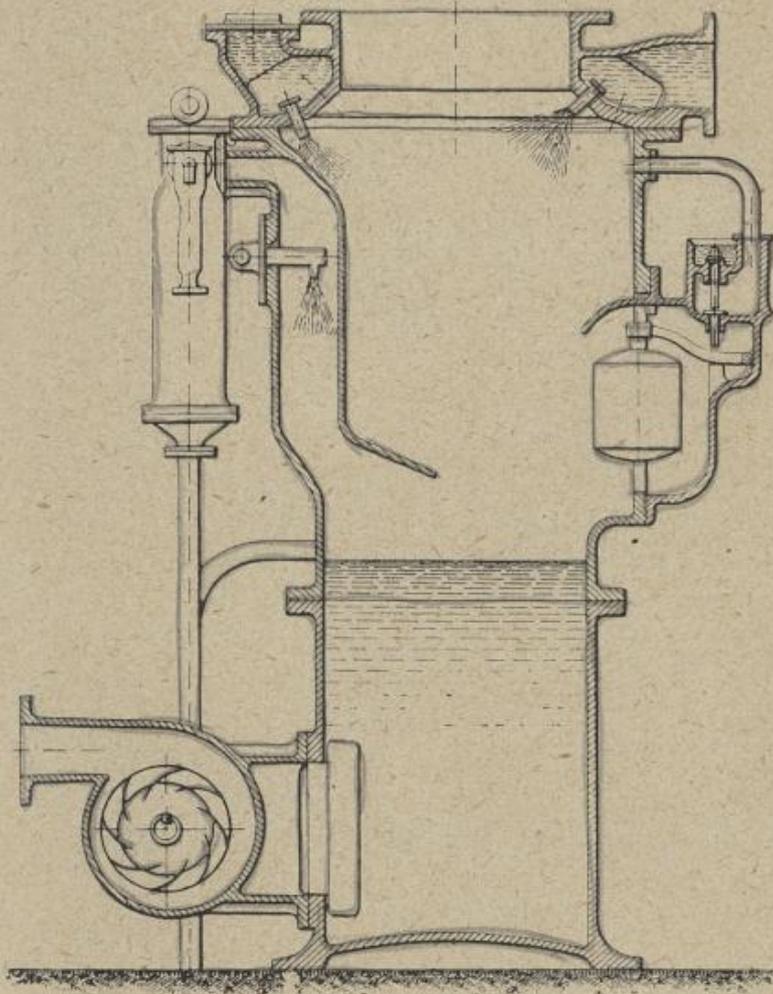


Fig. 213. — Condenseur à mélange Breguet.

d'eau traverse successivement plusieurs groupes de tubes, ce qui rend la circulation de l'eau effective dans tous les tubes. On doit aussi empêcher que l'air, occasionnellement dégagé par l'eau de circulation, ne puisse s'accumuler en certains points.

Le diamètre extérieur des tubes est d'environ 2 cm, avec une épaisseur de 1 à 1,5 mm ; ils sont en cuivre ou en laiton.

Le montage dans les plaques se fait à l'aide d'une *garniture* serrée par un presse-garniture fileté, portant une saillie vers l'intérieur, afin que le tube ne puisse sortir en glissant. La garniture se compose d'une tresse de chanvre ou de coton, de caoutchouc, de rondelles en papier, ou d'autres substances.

La vapeur amène des matières grasses qui recouvrent les tubes et gênent la transmission de la chaleur ; on fait disparaître ces dépôts en envoyant dans le condenseur des jets de vapeur. Cet inconvénient n'existe pas avec la turbine, dont la vapeur n'est nulle part en contact avec l'huile.

La *pompe à air* subsiste avec le condenseur à surface, mais les dimensions peuvent en être moindres qu'avec le condenseur à injection, puisqu'il n'y a plus à extraire que l'eau provenant de la condensation de la vapeur et l'air pénétrant par les joints. Toutefois, une pompe à air trop petite n'assurerait pas bien la condensation par surface : il convient qu'elle ait au moins un volume égal environ au 20^e de celui du dernier cylindre de détente du moteur (à plusieurs expansions) : elle est supposée fonctionner à double effet et avoir la même marche que le moteur desservi.

Le condenseur à surface comporte une *pompe de circulation*, qui fait passer dans l'appareil l'eau de refroidissement : en mer, la pompe de circulation n'a guère de travail d'élévation à fournir ; elle surmonte surtout les frottements.

L'extraction séparée de l'air et de l'eau améliore le condenseur à surface comme le condenseur à mélange ; les trompes et les éjecteurs y remplacent de même les pompes à piston.

Les pompes du condenseur Brown Boveri (fig. 214) sont commandées par une turbine à vapeur ou par un moteur électrique, ou par les deux, avec dispositif permettant de passer d'une commande à l'autre, sans arrêt. Ces trois pompes centrifuges, sont, de gauche à droite, la pompe de circula-

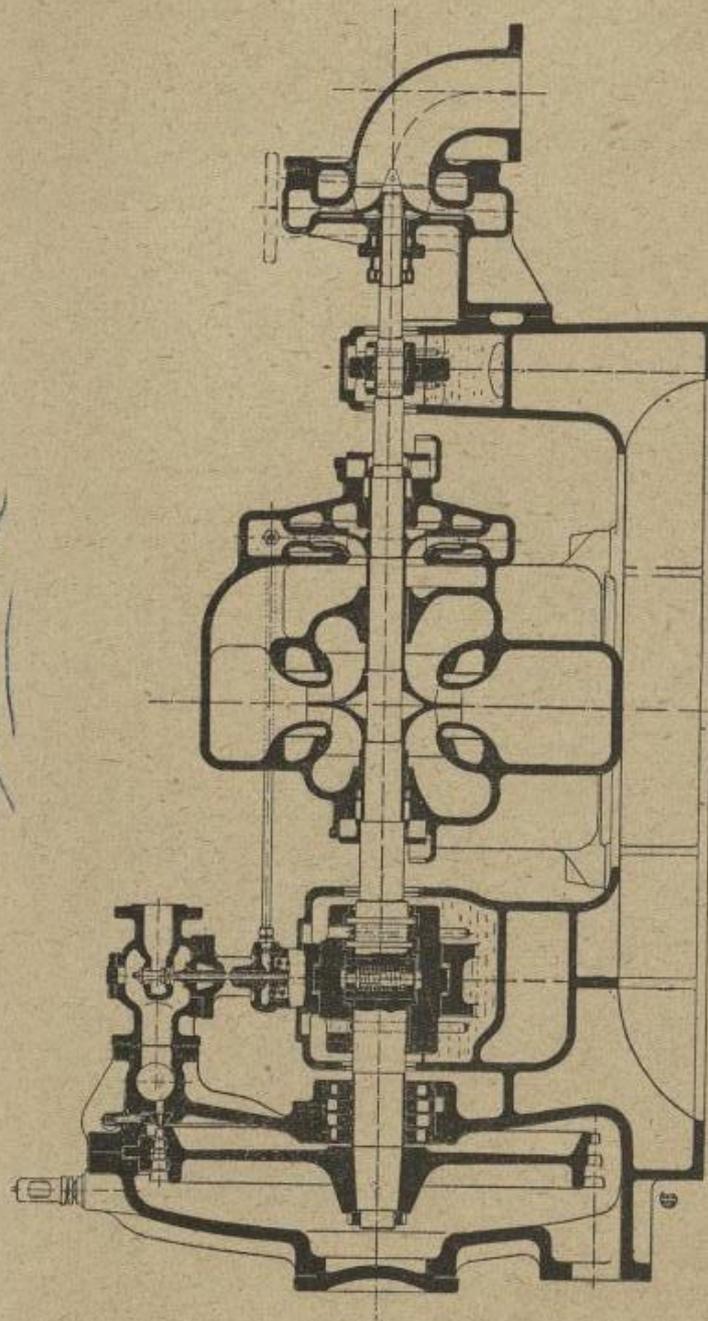


Fig. 214. — Pompes du condenseur Brown Boveri, avec commande par turbine à vapeur.

tion, celle qui alimente la trompe d'extraction d'air et, enfin, en bout d'arbre, la pompe d'extraction de l'eau. La turbine motrice envoie sa vapeur dans un étage de la turbine principale, desservie par le condenseur.

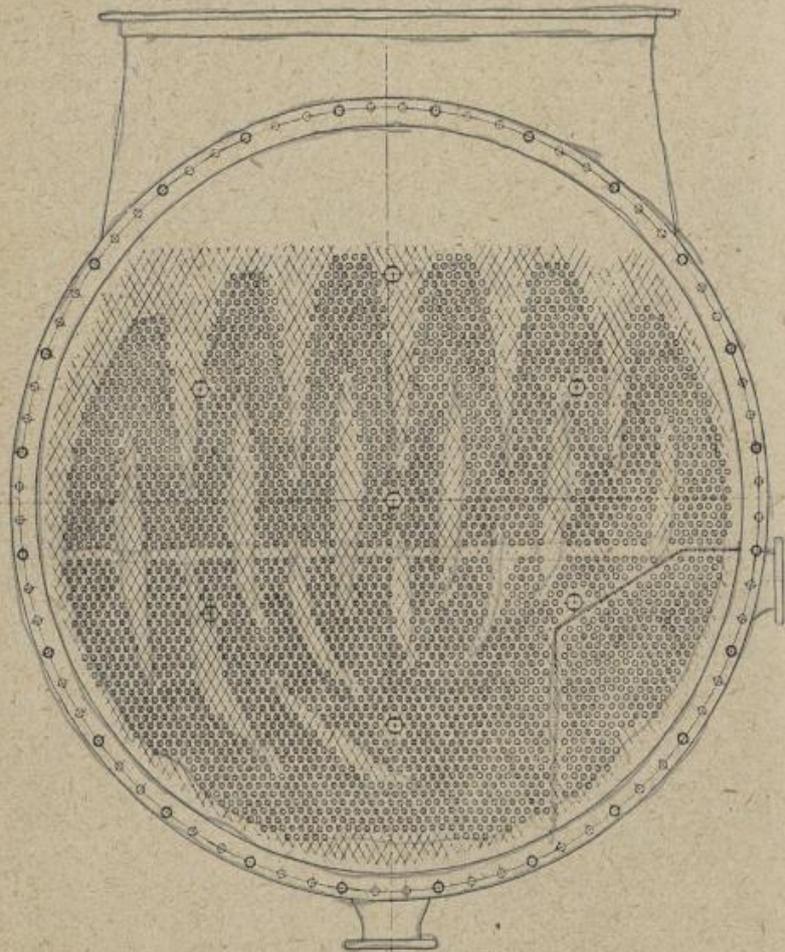


Fig. 215. — Condenseur à surface Bréguet.

Dans les condenseurs à surface de construction récente, on n'hésite pas à sacrifier quelques tubes, de manière à laisser des intervalles où la vapeur pénètre sans obstacle (fig. 215). On ménage même un assez grand vide au milieu du faisceau tubulaire (fig. 216).

Il convient que l'eau ne s'accumule pas autour des tubes inférieurs, ou même ne coule pas sur ces tubes, car elle s'y

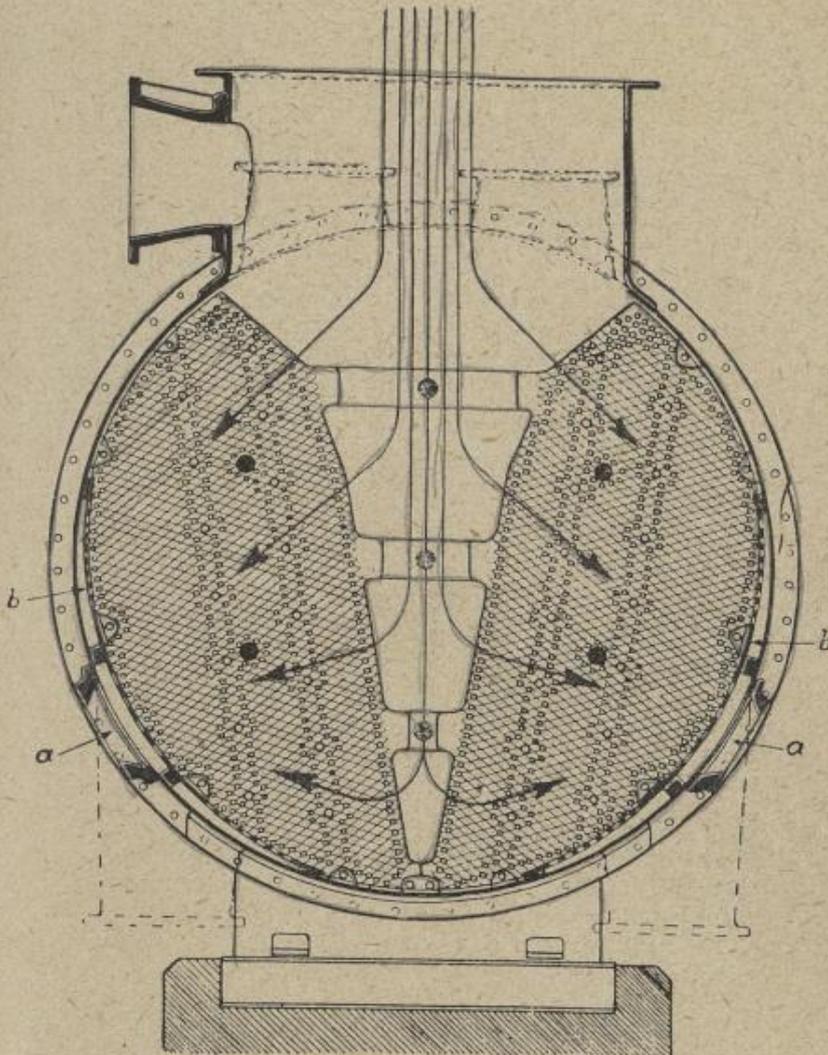


Fig. 216. — Condenseur à surface de la C^o électro-mécanique. Les tôles perforées *b* recouvrent les orifices de sortie d'air *a*.

refroidit inutilement. L'air doit être aspiré aussi froid que possible.

Certains condenseurs sont divisés en deux moitiés avec

portes de visite indépendantes. On peut arrêter la circulation d'eau dans une moitié, pour en visiter les tubes et en refaire les garnitures s'il y a lieu, sans arrêter le service. La surface condensante est alors réduite à moitié.

Pour établir un condenseur, on doit déterminer la surface condensante et la quantité d'eau de circulation suivant le débit de vapeur envoyée par la machine. On veut entretenir au condenseur une température déterminée. L'eau de refroidissement ne sort pas à cette température comme dans le condenseur à injection, mais à une température inférieure, inconnue a priori.

Parfois on choisit une surface condensante de $0,2 m^2$ par cheval¹ et un débit d'eau de circulation de 50 litres en moyenne par kilogramme de vapeur. Avec un moteur indépendant, on peut faire varier ce débit suivant les besoins, en l'augmentant quand la température de l'eau disponible s'accroît.

Le travail absorbé par la pompe à air se calcule comme pour le condenseur à injection ; il est minime et consiste surtout à vaincre les résistances passives.

Le travail de la pompe de circulation se calcule d'après les formules de l'hydraulique. Dans un appareil donné, il est proportionnel au carré de la vitesse de l'eau, c'est-à-dire du débit.

Un condenseur à surface Westinghouse-Leblanc de $200m^2$ a donné, dans des essais, les résultats suivants :

Vapeur condensée par heure et m^2 , en	
marche normale	22,57 kg.
Idem, marche en surcharge	26,85
Eau de circulation par heure	262 m^3
Températures d'entrée	8°,6 et 8°,5
— de sortie	18°,8 et 20°,5
Vide en mm de mercure	47 et 49
— en kg par cm^2	0,023 et 0,025

Le condenseur à surface est employé surtout lorsqu'on ne

1. Il s'agit des condenseurs de machines marines, dont la consommation se tient aux environs de 7 kg de vapeur par cheval-heure; d'une manière générale, l'indication de la puissance en chevaux ne donne qu'une idée incertaine de la consommation de vapeur.

dispose pas d'eau convenable pour l'alimentation des chaudières, notamment pour la navigation maritime. On en fait aussi usage pour obtenir une très faible pression ou « un très bon vide » : avec une grande surface condensante on peut employer une forte proportion d'eau de condensation, sans avoir l'inconvénient du dégagement de l'air dissous, comme dans le condenseur à mélange.

Les condenseurs à *ruissellement* consistent en faisceaux de tubes, exposés à l'air, et arrosés, dans lesquels pénètre la vapeur à condenser.

Dans l'*aéro-condenseur* Fouché, l'eau de circulation est remplacée par un courant d'air puissant, envoyé par un ventilateur sur un faisceau tubulaire qui reçoit la vapeur d'échappement : on peut ainsi produire la condensation, lorsque l'eau fait défaut. L'air chaud obtenu peut être utilisé au chauffage des ateliers, et, dans certaines industries, à la dessiccation des matières élaborées.

D'après M. Fouché, l'aéro-condenseur exige en moyenne 80 m³ d'air, pris à 10°, pour condenser un kilogramme de vapeur, et peut abaisser la pression à 150 g par cm² (*vide* de 65 mm de mercure). L'abaissement de la pression est moindre quand l'air n'est pas froid, ou quand on veut l'obtenir très chaud pour certaines opérations de séchage. Avec addition d'un arrosage extérieur des tubes, la quantité d'air peut être réduite.

98. **Refroidissement de l'eau de condensation.** — Lorsque l'eau est rare, on peut l'employer plusieurs fois en la faisant refroidir ; le refroidissement est dû surtout à l'évaporation ; la dépense d'eau est inférieure à celle d'une machine de même puissance à échappement dans l'atmosphère.

On peut se contenter d'un bassin avec jets d'eau finement divisés (système Sée). Les appareils usuels sont enfermés dans une enveloppe ; un ventilateur, ou le simple tirage dû à l'échauffement de l'air, y entretient un courant ascendant.

CHAPITRE XII

PRODUCTION DE LA VAPEUR

99. **Généralités.** — La production de la vapeur exige beaucoup de soin : du chauffeur dépendent la sécurité, l'économie de combustible, la conservation des chaudières.

Le *générateur* de vapeur, ou *chaudière*, est un récipient clos, soumis à l'action de la chaleur dégagée dans un foyer, et dans lequel l'eau est chauffée et vaporisée sous une pression déterminée dans chaque cas, et limitée par la *soupage de sûreté*. Un appareil *alimentaire* remplace l'eau sortie du générateur à l'état de vapeur.

La chaudière peut être complétée par un *réchauffeur* d'eau d'alimentation, qui chauffe l'eau, mais sans la vaporiser, et par un *surchauffeur*, destiné à élever la température de la vapeur, sans en augmenter la pression.

100. **Combustibles.** — Les combustibles pour le service des chaudières sont quelquefois choisis de manière à obtenir une vaporisation exceptionnellement active, ou en vue de la commodité de l'emploi. Mais le plus souvent, on recherche le combustible qui coûte le moins cher.

Ce combustible le moins cher n'est pas toujours celui dont le prix à la tonne est le moindre, car les cendres et l'eau s'ajoutent inutilement, ou plutôt d'une manière nuisible, au véritable combustible. En outre, le combustible doit convenir pour l'appareil de combustion employé.

La caractéristique essentielle d'un combustible est le *pouvoir calorifique* : c'est le nombre de calories que dégage

la combustion complète d'un kilogramme. Certains *calorimètres*, notamment celui de Mahler, permettent la détermination précise de ce pouvoir calorifique. Les produits de la combustion sont le gaz carbonique et la vapeur d'eau¹.

Le combustible contient des substances inertes, qui forment les cendres après la combustion. La cendre de houille consiste surtout en fragments schisteux et siliceux ; elle renferme souvent de l'oxyde de fer, donné par les *pyrites*, après la combustion du soufre et du fer qui les composent.

La proportion de cendres se mesure après l'*incinération* au rouge, en présence de l'air, du combustible pulvérisé. Cette opération exige, pour une livraison de houille, une *prise d'essai*, qui doit en représenter la teneur moyenne.

Certains combustibles contiennent une grande proportion d'eau : elle forme encore le quart ou le cinquième du bois bien séché à l'air. Les combustibles minéraux peuvent aussi absorber de l'eau : un kilogramme de coke sec, exposé à la pluie, peut en prendre 200 et même 250 *g*. Cette eau augmente le poids apparent du combustible ; dans l'emploi elle emporte la chaleur qui la transforme en vapeur.

La houille renferme aussi des proportions d'eau variables, et assez importantes pour rendre difficile le contrôle exact des poids vendus ; surtout après l'opération du lavage, les charbons menus en tiennent une proportion notable.

Les principales espèces de houilles se classent d'après leur teneur en matières volatiles. La calcination dégage ces

1. Cette vapeur d'eau se condense dans le calorimètre et y abandonne un certain nombre de calories. Dans la combustion normale, au contraire, cette vapeur d'eau se dégage sans être condensée, de sorte que les calories correspondant à sa chaleur latente ne sont pas utilisées. Par exemple, un kilogramme de houille grasse, à 3 p. 100 de cendres, donnera au calorimètre un pouvoir calorifique de 9000 calories ; la combustion produira 3,03 *kg* de gaz carbonique et 0,45 *kg* de vapeur d'eau, dont la chaleur latente, indiquée par le calorimètre, mais non utilisée en pratique, sera de 270 calories. Cette perte s'ajoute à celle qui résulte de la température généralement assez élevée des gaz rejetés. En déduisant ces calories du pouvoir calorifique total, on obtient le *pouvoir calorifique inférieur* (dans l'espèce, 8730).

matières volatiles, qui sont surtout des composés d'hydrogène et de carbone. La proportion de carbone fixe qui reste après la calcination est, par suite, inférieure à la proportion totale de carbone contenu dans le combustible. On rapporte parfois les proportions de matières gazeuses et de carbone fixe à la houille supposée pure, c'est-à-dire entièrement privée d'eau, et des matières stériles qui forment les cendres. Suivant la nature des houilles, la calcination dans un creuset donne un culot de coke plus ou moins compact, ou des grains isolés.

Les *anthracites* ne renferment qu'une faible proportion de matières volatiles. Ils s'enflamment difficilement, et les morceaux isolés s'éteignent rapidement; en masse, ils donnent un bon feu avec peu de flammes et sans fumée. Il convient, pour la bonne combustion, que les fragments soient tous à peu près de même taille.

La partie combustible des *houilles maigres* tient 10 à 15 g de matières volatiles contre 90 à 85 g de carbone fixe. Elles brûlent avec une flamme courte en donnant peu de fumée.

Les *houilles demi-grasses* renferment 15 à 20 g de matières volatiles par 100 g; les fragments s'agglutinent au feu.

Les *houilles grasses* tiennent 20 à 40 g de matières volatiles par 100 g; elles se ramollissent au feu, fondent en partie et se prennent en masse; cette propriété est utilisée dans la chauffe du fer de forge, avec les houilles dites *marécales*. La flamme des variétés de houilles grasses est tantôt courte et tantôt longue.

Les *houilles sèches à longue flamme* ou *flambantes* sont les plus riches en matières gazeuses (plus de 40 p. 100). Elles brûlent avec flamme et fumée abondantes, sans s'agglomérer.

Les *lignite*s sont des combustibles minéraux qui proviennent de couches moins anciennes que celles des véritables terrains houillers. Il en existe d'assez nombreuses variétés. Le plus souvent, le lignite est de couleur brune ou noire,

plutôt terne que brillante. Il donne une fumée abondante d'une odeur désagréable ; il renferme une forte proportion d'eau, de sorte qu'à poids égal le pouvoir calorifique est moindre que celui de la houille.

La *tourbe* est le produit de l'altération de divers végétaux ; elle est de formation récente. Elle contient principalement du carbone, des cendres, et une grande proportion d'eau, qu'on élimine partiellement par la dessiccation à l'air. Une bonne tourbe peut produire en brûlant à peu près la même quantité de chaleur qu'un poids égal de bois.

Pour la production de la vapeur, on préfère généralement les houilles demi-grasses ; mais les seules, qu'on n'emploie guère pour cet usage, sont les houilles grasses, qui ne sont pas les plus abondantes, et qu'on recherche surtout pour la fabrication du gaz d'éclairage et du coke. L'agglomération des morceaux en rend d'ailleurs la combustion difficile sur grille.

La proportion et la nature des cendres ont une grande importance. Non seulement les cendres réduisent la quantité du véritable combustible dans la masse transportée et vendue, mais elles gênent la combustion. Quand elles sont *infusibles* à la chaleur, elles tombent en poussière et traversent sans peine les grilles, ou sont entraînées par le tirage. Mais le plus souvent elles fondent partiellement et encrassent les grilles, sous forme de *mâchefers*. La fusion des cendres ne dépend pas seulement de leur nature, mais aussi de la température de combustion dans le foyer. Quand cette température s'élève, certaines cendres infusibles deviennent fusibles.

On classe les houilles d'après la grosseur des morceaux. Les opérations de triage et de classement se font sur le carreau des mines. On sépare les gros morceaux, puis ceux de taille moyenne, gros à peu près comme le poing, qu'on désigne par le nom de *gailleterie*. Le *tout venant* renferme des grosseurs mélangées : souvent on en a retiré les plus gros morceaux, ou les menus les plus fins. Enfin les *menus*

constituent des catégories variées, suivant les dimensions des grilles de criblage. Ces menus sont parfois de mauvais combustibles, mélangés d'une forte proportion de matières terreuses; inversement, les lavages peuvent les débarrasser en grande partie de ces matières, si bien qu'ils deviennent les sortes les plus pures.

L'exploitation de certaines houilles donne une forte proportion de morceaux; d'autres, très friables, n'existent guère qu'à l'état de menus.

Les *briquettes* sont formées de houille très menue, qui peut avoir été débarrassée d'une partie de ses cendres par le lavage, et de *brai*, à raison d'environ 80 kg par tonne. Une forte compression produit l'agglomération, mais la houille employée doit être assez grasse que les morceaux se collent au feu. La briquette est un excellent combustible, facile à employer. Elle s'emmagasine bien, et peut se conserver plusieurs années sans altération notable.

Les *cokes de gaz* servent parfois à la production de la vapeur. Le principal avantage du coke est de ne pas donner de fumée; il est inférieur à la houille dont il provient, puisque cette houille est privée des éléments gazeux. Par suite de ce départ, la proportion de cendres, rapportée au kilogramme, est plus forte dans le coke.

Les *goudrons* de houille et les résidus de distillation du *pétrole* sont d'excellents combustibles, d'un emploi commode pour la production de la vapeur.

Le pouvoir calorifique des bonnes houilles servant à la production de la vapeur se tient entre 7.000 et 8.000 calories par kg; celui des lignites ne dépasse guère 5.000 calories.

101. Combustion. — La combustion est la combinaison chimique avec l'oxygène de l'air des parties combustibles, carbone et hydrogène, qui forme avec le carbone divers composés, dits *carbures d'hydrogène*. Ces carbures d'hydrogène se dégagent lorsqu'on chauffe la houille; c'est ainsi qu'on produit le gaz d'éclairage, en soustrayant la houille, pendant

cette *distillation*, à l'action de l'air qui enflammerait les gaz chauds dégagés. Avec ces gaz combustibles se dégagent aussi, en petite proportion, des gaz *inertes* (non combustibles), tels qu'azote, gaz carbonique.

La combustion de l'hydrogène donne de la vapeur d'eau : 1 kg d'hydrogène se combine avec 8 kg d'oxygène pour donner 9 kg d'eau, et cette combinaison dégage 34.460 calories. Le carbone forme avec l'oxygène deux composés différents : 6 kg de carbone et 8 kg d'oxygène produisent 14 kg d'*oxyde de carbone*, qui est un gaz encore combustible ; 8 autres kg d'oxygène et 14 kg d'*oxyde de carbone* (ou 16 kg d'oxygène et 6 kg de carbone) forment 22 kg de *gaz carbonique* ou *acide carbonique*, qui n'est plus combustible. La transformation d'un kg de carbone en gaz carbonique dégage 8.080 calories, tandis que la formation de l'*oxyde de carbone* n'en produit que 2.500, ou les trois dixièmes de la quantité de chaleur totale que donnerait la combustion complète.

Connaissant les quantités de carbone et d'hydrogène à brûler dans un kg d'une houille déterminée, on peut facilement calculer le poids d'oxygène nécessaire pour la combustion complète de ces deux éléments. L'oxygène se trouve dans l'air, mélangé à l'azote et à quelques autres gaz inertes à raison de 230 g d'oxygène dans un kg d'air. En faisant ce calcul, on trouve que les houilles de qualités courantes exigent environ 12 kg d'air par kg, ou 9 m³ à la température et à la pression ordinaires.

Si la quantité d'air fournie est moindre que celle qui est strictement nécessaire, il est certain qu'une partie du combustible va se perdre à l'état de gaz non brûlés, carbures d'hydrogène ou oxyde de carbone. Si la quantité d'air est plus grande, l'excès d'air non utilisé pour la combustion sortira avec les gaz brûlés par la cheminée : comme ces gaz sont rejetés à une température encore assez élevée, ils emportent un certain nombre de calories, qui sont perdues ; par conséquent il est intéressant de ne pas exagérer l'excès

d'air. Mais il est impossible en pratique de régler, avec la précision des dosages chimiques, la proportion d'air qui entre dans un foyer ; en outre, il n'y a pas mélange homogène, dans toute l'étendue du foyer, de l'air et des gaz combustibles : aussi un excès d'air est-il nécessaire ; mais cet excès doit être aussi faible que possible.

L'analyse chimique des gaz rejetés par un foyer permet de reconnaître si l'air est trop abondant ou s'il fait défaut. Comme la composition du courant gazeux est variable, il importe que les analyses soient multipliées ; c'est surtout la rapidité plus qu'une exactitude minutieuse qui convient pour ces essais. Certains appareils, tels que celui d'Orsat, permettent des dosages faciles. C'est une opération qui devrait être faite de temps en temps dans toutes les installations de quelque importance : les résultats des essais seraient communiqués aux chauffeurs, à moins qu'ils ne fassent eux-mêmes ces dosages, après un facile apprentissage.

L'air contenant, en volumes, 21 p. 100 d'oxygène, la combustion complète du carbone donne des gaz contenant la même proportion de gaz carbonique. Cette proportion n'est pas atteinte dans les fumées des chaudières, parce que la combustion se fait avec excès d'air, et parce qu'une partie de l'oxygène brûle l'hydrogène du combustible, en donnant de la vapeur d'eau. On considère la proportion de 12 p. 100 de gaz carbonique comme satisfaisante.

Il existe plusieurs appareils qui indiquent d'une manière continue et même enregistrent la teneur des fumées en gaz carbonique.

La combustion exige non seulement des proportions convenables de combustible et d'air, mais il faut aussi que ces deux éléments, pour se combiner, soient portés au préalable à une température assez élevée. L'air entre ordinairement froid dans un foyer ; il passe sur des morceaux de combustible en ignition et s'échauffe à leur contact : la combustion peut alors se produire ; elle dégage

de la chaleur et échauffe le combustible restant. Mais on comprend aisément qu'un trop grand excès d'air, loin de la faciliter, peut refroidir la masse au point de gêner et même d'arrêter la combustion complètement. Une température élevée dans le foyer, supérieure à celle qui serait strictement nécessaire, provoque la bonne combustion. Le chauffage préalable de l'air, décrit au §116, est utile à ce point de vue.

102. Grilles. — On brûle habituellement les combustibles minéraux sur une grille horizontale ou légèrement inclinée,

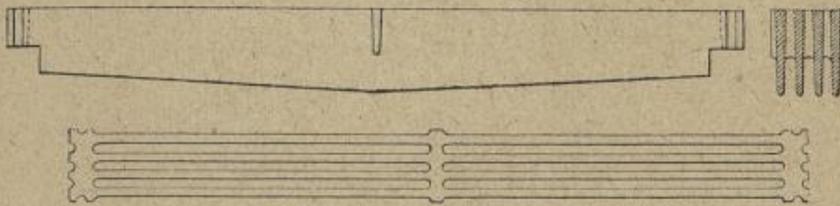


Fig. 217. — Barreau de grille en fonte.

composée de barreaux en fonte ou en fer (fig. 217 et 218). Par des chargements plus ou moins espacés, on entretient sur la grille une couche d'épaisseur à peu près uniforme.

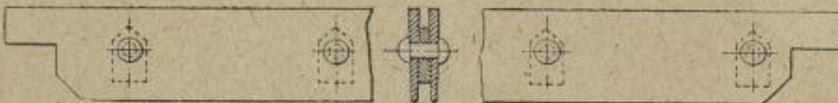


Fig. 218. — Barreau de grille en fer.

En coupe transversale, le barreau est aminci vers le bas, afin qu'un fragment engagé entre deux barreaux ne s'y coince pas, mais tombe aisément. La hauteur doit en être assez grande, pour qu'il ne fléchisse pas. De plus, une grande hauteur donne une grande surface de contact du métal et de l'air, doublement avantageuse en refroidissant le barreau et en échauffant l'air.

Les barreaux reposent par leurs extrémités sur de grosses barres transversales ou *sommiers*, encastrés dans les murs de briques qui entourent les foyers, ou fixés aux parois métalliques de la chaudière dans le cas de foyers *intérieurs*. On doit ménager des jeux suffisants pour la dilatation des barreaux et des sommiers.

Il convient de remplacer à temps les barreaux usés ou affaîssés, de manière que toute la surface de la grille soit régulière, car une dépression y fait brûler les barreaux voisins. L'épaisseur de la couche chargée sur la grille ne doit être ni trop forte, car elle dégagerait des gaz combustibles non brûlés, ni trop faible, car elle laisserait passer un excès d'air; il faut la déterminer pour chaque espèce de charbon, et suivant l'activité de la combustion. Cette épaisseur doit être maintenue à peu près uniforme : si on la laisse diminuer en un endroit, l'air y passe plus facilement et active la combustion : bientôt il se forme un vide sur la grille. Quand on bouche ce vide avec du charbon frais, la combustion se ralentit au contraire en cet endroit.

L'épaisseur de la couche est de 8 cm environ avec les houilles ordinaires : elle est moindre avec les menus maigres, et peut être plus forte avec certains combustibles en gros morceaux. Autant que possible, il convient que la grosseur des fragments ne dépasse pas celle du poing.

En plan, la grille a une forme rectangulaire. Sur un des côtés du rectangle se trouvent la porte ou les portes de chargement; sur le côté opposé est l'*autel*, mur en briques qui dépasse de 30 ou 40 cm la surface de la grille, pour maintenir le combustible. Les deux autres côtés sont formés par des murailles en briques (ou par les parois des chaudières, dans le cas de foyers *intérieurs*). Au-dessous de la grille est le *cendrier*, contenant parfois une couche d'eau pour éteindre les escarbilles.

La largeur de la grille (dimension parallèle à la façade et à l'autel) peut être quelconque; la *longueur* ne dépasse

guère 2 m pour la commodité du chargement et du nettoyage, quand la grille est horizontale. Les grilles inclinées des locomotives atteignent et dépassent la longueur de 3 m.

Autant que possible, on doit ménager entre la grille et la chaudière qu'elle chauffe un espace un peu grand, dit *chambre de combustion*, où se produit la combinaison des gaz combustibles et de l'air.

Les galettes de mâchefer, qui se forment sur les grilles, finissent par gêner et ralentir beaucoup la combustion. Il faut, au bout d'un certain nombre d'heures de marche, retirer ces mâchefers : l'opération pénible du *décrassage de la grille* ne va guère sans perte de combustible.

L'air nécessaire à la combustion entre dans le cendrier et traverse la grille; les barreaux le distribuent en nappes parallèles à travers la couche de combustible. Parfois on laisse aussi entrer un peu d'air par la porte ou par des ouvertures spéciales, au-dessus de la grille.

103. Grilles spéciales. — Les grilles ordinaires sont souvent modifiées en vue d'obtenir l'un ou l'autre des effets suivants, ou plusieurs ensemble : améliorer la combustion, éviter la fumée, charger mécaniquement le combustible, produire automatiquement le décrassage. Les descriptions qui suivent s'appliquent à des appareils choisis comme types parmi les nombreuses dispositions existantes.

Le principal inconvénient de la grille ordinaire est l'irrégularité du régime de la combustion qu'elle réalise. Qu'on suppose une grille chargée d'une couche uniforme de charbon bien allumé : la plupart des matières volatiles sont déjà dégagées, et le combustible se compose de morceaux de coke incandescents, entre lesquels l'air passe facilement. Pour ce motif, la proportion d'air est probablement trop forte; la combustion se fait bien, mais avec excès d'air. Sur ce combustible incandescent, on vient charger une couche de houille fraîche. Cette houille, souvent un peu humide, refroidit le foyer ; un certain refroidissement résulte aussi

de l'entrée de l'air pendant l'ouverture des portes de chargement. En outre, la houille, si elle est menue, obstrue les passages que l'air trouvait précédemment entre les fragments de coke. Cette houille fraîche, chauffée par la couche inférieure, commence à se sécher; puis les gaz combustibles distillent. A ce moment, il faudrait une proportion d'air assez grande pour brûler ces gaz; mais l'obstruction des passages gêne l'accès de l'air: de plus, la température des gaz n'est pas encore très élevée; donc, et par défaut d'air, et par température trop basse, la combustion se fait mal; les gaz combustibles ne se brûlent pas complètement; notamment le carbone qu'ils contiennent se sépare sans brûler, en particules noires très fines, qui colorent la fumée: la fumée peut d'ailleurs contenir des gaz combustibles invisibles, hydrocarbures et oxyde de carbone, qui sont perdus.

On peut remédier à l'insuffisance de l'air par une admission supplémentaire au-dessus de la grille, en ouvrant des ouvertures convenables dans les portes ou à côté: cette admission supplémentaire est utile dans certains cas, mais elle ne remédie pas à la seconde cause de la mauvaise combustion, température trop faible; au contraire, elle abaisse encore la température et peut être nuisible. Il serait avantageux que l'air ainsi admis en supplément fût préalablement chauffé, ce qui est rarement réalisé.

Petit à petit les gaz se dégagent, la nouvelle charge s'échauffe, et l'air retrouve des passages suffisants, de sorte qu'on revient à l'état primitif, caractérisé par une bonne combustion, mais avec excès d'air.

En résumé, la proportion d'air est alternativement trop petite et trop grande. Cet inconvénient est d'autant plus grave que les chargements sont plus rares et plus abondants. Un chauffeur habile l'atténue en chargeant fréquemment le foyer, par petites quantités à la fois, de manière à entretenir en un état presque uniforme la masse de combustible.

Un moyen simple pour améliorer la combustion sur les grilles ordinaires consiste à monter, à une certaine hauteur au-dessus du combustible, une voûte en briques réfractaires : cette disposition est très fréquente dans les foyers de locomotives (fig. 219). La voûte prend une température élevée, et chauffe l'air et les gaz que donne la distillation de la houille fraîchement chargée ; elle contribue ainsi à assurer

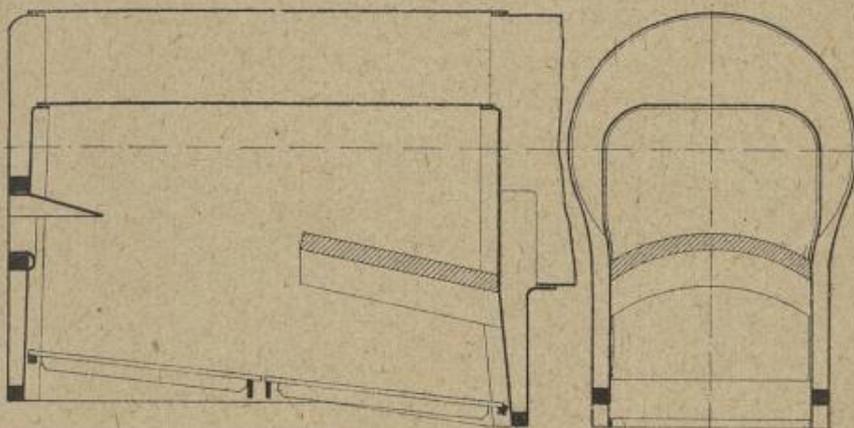


Fig. 219. — Foyer de locomotive avec voûte en briques et porte à déflecteur ; coupes longitudinale et transversale. Le déflecteur rabat vers le courant gazeux l'air qui entre par la porte de chargement.

une bonne combustion. En outre, elle brasse et mélange les filets gazeux

On ferait disparaître l'irrégularité du régime de la combustion sur les grilles ordinaires, en renversant le sens du courant gazeux, l'air frais arrivant au-dessus du combustible et les flammes sortant au-dessous de la grille, à travers les barreaux.

La grille porterait alors une couche de combustible facile à entretenir dans un état sensiblement uniforme : à la base le coke incandescent, dont les cendres tombent à travers les barreaux ; au-dessus le combustible en ignition, dégageant ses matières volatiles, et enfin à la partie supérieure,

le combustible frais, se séchant et commençant à distiller. Les chargements ne troubleraient pas ce régime régulier. L'avantage résulterait de ce que le combustible, depuis le chargement jusqu'à la chute du résidu dans le cendrier, circulerait dans le même sens que le courant gazeux, au

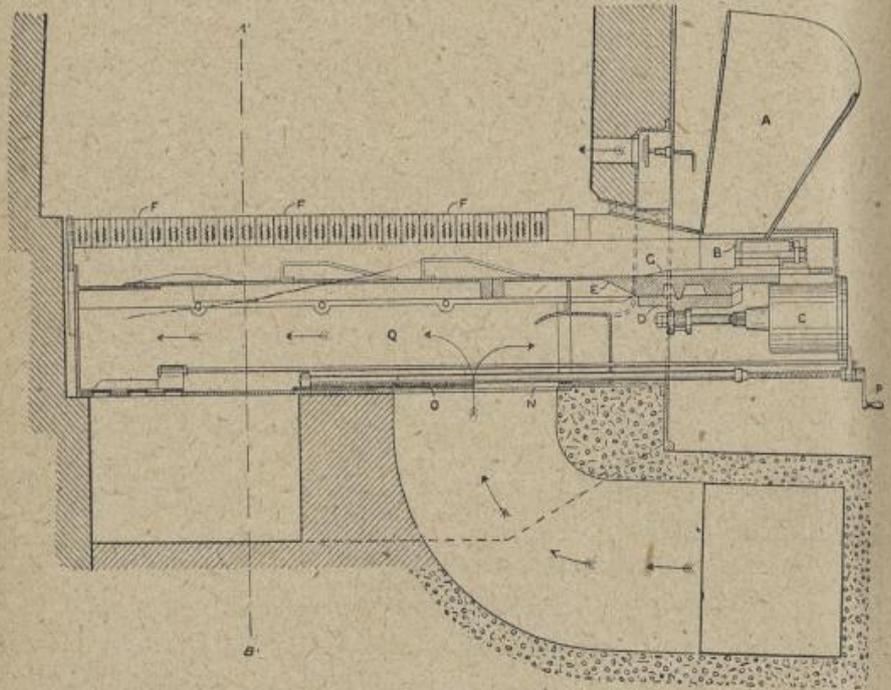


Fig. 220. — *Underfeed stoker*, coupe longitudinale.

lieu de marcher en sens opposé, comme sur une grille ordinaire.

Mais la grande difficulté pratique, dans la réalisation de ce système, vient de ce que les barreaux ordinaires, fortement chauffés, se détruiraient très rapidement. Une application partielle du système se voit dans le foyer Hawley, où les barreaux sont remplacés par des tubes à circulation d'eau; mais l'écartement en est trop grand, et il a fallu installer en dessous une grille ordinaire, sur laquelle s'achève la combustion.

On obtient l'avantage de la grille renversée, sans changer le sens du courant d'air, en chargeant le combustible frais non pas par-dessus le combustible en ignition, mais en dessous, entre la grille et la masse incandescente. C'est ce que réalisait l'ancien appareil de Duméry, où des poussoirs latéraux refoulaient le charbon sur les barreaux, en soulevant les charges précédentes.

Les dispositions plus récentes de l'*underfeed stoker* com-

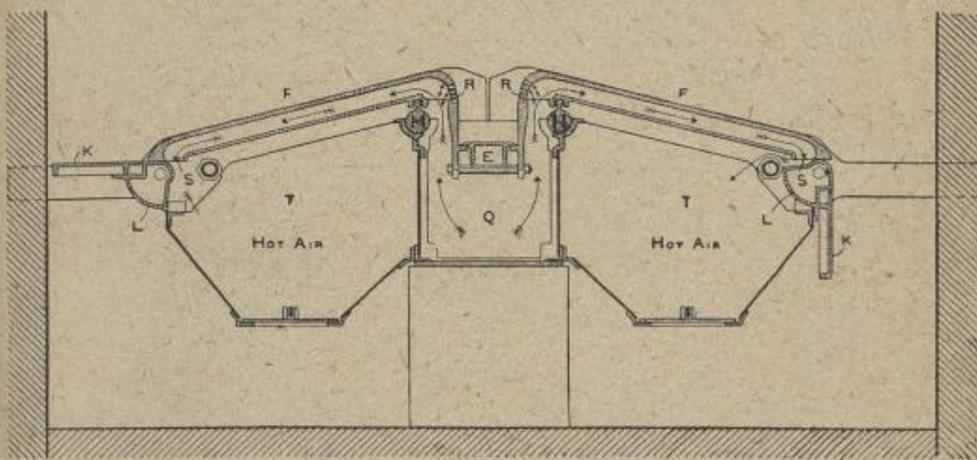


Fig. 221. — *Underfeed stoker*, coupe transversale.

Légende des figures 220 et 221 :

A, trémie ; E, Poussoir, actionné par le cylindre C ; F, barreaux creux ; K, trappes basculantes pour évacuation des résidus ; T, air chaud (*hot air*).

prennent une rigole centrale d'alimentation où le charbon avance sous l'action d'un poussoir (fig. 220 et 221) ou d'une vis d'Archimède, et se déverse des deux côtés sur des barreaux inclinés. Les figures montrent également comment l'air, soufflé en Q par un ventilateur, circule dans des barreaux creux où il s'échauffe, puis s'échappe des chambres T entre les barreaux.

On peut régulariser le régime en donnant à la grille ordinaire une forte inclinaison, un peu inférieure à celle du *talus* naturel d'éboulement du combustible employé. La masse du

combustible est alors comprise entre la grille et la surface inclinée suivant le talus d'éboulement, de sorte que l'épaisseur sur la grille va en diminuant depuis la partie supérieure jusqu'au bas : à mesure que la combustion avance, le combustible descend, le chargement se faisant à la partie supérieure; on trouve constamment de la houille fraîche en haut de la grille, puis une zone où les gaz se dégagent et enfin le coke incandescent en bas. L'air a tendance à passer surtout par la partie inférieure, où l'épaisseur est la moindre; mais tous les courants gazeux doivent être dirigés vers une région commune où ils se brassent et se confondent.

L'inclinaison de la grille est souvent combinée avec la mobilité des barreaux, commandés mécaniquement, afin d'assurer une descente régulière du combustible.

Les cendres et les escarbilles s'accumulent à la partie inférieure : parfois la grille se termine à une certaine distance du fond du cendrier, et le tas de cendres, qui s'élève jusqu'à la grille, bouche l'espace qui reste libre. La combustion doit être terminée quand le combustible arrive au bas de la grille se joindre à ce tas de déchets; d'autre part, elle ne doit pas se terminer trop tôt, pour éviter que la partie inférieure de la grille ne se découvre et ne laisse passer un grand excès d'air.

Ces grilles inclinées se prêtent bien au chargement mécanique : il suffit de verser la houille dans une trémie qui dessert la partie supérieure de la grille; on peut l'amener automatiquement dans la trémie à l'aide de norias, de vis d'Archimède, de courroies.

La grille à gradins est formée de lames plates qui sont comme des marches d'escalier, mais se recouvrant assez fortement en plan, et sans contre-marches; les cendres forment un talus sur chaque gradin. A cause des accumulations de cendres et d'escarbilles chaudes qu'ils portent, ces barreaux plats sont sujets à se brûler rapidement. Aussi ne les emploie-t-on guère que pour des

combustibles spéciaux ne produisant pas de températures très élevées, comme la sciure de bois. Quelquefois on a placé à l'intérieur des tubes à circulation d'eau pour les rafraîchir.

Dans la grille Donneley, le combustible est compris entre deux grilles verticales parallèles voisines, l'une formée de barreaux ordinaires, l'autre de tubes d'eau ; il se charge par la partie supérieure.

On obtient aussi l'avancement méthodique et régulier du combustible sur des grilles peu inclinées, en donnant aux barreaux des mouvements convenables. En numérotant les barreaux successifs, perpendiculaires à la façade du foyer, les barreaux de numéro impair forment un groupe relié à un mécanisme de commande, et les barreaux pairs un second groupe commandé de même, ou bien immobile.

Avec une forme convenable des barreaux, combinée avec une certaine inclinaison de la grille, on pousse le combustible vers le fond du foyer, sans le ramener en arrière pendant le mouvement de retour.

Le chargement se fait par une trémie placée au-dessus de la partie antérieure de la grille et peut être automatique. Lorsqu'un fragment arrive à la partie postérieure de la grille, il doit être entièrement brûlé, car un instant après il est rejeté dans le cendrier. D'autre part, il ne faut pas que la grille se dégarnisse trop tôt, parce que les barreaux non chargés laisseraient passer un grand excès d'air. La vitesse de commande des barreaux, l'importance du chargement, et le tirage, doivent donc être soigneusement réglés, de manière à se correspondre ; et un nouveau réglage est nécessaire si on veut passer d'un régime de combustion à un autre plus ou moins actif.

Les mouvements des barreaux gênent la formation des galettes de mâchefer, et dégrèssent automatiquement la grille.

L'ancienne grille Taillefer, dont le principe a été souvent

reproduit, se compose d'une sorte de chaîne de Galle très large passant sur deux poulies, qui lui donnent un mouvement direct de translation. Le combustible est chargé à une extrémité et les cendres sont rejetées à l'autre. L'épaisseur initiale de la couche de combustible est réglée par une vanne plus ou moins levée. La vitesse d'avancement est également réglable.

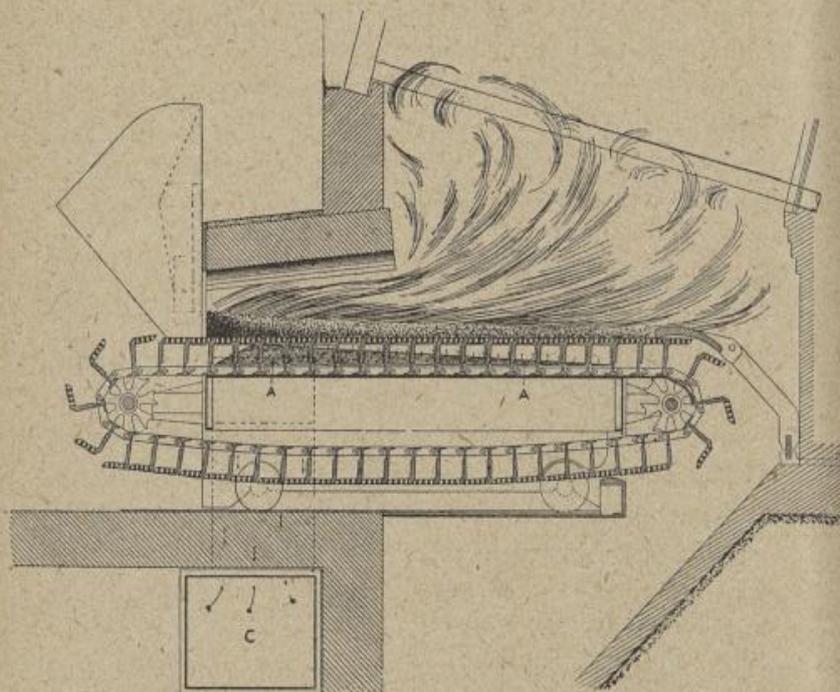


Fig. 222. — Grille à chaîne de l'*underfeed stoker Co.*

Des écrans placés sous la grille ou d'autres dispositifs équivalents empêchent le passage d'un grand excès d'air à travers la partie de la grille la plus éloignée de la façade de la chaudière, partie de la grille qui ne porte plus qu'une couche mince.

Les barreaux de la grille à chaîne de la figure 222 forment une série de conduits transversaux dans lesquels l'air pénètre latéralement par des ouvertures A,A de plus en

plus petites, ouvertures d'ailleurs réglables par la manœuvre d'un registre.

Une voûte en briques recouvre la partie antérieure de la grille.

Certaines grilles sont munies de palettes mécaniques qui projettent le charbon en différents points de la surface, comme le fait la pelle du chauffeur.

On conçoit que, bien réglées, les grilles mécaniques donnent de bons résultats ; tandis que mal surveillées, elles peuvent devenir inférieures aux grilles ordinaires chargées à la main.

Sur une grille à chaîne, par exemple, on doit régler simultanément la vitesse de translation, l'épaisseur de la couche de houille à l'entrée, et l'intensité du triage, ce qui revient à régler en proportion convenable les débits de combustible et d'air.

Les déchets de la combustion sont reçus par des trémies, qui les déversent dans des wagonnets circulant sur une voie établie en contre-bas des chaudières. Parfois on recueille séparément les fragments qui traversent les barreaux au voisinage des points de chargement, fragments qui contiennent beaucoup d'éléments combustibles.

Aux wagonnets on substitue parfois des transporteurs à mouvement continu ; on entraîne même, dans une conduite, par l'air comprimé, les fragments préalablement broyés.

104. Appareils divers de combustion. — Au lieu de brûler directement la houille dans le foyer qui doit produire la chaleur, on peut au préalable s'en servir pour fabriquer des gaz combustibles, carbures d'hydrogène et oxyde de carbone, dans des appareils dit *gazogènes*, où l'air traverse une masse assez épaisse de combustible. La chaleur produite par la formation de l'oxyde de carbone est en grande partie perdue : on peut l'utiliser à décomposer une certaine proportion de vapeur d'eau, en hydrogène et en oxygène, qui

forme dans le gazogène de nouvelles quantités d'oxyde de carbone.

Cette production de combustible gazeux est commode pour certains emplois : il alimente dans de bonnes conditions certains fours métallurgiques ; il fait fonctionner des moteurs à gaz ; mais pour la simple production de la vapeur, ce système ne présente pas d'avantages, car il exige des installations coûteuses et entraîne une perte de chaleur.

L'emploi du gaz sous les chaudières est d'ailleurs commode ; il suffit de le faire arriver avec une proportion d'air convenable dans des foyers en briques, qui se trouvent maintenus à une température assez élevée pour l'inflammation et la combustion complète. On règle facilement les proportions d'air et de gaz.

Souvent on emploie dans ces conditions le gaz combustible produit par les hauts fourneaux qui servent à la fabrication de la fonte.

Au lieu de gazéifier le combustible solide, si on le broie en poudre très fine, cette poudre, entraînée par un courant d'air, s'enflamme et brûle comme un jet de gaz. Pour cet emploi, la houille est au préalable desséchée, et la pulvérisation doit être poussée très loin.

On amène la poudre de houille aux brûleurs à l'aide d'un courant d'air produit par un ventilateur : il convient que la proportion d'air soit fort inférieure à celle nécessaire pour la combustion, pour éviter tout danger d'explosion dans la conduite.

Un des appareils employés (système Pruden) comprend une trémie, dans laquelle est amené le charbon pulvérisé et qui le verse sur une vis, qui le transporte dans un *mélangeur* : ce mélangeur reçoit également un courant d'air, qui entraîne le combustible dans le *carburateur*, où pénètre un second courant d'air. Le carburateur se termine par une *tuyère*, par laquelle s'échappe le combustible et où se produit l'inflammation. Un supplément

d'air, nécessaire pour la combustion, pénètre autour de la tuyère.

Le foyer doit être muni de parois en briques et d'une voûte. Pour la conservation des chaudières et des parois en briques les flammes ne doivent pas être trop longues, et la chambre de combustion doit être très largement établie.

En regard des avantages évidents et importants de ce mode de combustion, on considérera les dépenses nécessaires pour le broyage de la houille et, accessoirement, pour le nettoyage fréquent des carneaux, où se déposent les cendres fines, résidus de la combustion¹.

105. Combustibles spéciaux. — Certains combustibles exigent des appareils spécialement appropriés. Les coques et les anthracites très menus tombent entre les barreaux des grilles ordinaires. On les charge sur des grilles spéciales ayant des fentes très étroites, ou sur des plaques percées de petits trous, avec une soufflerie en dessous.

Les copeaux et les déchets de bois se brûlent dans des cuves en maçonnerie placées auprès des chaudières; le chargement se fait par l'ouverture supérieure de la cuve; l'air y pénètre latéralement près du fond, et un carneau conduit les gaz sous la chaudière.

On brûle aussi, sur des grilles à gradins, la *tannée*, ou les écorces broyées qui ont servi à la préparation du cuir; elle renferme encore beaucoup d'eau (près de la moitié du poids) après dessiccation à l'air.

106. Combustibles liquides. — Les huiles lourdes, résidus de la distillation des pétroles bruts, ont un pouvoir calorifique d'environ 10.500 calories. Pendant longtemps, ces résidus étaient considérés comme de valeur minime, et

1. Un article de M. Drouot, dans *La Technique moderne* (octobre 1920, p. 407) donne de nombreux détails sur l'emploi du charbon pulvérisé. D'importants mémoires sur la question ont été présentés au *Congrès de chauffage industriel*, tenu à Paris en 1923, et figurent dans le compte rendu de ce Congrès.

on ne les employait que dans le voisinage des lieux de production, mais leurs précieuses qualités les font rechercher aujourd'hui comme combustibles pour les chaudières, et seul leur prix élevé en limite l'emploi. Ces huiles sont désignées par les noms de mazout, astakti, pacura. Les goudrons de houille donnent aussi des produits analogues. D'après le pouvoir calorifique, un kg d'huile lourde pourrait remplacer 1,3 à 1,4 kg de houille;

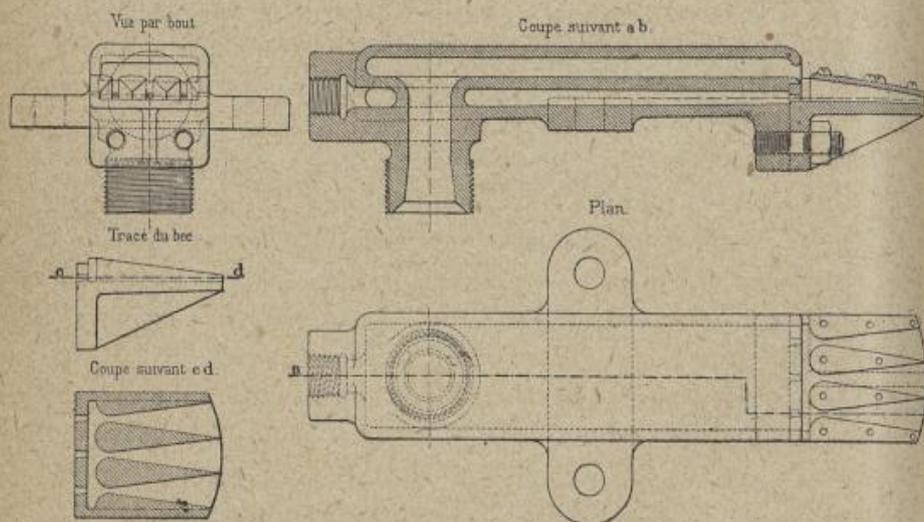


Fig. 223. — Brûleur à mazout de locomotives des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée.

L'absence de déchets et la facilité du réglage de la combustion peuvent donner le rapport de 1 à 1,5 dans cette substitution.

C'est avant tout pour le chauffage des chaudières marines que ce combustible est commode; viennent ensuite les locomotives, et enfin les chaudières fixes. On peut toutefois obtenir une meilleure utilisation en le brûlant dans les cylindres de moteurs à combustion interne¹.

1. On trouvera de nombreux dessins de brûleurs dans *Le pétrole, son utilisation comme combustible*, par Masméjean et Béréhère.

Pour assurer la combustion complète du pétrole, on le pulvérise au contact de l'air et on brûle le mélange dans une chambre en briques réfractaires assez grande pour que la combustion soit complète avant l'arrivée des gaz au contact des surfaces de chauffe.

La pulvérisation s'obtient en refoulant le pétrole avec une pompe donnant une pression de 5 kg par cm^2 , ou en l'entraînant par un jet de vapeur ou d'air comprimé. L'emploi direct de la vapeur est le moyen le plus simple; la substitution de l'air à la vapeur se justifie quand les chaudières doivent être alimentées à l'eau distillée.

Le brûleur peut donner un jet circulaire ou bien une flamme plate.

On estime la dépense de vapeur, pour la pulvérisation, à 3 à 5 p. 100 de la quantité produite : avec les appareils mal réglés, la dépense est beaucoup plus forte.

Certains brûleurs sont entourés d'une gaine en matériaux réfractaires, qui chauffe le jet par rayonnement.

Le brûleur appliqué à quelques locomotives des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée (fig. 223) est à flamme plate. Il est alimenté par la vapeur surchauffée. Le mazout est réchauffé par la vapeur, légèrement dans le tender, et plus fortement près du brûleur. Des expériences exécutées avec cet appareil ont donné les résultats suivants : la température des gaz de la combustion, du foyer à la boîte à fumée, a varié de 1700° à 300° ou 375° . La proportion de gaz carbonique en volume était de 9 à 11 p. 100, celle d'oxygène libre de 7 à 5 p. 100. Avec ce combustible, une proportion assez forte d'oxygène se combine à l'hydrogène et forme de la vapeur d'eau. Le rendement de la chaudière, calculé sur le pouvoir calorifique minimum du combustible, et sans déduction de la vapeur consommée par le brûleur, a été de 75 p. 100. Le brûleur dépensait 3,5 p. 100 de la vapeur produite.

Le brûleur Gènevet (fig. 224) reçoit l'huile minérale d'un

réservoir, où elle est chauffée par la vapeur; l'huile traverse un filtre avant d'arriver à la chaudière.

107. Tirage. — Le tirage est dit *naturel* lorsqu'il est provoqué seulement par une cheminée, et *forcé* lorsque le courant gazeux est activé par des ventilateurs ou par des jets de vapeur ou d'air comprimé. La mesure du tirage est donnée par la différence entre la pression de l'air avant l'entrée dans le foyer et au point où il quitte la chaudière, c'est-à-dire au pied de la cheminée. On observe aisément cette différence à l'aide d'un manomètre à eau, dont une branche s'ouvre librement au dehors et dont l'autre pénètre dans le conduit de fumée. Elle s'exprime en millimètres d'eau (correspondant chacun à 1 kg par m^2). Le tirage naturel, produit par les cheminées usuelles, atteint 10 à 15 mm; avec le tirage forcé, on dépasse 150 mm.

Pour le tirage naturel, la section d'une cheminée doit être d'environ 0,2 m^2 par m^2 de grille, soit $1/5$, avec une hauteur de 30 à 40 m au moins. Avec le tirage d'une telle cheminée, on arrive à brûler convenablement 80 à 120 kg de houille ordinaire par m^2 de grille et par heure. Une température de 200° à 300° des gaz dans la cheminée produit un tirage énergique, mais 150° suffisent encore. On modère le tirage par la manœuvre d'un registre installé dans le carneau auprès de la chaudière. Pour éviter lors des chargements, par suite de l'ouverture des portes du foyer, l'entrée d'un excès d'air froid nuisible, il est bon, pendant cette opération, de réduire l'ouverture du registre; quelquefois on conjugue mécaniquement le registre et la porte du foyer, de telle sorte que le registre s'abaisse quand on ouvre la porte.

Une disposition ancienne, quelquefois reproduite, consiste à commander le registre par un régulateur qu'actionne la pression de la chaudière, de sorte qu'il s'abaisse quand la pression atteint la limite fixée et s'ouvre davantage quand la pression baisse.

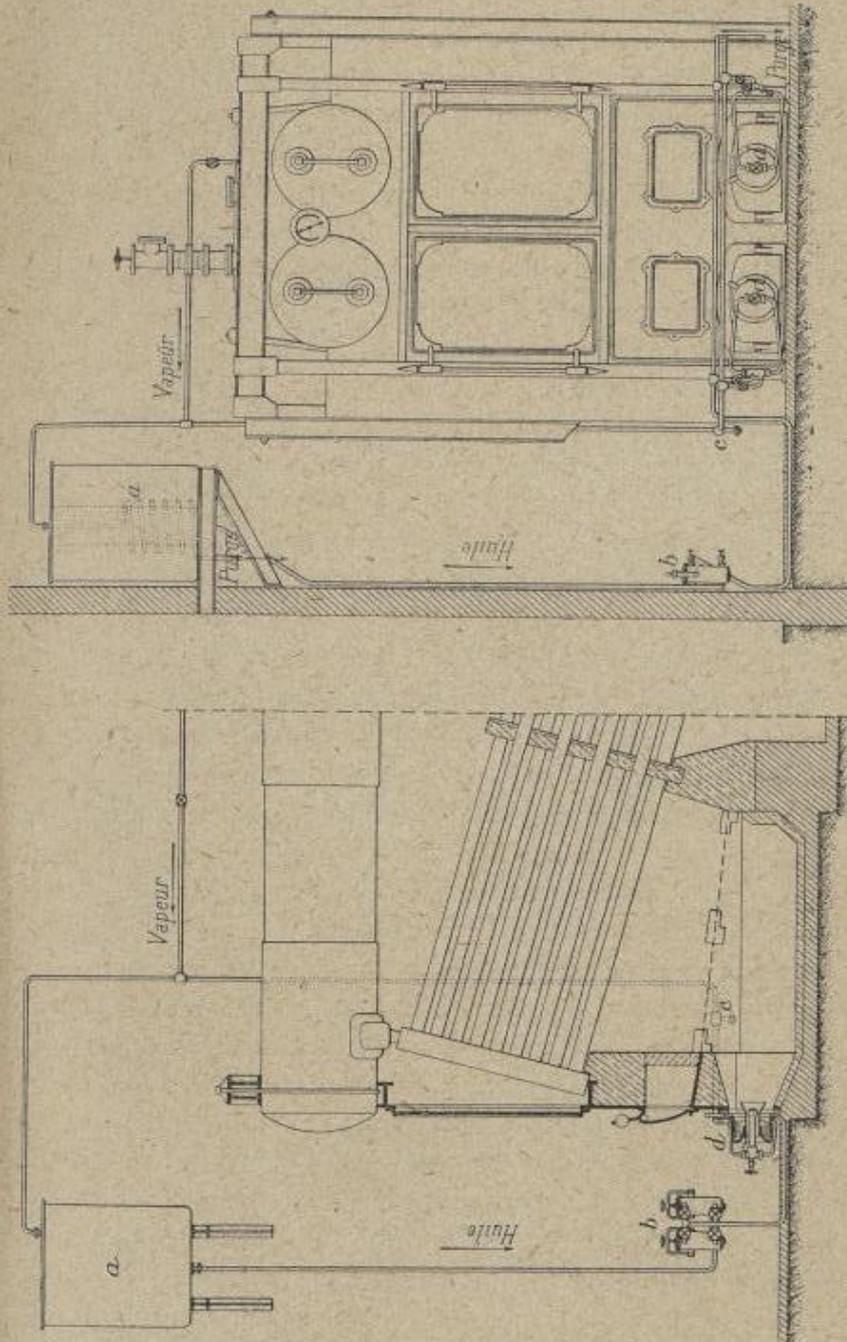


Fig. 224. — Brûleur Gènevet, sous une chaudière Babcock et Wilcox.

Souvent la lente dans laquelle joue le registre donne lieu à une rentrée d'air importante, qui contrarie le tirage. On évite cet inconvénient en installant au-dessus de cette fente une gaine en tôle, dans laquelle se loge le registre ouvert. Cette gaine n'a d'autre ouverture extérieure qu'un petit trou pour la tringle de manœuvre.

Lorsqu'on veut brûler par m^2 de grille et par heure une quantité de houille notablement supérieure à 420 kg, il est nécessaire de recourir au tirage forcé. Ce tirage forcé est obtenu soit par *aspiration* d'air dans la cheminée, soit par *insufflation* sous la grille.

Dans les machines sans condensation, la vapeur d'échappement, envoyée dans une *tuyère* placée dans l'axe de la cheminée, produit un tirage énergique par aspiration, qui permet, dans la locomotive, des combustions de plus de 500 kg de houille par m^2 de grille et par heure. Souvent la tuyère d'échappement a une section variable à volonté, qui permet d'agir sur l'intensité du tirage. La vapeur d'échappement est employée de même dans les locomobiles.

A la vapeur d'échappement on peut substituer des jets de vapeur prise directement dans la chaudière, mais seulement d'une manière occasionnelle et pour une légère augmentation du tirage, sous peine de dépenser de ce chef beaucoup de vapeur. Ces jets de vapeur agissent par aspiration dans la cheminée (souffleur des locomotives) et par insufflation sous les grilles : l'air refoulé est alors mélangé d'un peu de vapeur d'eau, ce qui n'a pas d'inconvénients.

Les ventilateurs agissent le plus souvent par insufflation : il suffit de diriger sous la grille, dans un cendrier clos, l'air qu'ils refoulent. Lorsqu'on ouvre la porte du foyer pour le chargement, les flammes sortent vers le chauffeur, à moins qu'on n'arrête, par la manœuvre d'un registre, le courant envoyé dans le cendrier. En insufflant l'air dans une chambre de chauffe complètement close, aucun retour de flamme n'est à craindre, mais l'air froid pénètre abondamment dans les foyers quand la porte est ouverte.

Le débit en volume d'un ventilateur aspirant doit être plus grand que le débit d'un ventilateur soufflant à cause de la température plus élevée des gaz qui le traversent. A pression constante, le volume d'une masse gazeuse est proportionnel à sa température absolue (centigrade plus 273).

Au lieu de souffler ou d'aspirer tout l'air qui traverse le foyer par un ventilateur, on peut en diriger le refoulement dans une tuyère disposée pour entraîner les gaz de la combustion, par une disposition qui présente une analogie de principe avec l'échappement des locomotives. Dans le système Prat (fig. 225), cette tuyère est annulaire et suivie d'une cheminée divergente, de dimensions beaucoup moindres que la cheminée ordinaire à tirage naturel équivalent.

Dans une disposition récente du tirage Prat (fig. 226), le ventilateur aspire une partie des gaz chauds à évacuer; il est placé à l'intérieur de la cheminée, pour éviter aux gaz les coudes et brusques changements de section.

Lorsque le tirage est produit par l'aspiration d'une cheminée ou d'un ventilateur, l'air extérieur est appelé dans le courant des gaz chauds par toutes les ouvertures et fissures de massif de la chaudière; cet appel d'air devient très abondant quand la porte du foyer est ouverte. Avec le tirage soufflé, au contraire, la pression à l'intérieur du massif dépasse la pression extérieure, et les gaz chauds sortent par la porte ouverte. Le tirage



Fig. 225. — Tirage par ventilateur, système Prat. L'air refoulé par le ventilateur s'échappe par une ouverture annulaire en entraînant au centre les gaz de la combustion.

équilibré maintient la chambre de combustion, au-dessus de la grille, exactement à la pression atmosphérique extérieure, de sorte que la porte peut être ouverte sans donner lieu à aucun passage d'air ou de gaz chaud. Cet effet est obtenu par la combinaison d'un ventilateur soufflant sous la grille avec l'aspiration d'une cheminée : la

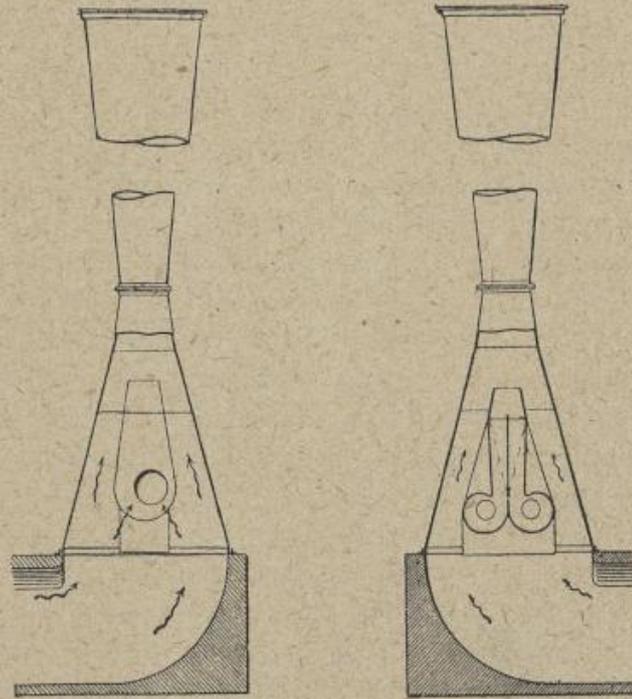


Fig. 226. — Tirage Prat par ventilateur et tuyère, disposition dite *Mix*. Types à un ventilateur et à deux ventilateurs.

dépression à la base de la cheminée ne correspond plus qu'à la circulation des gaz dans les carneaux ou les tubes de la chaudière.

Des appareils automatiques, sensibles aux variations de pression, règlent le débit du ventilateur et l'aspiration de la cheminée (par la manœuvre du registre) de manière à maintenir l'équilibre.

Le tirage, naturel ou artificiel, produit le travail nécessaire pour la circulation de l'air dans le foyer, sous la chau-

dière et dans la cheminée. Par la combustion, cet air se charge des éléments du combustible, sauf les cendres, de sorte que tout le poids brûlé se trouve élevé par le tirage jusqu'à la partie supérieure de la cheminée.

108. Utilisation de la chaleur. — La chaleur, dégagée dans le foyer par la combustion, chauffe, puis vaporise l'eau contenue dans la chaudière. La transmission se fait, à travers la tôle, par la *surface de chauffe* en contact avec les gaz chauds¹. Cette surface de chauffe doit être assez étendue pour refroidir suffisamment les gaz.

Pour apprécier le fonctionnement de la surface de chauffe des chaudières, il faut savoir à quelle quantité de chaleur elle donne passage. Le nombre des calories qui traversent un mètre carré de cette surface, en une seconde, varie beaucoup suivant l'endroit de la chaudière considéré : auprès de la grille, où se produit la combustion, cette quantité est relativement grande ; elle est beaucoup plus faible à l'extrémité de la chaudière, voisine de la cheminée, où les gaz de la combustion sont déjà très refroidis. A ce point de vue on distingue la surface de chauffe *directe* qui se trouve placée en vue du foyer même, c'est-à-dire non seulement en contact avec les gaz les plus chauds, mais sous l'action de la chaleur rayonnante dégagée par la combustion, et la surface *indirecte*, parcourue par les gaz qui quittent le foyer et se rendent à la cheminée. Un mètre carré de surface directe reçoit, en une heure, plus de chaleur qu'un mètre carré de surface indirecte. Dans la surface indirecte, il y a de grandes inégalités d'un point à l'autre, le mètre carré devenant de moins en moins efficace à mesure qu'il est baigné dans des gaz moins chauds².

1. Quelquefois on compte la surface de chauffe de l'autre côté de la tôle, qui est en contact avec l'eau, mais la première manière est préférable. Avec les chaudières formées de tubes de petit diamètre la différence entre ces deux évaluations est importante ; par exemple un tube de 40 mm de diamètre intérieur et de 45 mm à l'extérieur, long de 4 m, a une surface de 0,503 m² à l'intérieur et de 0,563 m² à l'extérieur.

2. Consulter à ce sujet l'étude de M. Kammerer mentionnée dans la note du § 118, p. 382.

Du nombre de calories on passe facilement au poids vaporisé par seconde ou par heure. Par exemple, pour vaporiser un kg d'eau à 180°, il faut 479 calories. Si l'eau doit être en outre chauffée de 15° à 180° dans la chaudière, il faut 646 calories par kg.

Quand on parle de la vaporisation d'une chaudière par mètre carré et par heure, il s'agit d'une moyenne entre des nombres bien différents. On trouve souvent, pour les chaudières à tirage naturel dans les conditions usuelles, une transmission moyenne de 3 calories par m² et par seconde, ce qui correspond à la vaporisation par heure, à la température de 180°, de 16 à 17 kg d'eau prise à 15°. Dans des chaudières de locomotives, on arrive à des vaporisations moyennes, par m² de surface de chauffe, dépassant 60 kg à l'heure.

Plusieurs conditions sont nécessaires pour le bon fonctionnement des surfaces de chauffe des chaudières. Il faut d'abord qu'elles soient effectivement léchées par le courant des gaz chauds. Les deux faces de la tôle doivent être nettes : du côté des gaz, un dépôt de suie ralentit beaucoup la transmission de la chaleur : du côté de l'eau, les dépôts solides, qui se forment sur le métal par suite des sels calcaires que l'eau abandonne, agissent de même. Mais ces dépôts intérieurs ont un autre inconvénient bien plus grave : dès que leur épaisseur dépasse quelques millimètres, la température de la tôle s'élève notablement, et c'est une cause de détérioration. Tant que le métal est en contact avec l'eau, il reste à une température qui ne dépasse pas beaucoup celle de l'eau : par exemple dans les parties les plus chauffées, à 250° environ, avec l'eau à 200° ; cette température n'est, d'ailleurs, pas tout à fait la même dans toute l'épaisseur du métal, et elle augmente avec cette épaisseur.

Les mêmes effets, avec une intensité plus grande, sont produits par les dépôts graisseux et visqueux qui peuvent quelquefois se former sur les tôles, quand les eaux d'alimen-

tation sont chargées de matières grasses, sucrées ou amidonnées.

Il y a aussi une autre cause, bien connue, qui peut produire la surchauffe des tôles et la réduction de la quantité de chaleur transmise, la présence de vapeur à la place de l'eau, par suite de l'abaissement excessif du niveau : la tôle prend alors une température moyenne entre celles des gaz chauds et de la vapeur (par exemple 1.500° et 200° , soit une moyenne de 850°). Aussi toute la surface de chauffe doit-elle être refroidie par l'eau ; les appareils surchauffeurs de vapeur, auxquels, par leur destination même, cette règle n'est pas applicable, ne doivent pas être placés en contact avec les gaz les plus chauds.

C'est un phénomène digne de remarque que ce faible échauffement des tôles en contact d'un côté avec des gaz très chauds et de l'autre côté avec de l'eau à une température relativement basse. Il indique que la transmission de la chaleur des gaz à la tôle est difficile, mais qu'au contraire la chaleur traverse facilement la tôle et se communique aisément à l'eau. Mais lorsque cette sortie de la chaleur est gênée, soit par des dépôts intérieurs, soit par l'absence de l'eau, la tôle s'échauffe indûment.

Le nombre des calories transmises par m^2 et par heure ne paraît pas beaucoup influencé par la nature du métal (fer ou cuivre) ni même par son épaisseur : toutefois la grande épaisseur a l'inconvénient d'exposer le métal à prendre une température moyenne plus élevée. Ce nombre de calories dépend de divers facteurs, et notamment de la différence de température entre les gaz et l'eau ; de sorte que, pour une même température des gaz, il augmente si l'eau est plus froide. C'est ce qui a lieu dans les réchauffeurs d'eau d'alimentation. L'eau froide, introduite directement dans une chaudière ordinaire, s'échauffe toujours aux dépens de la chaleur du foyer, mais en se mélangeant à l'eau déjà chaude ou à la vapeur, de sorte que la température de l'eau qui baigne les tôles ne descend guère au-

dessous de la température de vaporisation. Sur les derniers mètres carrés de la surface de chauffe d'une chaudière ordinaire, contenant de l'eau à 180° , et chauffés par des gaz à 300° , la transmission est peu active : elle augmente si l'eau est à 20° , l'écart des températures des deux côtés de la tôle passant de 120° à 280° .

Le réchauffeur permet en théorie de réaliser le *chauffage méthodique* de l'eau, depuis la température initiale jusqu'à celle de vaporisation, l'eau circulant en sens contraire du courant gazeux. La vaporisation se fait ensuite dans la chaudière proprement dite, à température constante. Beaucoup de réchauffeurs n'ont pas un fonctionnement aussi satisfaisant : ils élèvent la température de l'eau d'une certaine quantité, par exemple de 20° à 80° , en utilisant de la chaleur autrement perdue ; mais cette eau à 80° est envoyée dans la chaudière, au lieu d'être chauffée méthodiquement jusqu'à la température de vaporisation. Avec les dispositions usuelles, la vapeur ne se forme jamais dans le réchauffeur.

L'étendue de la surface de chauffe des chaudières s'exprime souvent en fonction de la surface de la grille. Mais la même surface de grille peut produire des quantités de chaleur bien différentes. Deux grilles de même étendue brûleront l'une 100 kg par heure et m^2 au tirage naturel, et l'autre 300 kg au tirage forcé ; la seconde est en réalité l'équivalent d'une grille trois fois plus grande que la première, avec la même combustion, et par conséquent la surface de chauffe devrait être trois fois plus grande pour utiliser de même la chaleur produite. Quand on veut tirer du combustible le meilleur parti possible, la surface de chauffe doit être étendue. Au contraire, si l'on recherche la légèreté et le faible encombrement, on sacrifie la partie la moins active de la surface de chauffe.

En général, dans les chaudières fixes marchant au tirage naturel, la surface de chauffe est de 30 à 40 fois la surface de grille. Dans les chaudières à tirage forcé des locomotives,

ce rapport est souvent de 75 à 80, ce qui n'est pas une augmentation proportionnelle à la quantité de combustible brûlé.

Un dernier point sur lequel il est utile d'appeler l'attention est la division d'une surface de chauffe totale en surface directe et indirecte. Comme la production horaire du m^2 de surface directe est beaucoup supérieure à la production moyenne par m^2 de la surface indirecte, on pense quelquefois qu'il y a intérêt à augmenter la première aux dépens de la seconde : au seul point de vue de la transmission de la chaleur, cette répartition n'a pas grande importance : ce qui n'est pas pris par la surface directe est reçu par la surface indirecte, et le total ne varie guère. L'augmentation de surface directe peut être intéressante à un autre point de vue, car elle se concilie avec une grande chambre de combustion au-dessus de la grille, favorable à un bon emploi du combustible. Inversement, une chaudière placée très près de la grille peut nuire à la production de chaleur, en refroidissant les gaz avant leur combustion complète.

109. Classification des chaudières. — Les chaudières se rangent pour la plupart en trois grandes catégories : les chaudières à *grands corps*, où l'eau est contenue dans des récipients en tôle relativement vastes ; les chaudières à *tubes de fumée*, où les gaz chauds traversent des tubes baignés dans l'eau¹ ; les chaudières à *tubes d'eau*, où les tubes sont chauffés par l'extérieur. Quelques générateurs ne rentrent pas uniquement dans une de ces trois catégories : notamment on combine les tubes d'eau et les grands corps.

Les principaux éléments à considérer dans une chaudière sont la surface de grille ; la surface de chauffe ; la pression maxima. Il est intéressant de noter la capacité de la

1. On appelle souvent ces chaudières *tubulaires*, mais cette expression est devenue ambiguë, depuis la construction des chaudières également formées de tubes, mais avec la disposition inverse, eau dans les tubes.

chaudière, divisée en volume d'eau et volume de vapeur, la surface du plan d'eau, la variation possible du volume de l'eau.

110. Grands corps et foyers extérieurs. — La chaudière à grand corps la plus simple est un cylindre, à fonds hémisphériques ou bombés ; cette forme ne donne qu'une faible surface de chauffe pour un grand volume. Le cylindre est horizontal ou vertical ; toutefois la chaudière verticale, qui servait à utiliser les flammes perdues des fours à puddler et à réchauffer, n'est plus employée.

On augmente la surface de chauffe des générateurs cylindriques en leur ajoutant des cylindres de petit diamètre qu'on appelle *bouilleurs*. La liaison du corps principal et du bouilleur se fait à l'aide de *cuissards* à deux collerettes embouties, formés souvent d'une tôle soudée sur elle-même. Les bouilleurs sont destinés à être toujours pleins d'eau et sont chauffés sur toute leur surface : ils ne doivent donc présenter aucune partie pouvant former une *chambre de vapeur*. Si le bouilleur est incliné, il doit se trouver un *cuissard* à l'extrémité la plus élevée.

La chaudière à bouilleurs était fort répandue en France, avant l'emploi des générateurs à tubes d'eau.

Une disposition fréquente consiste à chauffer directement les bouilleurs au-dessus de la grille (fig. 227), en exposant au *coup de feu* la partie la plus facile à remplacer.

Parfois c'est le corps principal qu'on chauffe directement, en plaçant les bouilleurs dans les carneaux (fig. 228). On peut faire entrer l'eau d'alimentation à l'extrémité du bouilleur la moins chauffée et réaliser un chauffage méthodique par circulation de l'eau en sens contraire du mouvement des gaz. Les bouilleurs sont parfois latéraux (fig. 229). Les derniers bouilleurs ne sont que des réchauffeurs.

Les gaz sont guidés par des murettes et des voûtes en briques. Les fissures de cette maçonnerie permettent des passages directs de gaz chauds vers la cheminée, ou

des rentrées d'air qui refroidissent inutilement le courant ¹.

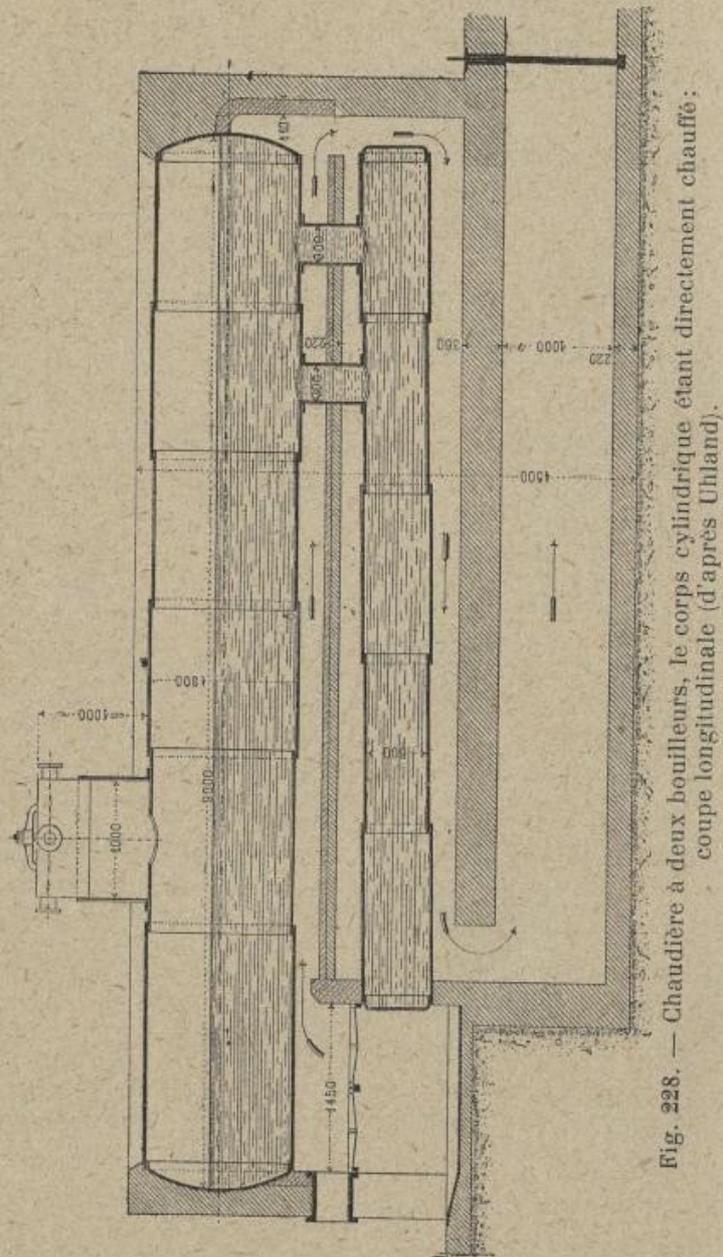


Fig. 228. — Chaudière à deux bouilleurs, le corps cylindrique étant directement chauffé: coupe longitudinale (d'après Uhland).

¹. Ces rentrées d'air se constatent par l'analyse des gaz auprès de l'autel et à la base de la cheminée.

Les grands massifs de maçonnerie ne s'échauffent que lentement et absorbent une forte quantité de chaleur : ils ne conviennent donc pas si les allumages sont fréquents et lorsqu'on veut une mise en pression rapide. Par contre, ils maintiennent la chaudière chaude pendant des arrêts de quelques heures. Tout compte fait, la déperdition de chaleur par les maçonneries paraît assez considérable.

Il faut démolir les massifs pour examiner sérieusement

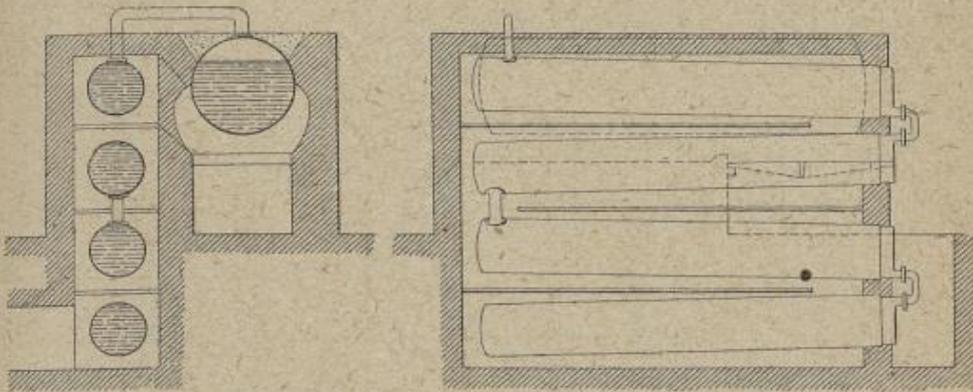


Fig. 229. — Chaudière avec bouilleurs-réchauffeurs latéraux : les gaz chauds circulent d'abord sous le corps principal, puis successivement autour de chaque bouilleur.

l'extérieur de toutes les tôles : la dépense et la gêne qui en résultent font souvent espacer par trop ces examens.

411. Grands corps et foyers intérieurs. — La chaudière la plus simple à foyer intérieur est celle de *Cornouailles* (fig. 230). Le foyer est placé à l'entrée d'un cylindre, qui traverse de part en part la chaudière. Les gaz chauds circulent ensuite à l'extérieur du grand corps cylindrique. La surface de chauffe est à peu près la même que celle d'une chaudière à foyer extérieur, munie d'un bouilleur de même diamètre que le foyer intérieur.

La chaudière de *Lancashire* a deux foyers disposés parallèlement à l'intérieur d'un cylindre unique, comme le montre

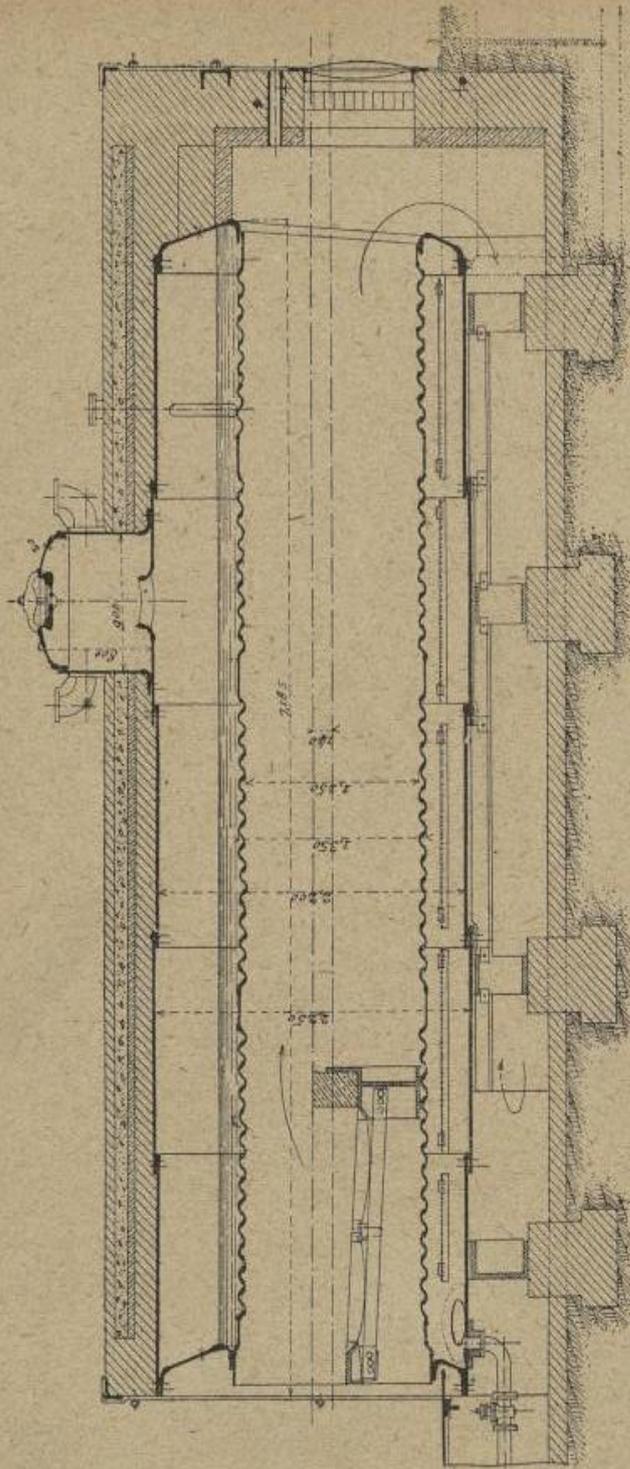


Fig. 230. — Chaudière de Cornouailles à foyer intérieur ondulé, construite par Knaudt, pour une pression effective de 12 kg par cm^2 . Coupe longitudinale.

la figure 231 du côté gauche (il faudrait supposer les deux foyers cylindriques prolongés jusqu'à l'extrémité de droite, au lieu d'être réunis en un tube unique).

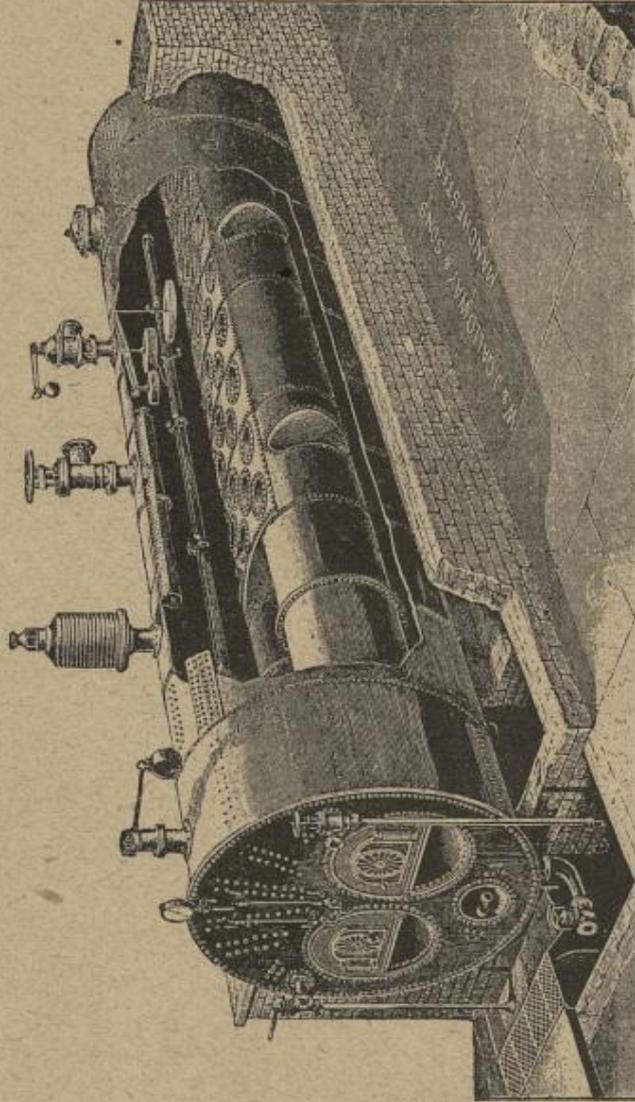


Fig. 231. — Chaudière Galloway.

Dans la chaudière *Galloway* (fig. 231) les tubes-foyers se réunissent en un seul, à section déprimée, que traversent de nombreux tubes tronconiques (fig. 232).

En comparant des chaudières équivalentes, à foyers intérieurs et à foyers extérieurs, on voit que l'installation des premières est plus simple et qu'elles exigent moins de maçonneries; les pertes de chaleur autour du foyer sont réduites; les courts-circuits des gaz à travers les maçonneries sont moins à craindre. Par contre, la largeur de la grille est souvent trop restreinte; il en est de même de la



Fig. 232. — Tube Galloway.

hauteur libre au-dessus de la grille : il est vrai que les gaz trouvent une chambre de combustion au delà de l'autel. Bonnes avec certains combustibles, tels que les houilles flambantes, ces chaudières se prêtent mal à l'emploi des menus maigres.

L'alimentation doit être l'objet d'une attention soutenue, car l'abaissement du plan d'eau laisse le ciel du foyer exposé à la chaleur la plus vive.

Quand on allume ces chaudières, l'eau reste froide longtemps à la partie inférieure en dessous des foyers, quelquefois pendant plusieurs heures, bien que le fond soit chauffé par les gaz dans leur trajet vers la cheminée. Les tôles de la chaudière, chaudes en haut et froides en bas, se dilatent inégalement, ce qui les fait cintrer suivant la longueur et fatigue les rivures. Certaines dispositions provoquent la circulation de l'eau.

112. Chaudières à tubes de fumée. — Créé par Séguin en 1827, pour la locomotive, le générateur à tubes de fumée est, en outre, d'un usage fréquent dans la marine; on l'emploie aussi dans les locomobiles et pour des installations fixes.

Les parties essentielles de la chaudière ordinaire de locomotive (fig. 233) sont le *foyer*, en cuivre ou en acier (construction américaine), la *boîte à feu*, qui l'enveloppe, le *corps cylindrique*, traversé par les *tubes*, qui débouchent dans la *boîte à fumée*. Grâce au tirage forcé produit par la vapeur

d'échappement, on arrive à brûler 500 kg de houille, et même davantage, par heure et m^2 de grille, et on obtient une abondante production de vapeur avec une surface de grille généralement comprise entre 2 et 4 m^2 et une surface de chauffe qui dépasse rarement 300 m^2 .

Les formes et les proportions des diverses parties de la chaudière sont commandées par les nécessités de leur installation sur la locomotive.

Les locomobiles et les machines demi-fixes ont souvent une chaudière analogue à celles des locomotives. On emploie aussi le même type de générateur pour des installations fixes. La mise en place en est commode, mais la complication de formes n'est pas alors bien justifiée. Aussi des types d'exécution plus facile sont en général préférés, notamment la chaudière à bouilleurs dite *semi-tubulaire* (fig. 234) ; les deux bouilleurs sont directement chauffés par le foyer, puis par les gaz chauds, qui circulent ensuite autour du grand corps cylindrique, et enfin à travers les tubes.

La figure 235 représente une chaudière du type Tischbein, à foyer intérieur et corps tubulaire. Parfois, comme c'est le cas de la figure, il y a deux niveaux d'eau différents, le corps inférieur n'étant pas complètement rempli. La règle qui consiste à soustraire à l'action de la chaleur les tôles en contact avec la vapeur n'est pas observée : mais le corps inférieur est chauffé extérieurement par les gaz qui ont traversé les tubes et se rendent à la cheminée, gaz qui sont suffisamment refroidis pour que cette dérogation n'ait pas d'inconvénients.

L'eau d'alimentation est envoyée dans le corps supérieur ; dès qu'elle y dépasse le niveau normal, elle tombe, par un tube vertical, dans le corps inférieur, où une alimentation de secours permet l'envoi direct de l'eau. Un gros tube vertical donne issue à la vapeur produite dans le corps inférieur. Le corps supérieur sert principalement de réchauffeur et la vaporisation y est peu active.

1. Il s'agit ici des proportions courantes en Europe. Certaines locomotives américaines ont des dimensions beaucoup plus grandes.

On a parfois installé des tubes dans le prolongement du

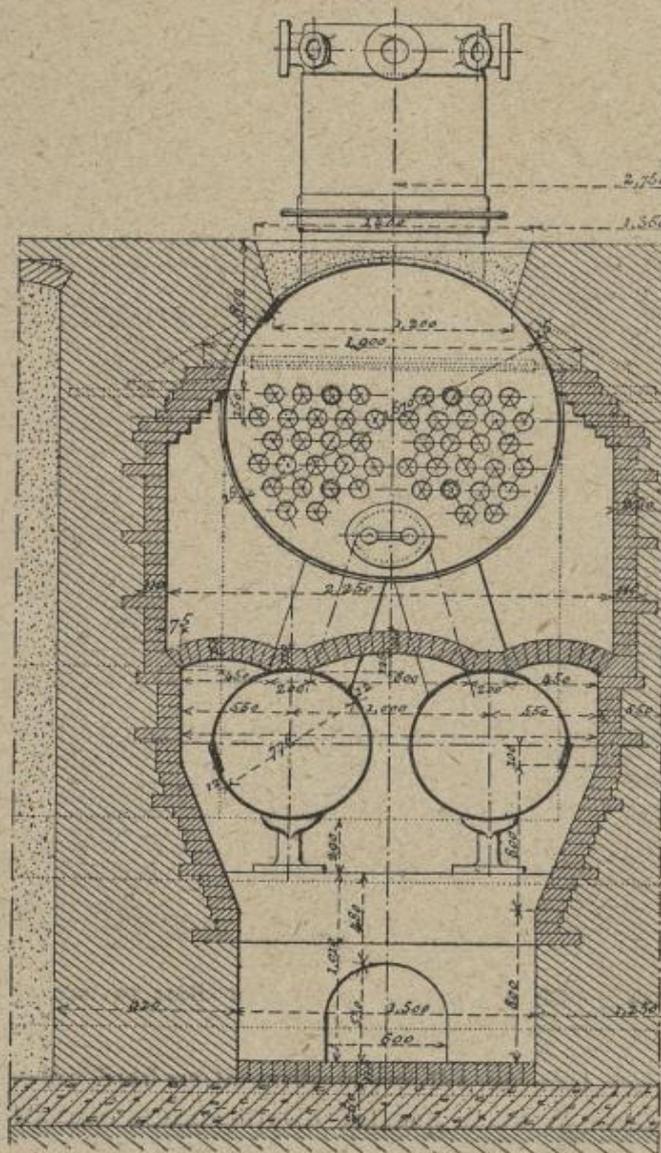


Fig. 234. — Chaudière à bouilleurs, semi-tubulaire; coupe transversale.

foyer cylindrique d'une chaudière de Cornouailles, en raccourcissant d'autant ce foyer.

Le foyer intérieur peut aussi communiquer avec une chambre, d'où les tubes partent *en retour* (fig. 236) : une boîte à fumée en tôle entoure la porte de chargement. Tout

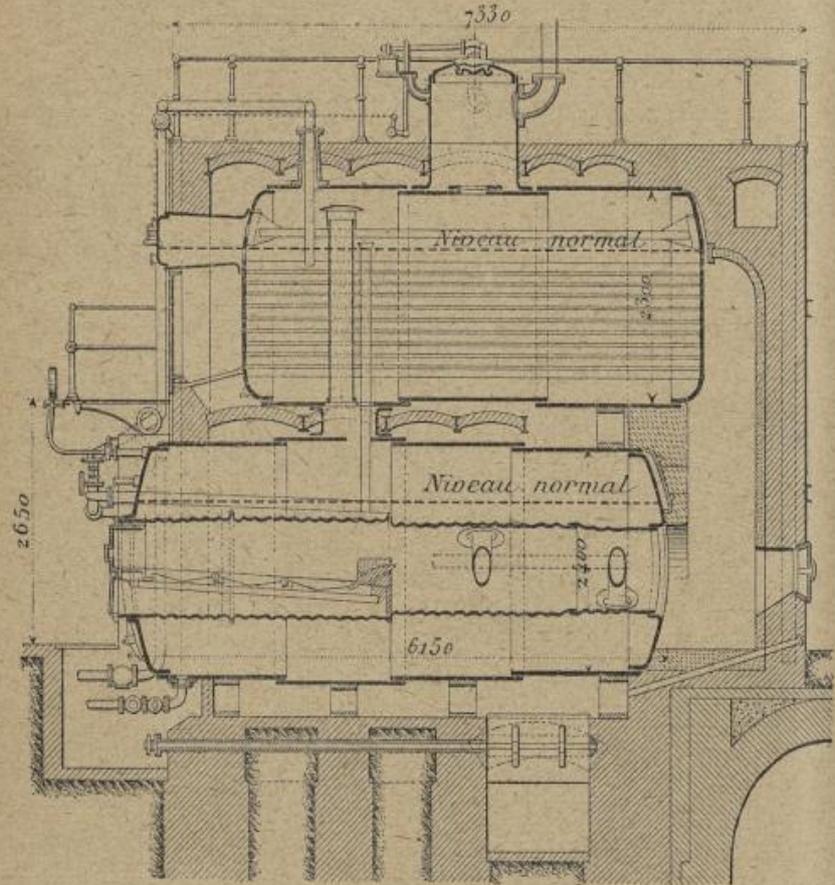


Fig. 235. — Chaudière Tischbein, avec deux niveaux d'eau.

le système interne adhère seulement au fond antérieur de la chaudière, de sorte que les dilatations en sont libres. La chambre *b* est construite de manière à résister à la pression, sans entretoisement avec le fond voisin de l'enveloppe extérieure.

En rattachant le fond de la chaudière au corps cylindrique par un joint à brides, facile à démonter, on permet la visite

et le nettoyage du faisceau intérieur, sujet à l'entartrement.
 Pour les chaudières marines, on est arrivé à un type en

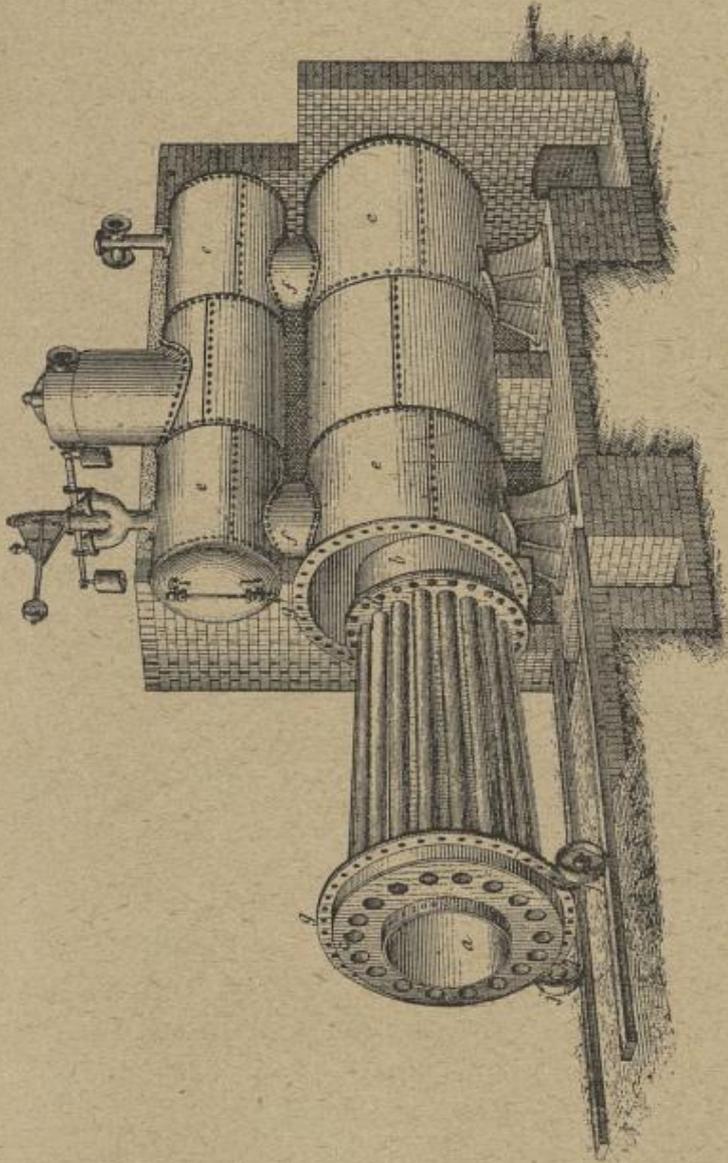


Fig. 236. — Chaudière tubulaire à foyer amovible, de la Société de Pantin : vue avec le foyer démonté et sorti de la *calandrac* : *a*, foyer cylindrique, contenant la grille ; *b*, boîte à feu, d'où partent les tubes, en retour, entourant le foyer et débouchant dans une boîte à fumée extérieure (non figurée sur le dessin), fixée contre la façade de la chaudière.

quelque sorte classique, avec foyers cylindriques intérieurs, surmontés de tubes en retour, le tout placé dans un grand

cylindre avec deux fonds plats. Cette chaudière est parfois désignée par le nom de *chaudière écossaise*.

Le foyer et les tubes communiquent avec des *boîtes à feu* ou *chambres de combustion*, dont les parois sont entretoisées entre elles, avec la surface cylindrique extérieure et avec le fond plat de la chaudière.

De petites chaudières n'ont qu'un foyer ou deux; fréquemment une chaudière comporte trois foyers (fig. 237) et parfois quatre. Ces foyers, pour les hautes pressions, sont à profil ondulé du système Fox ou autre analogue, beaucoup plus résistant que le cylindre uni.

Les boîtes à fumée, munies de portes de visite, sont rapportées devant le débouché des tubes, sur la façade de la chaudière, au-dessus des portes de foyer. Des conduits en tôle raccordent les boîtes à fumée à la cheminée.

413. Tubes de fumée. — Le diamètre intérieur des tubes est, dans les chaudières de locomotives, de 40 à 45 mm, et de 120 mm pour ceux qui contiennent les tubes surchauffeurs; il est de 60 à 80 dans les chaudières marines et les grandes chaudières fixes. Ces tubes sont en fer ou en acier doux. Pendant longtemps on a employé le laiton, souvent avec un bout soudé en cuivre rouge du côté du foyer.

Comme c'est la surface de chauffe en contact avec le gaz du foyer, beaucoup plus que celle baignée par l'eau, qui détermine la quantité de chaleur absorbée par la chaudière, on a augmenté la première surface en munissant les tubes d'ailettes intérieures (fig. 238). Certaines expériences ont montré que la surface de chauffe ainsi obtenue avec des ailettes était presque aussi efficace que la même surface de tubes lisses¹. Il convient que le diamètre intérieur de ces tubes à ailettes ne descende pas au-dessous de 60 ou 65 mm, pour éviter l'obstruction par les escarbilles.

Sur la plaque tubulaire, les centres des tubes sont rangés

¹ Cette efficacité ne paraît pas certaine dans toutes les applications.

en lignes droites ; les centres de deux rangées voisines sont alternés de manière à former une série de triangles équilatéraux (c'est du moins la disposition usuelle dans les locomotives). L'épaisseur du métal ne doit pas être trop réduite entre deux trous (par exemple ne pas descendre au-dessous de 20 mm pour des trous de 50 mm). Les rangées de tubes sont horizontales ou verticales, cette dernière disposition paraissant faciliter le dégagement de la vapeur. Dans les chaudières marines, les tubes forment souvent à la fois des rangées verticales et horizontales.

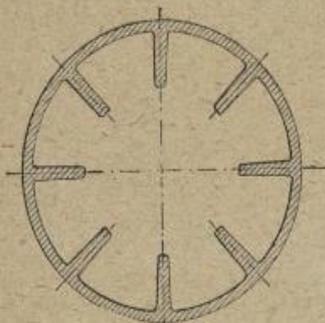


Fig. 238. — Coupe d'un tube à ailettes.

Les tubes doivent être ramonés très fréquemment, soit avec un écouvillon, soit à l'aide d'un jet de vapeur envoyé par une lance à tuyau flexible.

L'assemblage des tubes dans les deux plaques tubulaires, heureusement obtenu par des moyens très simples, est une opération d'importance capitale. On applique fortement le tube, en l'évasant, contre la paroi du trou percé dans la plaque. Cette opération se fait à l'aide de l'outil appelé, du nom de son inventeur, *dudgeon* : il consiste en galets entraînés par une broche centrale, légèrement conique, qu'on fait tourner, tout en l'enfonçant progressivement pour écarter les galets. Pour correspondre exactement au *dudgeon*, le trou est également conique. Toutefois l'appareil peut être disposé pour sertir les tubes dans des trous cylindriques.

Le montage est complété d'habitude par une rivure ou un sertissage du tube formant un boudage extérieur (fig. 239). Une *bague* ou *virole* conique, enfoncée à l'entrée du tube, consolide l'assemblage et permet de le resserrer au besoin. On peut souvent se dispenser d'en placer, surtout à l'extrémité de sortie des gaz.

Les tubes sont des tirants qui entretoisent les plaques tubulaires ; dans les chaudières marines, certains tubes, plus gros que les autres, sont vissés dans les plaques ou serrés par des écrous ; on les nomme *tubes-tirants*. Il faut remarquer que les tubes se dilatent plus que l'enveloppe extérieure et commencent par pousser les plaques avant de les maintenir : ce n'est qu'après le bombement de ces plaques qu'ils peuvent travailler comme tirants.

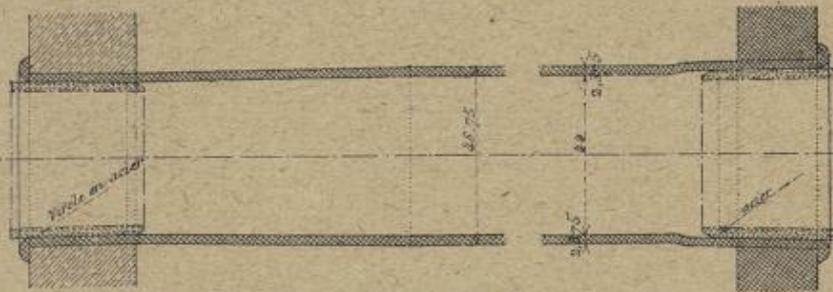


Fig. 239. — Montage de tube de chaudières des locomotives des chemins de fer de l'Est ; le tube, rétréci du côté du foyer, est agrandi du côté de la boîte à fumée. La bague ou virole est appliquée habituellement du côté du foyer (à gauche) seulement.

Les tubes *Bérendorf*, employés dans certaines chaudières fixes, ont un simple emmanchement conique aux deux bouts, de manière à être facilement démontables, les cônes des deux extrémités étant dirigés dans le même sens. Une plaque de sûreté les maintient en place quand la chaudière est en pression, car la pression tend à les déboîter.

114. **Chaudières à tubes d'eau.** — En plaçant l'eau à l'intérieur des tubes, on rend inutile le grand corps de chaudière que traversent les tubes à fumée. Par contre, les pièces qui raccordent les extrémités des tubes d'eau sont souvent compliquées. Le volume d'eau peut être réduit, ce qui active la mise en pression et diminue les effets mécaniques d'une explosion.

On cherche à réaliser, dans ces chaudières, deux modes de fonctionnement différents : ou bien on laisse pénétrer

dans les tubes chauffés l'eau en quantité limitée, correspondant à la vapeur formée ; ou bien, et c'est la disposition la plus fréquente, on provoque dans les tubes une active circulation d'eau, dont une fraction seulement se vaporise à chaque passage : le courant entraîne la vapeur formée, qui se sépare de l'eau dans la partie supérieure de la chaudière. La première disposition est dite à *circulation limitée*.

La chaudière Belleville (fig. 240) est un type ancien et encore très répandu de ces générateurs à circulation limitée. Les tubes en font communiquer le *collecteur* inférieur C et le *collecteur* supérieur D. Ils sont assemblés en un certain nombre d'*éléments*. Chacun de ces éléments se compose de deux rangées verticales de tubes, formant une conduite unique repliée sur elle-même. Le premier tube part du collecteur inférieur ; les différents tubes de l'élément communiquent par des boîtes de raccord, dans lesquelles ils sont vissés ; le dernier tube débouche dans le collecteur supérieur. Un certain nombre d'éléments pareils sont disposés au-dessus de la grille, aussi longue que les tubes. La grille et les tubes qui la recouvrent sont installés dans une enceinte en cornières et en tôles garnies de briques.

Les deux collecteurs sont réunis extérieurement par un conduit vertical. En outre, un récipient vertical communique par de petits tuyaux avec le haut et le bas de la chaudière. Ce récipient porte un tube indicateur du niveau de l'eau, et renferme un flotteur qui règle automatiquement l'alimentation. Le niveau de l'eau dans ce récipient est en dessous des rangées supérieures de tubes.

Le conduit vertical qui réunit les deux collecteurs est prolongé à sa partie inférieure pour former un *déjecteur*, destiné à recueillir les dépôts solides abandonnés par l'eau d'alimentation, qui pénètre au milieu de la vapeur, dans le collecteur supérieur. Un robinet d'extraction permet de faire écouler les dépôts boueux. Il importe, en effet, d'éviter autant que possible les incrustations dans les tubes. Des bouchons démontables, montés sur les boîtes de raccord,

permettent de racler l'intérieur des tubes pour enlever ces incrustations.

La vapeur, qui se forme surtout dans les tubes inférieurs, les plus chauffés, doit parcourir tous les tubes de l'élément

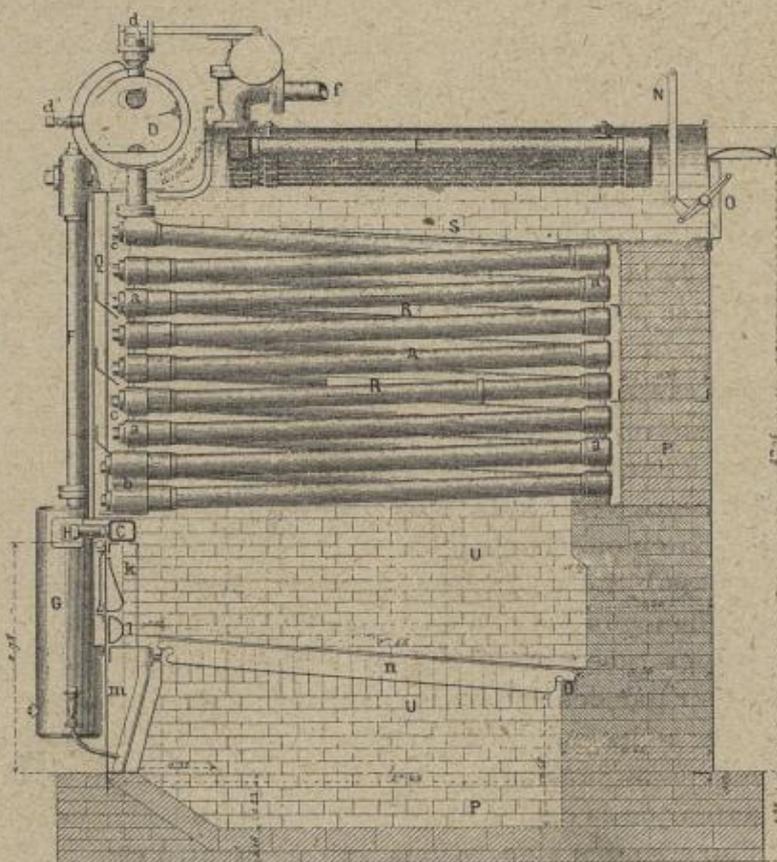


Fig. 240. — Générateur Belleville.

D, collecteur supérieur; C, collecteur inférieur; G, déjecteur; R, R, chicanes;
E, tubes sécheurs de vapeur; O, registre à commande automatique.

avant de se dégager dans le collecteur supérieur. La présence de la vapeur dans les tubes les expose à souffrir de la chaleur quand on force la production au delà d'un certain maximum.

Le générateur Belleville à double spire, récemment cons-

truit, élève ce maximum. L'élément ancien, formé d'un nombre pair de tubes qui relie, par un circuit unique, le collecteur inférieur au collecteur supérieur, est remplacé par deux éléments distincts, composés chacun d'un nombre moitié moindre de tubes; l'emplacement occupé reste le même. Chacun de ces éléments réduits, ou spire, possède son orifice d'alimentation et son orifice de dégagement de vapeur. Le parcours du fluide est ainsi réduit à moitié, ainsi que le nombre des coudes; à égalité de production, le débit d'un élément est aussi réduit à moitié.

Des chicanes en tôle, dans le collecteur, sont destinées à séparer de la vapeur l'eau entraînée. En outre, on réduit la pression à l'aide d'un détendeur; souvent aussi la vapeur traverse un faisceau de tubes sécheurs, sur le parcours des gaz chauds.

Un registre automatique, commandé par un piston pressé d'un côté par la vapeur, et soumis de l'autre côté à l'action d'un ressort, règle le tirage.

Dans la chaudière Solignac-Grille (fig. 241), on supprime toute possibilité de renversement du courant en obturant, par un bouchon muni d'un étroit ajutage, l'extrémité inférieure des tubes chauffés: l'eau descend d'un collecteur supérieur par des conduits verticaux; la vapeur se dégage dans ce collecteur par l'extrémité supérieure des tubes. L'écoulement de l'eau par les ajutages se fait en vertu de la hauteur de la colonne liquide partant du collecteur.

A l'inverse des dispositions qui viennent d'être décrites, dans la plupart des types de chaudières à tubes d'eau, on cherche à provoquer une circulation active. A cet effet, les tubes, au lieu d'être montés en longs circuits, comme ceux des éléments Belleville, sont parcourus individuellement par des courants parallèles; ils sont tous inclinés dans le même sens; en général, la grille n'existe que sous une partie du faisceau de tubes, et des chicanes dirigent les gaz chauds autour des tubes, en empêchant l'écoulement direct vers la cheminée.

La disposition de la figure 242 est fréquente: un collec-

teur supérieur, à demi plein d'eau, contient aussi la vapeur; l'eau descend par des communications verticales à l'extrémité inférieure des tubes chauffés; elle parcourt ces tubes en se vaporisant partiellement, puis elle remonte au collecteur supérieur en entraînant la vapeur par d'autres com-

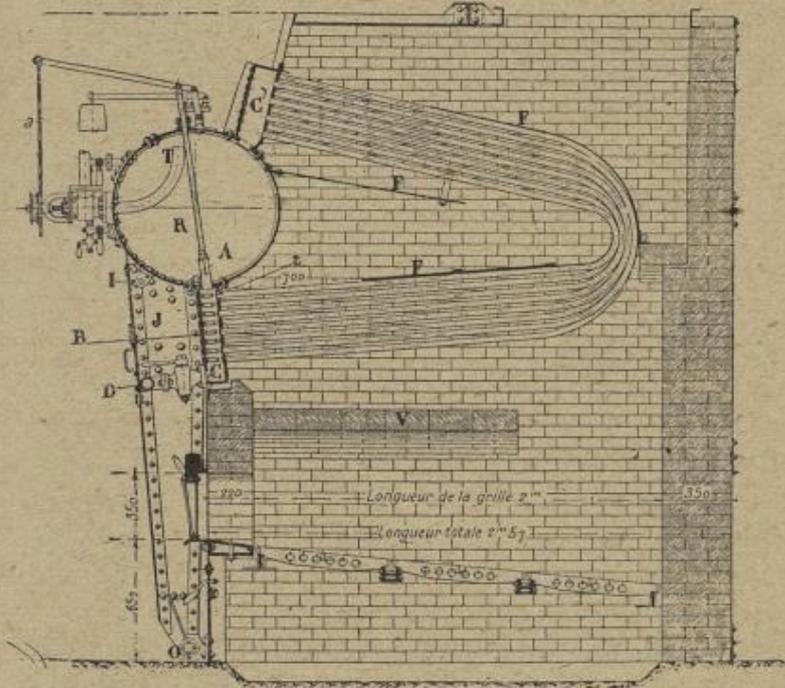


Fig. 241. — Coupe longitudinale de la chaudière Solignac-Grille.

munications verticales, branchées à l'extrémité supérieure des tubes chauffés.

On a quelquefois reproché à cette disposition de mieux alimenter les tubes supérieurs que les tubes inférieurs, qui sont cependant les plus chauffés; c'est pourquoi certains générateurs présentent la disposition de la figure 243: les tubes sont alimentés par un collecteur inférieur relié au collecteur supérieur par des *tubes de retour* non chauffés.

On obtient d'ailleurs de bons résultats avec les deux dispositions.

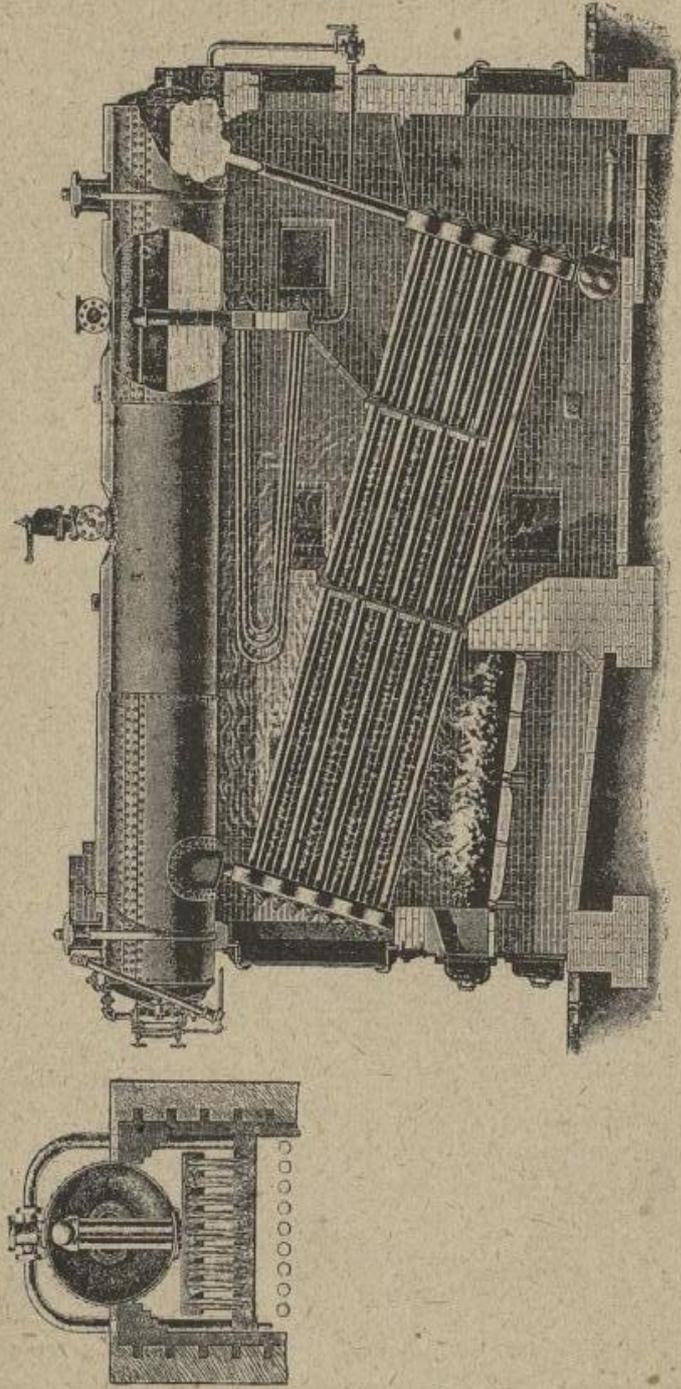


Fig. 212. — Chaudière Babcock et Wilcox, avec surchauffeur de vapeur, placé entre le premier et le second passage des gaz chauds sur les tubes vaporisateurs.

Les pièces, qui établissent la communication entre les tubes, sont tantôt de petits raccords séparés, comme dans

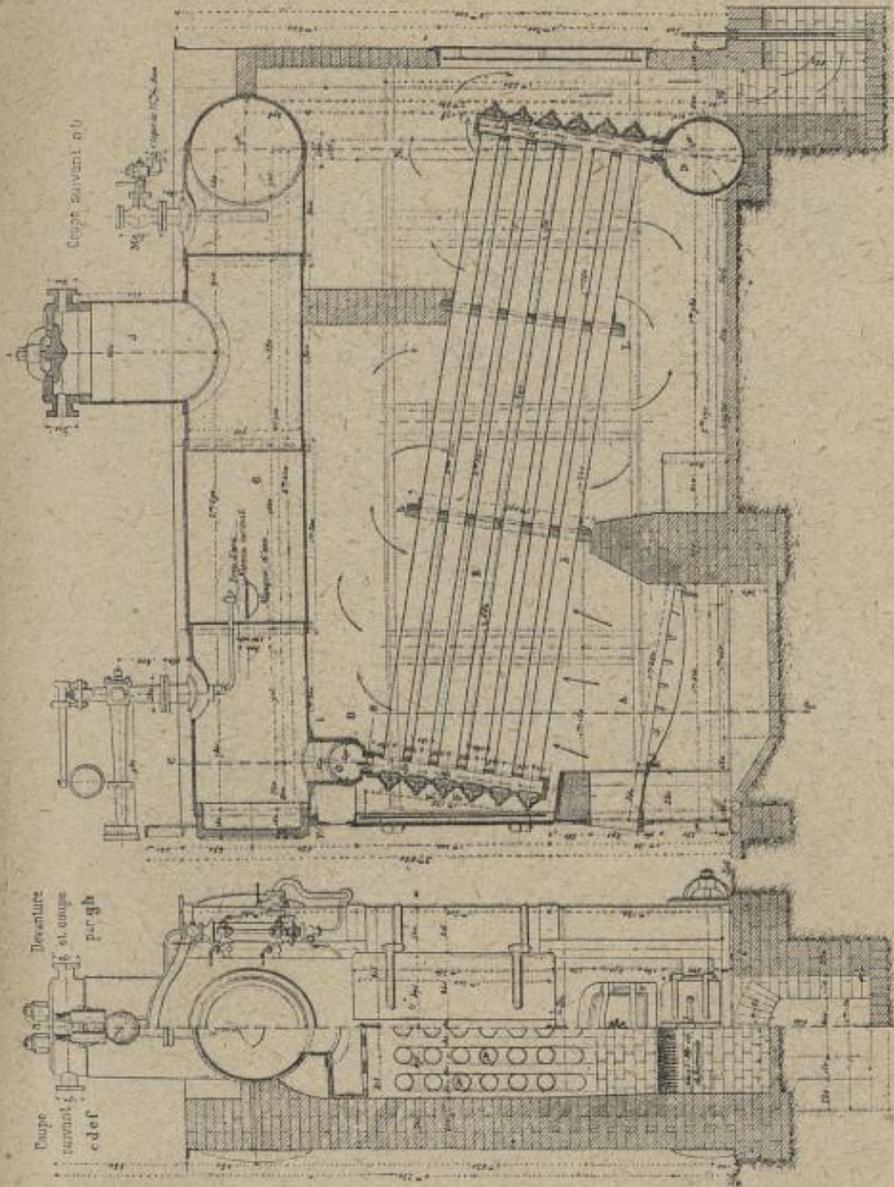


Fig. 243. — Générateur Roser : le collecteur inférieur D communique avec le collecteur supérieur C par deux tubes extérieurs verticaux N. Deux cloisons de briques dirigent les gaz autour des tubes.

le générateur Belleville, tantôt des conduits sur lesquels se branchent tous les tubes d'une rangée verticale; enfin tous

les tubes peuvent s'assembler, à chaque extrémité, sur une

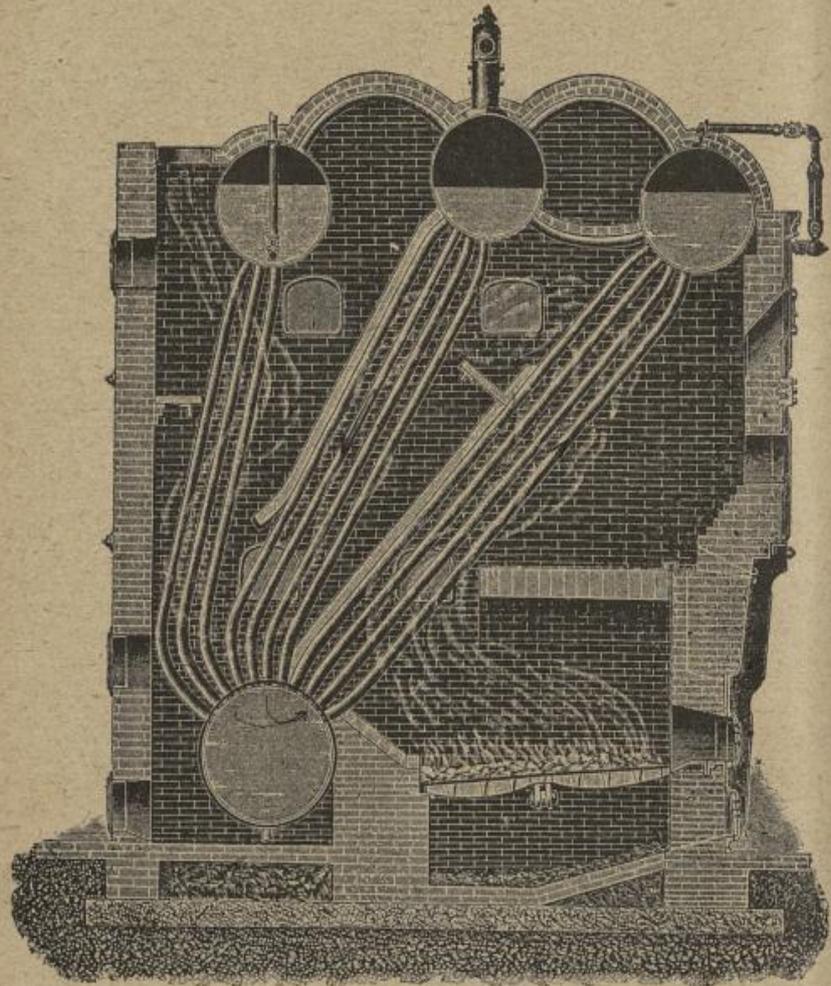


Fig. 244. — Chaudière Stirling ; l'alimentation se fait dans le collecteur supérieur de gauche, d'où l'eau descend dans le collecteur inférieur par des tubes formant réchauffeur. Les deux autres collecteurs supérieurs communiquent entre eux par deux rangées de tubes cintrés ; des tubes cintrés relient le premier et le second collecteur, à leur partie supérieure seulement.

sorte de caisse plate en tôle, dont les deux faces planes sont entretoisées.

Des tampons démontables permettent la visite intérieure

de chaque tube ; des ouvertures dans l'enveloppe en maçonnerie servent au ramonage de leurs surfaces extérieures à l'aide d'un jet de vapeur.

Souvent la dimension du collecteur supérieur est assez grande : il présente alors un plan d'eau étendu ; tantôt il

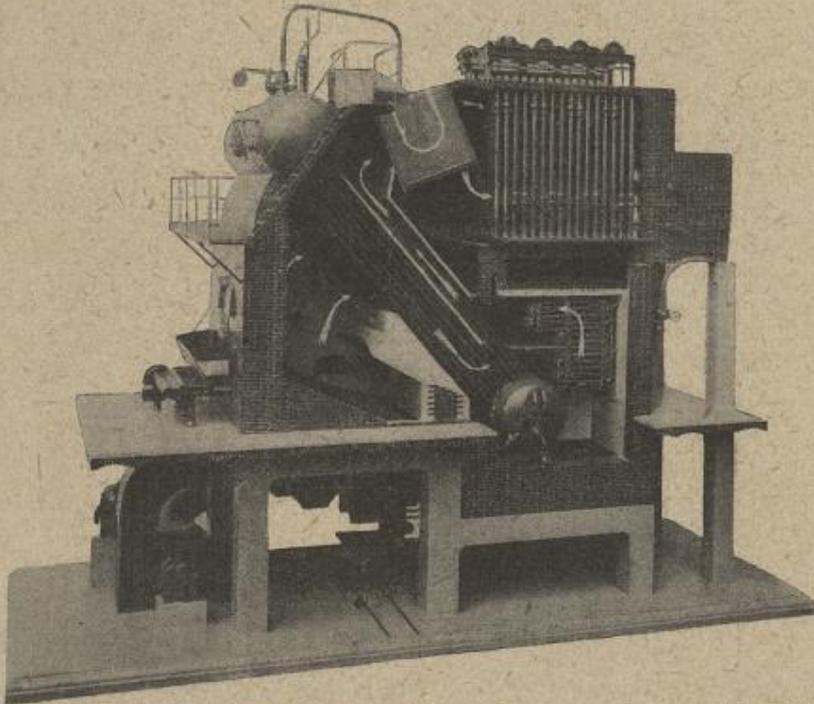


Fig. 245. — Chaudière à flux direct de la Société alsacienne de constructions mécaniques, avec grille Erith Riley, surchauffeur, réchauffeur d'air et réchauffeur d'eau (économiseur Green).

est complètement soustrait à l'action des gaz chauds ; d'autres fois il est chauffé par les gaz qui ont traversé le faisceau de tubes.

Une circulation d'eau active augmente la production de vapeur et maintient toujours les appareils à une température relativement basse. Si au contraire l'eau ne circule pas d'une manière continue, la vapeur forme des poches et se dégage difficilement par les communications souvent étroites

des tubes; l'eau vient remplacer la vapeur par intermittences.

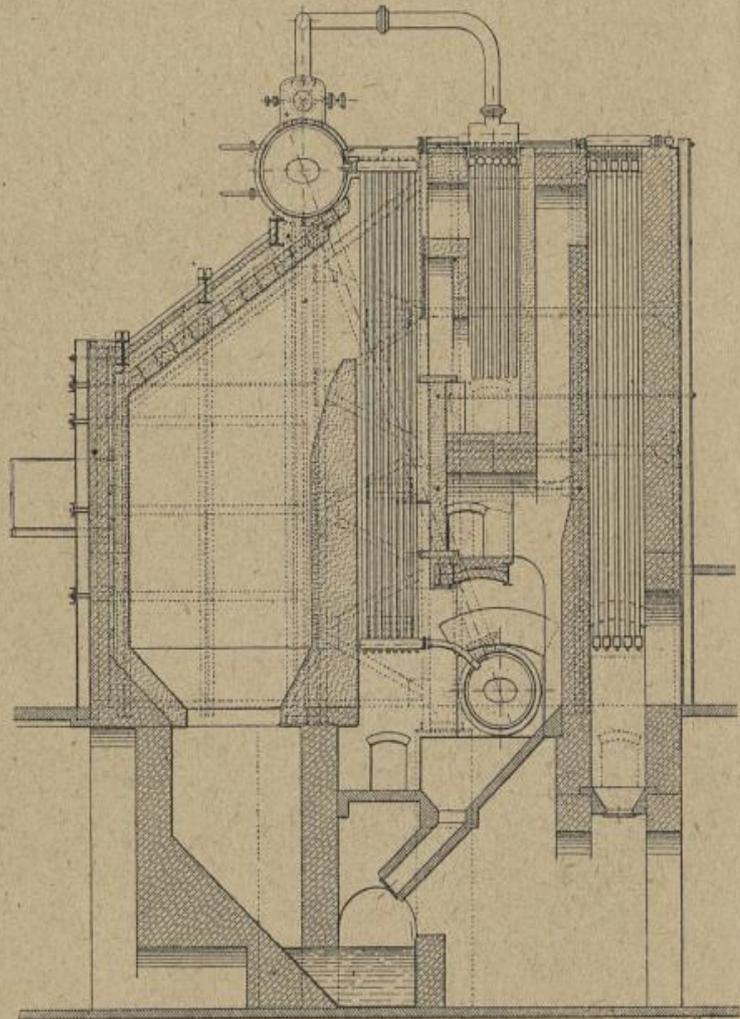


Fig. 246. — Chaudière Duquenne chauffée au charbon pulvérisé, avec surchauffeur et réchauffeur d'eau. Surfaces de chauffe : vaporisateur, 500 m^2 ; surchauffeur, 120; réchauffeur, 300. Timbre, 15 kg.

La circulation de l'eau dans les chaudières a donné lieu à de nombreuses discussions. En général, l'eau et la vapeur s'élèvent dans les parties chauffées, et le courant d'eau des-

endant se fait par des communications peu ou pas chauffées. Il convient que les sections de passage soient en

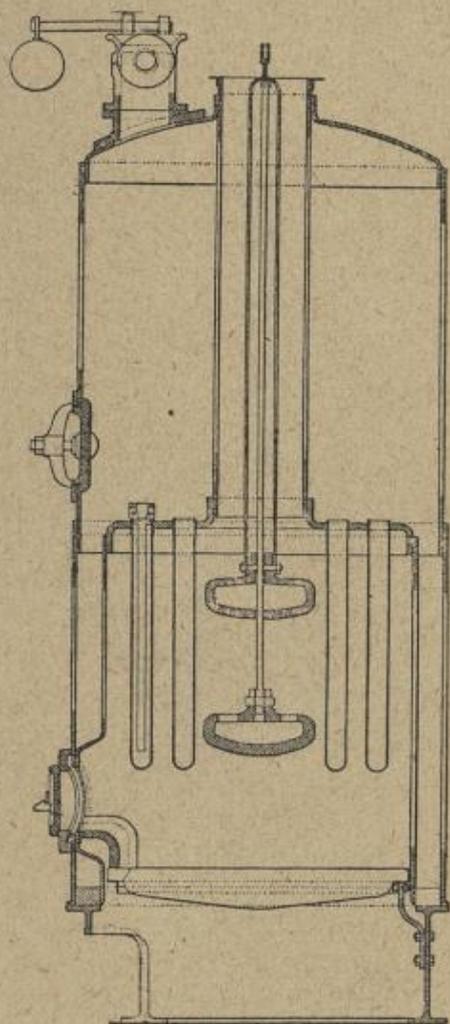


Fig. 247. — Chaudière Field.

chaque point suffisantes, mais sans excès.

D'une manière générale, la circulation se fait bien tant que la production n'est pas forcée au delà d'une certaine limite ; mais

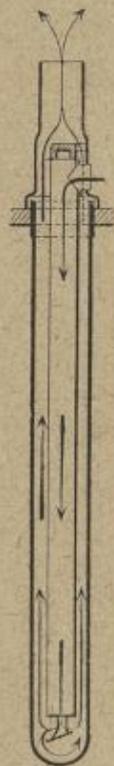


Fig. 248. — Tube Field, avec séparation des courants, de Montupet; l'eau entre dans le tube central par une ouverture latérale; la petite plaque placée à la partie inférieure est destinée à empêcher l'entrée de vapeur dans le tube central.

avec une vaporisation plus active, la circulation s'arrête, la vapeur se dégage en sens inverse du courant, et certains tubes, momentanément vides d'eau, sont exposés à atteindre une température beaucoup trop élevée.

En réunissant des collecteurs supérieurs et inférieurs par des tubes voisins de la verticale, on supprime les nombreuses pièces de communication exigées par la disposition horizontale, et ce montage paraît faciliter la circulation. Telles sont les chaudières Stirling (fig. 244), à *flux direct* de la Société alsacienne de constructions mécaniques (fig. 245), et Duquenne (fig. 246).

Parfois la circulation se fait par tubes concentriques. Le tube *Field* (fig. 247), fermé à une extrémité, ne présente qu'un seul assemblage, conique, avec la plaque qui le porte ; cet assemblage est simple, et la pression de la vapeur le resserre. Un petit tube intérieur, ouvert aux deux bouts, est destiné à amener l'eau qui remplace la vapeur formée. L'accès de l'eau par le tube central peut être gêné par le dégagement de la vapeur : on l'a modifié pour séparer les courants (fig. 248).

La chaudière *Field* (fig. 247) est cylindrique et verticale, avec un foyer intérieur : les tubes pendent verticalement au-dessous du ciel de foyer. Les gaz s'échappent par une cheminée centrale. Malgré l'obturateur suspendu au centre pour diriger les gaz autour des tubes, ils sont souvent encore très chauds dans la cheminée, qui se trouve portée à une température trop élevée dans la partie qui traverse la vapeur.

Le générateur *Niclausse* (fig. 249) a des tubes concentriques inclinés, qui débouchent dans deux lames d'eau verticales, séparées par une cloison, de manière à diviser les courants ; ces deux lames aboutissent au collecteur placé à la partie supérieure.

Les chaudières à tubes d'eau, notamment celles de Belleville, de *Niclausse*, de *Babcock et Wilcox*, ont été appropriées au service des bateaux, spécialement pour les marines mili-

taires. Elles permettent des pressions très élevées, atteignant 20 kg par cm^2 .

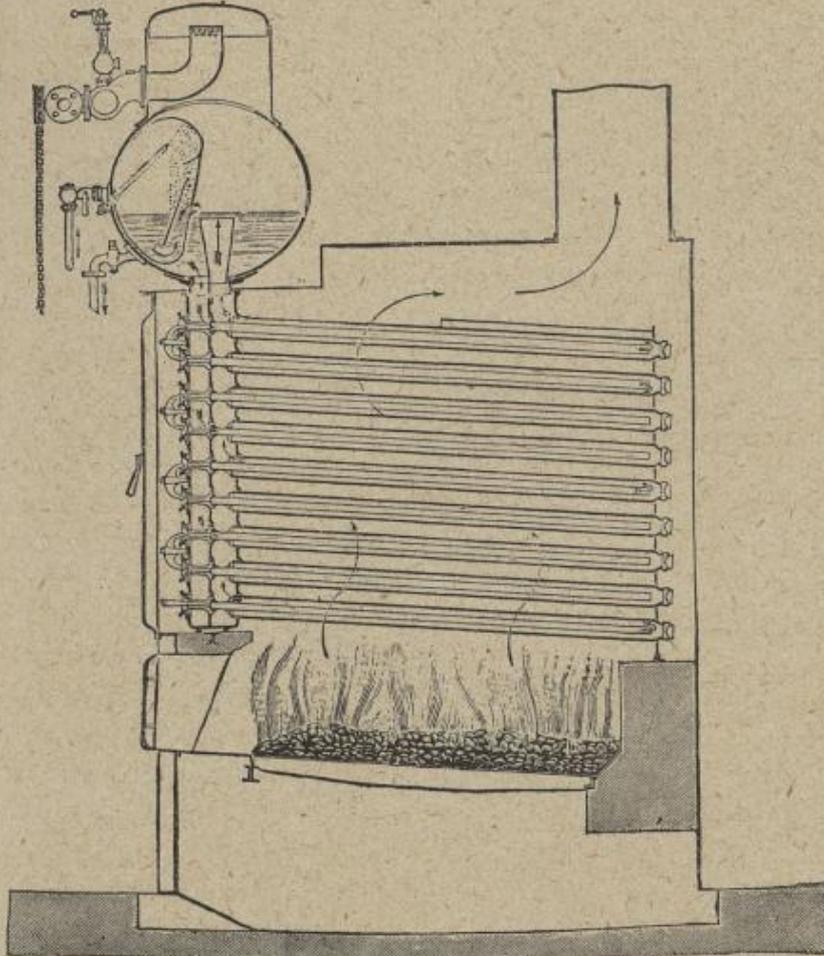


Fig. 249. — Générateur Niclausse; coupe longitudinale, montrant les dispositions prévues pour l'arrivée de l'eau dans chaque tube et le dégagement de la vapeur.

On emploie aussi sur mer les chaudières dites *express*, formées de tubes de petit diamètre (25 mm à l'intérieur¹).

115. Chaudières mixtes. — La chaudière *ambitubulaire* de

1. Consulter à ce sujet l'ouvrage de Bertin, *Chaudières marines*.

la Société alsacienne de constructions mécaniques (fig. 250) comprend un faisceau de tubes d'eau monté en dessous d'un corps cylindrique traversé par des tubes à fumée.

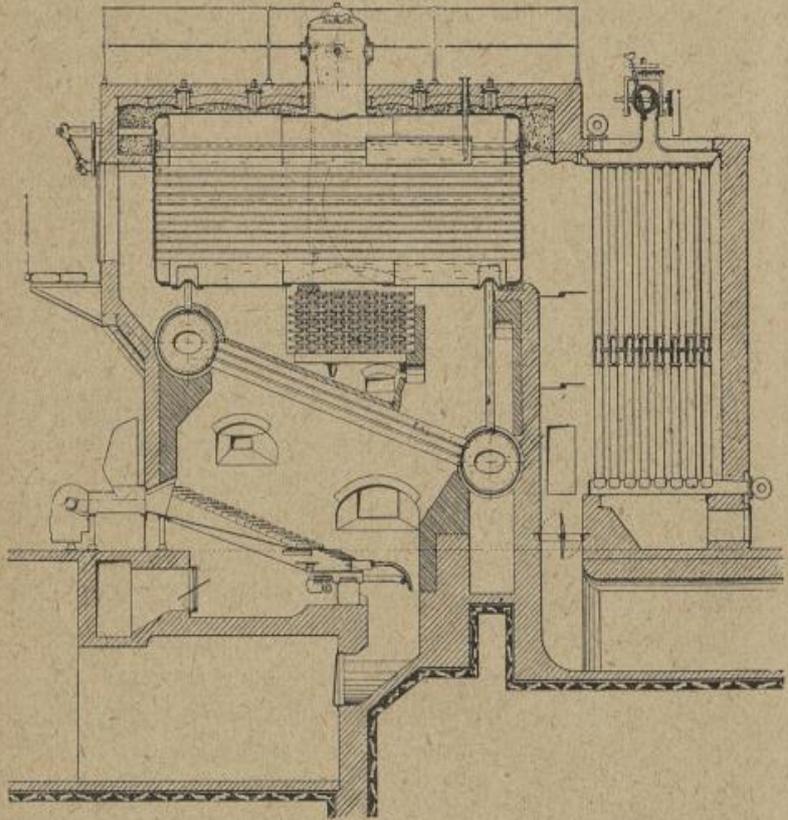


Fig. 250. — Chaudière multitubulaire, avec surchauffeur, réchauffeur et grille Erith Riley.

116. Réchauffeurs. — La température de l'eau d'alimentation des chaudières est généralement de 30 à 40°, si elle est prise dans un condenseur, et de 5 à 20°, quand elle vient de l'extérieur. Elle doit être chauffée, puis vaporisée. En la faisant circuler dans un *réchauffeur*, c'est-à-dire dans une sorte de chaudière supplémentaire placée dans le courant des gaz encore chauds qui se rendent à la cheminée, on commence l'échauffement de l'eau aux dépens de chaleur autrement perdue.

Certains types de chaudières comportent des bouilleurs qui constituent de véritables réchauffeurs, et réalisent la *circulation méthodique* de l'eau, en sens inverse du courant des gaz chauds.

Les réchauffeurs sont habituellement formés de tubes d'eau : ces tubes sont parfois en fonte : tel est l'*économiseur Green* de la figure 245. Comme la suie a tendance à se déposer sur ces tubes relativement froids et gêne la transmission de la chaleur, des racleurs sont constamment en mouvement sur leur surface extérieure.

Pendant la marche normale, il ne doit pas se former de vapeur dans un réchauffeur ; mais cette formation est toujours possible, quand la consommation des machines s'arrête ou se ralentit. Pour éviter les accidents, le réchauffeur doit être muni de soupapes de sûreté, à moins qu'aucune fermeture ne permette de l'isoler de la chaudière ; même sans production de vapeur, la dilatation de l'eau suffirait pour causer la rupture d'un récipient clos hermétiquement.

Avec les machines à échappement dans l'atmosphère, on chauffe facilement l'eau jusqu'à une température voisine de 100°, à l'aide d'une partie de la vapeur d'échappement. On la condense directement dans l'eau à chauffer, ou mieux, pour éviter l'entrée dans la chaudière des matières grasses, dans un faisceau tubulaire, analogue à un condenseur à surface. L'injecteur à vapeur d'échappement chauffe l'eau par condensation directe.

Quelquefois l'eau d'alimentation est chauffée au préalable aux dépens de vapeur prise à la chaudière. Au point de vue du nombre de calories dépensées, il n'y a pas de différence entre cette manière de procéder et l'envoi d'eau froide dans la chaudière ; c'est toujours l'eau chaude ou la vapeur de la chaudière qui chauffe l'eau. Mais le chauffage préalable est avantageux, en évitant aux tôles de la chaudière le contact momentané de l'eau froide, qui produit des contractions nuisibles. La vapeur ainsi employée peut avoir servi à produire de la puissance motrice, notamment dans

des machines auxiliaires dont le travail est ainsi obtenu très économiquement, puisqu'il correspond entièrement aux calories qui disparaissent.

Dans les machines à plusieurs expansions, et surtout dans les turbines à vapeur, on dispose de vapeur à des pressions décroissantes; à l'aide de prises étagées, on peut chauffer

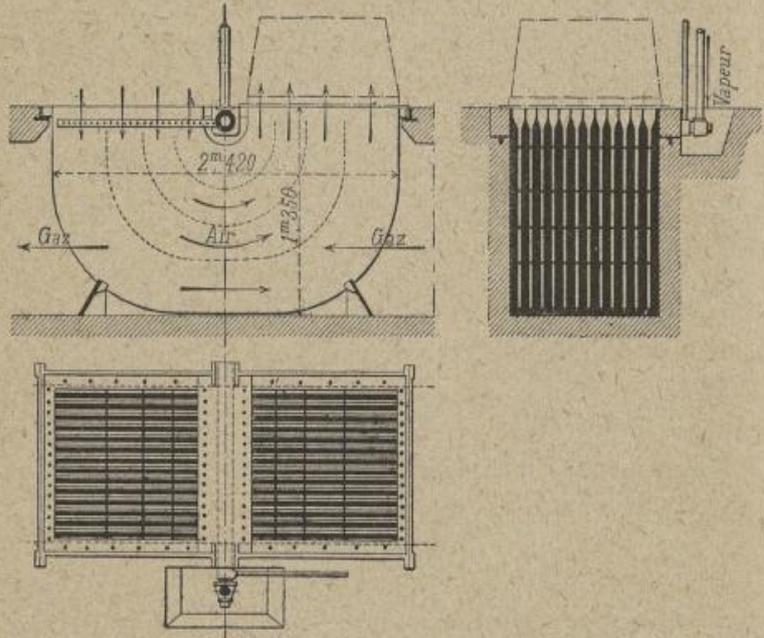


Fig. 251. — Réchauffeur d'air *Usco*.

l'eau progressivement jusqu'à la température de la chaudière, en tirant de la vapeur de chauffage une quantité notable de travail. On appliquera par exemple ce mode de chauffage pour porter l'eau de 80°, à la sortie du réchauffeur, à 200° dans la chaudière. Toutefois l'avantage s'atténuerait si on chauffait l'eau méthodiquement jusqu'à 200°, au lieu de n'utiliser les chaleurs perdues que jusqu'à 80°. Ce procédé a été employé il y a plus de 30 ans par Weir et par Normand (*Annales des mines*, 8^e série, t. XVII, p. 432).

On peut enfin employer la chaleur perdue des gaz de la

combustion à chauffer l'air à son entrée dans le foyer : ce chauffage, qui se fait à travers des tôles minces, permet de récupérer presque toutes les calories autrement perdues ; la température de combustion s'en trouve relevée¹. Dans le réchauffeur *Usco* (fig. 251), l'air d'une part et les gaz chauds d'autre part circulent en lames minces entre des tôles qui gênent aussi peu que possible le courant de gaz ; l'air, aspiré par un ventilateur, est guidé suivant une demi-circumference sans changements brusques de direction. Des tubes percés de petits trous permettent l'envoi de vapeur entre les éléments du réchauffeur, pour en ramoner les surfaces : on fait décrire à ces tubes un demi-cercle, en tournant autour d'un axe le tuyau qui les alimente.

En résumé, l'installation la plus complète comprend successivement, à partir du foyer, une chaudière proprement dite ou vaporisateur, avec une surface de chauffe relativement restreinte ; un surchauffeur, vers le milieu de cette chaudière ; un réchauffeur d'eau ; enfin un réchauffeur de l'air servant à la combustion. Les gaz rejetés sont trop froids pour le tirage naturel, et le ventilateur est indispensable.

417. Surchauffeurs. — Un bon surchauffeur doit pouvoir élever la température de toute la vapeur fournie par la chaudière, à laquelle il est annexé, jusqu'à 300° et même davantage. Il est d'autant plus actif qu'il est en contact avec des gaz plus chauds ; mais la conservation du métal dont il est formé impose une limite à la température des gaz avec lesquels il est prudent de le mettre en contact. Les surchauffeurs sont généralement formés de tubes de petit diamètre, dans lesquels circule la vapeur sortant, saturée, sèche ou humide², de la chaudière proprement dite : la sec-

1. MM. Kammerer et Köhler ont cité, au Congrès de chauffage industriel, un cas où l'emploi d'air chaud augmentait la consommation de combustible : en élevant la température de combustion, il rendait les cendres fusibles, et celles-ci enrobaient des fragments de houille.

2. L'humidité de la vapeur cause l'entartrement des tubes surchauffeurs.

tion de l'ensemble des tubes doit être suffisante pour que la vitesse de la vapeur ne soit pas trop grande, afin d'éviter une forte chute de pression. Certains constructeurs adoptent la valeur de 20 à 25 *m* par seconde. La vapeur peut circuler dans le même sens que les gaz chauds ou en sens inverse. La seconde disposition donne, à égalité de surface du métal, une surchauffe plus forte ; mais elle augmente la fatigue des tubes du surchauffeur, plus exposés à rougir du côté de l'arrivée des gaz chauds. En ce point les tubes sont remplis de vapeur à la température la plus élevée, tandis qu'avec la circulation par courants parallèles, ils sont rafraîchis par l'entrée de la vapeur saturée. Les différences de températures ne sont toutefois pas très fortes d'un système à l'autre.

Dans certains surchauffeurs la disposition des tubes est telle que la vapeur circule alternativement dans les deux sens.

La surface de chauffe, que doit avoir un surchauffeur, dépend de la température de surchauffe demandée, et de sa position dans le circuit des gaz chauds : on peut citer, à titre d'exemple, une proportion du tiers au quart de la surface de chauffe produisant la vapeur.

Les tubes surchauffeurs sont habituellement en acier. Ils doivent être disposés de manière à se dilater librement. Le diamètre de ces tubes étant assez petit, il en faut plusieurs montés en parallèle.

Le surchauffeur peut être placé dans un carneau spécial, muni de registres, qui permettent de le mettre hors circuit, ou de réduire la quantité de gaz qui le chauffe. Il est plus simple toutefois de le placer directement sur le trajet des gaz dans le massif même de la chaudière (fig. 242, 243 et 252). Mais dans ce cas il est difficile de modérer la surchauffe si elle est excessive. Un des moyens consiste à ajouter à la vapeur trop chauffée une certaine proportion de vapeur saturée prise à la chaudière ; mais le réglage de cette proportion est délicat.

Avec des appareils de dimensions convenables, ces complications ne semblent pas indispensables.

Quelquefois les surchauffeurs, indépendants des chau-

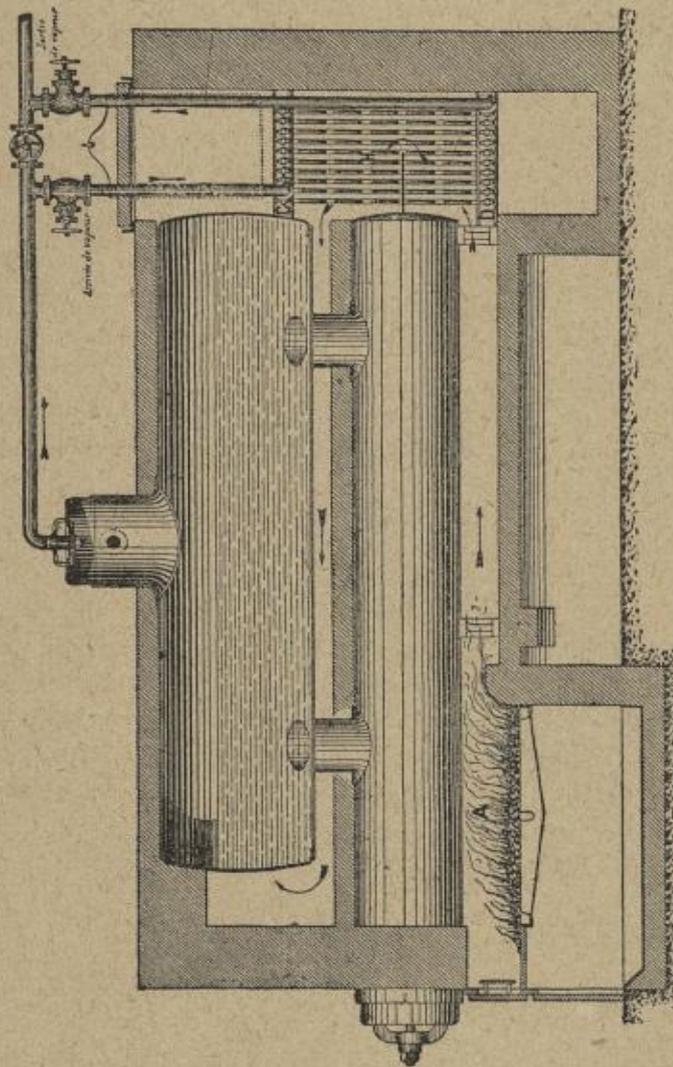


Fig. 252. — Surchauffeur Grouvelle et Arquembourg, dans les carneaux d'une chaudière à bouilleurs.

dières qui produisent la vapeur, sont munis d'un foyer spécial : un seul surchauffeur peut alors desservir plusieurs chaudières, et se placer auprès d'une machine motrice alimentée par une longue tuyauterie. Mais, étant donnée la

nécessité d'éloigner de la grille les surfaces de chauffe, l'utilisation de la chaleur est médiocre dans ces appareils, qui d'ailleurs compliquent le service de la chauffe; ils ont toutefois l'avantage de permettre un réglage facile de la température de la vapeur.

Les chaudières de locomotives (fig. 233) sont aujourd'hui munies de surchauffeurs : après de nombreux essais de types divers, on s'en tient généralement à celui de Schmidt, où les tubes surchauffeurs, repliés quatre fois sur eux-mêmes, se logent dans de gros tubes à fumée.

118. Essais de chaudières. — Seuls des essais permettent d'apprécier exactement la valeur d'un type de générateur, les meilleures conditions de marche, les soins apportés à la conduite. Suivant le degré de précision nécessaire, ces essais exigent des précautions plus ou moins grandes.

Pour un essai complet, il faut non seulement peser le combustible brûlé, mais en déterminer le pouvoir calorifique : on sait ainsi quel est le nombre des calories que dégagerait dans le foyer une combustion parfaite. Si on mesure d'autre part la quantité d'eau vaporisée, en relevant la température de l'eau d'alimentation, et la pression de la vapeur produite, on connaît le nombre des calories utilisées. Si la vapeur n'est pas sèche, il faut savoir quelle proportion d'eau elle entraîne : avec certains types de générateurs, qui donnent de la vapeur très humide, on commettrait une erreur importante en la supposant sèche. Si la vapeur est surchauffée, on en mesure la température.

En rapprochant les deux quantités ainsi relevées, nombres des calories disponibles et des calories utilisées, on connaîtra le rendement pratique de l'appareil; mais il est intéressant de savoir ce que deviennent les calories non utilisées.

D'abord une partie du combustible peut échapper à la combustion : on retrouve dans les cendres de petits morceaux non consumés, et la cheminée reçoit des gaz combustibles, oxyde de carbone et hydrocarbures. Surtout avec

le tirage forcé, le combustible solide peut aussi être entraîné par le courant gazeux. Cet entraînement est souvent très intense dans la chaudière de locomotive. Le nombre des calories produites se trouve par là réduit.

Les gaz, rejetés chauds dans la cheminée, emportent de la chaleur; en jugeant le poids¹, et en relevant la composition et la température de ces gaz, on calcule le nombre des calories ainsi emportées. Il convient aussi de tenir compte de la chaleur employée pour vaporiser l'eau mélangée au combustible, parfois en notable proportion. Enfin des calories, en nombre assez important, se dissipent par rayonnement et par conductibilité : la quantité de chaleur ainsi perdue est difficile à mesurer; on l'estime par différence.

La chaudière doit se retrouver à la fin de l'essai dans le même état qu'au commencement, c'est-à-dire avec la même quantité d'eau, la même pression, le même poids de combustible sur la grille, au même état d'ignition. L'appréciation du poids et de l'état du combustible risque d'être peu précise; il convient donc que la durée de l'essai soit longue pour que les erreurs d'estimation n'aient pas une trop grande influence.

En donnant les résultats des essais de chaudières, on indique le plus souvent le poids vaporisé par un kilogramme de combustible; parfois on indique un poids fictif, en supposant l'eau prise à 0° et vaporisée à 100° ou bien prise à 100° et vaporisée sous cette même température : on calcule ces poids fictifs en admettant que le nombre de calories reçues par l'eau reste le même que dans l'opération effectivement faite. Il importe de ne jamais omettre la mention exacte de la manière de compter qu'on emploie.

Certains essais indiquent une utilisation de 80 p. 100 du pouvoir calorifique du combustible, utilisation excellente. La proportion de 65 à 70 p. 100 peut être considérée comme

1. Le débit en poids se déduit du débit en volume (estimé d'après la vitesse), de la température et de la composition de gaz.

assez bonne; on ne devrait jamais tolérer qu'elle soit inférieure à 60 p. 100¹.

119. Comparaison des générateurs. — Des chaudières de types différents, de même surfaces de grille et de chauffe, peuvent être considérées comme presque équivalentes, si elles sont bien proportionnées, et il est assez rare de trouver des formes qu'on puisse déclarer en principe nettement supérieures. La production d'un générateur dépend avant tout de l'appareil de combustion, caractérisé, avec les dispositions usuelles, par l'étendue de la grille, pourvu que le régime de la combustion soit connu.

Une fois la chaleur produite, elle doit être recueillie sur une surface de chauffe suffisante; toute la surface de chauffe n'est d'ailleurs complètement utilisée que si le courant gazeux la parcourt effectivement; il importe aussi d'éviter la rentrée de l'air froid, qui absorbe inutilement la chaleur.

A l'intérieur même de la chaudière, il convient que la vapeur se dégage facilement, et soit immédiatement remplacée par l'eau : sous ce rapport, certains générateurs laissent à désirer.

Les volumes d'eau et de vapeur, pour une même surface de chauffe, varient beaucoup d'un type à l'autre : un grand volume d'eau rend la production régulière, et la conduite facile; un faible volume permet une mise en pression rapide.

L'emplacement occupé et le poids du générateur sont des éléments qui ont parfois une grande importance.

120. Alimentation. — Alimenter une chaudière, c'est remplacer l'eau qui s'y vaporise. On emploie pour l'alimentation l'eau tiède rejetée par la pompe à air du condenseur, après en avoir séparé autant que possible les matières grasses.

1. M. Kammerer a donné, dans le *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse* (novembre 1920), le compte rendu d'essais très soignés d'une chaudière *ambitubulaire* de la Société alsacienne de constructions mécaniques, suivi d'une étude intéressante des lois de la transmission de la chaleur dans les générateurs.

Pour pénétrer dans la chaudière, l'eau doit en surmonter la pression effective. Avec une pression effective de 10 kg par cm^2 , le travail nécessaire élèverait l'eau à la hauteur de 100 m : c'est une dépense de 100 *kgm* par kilogramme d'eau. Si la machine motrice desservie par cette chaudière dépense 13 kg de vapeur pour produire un kilowatt-heure ou 367.000 *kgm*, le travail utile correspondant à l'alimentation sera de 1300 *kgm*, c'est-à-dire 0,35 p. 100 du travail produit. En réalité, à cause des frottements de l'eau et des appareils, l'alimentation consomme un travail plus grand.

Elle est *continue* lorsque la vapeur qui sort de la chaudière est constamment remplacée par un poids d'eau égal, et *discontinue* lorsqu'elle se fait par intermittences. L'alimentation à peu près continue est nécessaire pour les générateurs qui ne contiennent qu'un très petit volume d'eau : dans le générateur Belleville, elle est régularisée par un appareil automatique. L'alimentation discontinue exige des appareils capables de donner par moments un débit supérieur à la dépense moyenne : il est d'ailleurs utile que la puissance des appareils d'alimentation soit, dans tous les cas, largement calculée.

L'alimentation des chaudières se fait au moyen de *pompes*, de *bouteilles alimentaires* ou d'*injecteurs*.

Une soupape de retenue (obligatoire en France) est utile au point où le tuyau d'alimentation pénètre dans la chaudière.

Quand on ne fait pas usage de réchauffeur, l'eau d'alimentation est le plus souvent envoyée au milieu de la masse d'eau contenue dans la chaudière; mais on peut aussi la faire pénétrer dans la vapeur. L'alimentation dans la vapeur est à recommander; un plateau sous l'arrivée d'eau recueille une partie des dépôts. Certaines précautions sont nécessaires dans l'installation de la tuyauterie, pour y éviter des chocs violents et destructeurs : à l'intérieur de la chaudière, le tuyau d'alimentation doit aller en montant, de manière à rester constamment plein d'eau.

La pompe est à piston plongeur, avec soupapes métalliques. La commande directe de la pompe alimentaire par le moteur principal, outre la difficulté de fonctionnement aux grandes vitesses, ne permet pas l'alimentation pendant les arrêts, et la pompe marche inutilement quand la chaudière n'a pas besoin d'eau; dans ce cas, l'eau aspirée est renvoyée à la bêche, ou bien le conduit d'aspiration est fermé par un robinet. Ces motifs font préférer, pour les grands appareils, la commande de la pompe par un moteur spécial ou *petit cheval*. La commande rectiligne, sans mouvement de rotation, est commode pour ces machines; mais souvent elles consomment beaucoup trop de vapeur. Si le travail de l'alimentation, frottements compris, exige 0,6 p. 100 du travail total produit, et si le petit cheval consomme par kilowatt-heure cinq fois plus de vapeur que le moteur principal, l'alimentation dépense 3 p. 100 de la vapeur produite; et on trouve souvent des consommations plus élevées. On peut d'ailleurs employer la vapeur qui actionne le petit cheval à échauffer l'eau d'alimentation.

• Les pompes centrifuges à moteur électrique remplacent avantageusement les petits chevaux à pistons.

La *bouteille alimentaire* est d'un emploi fréquent sur les générateurs qui servent au chauffage par la vapeur: c'est un récipient installé au-dessus de la chaudière: à l'aide d'un jeu de robinets, on le remplit d'eau, puis on le met en communication avec la chaudière.

Les *injecteurs* sont l'objet du § 89.

121. Épuration des eaux; désincrustants. — L'eau qui alimente les chaudières est rarement pure; les diverses substances qu'elle renferme ont presque toutes une action nuisible: les unes corrodent les tôles, d'autres les couvrent de dépôts solides, quelques-unes forment des émulsions visqueuses.

Certaines eaux, extraites de mines, contiennent de l'acide chlorhydrique ou sulfurique; si on doit les employer à l'ali-

mentation des chaudières, il convient d'en neutraliser l'acide au préalable par l'addition d'une base telle que la chaux ou la soude.

Les matières grasses d'origine animale ou végétale se décomposent à la chaleur des chaudières, et forment de l'acide oléique et d'autres acides, qui attaquent les tôles. Ces matières, ayant servi au graissage des cylindres, se retrouvent dans les condenseurs. L'emploi de huile minérale n'a pas le même inconvénient. Dans tous les cas, d'ailleurs, il convient de séparer autant que possible de l'eau d'alimentation, au moyen d'un filtre, les matières grasses, qui sont nuisibles même quand elles n'ont pas d'action corrosive.

A la température de l'eau des chaudières, le chlorure de magnésium, qui existe dans les eaux de la mer et de certaines sources, se décompose en magnésie et en acide chlorhydrique, qui attaque le fer.

Indépendamment de ces causes exceptionnelles d'attaque des tôles, la corrosion se produit très généralement dans la plupart des chaudières, souvent au bout d'un petit nombre d'années. Elle est due à l'oxygène dissous dans l'eau d'alimentation (en proportion par rapport à l'azote plus forte que dans l'atmosphère). Certains ingénieurs pensent que la présence de gaz carbonique, également dissous dans l'eau, favorise l'attaque du fer par l'oxygène.

Aussi les procédés de *dégazage* préalable de l'eau, qu'on commence à appliquer, ont un grand intérêt. L'eau, privée de gaz, doit être immédiatement employée, car, au contact de l'air, la dissolution des gaz est très rapide.

L'ébullition, combinée avec l'agitation, est un moyen de séparer de l'eau les gaz dissous. Un autre procédé, d'une application plus facile, consiste à faire passer l'eau, de préférence tiède, sur des tournures de fer qui s'oxydent. Certaines qualités de fer sont à choisir, comme s'oxydant plus aisément que d'autres.

L'alimentation dans la vapeur paraît aussi un moyen très

simple d'éviter ou d'atténuer l'action nuisible de l'air, l'attaque ne se produisant que dans les parties mouillées de la chaudière.

Les dépôts solides dans les chaudières sont formés par les matières que les eaux bourbeuses tiennent en suspension, et plus souvent par les sels de chaux dissous. Le bicarbonate de chaux, soluble dans l'eau froide, abandonne la moitié de l'acide carbonique dès que l'eau est chauffée, et donne un précipité de carbonate insoluble. L'eau froide peut tenir en dissolution une certaine quantité de sulfate de chaux, qu'elle abandonne en partie quand elle est chauffée.

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 contient :

Soit 0,0037 g de chaux ;

Soit 0,0114 de chlorure de calcium ;

Soit 0,0103 de carbonate de chaux ;

Soit 0,0140 de sulfate de chaux ;

Soit 0,0090 de chlorure de magnésium ;

Soit 0,0120 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. Il est nécessaire de débarrasser de temps en temps les chaudières de ces dépôts, en les lavant avec des jets d'eau et en raclant les parties entartrées.

Les matières grasses, qui sont amenées dans les chaudières par l'eau de condensation, forment 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 matières grasses forment aussi sur les tôles des enduits qui ralentissent la transmission de la chaleur : la température du métal risque alors de s'élever beaucoup trop.

Le moyen le plus sûr d'éviter ou du moins de beaucoup réduire les dépôts dans les chaudières consiste à purifier au préalable l'eau d'alimentation par décantation ou filtrage, si elle tient des matières solides en suspension, et par précipitation des sels dissous.

Parmi les nombreux procédés d'épuration chimique des eaux, les plus simples et les plus employés pour l'eau des chaudières consistent en additions de chaux et de carbonate de soude : la chaux précipite le bicarbonate de chaux, en le transformant en carbonate simple ; avec le sulfate de chaux le carbonate de soude donne du carbonate de chaux insoluble et du sulfate de soude qui reste dissous. La chaux ajoutée est dissoute dans l'eau, dont la quantité doit être assez grande, ou bien elle est en suspension, formant un *lait de chaux*. Le précipité de chaux est séparé par décantation ou par filtrage. La formation du précipité est souvent assez longue : certaines eaux, chargées de matières organiques, demeurent troubles très longtemps.

Plusieurs appareils ont été construits pour l'épuration continue des eaux des générateurs : les réactifs (chaux et carbonate de soude) sont ajoutés à l'eau en proportions convenables : des chicanes sont disposées pour recueillir les dépôts.

Lorsque l'eau n'est pas épurée au préalable, on cherche souvent à éviter les dépôts en croûtes dures à l'aide de désincrusters. Ces désincrusters ont des compositions

diverses ; parfois ils contiennent des substances inertes, ou même nuisibles ; leur action est d'ailleurs très variable selon la nature des eaux.

Des matières organiques, telles que les pommés de terre, l'amidon, la fécule, le tannin et divers bois de teinture, rendent les dépôts pulvérulents, et, par suite, d'une extraction facile. Ces matières ont parfois le défaut de faire mousser l'eau et de donner lieu à des entraînements avec la vapeur.

Dans les chaudières entartrées, les désincrustants font parfois détacher les croûtes formées par les dépôts : avec certaines formes de chaudières, l'accumulation de ces croûtes sur les tôles chauffées les expose à des coups de feu.

Le carbonate de soude, qui décompose le sulfate de chaux, est la base de nombreux désincrustants. Le zinc est employé surtout pour éviter l'attaque du fer : c'est la plaque de zinc, plus attaquable que le fer, qui se combine à l'oxygène. Les dépôts adhèrent moins aux tôles qui restent lisses¹.

Avec les sels très solubles, tels que le chlorure de sodium, on empêche la concentration indéfinie du liquide par l'extraction d'une fraction de l'eau introduite, extraction autrefois employée pour les chaudières marines alimentées à l'eau de mer ; en extrayant constamment le cinquième de l'eau d'alimentation, la proportion de sel ne dépasse pas cinq fois la proportion initiale. La chaleur de l'eau extraite, et rejetée à la mer, peut n'être pas perdue entièrement, si on l'utilise pour un chauffage méthodique de l'eau d'alimentation, formant un courant inverse.

122. Indicateurs de niveau. — Il est nécessaire de connaître à tout instant le niveau de l'eau dans les chaudières. En France le décret du 9 octobre 1907 prescrit, à cet effet, deux indicateurs distincts, dont l'un doit être un tube transparent.

1. Cet emploi du zinc paraît abandonné.

Ce tube, en verre ou en cristal, est tenu par deux tubulures en bronze fixées sur la chaudière (fig. 253). Deux robinets permettent de fermer les communications avec la chaudière ; un troisième robinet sert à la *purge* du tube et des communications. L'appareil est disposé pour qu'on puisse

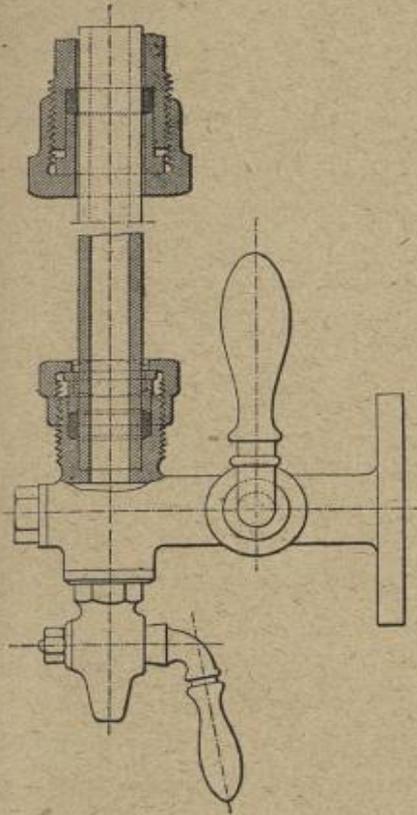


Fig. 253. — Montage des garnitures de tubes de niveau évitant l'obstruction ; la matière plastique est logée dans une gorge à quelque distance de l'extrémité du tube ; un presse-garniture, serré par un écrou, la comprime. La figure montre le robinet de communication inférieur avec la chaudière, le robinet de purge, et, à gauche, la tête de la vis qui bouche une ouverture placée dans le prolongement de la communication avec la chaudière, pour le nettoyage. La monture supérieure en bronze n'est représentée que partiellement.

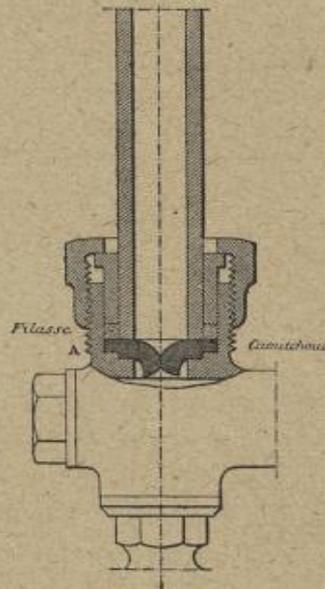


Fig. 254. — Tube en verre bouché par la matière plastique de sa garniture.

remplacer, pendant la marche, un tube brisé, et nettoyer les conduits des tubulures, quand la chaudière est hors feu. Il est bon que les robinets d'isolement soient manœuvrés à

l'aide d'une tige assez longue pour être maniée sans danger, lorsqu'un tube vient à se rompre.

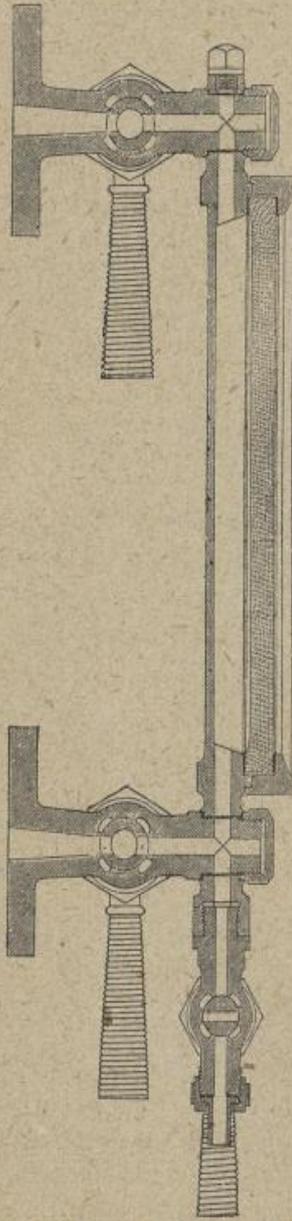


Fig. 253. — Tube de niveau métallique à glace.

Le tube en verre donne une indication commode, mais quelquefois trompeuse. Il importe que les communications avec la chaudière soient courtes et directes, et que rien ne vienne les obstruer.

Une garniture élastique, mal disposée (fig. 254), peut venir boucher le tube.

Des tuyaux de communication, longs et courbés, peuvent fausser l'indication du tube de niveau. Il suffit, du reste, d'étrangler le passage supérieur, en manœuvrant le robinet, pour élever le niveau dans le tube de verre.

On doit vérifier l'état de l'appareil par des purges fréquentes : une vérification complète exige la fermeture successive de chacune des deux communications avec la chaudière, pendant la purge.

Divers systèmes de fermeture automatique arrêtent les jets d'eau chaude et de vapeur qui se produisent quand le tube se brise. Avec ces appareils, les fermetures intempestives sont toujours à craindre, surtout au

moment des purges. Ils peuvent être utiles lorsque la fuite

d'eau et de vapeur, en cas de rupture du tube, se produit dans une chambre close où elle serait dangereuse.

On se protège d'ailleurs contre le danger des ruptures par des enveloppes formées de grillages ou de glaces épaisses.

On augmente la solidité de l'indicateur en substituant au tube de verre une monture métallique dans laquelle est encastrée une glace épaisse. La glace (fig. 255) peut porter, sur sa face interne, une série de cannelures verticales formant des prismes rectangulaires. Ces prismes, par le phénomène de la réflexion totale, renvoient la lumière dans la partie en contact avec la vapeur ; mais l'eau laisse passer les rayons lumineux et apercevoir l'intérieur de la monture, peint en noir. L'eau, qui semble de l'encre, est ainsi rendue extrêmement apparente.

L'ouverture d'un *robinet de jauge* donne un jet d'eau ou de vapeur, qui permet de vérifier si le niveau est à peu près à la hauteur convenable. Il y a deux ou trois robinets étagés.

Les *flotteurs* transmettent, hors de la chaudière, l'indication du niveau, au moyen d'une tige traversant une garniture, généralement trop ou trop peu serrée, ou mieux par l'action attractive d'un aimant sur une aiguille d'acier à travers un tube en bronze, ou bien en tordant un tube de métal élastique. Ils peuvent aisément commander des sifflets ou des sonneries, quand le niveau descend trop bas ou s'élève trop haut.

123. Soupapes de sûreté. — Une soupape de sûreté doit se soulever dès que la pression de la vapeur atteint une limite déterminée. En France, le décret du 9 octobre 1907 prescrit deux soupapes par chaudière, et chacune d'elles « doit suffire à évacuer à elle seule et d'elle-même toute la vapeur produite, dans toutes les circonstances du fonctionnement, sans que la pression effective dépasse de plus de un dixième la limite indiquée par le timbre réglementaire¹ ».

1. Le chauffeur doit veiller à ce que cette augmentation de pression ne se produise pas.

Il convient en outre, pour l'économie et pour la bonne marche des machines, que la soupape se referme sans laisser la pression s'abaisser beaucoup au-dessous de la limite fixée par le timbre.

La soupape doit être simple; l'entretien doit en être facile et le fonctionnement certain. Il ne faut pas que les conducteurs des chaudières puissent aisément gêner ou paralyser le fonctionnement des soupapes.

Pour calculer la charge, en kilogrammes, que doit porter une soupape, on multiplie la surface pressée par la vapeur, en cm^2 , par la pression effective, en kg par cm^2 .

La soupape repose sur une portée étroite, dont le diamètre intérieur définit la surface circulaire pressée par la vapeur. Elle doit être en contact avec le siège sur toute l'étendue de la portée prévue, sinon la vapeur presserait une surface plus grande qu'on ne le suppose.

La surface de portée est plane ou conique. La première forme offre une plus large issue à la vapeur, pour une même levée, généralement très petite, de la soupape, car la largeur de la fente est égale à la levée même si la portée est plane, tandis qu'elle est moindre avec une portée conique.

Le contact de la soupape et du siège s'obtient en *rodant* les deux pièces l'une contre l'autre, avec interposition d'un peu d'huile et de poudre fine d'émeri.

La soupape est guidée verticalement par un téton central ou par des ailettes. Il est essentiel que ces guides ne donnent pas naissance à un frottement notable et surtout qu'ils ne puissent pas se coincer.

La soupape peut être chargée directement par une masse métallique. Plus fréquemment on fait usage d'un poids moindre, agissant à l'extrémité du grand bras d'un levier, dont le petit bras charge la soupape; le calcul du poids, en fonction des bras de levier, est des plus simples; dans ce calcul, on peut tenir compte du poids du levier, qu'on suppose concentré au centre de gravité. La construction doit réaliser avec précision les bras de levier prévus dans le

calcul; l'articulation sur un tourillon laisse incertaine la position du point d'appui du levier : l'emploi des *couteaux* fait disparaître cette incertitude (fig. 256).

Sur les chaudières des locomotives, des bateaux, le mouvement fait danser les soupapes chargées par des poids, qui sont remplacés par des ressorts, agissant directement, ou par l'intermédiaire d'un levier.

La dimension des soupapes est établie empiriquement. Il n'est pas difficile de régler une soupape de manière qu'elle

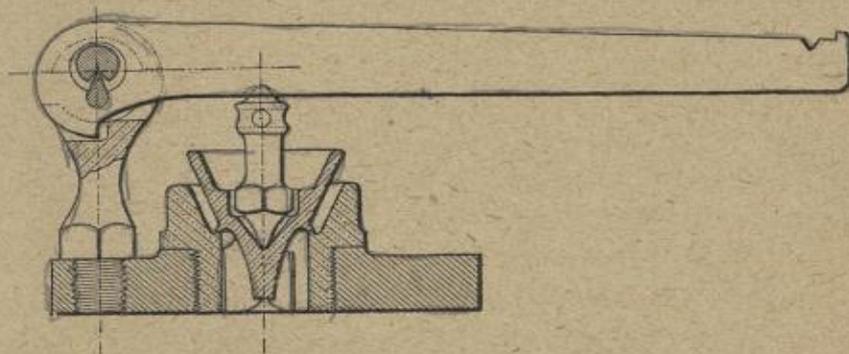


Fig. 256. — Soupape de sûreté Dulac, articulée sur couteau (le poids suspendu à l'extrémité du levier n'est pas représenté).

se lève avec précision, quand la pression de la vapeur atteint la limite supérieure, pourvu qu'elle soit bien construite et bien rodée; mais dès que la soupape fonctionne, la force qui la soulève change. Elle est pressée par une nappe de vapeur en mouvement, et la pression dans les diverses sections de cette nappe ne reste plus la même. En somme, dès que la soupape s'ouvre, elle tend à se refermer, et la pression dans la chaudière peut s'élever au-dessus de la limite supérieure, avant que la soupape débite toute la vapeur produite.

Avec un diamètre convenable, la soupape usuelle, malgré le défaut qui vient d'être signalé, suffit dans bien des cas; et il ne semble pas qu'en pratique ce défaut ait eu de conséquences fâcheuses. La soupape ordinaire peut toutefois

devenir insuffisante si la vaporisation est extrêmement active, et s'il existe des raisons spéciales pour soustraire la chaudière à toute cause de fatigue anormale, si légère qu'elle soit.

On améliore le fonctionnement de ces appareils en les dis-

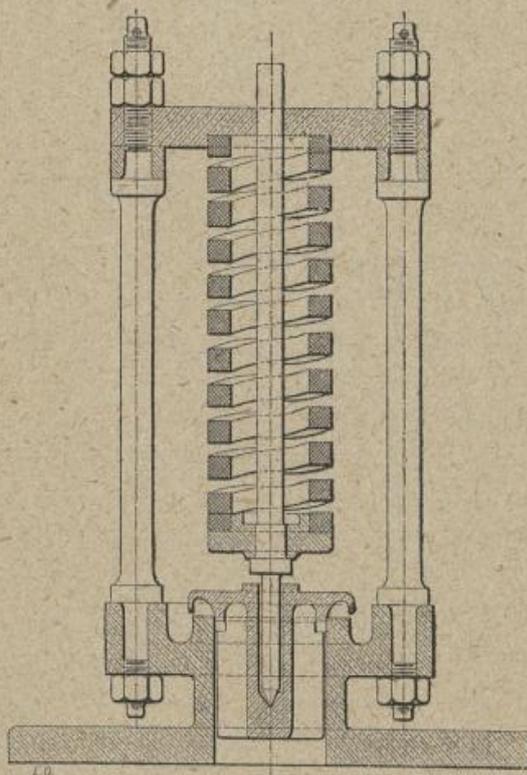


Fig. 257. — Soupape Adams à gorge et à charge directe, pour locomotives.

posant de telle sorte que la force qui les soulève augmente, ou au moins reste constante, lorsqu'ils laissent échapper la vapeur. Tel est le rôle de la gorge de la soupape Adams (fig. 257), du cône de la soupape Dulac (fig. 256).

Il est facile d'accroître ainsi la force qui soulève la soupape; mais alors on risque d'en retarder la fermeture, qui ne se produit qu'après un abaissement excessif de la pres-

sion dans la chaudière : c'est le défaut de certains types à grand débit; et on ne l'évite que par une construction très précise, conformément aux formes déterminées par tâtonnements, et par un entretien très soigné. Grâce au grand débit, le diamètre de la soupape peut être réduit.

La pression dans les chaudières est indiquée continuellement par le manomètre métallique décrit § 9.

124. Tuyauterie. — Les tuyaux de vapeur sont composés de tronçons terminés par des brides assemblées par boulons, sauf pour les très petits diamètres, dont la réunion se fait par raccords filetés.

On employait autrefois pour les tuyaux de vapeur le cuivre, facile à travailler et peu altérable, mais la résistance de ce métal diminue beaucoup vers la température de 200°. L'acier remplace le cuivre pour les tuyaux destinés à la vapeur sous forte pression ou surchauffée.

Le diamètre des tuyaux se détermine d'après les formules donnant la perte de pression, en fonction de la vitesse; il ne faut pas oublier, d'autre part, qu'en augmentant le diamètre, on augmente la surface refroidissante. Pour cette raison, comme pour l'économie de l'installation, on ne doit pas craindre des vitesses un peu fortes.

Les tuyaux de grande longueur sont exposés à des coups d'eau, qui se produisent au moment où on y laisse entrer la vapeur et qui sont assez violents pour provoquer des ruptures¹. Aussi est-il important de purger soigneusement les tuyaux, et de n'y faire pénétrer la vapeur que très lentement.

Lorsqu'on admet la vapeur dans une tuyauterie, elle s'allonge en prenant la température de la vapeur, qui atteint 400° dans certaines installations. Avec des tuyaux de faible diamètre et peu épais, des coudes de grand rayon, des enroulements en cor de chasse, peuvent se prêter aux effets de la

1. Consulter à ce sujet une étude de M. Walckenaer dans les *Annales des mines*, 19^e série, t. XV, p. 127.

dilatation. Mais ces dispositions sont insuffisantes pour des tuyaux épais et de grand diamètre. Il est nécessaire de prévoir des articulations efficaces qui soustraient la tuyauterie à tout effort anormal produit par la déformation, telles que le joint tournant, avec couronne de billes, étudié par M. Luc Denis¹.

125. Prises de vapeur. — La prise de vapeur, montée sur la chaudière, est fermée par une soupape. Lorsqu'elle atteint une grande dimension, une petite soupape supplémentaire, qui peut donner une admission préliminaire de vapeur (fig. 258), rend la manœuvre plus facile et évite la mise en pression trop brusque de la conduite.

L'article 14 du décret du 9 octobre 1907 prescrit que « sur les groupes générateurs composés de deux ou de plusieurs appareils distincts, toute prise de vapeur correspondant à une conduite de plus de 50 cm^2 de section intérieure, et par laquelle, en cas d'avarie à l'un des appareils, la vapeur provenant des autres pourrait refluer vers l'appareil avarié, est pourvue d'un clapet ou soupape de retenue, disposé de manière à se fermer automatiquement dans le cas où le sens normal du courant de vapeur viendrait à se renverser ».

On réduit ainsi la quantité de vapeur dégagée dans la chambre de chauffe par l'avarie d'une chaudière, pourvu que cette avarie ne mette pas hors de service le clapet de retenue.

Une solution plus complète consiste à munir chaque chaudière d'un clapet qui se ferme quand le débit de vapeur devient exagéré; les chaudières autres que celle avariée sont ainsi isolées. Ces clapets ont même été réglementaires en France pendant un certain temps; mais, devant les difficultés de réaliser des appareils de ce genre entièrement satisfaisants, on a cessé, en 1907, de les rendre obligatoires. On peut toutefois les employer avec avantage dans bien des cas.

Les *détendeurs* abaissent, jusqu'à une limite déterminée, la

¹. Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, année 1923, p. 326.

pression de la vapeur, un excès de pression étant fréquemment prévu dans les générateurs à tubes d'eau. Le détendeur assèche légèrement la vapeur et fait disparaître les variations de pression qui se produisent dans le générateur.

Le détendeur consiste en une soupape ou en un appareil d'obturation analogue, que commande un piston, soumis d'un côté à la poussée d'un ressort, et, de l'autre côté, à la pression de la vapeur détendue. Lorsque cette pression s'élève, le piston manœuvre la soupape, de manière à réduire l'orifice de la prise de vapeur; lorsqu'elle diminue, au contraire, le ressort augmente cet orifice. La

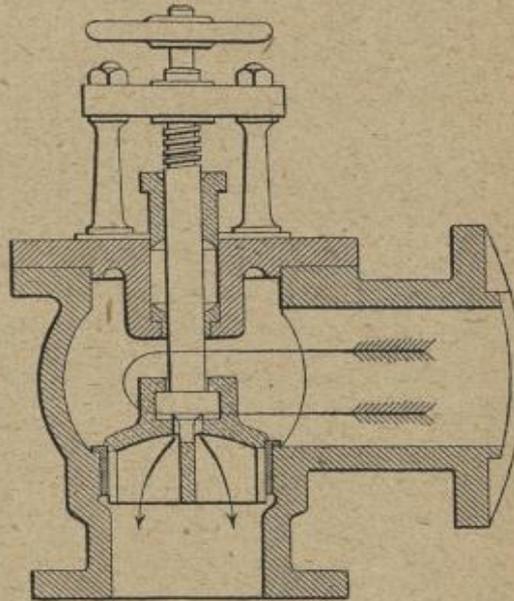


Fig. 258. — Soupape de prise de vapeur, avec petite soupape d'admission préliminaire; les flèches indiquent la vapeur sortant de la chaudière.

vapeur détendue n'a donc pas une tension rigoureusement constante: la variation correspond à celle de la poussée du ressort dans toute l'étendue de sa course, variation qui peut être minime.

On dispose ces appareils de manière qu'ils soient également chauffés de tous côtés par la vapeur, pour éviter les coincements dus aux dilatations inégales.

126. Isolants. — On doit revêtir soigneusement, avec des matières isolantes, l'extérieur des chaudières, des tuyaux de vapeur et des cylindres des machines, pour atténuer la déperdition de chaleur.

La quantité de chaleur, transmise à l'air par une paroi métallique non enveloppée en contact avec la vapeur, varie avec la nature de la paroi : si la paroi est polie, cette quantité de chaleur est moindre que si elle est rugueuse. Le nombre de calories transmises, en une heure, par mètre carré, dans un air calme, varie de 6 à 12 pour chaque degré de différence des températures de la vapeur à l'intérieur et de l'air extérieur. Avec un isolant qui recouvre le métal, on réduit cette perte à la moitié et même au tiers¹.

Les isolants employés sont très variés ; on se sert de bois, de liège en bandes, de corde, de tresses en paille, de terre argileuse avec de la paille hachée, de scories filées, de briques en liège aggloméré, de bien d'autres substances peu conductrices. Outre ses qualités intrinsèques pour réduire la transmission de la chaleur, on demande à un isolant de se mettre en place facilement, de ne pas trop charger les tuyaux, de ne pas se désagréger à la chaleur, et de pouvoir se démonter et se remonter ; il faut encore que le prix n'en soit pas trop élevé.

Il y a grand intérêt à isoler avec soin les tuyaux de vapeur, y compris leurs brides et tous leurs accessoires.

On se contente trop souvent d'une enveloppe en tôle mince emprisonnant une couche d'air.

127. Accidents. — Les chaudières donnent lieu à des accidents plus ou moins graves, depuis l'explosion foudroyante, qui ruine les constructions voisines, jusqu'aux petites déchirures, toujours à craindre parce que les brûlures par l'eau chaude et la vapeur sont dangereuses. En général, l'explosion est d'autant plus redoutable que la masse d'eau chaude sous pression mise subitement en liberté est plus grande. Ainsi la rupture d'un tube de chaudière produira peu d'effets destructeurs ; mais elle est dangereuse pour le personnel qui dessert l'appareil.

1. En prenant la valeur moyenne de 9 calories et une différence de température de 175°, avec un fonctionnement de 4000 heures par an, on trouve qu'un mètre carré non enveloppé consomme 100 kg de houille.

La gravité de ces ruptures de tubes peut être atténuée si les portes, qui enferment les faisceaux de tubes, sont solides et toujours bien fermées, de manière à ne pas s'ouvrir, en cas d'avarie, sous la poussée de la vapeur, qui s'échappera en soulevant une *trappe d'expansion*, ménagée à la partie supérieure du massif. Il convient que les portes des foyers et des cendriers se ferment automatiquement du dedans vers le dehors (article 16 du décret du 9 octobre 1907).

Dans les salles closes, et surtout à bord des navires, la rupture des tuyaux de vapeur est extrêmement dangereuse : de telles ruptures ont causé d'épouvantables désastres.

Certains accidents prennent une effrayante gravité, lorsqu'ils se produisent au milieu d'ateliers remplis d'ouvriers.

Les locomobiles employées pour les travaux de l'agriculture donnent lieu à des accidents assez fréquents.

Un phénomène curieux est celui des explosions simultanées de générateurs d'une même batterie (27 sur 32, à Shamokin, Pennsylvanie, le 11 octobre 1894; 22 à Friedenshütte, Silésie, le 23 juillet 1887)¹.

La fragilité du métal aggrave beaucoup les conséquences d'une rupture initiale; limitée si le métal est ductile, elle s'étend quand il est fragile et peut intéresser toute la chaudière.

La projection, à grandes distances, de fragments de la chaudière, s'explique, une fois la rupture produite, par la production subite d'une grande quantité de vapeur qui résulte de la chute brusque de pression². Lorsqu'une chaudière s'ouvre à une extrémité, elle est parfois lancée tout entière à distance par la réaction de la vapeur qui s'échappe par l'ouverture.

Les causes des accidents sont de trois sortes :

En premier lieu, l'appareil peut avoir des défauts origi-

1. *Annales des Mines*, 8^e série, t. XV, p. 5.

2. 1 000 kg d'eau à 180° (pression absolue, 10,25 kg par cm²) brusquement soumis à la pression de l'atmosphère, donneront environ 850 kg d'eau à 100° et 150 kg de vapeur à la pression atmosphérique, occupant un volume de 250 m³.

nels : quelquefois les formes sont mal étudiées et les différentes parties ne sont pas proportionnées aux efforts qu'elles subissent en service ; la qualité des tôles employées est défectueuse, ou bien le travail de chaudronnerie est mal exécuté.

En second lieu, si bien construite que soit une chaudière, elle est soumise à l'usure, comme tout autre appareil, plus même que d'autres appareils.

Enfin, on se sert maladroitement ou imprudemment des générateurs, en négligeant l'entretien courant, en élevant outre mesure la pression, en oubliant l'alimentation, en laissant s'accumuler les dépôts de tartre.

Lorsqu'un accident se produit, il arrive fréquemment qu'il est dû à l'action combinée de plusieurs causes. Ainsi l'usure est surtout à craindre sur une chaudière dont la résistance est à peine suffisante quand elle est neuve. Un léger excès de pression, qui serait sans danger sur une bonne chaudière, peut être funeste si elle est mal construite ou affaiblie par l'usure.

Le manque de résistance, par vice d'étude, est moins rare que ne seraient tentées de le croire les personnes étrangères à la construction. Il est difficile de calculer avec précision la fatigue des diverses pièces d'une chaudière, à moins que les formes n'en soient extrêmement simples ; les dilatations inégales des différentes parties produisent des poussées et des tiraillements, dont les effets sont loin d'être toujours négligeables. Lorsqu'une chaudière s'écarte des formes consacrées par une longue expérience, il faut l'examiner avec grande attention pour s'assurer qu'elle est solide, et encore on risque de laisser passer inaperçue quelque grave erreur. Et même quand on reproduit des formes bien connues, de légères modifications, une simple augmentation de grandeur, une élévation du timbre, peuvent fatiguer jusqu'à un point dangereux certaines parties, qui étaient déjà un peu trop chargées, sans qu'on s'en doutât, dans les anciennes constructions.

Les chambres d'air et de vapeur, dans les parties chauffées, qu'on remarque parfois à la partie supérieure des bouilleurs, tiennent aussi à un vice d'étude; la tôle est sujette à une altération rapide au-dessus de ces chambres.

Dans l'exécution des chaudières, on constate trop souvent des défauts : bien des tôles employées sont défectueuses. Quand on voit combien les tôles de certaines chaudières sont cassantes, on s'étonne qu'elles aient jamais pu résister en service. Le travail des tôles est souvent une cause d'altération, malheureusement peu apparente, quand il est exécuté à une certaine température du métal (au *bleu*, vers 300°).

A l'emploi de mauvaises matières premières s'ajoute l'exécution défectueuse : tôles mal assemblées, trous de rivure ne se correspondant pas, et ramenés en regard par l'opération du brochage, rivets mal posés, cassures entre les trous de rivets.

Un défaut, autrefois assez fréquent, des tôles de fer, était la présence de *pailles* ou dédoubleures, par suite de manque de soudure des mises qui les composent. Si elle se trouve fortement chauffée, la paille produit le soulèvement d'une bosse qui se détruit rapidement. Dès que la paille ou la bosse a quelque étendue, il faut remplacer la tôle ou du moins y mettre une pièce, qui se trouve placée dans de mauvaises conditions, la rivure et la double épaisseur de métal étant à l'endroit le plus chauffé. Ce défaut est devenu rare, avec le métal fondu généralement en usage aujourd'hui.

La seconde cause de danger se trouve dans l'usure des tôles, parfois très rapide; des corrosions locales se développent en peu d'années, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur des chaudières.

La corrosion intérieure est quelquefois due à l'emploi des eaux acides, mais généralement à la présence de l'oxygène dissous dans l'eau, comme on l'a vu plus haut.

Parfois la corrosion débute par des piqûres isolées, ou

pustules. Plusieurs piqûres voisines, par leur extension progressive, finissent par amincir la tôle sur une surface étendue. Les tubes en fer et en acier sont le siège d'attaques analogues.

Les corrosions produisent aussi des sillons allongés, qui peuvent devenir fort dangereux, surtout le long des pinces, à l'endroit où une tôle cesse de porter contre la tôle contiguë, et dans les parties embouties. C'est ainsi que dans les chaudières de locomotives le bord arrondi des plaques tubulaires de boîte à fumée se corrodent parfois en peu d'années. De même des sillons se creusent dans les arrondis concaves en contact avec l'eau.

Ces effets se produisent dans les parties où la tôle est soumise à des efforts répétés de flexion. Toutefois, dans les parties qui ne sont en contact qu'avec la vapeur, les tôles restent en général intactes. Quelquefois des sillons se produisent en lignes horizontales à l'affleurement du niveau moyen de l'eau.

La corrosion se produit aussi pendant le chômage des générateurs, par l'action de l'air humide, surtout quand il reste un peu d'eau dans les chaudières après la vidange, comme dans le fond d'une virole de grand diamètre, comprise entre deux autres plus petites. Lorsque le chômage d'un générateur doit se prolonger, il importe de l'assécher soigneusement, et de prendre quelques précautions pour le maintenir bien sec, ou bien de le tenir complètement rempli d'eau (sauf en temps de gelée).

La présence de matières grasses, d'origine végétale ou animale, dans l'eau des chaudières, est une cause d'attaque, car elles donnent des produits acides. Les huiles minérales sont plus stables mais elles ont une action mécanique fâcheuse en gênant la transmission de la chaleur de la tôle à l'eau.

Les corrosions extérieures sont déterminées principalement par l'action des fuites de l'eau de la chaudière, action destructive dès qu'elle se prolonge. Elle s'exerce le long des

pinces, autour des rivets et de tous les joints mal faits, autour des bouchons autoclaves fréquemment démontés.

Ces corrosions ne doivent pas exister sur une chaudière

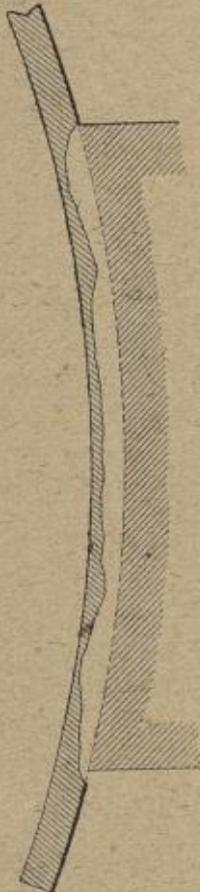


Fig. 259. — Corrosion extérieure d'une tôle de chaudière, par fuites au contact d'une maçonnerie.

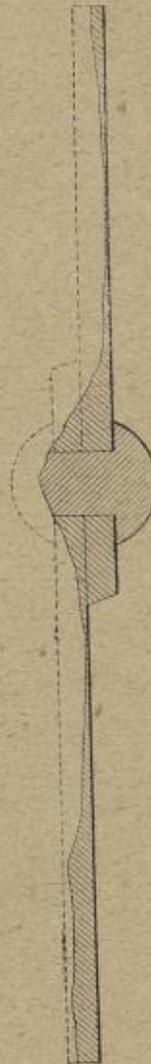


Fig. 260. — Corrosion extérieure de la tôle d'un bouilleur réchauffeur.

bien construite et bien entretenue. Si la fuite se produit au contact de la maçonnerie, qui forme alors comme un emplâtre toujours humide sur la tôle, la corrosion s'étend sur toute la surface couverte (fig. 259).

Un autre genre de corrosion extérieure a été constaté dans les réchauffeurs (fig. 260), quand ils ne reçoivent que des gaz déjà fortement refroidis et quand ils sont placés dans des carneaux humides : la corrosion peut alors tenir à l'attaque par l'acide sulfurique, qu'on trouve dans la suie qui recouvre ces réchauffeurs. Cet acide vient de l'oxydation du gaz sulfureux, produit de la combustion des pyrites (sulfure de fer), que renferment souvent les houilles. Cette action ne se produit jamais lorsque les gaz quittent la chaudière à une température un peu élevée.

Les négligences dans l'entretien des générateurs ne sont pas rares : on ne les débarrasse pas en temps utile, par des lavages, du tartre, qui s'accumule petit à petit, jusqu'à faire rougir les tôles directement chauffées ; les soupapes fonctionnent mal et restent collées sur leurs sièges ; les indicateurs de niveau, les manomètres, sont en mauvais état et donnent des indications inexactes. Ces négligences n'engagent pas seulement la responsabilité du chauffeur, mais ses chefs sont également coupables, quand elles sont habituelles.

Enfin le mauvais emploi des appareils peut causer un accident d'un moment à l'autre, par excès de pression ou par défaut d'alimentation. L'excès de pression est voulu ou non, suivant que les soupapes sont à dessein surchargées ou calées, ou bien mal entretenues et collées sur leurs sièges.

Les effets du manque d'eau et de l'alimentation intempes- tive sur des tôles trop chauffées ont été souvent exagérés. Il est certain que les tôles perdent leur ténacité, quand elles arrivent au rouge : si l'on s'aperçoit qu'une chaudière est dans cet état dangereux, il faut jeter ou couvrir le feu et éviter toute cause d'augmentation de pression, même légère. C'est surtout dans les chaudières à foyer intérieur que le manque d'eau peut avoir des conséquences désastreuses, parce que les ciels de foyer, une fois découverts, arrivent vite au rouge. Lorsque les tôles sont très ductiles, la pres-

sion de la vapeur les emboutit quelquefois, en pareil cas, vers l'intérieur du foyer, sans les déchirer.

On a souvent supposé qu'en alimentant une chaudière dont les tôles avaient rougi par manque d'eau, on produisait une élévation considérable de pression, très dangereuse, par suite de la formation subite d'une grande quantité de vapeur. L'expérience, comme le raisonnement, démontre l'inanité de cette théorie.

128. Épreuves et surveillance. — Pour vérifier si les chaudières sont étanches et assez résistantes, on les soumet à une pression déterminée, en y refoulant de l'eau avec une pompe. Cette *épreuve à la presse hydraulique* est souvent obligatoire, notamment en France. L'épreuve porte sur les chaudières neuves et doit être renouvelée au bout de certains délais : elle est, en outre, prescrite dans divers cas, tels que réparation, vente de l'appareil.

La pression d'épreuve dépasse la pression la plus élevée en marche, suivant un principe général des essais de résistance, et aussi parce qu'en service les dilatations inégales augmentent la fatigue des tôles. Il convient toutefois que la surcharge d'épreuve ne soit pas assez forte pour détériorer l'appareil. En France, cette surcharge est de 6 kg par cm^2 , (réduite à 3 dans certains cas de réépreuve) pour les chaudières fonctionnant à une pression effective supérieure à 6 kg par cm^2 , sans excéder 20.

L'essai à la presse est une bonne garantie de l'étanchéité des chaudières, plus difficile à obtenir à froid qu'à chaud. Au point de vue de la résistance, elle ne donne pas une sécurité complète, car on a vu des appareils dangereux la supporter avec succès. Aussi doit-elle être complétée par l'examen minutieux des tôles et des rivures, à l'extérieur et à l'intérieur.

La démolition des massifs de maçonnerie, nécessaire pour l'examen extérieur des tôles de certaines chaudières, rend parfois l'épreuve assez gênante; mais indépendamment

même de l'épreuve, la prudence commanderait de ne pas différer indéfiniment cet examen.

Pour éviter, des projections dangereuses, en cas de rupture pendant l'essai, il convient que la chaudière soit entièrement remplie d'eau. Pour boucher une ouverture, il ne faut pas employer un tampon en bois, qui pourrait être projeté. La pression est mesurée à l'aide d'un manomètre étalon monté sur la chaudière.

L'inspection périodique des chaudières, parfois exposées à des usures rapides en certaines parties, est la meilleure garantie contre les accidents. Cette inspection exige une expérience spéciale : peu de personnes peuvent l'acquérir aussi complètement que les agents des associations de propriétaires d'appareils à vapeur.

129. Conduite des chaudières. — Avant d'allumer le feu sous une chaudière, il ne faut jamais négliger de s'assurer qu'elle contient de l'eau jusqu'au niveau normal; la présence d'eau dans le tube transparent n'est pas une garantie suffisante, tant qu'on n'a pas vérifié que ce tube communique librement avec la chaudière. L'allumage du feu sous la chaudière vide la détériore gravement en peu d'instant. On s'assure que les divers robinets sont dans la position convenable, celle de fermeture (sauf pour les communications du tube de niveau), et que les soupapes de sûreté peuvent jouer librement. On doit porter une attention spéciale aux robinets de vidange, qui peuvent rester ouverts sans que cette position dangereuse soit bien apparente.

Avant l'allumage, toutes les parties qui s'obstruent rapidement, telles que cendriers, boîtes à fumée, tubes à fumée, ont dû être nettoyées.

Autant que possible, les feux ne doivent pas être poussés au début : une mise en pression lente est favorable à la conservation des chaudières.

Le combustible doit être chargé fréquemment et par petites quantités, de manière à entretenir sur la grille une

couche d'épaisseur uniforme ; il est bon de diminuer le tirage par la manœuvre du registre de la cheminée, pendant l'ouverture de la porte du foyer, afin d'éviter l'entrée d'air froid en excès, mais c'est une précaution assez assujettissante. Il ne faut pas la négliger toutefois quand l'ouverture des portes se prolonge, par exemple pour le *décrassage* de la grille, ou enlèvement des mâchefers qui la recouvrent.

La pression doit être maintenue régulière, en réglant sur les besoins les chargements de combustible, en manœuvrant le registre de la cheminée, et en ralentissant ou en forçant l'alimentation, quand le type de chaudière permet une variation du plan d'eau. Toutefois, l'alimentation régulière et continue est recommandable en général.

On purge de temps en temps, toutes les deux heures par exemple, le tube de niveau. Un tube de niveau brisé sera remplacé sans délai : il doit toujours exister, à la disposition des chauffeurs, des tubes de rechange, coupés à la longueur voulue. On soulèvera de temps en temps les soupapes de sûreté pour en vérifier le bon fonctionnement.

Lorsque le joint d'une pièce fixée contre une chaudière vient à perdre, il faut éviter de resserrer les écrous qui fixent cette pièce pendant que la chaudière est en pression, surtout quand la bride d'assemblage est en fonte. Ce serrage pendant la marche risque de causer des ruptures désastreuses.

Quand le chauffeur s'aperçoit que l'eau manque dans la chaudière (ce qui ne peut guère se produire quand les précautions qui viennent d'être rappelées ont été observées), s'il a constaté la présence de l'eau peu de temps auparavant, et s'il ne remarque rien d'anormal, il n'a qu'à rétablir le niveau par une alimentation abondante. Le cas est plus embarrassant quand on ignore depuis quand le niveau d'eau a cessé d'être visible. On a bien la ressource extrême de jeter le feu, mais il serait en général aussi bon de ralentir la combustion, en fermant le registre et en couvrant le feu, et d'alimenter, ce qui fait rapidement tomber la pression.

On ne doit pas chercher en effet dans un cas pareil à maintenir sans arrêt la production de vapeur.

Pour l'arrêt d'une chaudière, si les feux doivent être maintenus allumés, on les couvre, on ferme le registre de la cheminée et les portes du cendrier, et le niveau de l'eau doit être élevé au maximum. On peut alors abandonner la chaudière, quand la pression s'est abaissée au-dessous de la normale, pourvu qu'on soit sûr du bon fonctionnement des soupapes de sûreté. Il est prudent de fermer les robinets du tube de niveau, pour éviter la vidange de la chaudière, s'il venait à se rompre ; il ne faut pas oublier de les rouvrir à la reprise du service¹.

Quand la chaudière doit être mise hors feu, l'économie commande de laisser aussi peu de charbon que possible sur la grille au moment de l'arrêt.

Avant d'ouvrir la prise de vapeur sur la chaudière, on s'assure que les tuyaux dans lesquels on va envoyer la vapeur ne contiennent pas d'eau, et l'ouverture doit être très lente.

A certains intervalles, qui dépendent de la nature des eaux et de la quantité vaporisée, il faut arrêter la chaudière pour enlever les dépôts. Quelquefois la vidange se fait à chaud ; mais une vidange trop précipitée fatigue les tôles, qui risquent d'être trop chauffées, en l'absence de l'eau, par les maçonneries encore chaudes : un lavage ultérieur à l'eau froide, avant refroidissement, est une cause d'altération des tôles et de dislocation des rivures. En outre, les dépôts mis à sec durcissent rapidement à la chaleur, et l'enlèvement en devient difficile : il faut *piquer* les tôles, travail pénible qui risque de détériorer le métal.

Quand on laisse la chaudière se refroidir complètement, avant la vidange (ce qui peut exiger plus d'une semaine pour une chaudière entourée de maçonneries) on peut enlever

1. Il est utile de préparer une pancarte avec l'indication bien visible « Robinets fermés » placée à côté du tube de niveau.

les dépôts par le jet d'une lance ou par un simple grattage, à condition d'opérer immédiatement avant qu'ils ne séchent. Au bout d'une demi-heure ou même d'un quart d'heure après la vidange, ils commencent à durcir et à adhérer aux tôles. On peut accélérer le refroidissement en renouvelant deux ou trois fois l'eau de la chaudière (après un premier refroidissement pendant deux ou trois jours : on laisse écouler l'eau tiède à mesure qu'on fait entrer l'eau froide. Ensuite, pour éviter le durcissement des dépôts pendant l'opération même du nettoyage, on fractionnera la vidange : par exemple, dans une chaudière à bouilleurs, on videra successivement le corps principal, puis chacun des bouilleurs¹.

1. Ce procédé intéressant a été décrit par M. Schmidt, directeur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise. (Voir *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, janvier 1898, p. 94.)

CHAPITRE XIII

EMPLOI DES MACHINES

130. **Services demandés.** — L'extrême variété des machines rend difficile le choix de celle qui convient pour chaque application. En faisant ce choix, on doit observer quelques règles générales, qui, du reste, s'appliquent à peu près de même pour tous les appareils industriels.

Chaque machine doit satisfaire à plusieurs conditions : la première est évidemment de pouvoir faire le service qu'on en attend. Aussi est-il important d'établir au préalable un programme aussi précis que possible de ce service.

On peut dresser une classification générale des diverses circonstances à prévoir dans le programme d'un moteur.

En premier lieu, la puissance nécessaire est ou constante ou variable. En parlant de puissance constante, on veut dire, en réalité, que les variations en sont minimales. Les variations importantes de la puissance peuvent être demandées dans des conditions très différentes, soit d'un instant à l'autre pendant la marche, soit, au contraire, pour des périodes plus ou moins prolongées en régime constant, soit seulement en vue d'augmentations ou de réductions futures.

Quand la puissance demandée est très grande, un moteur unique prend des proportions gênantes; d'autre part, la nécessité d'appareils de rechange s'impose pour assurer la continuité absolue de certains services, par exemple dans les stations centrales électriques, pour les souffleries de hauts fourneaux. Lorsque la puissance demandée est très variable, la multiplicité des moteurs d'une station permet

de les faire toujours fonctionner dans de bonnes conditions, en nombre plus ou moins grand.

En ce qui concerne la vitesse de marche, on fixe d'habitude la vitesse angulaire de l'arbre, ou le nombre de tours par minute. Le nombre de tours restant à peu près constant, on demande une régularité plus ou moins grande de la vitesse angulaire ; les variations doivent en être très faibles pendant chaque tour pour certaines applications, telles que la commande des filatures, la production de la lumière électrique ; certains usages admettent des irrégularités un peu plus grandes ; enfin pour actionner les cylindres soufflants, par exemple, des variations assez fortes sont acceptables.

Pour certaines applications, au contraire, la vitesse peut varier entre des limites étendues : c'est ainsi que des pompes donnent par minute un nombre de coups variable suivant le débit nécessaire. Les machines de bateaux sont parfois conduites à des allures différentes. Les variations de vitesse sont fort grandes pour la locomotive.

La marche d'un moteur doit être tantôt continue, pendant une période parfois assez longue, tantôt coupée par des arrêts fréquents. Les dispositions de graissage sont prévues en conséquence.

Les conditions de démarrage sont différentes dans les diverses applications. Il est nécessaire qu'il se fasse rapidement, et sans hésitation, pour les machines d'extraction, les locomotives. Il en est de même pour les machines marines, les moteurs réversibles de laminoirs, mais alors le démarrage est facile, parce que la résistance est faible à ce moment.

Entrant dans des détails spéciaux, on tiendra compte des conditions d'emplacement de la machine, de la nature du personnel qui en aura la charge, des ressources locales pour la réparation.

Il ne faut pas omettre d'examiner les moyens de transport de la machine depuis les ateliers de construction jusqu'au

lieu où elle sera montée, et les appareils de levage disponibles pour la mettre en place. Par exemple, certaines usines ne sont accessibles que par des chemins muletiers ; les appareils qu'on y envoie doivent être composés de petites pièces facilement transportables. Les chemins de fer ne peuvent admettre les chargements dépassant leur gabarit.

Une considération de première importance est la sécurité des personnes qui se servent des machines et qui les approchent. Elle est assurée d'abord par les proportions des diverses parties, l'emploi de bonnes matières et le soin dans l'exécution. Mais il est en outre une foule de détails, qu'enseigne l'expérience, parfois insignifiants en apparence, qui font disparaître des risques d'accidents. C'est ainsi que des garde-corps suffisants entoureront les volants et autres pièces tournantes ; les engrenages seront recouverts d'enveloppes ; les pièces mobiles ne devront pas s'approcher tellement des pièces fixes qu'elles puissent broyer une main ou un bras imprudemment avancé. Avec le bâti Corliss, il arrive souvent que la bielle, dans sa plus grande inclinaison, s'approche trop de l'extrémité des glissières.

Les dispositions de sécurité ont été l'objet d'études particulières, de publications fort utiles et de musées spéciaux, notamment à Paris au Conservatoire des Arts et Métiers.

En ce qui concerne les chaudières, il convient que les chambres de chauffe soient munies d'issues commodés, afin que les chauffeurs puissent s'échapper en cas d'accident. Ces issues doivent exister aux deux extrémités de la chambre de chauffe ; si elle est longue, il faut aussi des sorties intermédiaires. Un tube crevé, une tôle fissurée, peut donner issue à un jet très dangereux d'eau chaude : il faut que la chambre puisse être évacuée immédiatement et sans qu'on ait à passer sous le jet brûlant,

— 131. **Prix de revient.** — Lorsqu'une machine, appropriée aux diverses conditions spéciales de l'emploi qu'on en veut

faire, peut rendre les services qu'on en attend, il reste à déterminer ce que coûtent ces services : seul le prix de la puissance, que fournit un moteur, permet d'en apprécier l'utilité réelle, et de le comparer à des appareils équivalents.

Il est assez facile, avec un peu de soin, d'établir le compte d'une machine installée ; on en déduit le devis du prix de la puissance que fournira un moteur projeté ; ce devis est forcément approximatif, puisqu'il comprend des éléments variables, comme le prix des combustibles.

La dépense des machines est souvent rapportée au cheval-heure, ou aux 270 000 *kgm*. Il convient que le travail dont on donne ainsi le prix soit le travail effectif produit par la machine. D'autres fois la dépense est comparée à la tâche utile accomplie par le moteur et par les appareils qu'il commande ; c'est ainsi que, pour une machine élévatrice, on détermine le prix du mètre cube d'eau élevée à une certaine hauteur ; pour une machine marine, on compte le prix du parcours effectué avec une vitesse déterminée ; pour une locomotive, le prix du kilomètre dans des conditions fixées. En pareil cas, il convient, autant que possible, d'isoler, dans la dépense totale, la part propre du moteur et celle des appareils qu'il commande.

Même quand on ne considère que le moteur seul, en établissant le prix des 270 000 *kgm*, ce prix subit l'influence de circonstances étrangères au moteur même, dont il faut tenir compte avec grand soin. Il ne reste pas le même pour un travail constant et pour un travail variable, pour une marche continue et pour un emploi intermittent. Les prix les plus bas s'obtiennent par une marche à peu près continue, avec une puissance uniformé.

Le fonctionnement d'un moteur entraîne des frais d'exploitation qui se renouvellent continuellement ou à de courts intervalles : telles sont les dépenses de combustible, d'huile, de matières diverses, nécessaires à l'entretien courant et aux petites réparations ; celle de main-d'œuvre, pour

la conduite et l'entretien ; il y faut joindre les impôts, les assurances, la surveillance. Quelques-unes de ces dépenses subsistent même quand le moteur chôme.

D'autres dépenses, nécessaires pour obtenir les services d'un moteur, se font une seule fois, ou à de long intervalles : ce sont celles qui résultent de l'installation première et des grandes réparations ou des modifications de l'appareil. Ces *dépenses d'établissement* sont faites par avance, et on en profite pendant une période assez longue, tandis que les *dépenses d'exploitation* se règlent à peu près au moment où elles sont utiles. C'est là surtout ce qui les distingue, car elles ne sont pas d'essences si différentes qu'on le croit souvent : elles se feraient dans les mêmes conditions si, par exemple, en montant une machine, on était obligé d'approvisionner le charbon qu'elle consommera pendant une longue suite d'années, ou si, inversement, on la payait au constructeur par une série d'annuités. Elles se confondent d'ailleurs pour une machine prise en location.

Il est logique de répartir à peu près régulièrement, entre les diverses périodes de marche des machines, ces dépenses initiales, ou rarement renouvelées, comme on répartit les dépenses d'exploitation : c'est ce qu'effectuent plus ou moins bien les diverses combinaisons d'amortissement.

Indépendamment de toute opération comptable, une machine, au moment où elle vient d'être installée, à une certaine valeur. Au bout d'un certain temps, après une année par exemple, la valeur en est habituellement moindre : on a consommé, pendant l'année, une partie de la valeur de la machine, comme on a consommé le charbon et le travail des chauffeurs. Que cette diminution de valeur figure ou non dans les comptes, elle ne s'en produit pas moins. Il en sera de même pendant les années suivantes.

La diminution continuelle de la valeur des machines tient à trois causes principales : d'abord à l'usure, qui résulte du travail, mais qui se produit même pendant les chômages (surtout pour les chaudières) ; ensuite aux per-

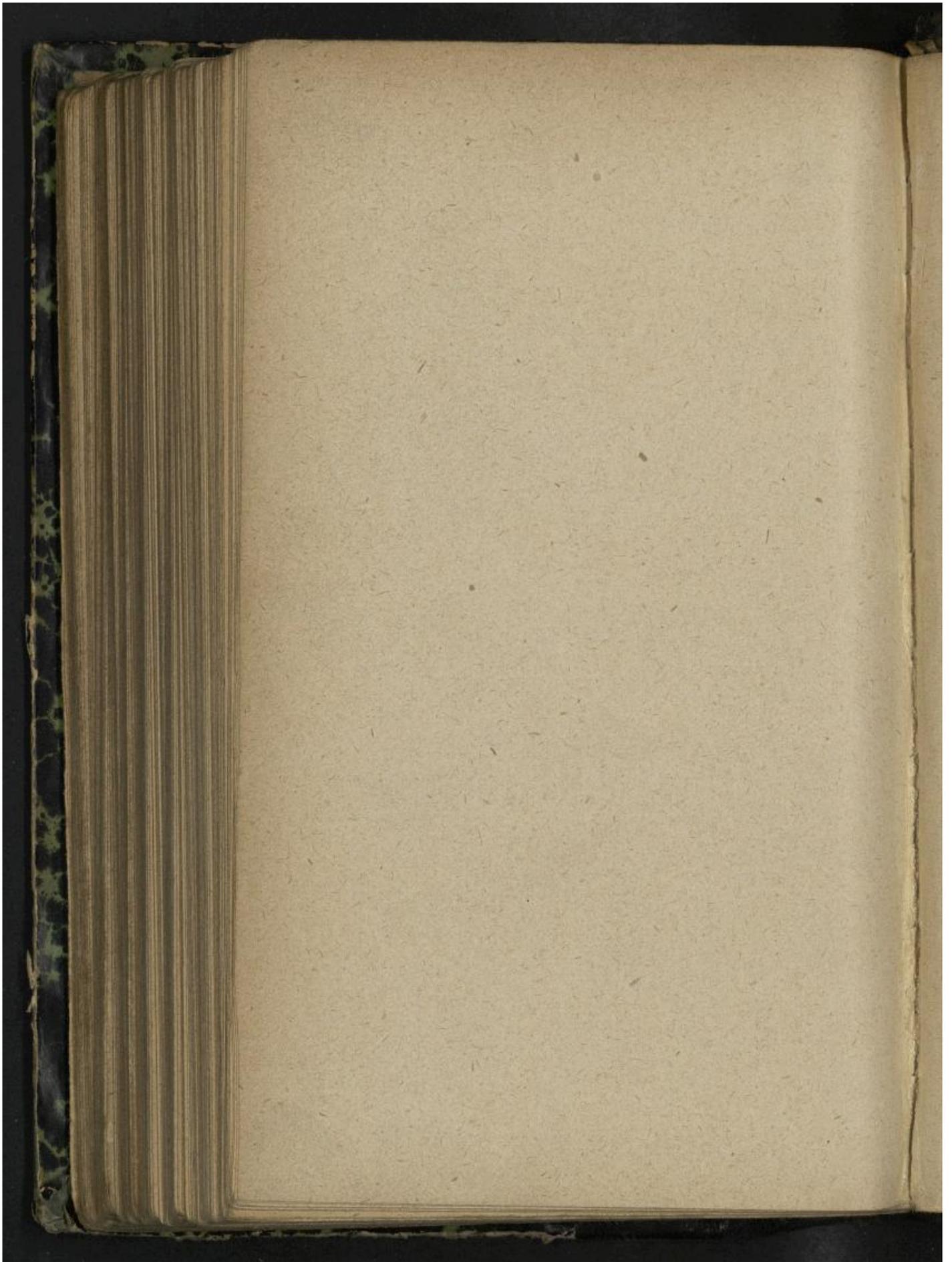
fectionnements de la construction, qui livre des types de machines meilleurs ou de fabrication moins coûteuse ; enfin à la variation des services qu'on leur demande, d'où résulte fréquemment l'insuffisance des machines anciennes.

Cette réduction de la valeur des appareils, par suite de l'usure et de la dépréciation, pour être moins apparente pendant une courte période, ou plutôt moins observée, que la consommation directe de main-d'œuvre, de combustibles, d'huile, n'en est pas moins réelle et inévitable. Une machine installée dans une usine est une partie du capital fixe de cette usine, partie dont la valeur diminue peu à peu et finit par disparaître entièrement, lorsque la machine ne constitue plus qu'un amas de ferraille.

Ces considérations montrent qu'on doit affecter chaque année une certaine somme à l'amortissement des machines, somme qui correspond à peu près à leur dépréciation réelle, et qui s'ajoute aux dépenses directes d'exploitation. En outre, on doit tenir compte de l'intérêt du prix de l'installation, qui peut avoir été faite au moyen d'un emprunt. Si cet emprunt est remboursable en une période qui correspond à la durée de la machine, on voit qu'en réalité elle aura été payée par une série d'annuités pendant la durée de son fonctionnement.

Les dépenses d'amortissement et d'intérêt élèvent le prix du cheval-heure d'autant plus que la machine aura fonctionné dans l'année pendant un moindre nombre d'heures.

Les considérations qui précèdent peuvent se trouver quelque peu modifiées par suite de l'énorme augmentation des prix qui a suivi la grande guerre : la valeur actuelle d'une machine peut dépasser beaucoup le prix d'achat, mais les amortissements n'en restent pas moins nécessaires.



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

TABLE ALPHABÉTIQUE

A	
Abscisses	18
Accidents	398
Accumulateurs de vapeur.	273
Action des parois	54
— des parois des compound	72
— directe de la pression	2, 284
— directe (machines à)	178, 243
Adams (soupape).	394
Adiabatique (détente).	45
Aéro-condenseur.	313
Ailettes (tubes à)	360
Air, action dans les chaudières	385
Alimentation.	382
Allan (coulisse).	130
Allis-Chalmers, condenseur.	298
Ambitubulaire (chaudière)	373
Amortissement.	414
Amortisseur à huile, à vapeur:	167
Andrade, régulateur	203
Anhydride sulfureux.	85
Anthracites	316
Arago, histoire.	1
Arbre coudé	225
— de relevage.	119, 138
Arbres.	225
Arrêt des chaudières.	408
Aubes de turbines	254, 273
Audemar, distribution à soupapes	169
Autel.	322
Avance angulaire	9
— linéaire	98
Avances linéaires constantes	130
— linéaires, coulisse de Stephenson	123
B	
Babcock et Wilcox (générateur).	366
Bague de fond.	221
— de piston	219
— de tube	360
Baïonnette (bâti à).	211
Balancier de renvoi du tiroir.	109
— (machine à)	7, 235
Balanciers inférieurs	10, 246
Baromètre	14
Barreaux de grille	321
Barres d'excentrique.	27, 98
— droites, croisées (coulisse).	120
Barrus, calorimètre.	61
Bâtis.	211
Behrend et Zimmermann, vapeurs combinées.	85
Bélidor.	4
Belleville, chaudière	362
Bérendorf (tubes).	361
Bielle.	25, 223
Bielle en retour	246
Bollinckx (équicourant).	177
Bouilleurs	346
Bourdon et Hamelle, graisseur.	232
Bourdon (manomètre)	15

226	Creusot, essais	89	Donkin, révélateur	55
27	Crosse de piston	223	Données physiques	42
314	Cuissards	346	Donneley (grille)	329
333	Curtis, turbine	263	Double effet	44
333	Cycle théorique de la ma-		Dudgeon	360
48	chine monocylindrique	44	Dulac, soupape	394
	Cylindres	215	Duméry, grille	327
38	— et pistons	24	Duquenne, chaudière	370
	— oscillants	246	Du Tremblay, vapeurs com-	
87			binées	85
	D		Dynamo-dynamomètre	41
32	Dalton (loi de)	289	Dynamomètre hydraulique	42
14	Dash-pot	152	Dynamomètres	36
30	Davey, machine de Newco-			
4	men	4	E	
6	Découvert des tiroirs	102	Echappement anticipé	93
9	Décrassage des grilles	323	— libre	11
4	Défecteur	325	Economiseur Green	375
7	Dégazage	385	Ecossaise (chaudière)	358
8	Degré de réaction	254	Ecoulement de la vapeur	250
8	Degré hydrotimétrique	386	Edwards, pompe à air	296
3	Déjecteur	362	Ejectair Bréguet	303
7	Démarrage	183	Ejecteurs	284
8	— des compound	186	Ejecto-condenseurs	296
	Demay, indicateur	35	Élévations d'eau	242
	Désincrustants	384	Embrayage (régulateurs à)	200
	Détendeur	396	Emploi des machines	410
	Détente adiabatique	45	Engrenages (turbines à)	274
	— de la vapeur	5	Entropie	49
	— incomplète	50	Enveloppes de vapeur	57
	Diagramme de la distribution	99	— isolantes	397
	— des pertes de la		Epreuves	405
	turbine	260	Epuration des eaux	384
	— de Mollier	48	Epure du déplacement du	
	— d'indicateur	32	tiroir	401
	— entropique	49, 45	Equicourant (machines)	174
	— figurant les états		Equilibre du poids du tiroir	447
	d'un fluide	18	Equivalent mécanique de la	
	— totalisé	76, 82	chaleur	17
	Diffuseur des turbines	259	Espace libre	54
	Dilatation des bâtis	213	Espaces libres des com-	
	Dimensions des cylindres	67	pound	72
	Dispositions d'ensemble	234	Essais de chaudières	380
	Distributeur (turbines)	252	Essais des machines	86
	— oscillants	161	Etages de pression	256
	Distribution de la vapeur	92	— de vitesse	255
	Distributions à deux tiroirs	141	Ether (table)	22
	— Corliiss	148	— (machine à)	85

Excentrique	27	Génevet, brûleur	335
— fictif	121	Giffard, injecteur	279
— sphérique Tripier	140	Glissières	26, 223
Explosions simultanées	399	Godets graisseurs	229
Express (chaudières)	373	Gonzenbach, détente	142
Extraction (machines d')	243	Gooch, coulisse	129
Extractions (chaudières)	388	Goudrons	318
F			
Farcot, distribution	148	Graissage des mécanismes	226
— machine Corliss	155	— des pistons	231
Field (tubes et chaudière)	372	Great Eastern, tiroir	112
Fissures des maçonneries	339	Green (réchauffeur)	375
	346	Grille à chaîne	330
Flasques de coulisse	124	Grille à gradins	328
Floteurs	391	— renversée	325
Flux direct (chaaudière à)	372	— (tiroir à)	143
Fondations des machines	211	Grilles	321
Force	12	— inclinées	327
— d'inertie	189	— spéciales	323
— motrice tangentielle	185	Grouvelle et Arquembourg, surchauffeur	379
Forgeage au bleu	401	Guinotte (excentriques éc- tifs)	121
Fouché, aéro-condenseur	313	H	
Fournier, pyromètre	16	Hall (condenseur)	11
Foyer amovible	357	Harris-Corliss, distribution	154
— extérieur	346	Hartung, régulateur	205
Foyers intérieurs	349	Hawley, grille renversée	326
Frein à corde	37	Hertay, distribution	148
— à huile	139, 201, 209	Hirn, pandynamomètre	43
— de Prony	38	Historique	1
Fresnes (mine de)	2	Hoffmann (machine)	238
Frikart (distribution)	160	Hopkinson, indicateur	31
Frottement des tiroirs	113	Hornblower	6
Froude, dynamomètre	42	Hospitalier, manographe	36
Fuite au joint (turbines)	259	Houilles	316
Fuites de vapeur	65	Huiles de graissage	228
G			
Gabarit pour l'étude des ti- roirs	99	Humidité de la vapeur	60
Gailleries	317	Hydrogène	318
Galloway (chaaudière)	351	Hydrotimétrique (degré)	386
Garniture hydraulique	270	Hyperbole équilatère	55, 68
Garnitures de tiges	217	I	
Gaz carbonique	319	Ide (machine)	237
— de haut fourneau	332	Impulsion (turbines à)	254
Gazogènes	331	Incinération	315
		Incrustations	386

Indicateurs	20		
— de vide	296		
— de niveau	388		
Inertie (régulateurs à)	209		
Injecteurs	278		
Injection (condenseurs à)	288		
Intervention des bords des tiroirs	117		
Introduction	vii		
Isochrones (régulateurs)	204		
Isolants	397		
Izart, calorimètres	61		
J			
Jeu des articulations	224		
Joy, distribution	135		
K			
Kilogrammètre	12		
Kilowatt	13		
Knaut, chaudière	350		
L			
Labyrinthe, garniture	269		
Lafont, vapeurs combinées	85		
Laminage de la vapeur	62		
Laminoirs (machines de)	244		
Lancashire (chaudière de)	349		
Lancé du piston d'indica- teur	34		
Lanterne équilibrée	196		
Laval, turbine de	261		
Leblanc, condenseur	301		
Lêcheurs	229		
Lentz, garniture	221		
— régulateur	209		
Levier des soupape	392		
— roulant	165		
Lignites	316		
Ljungstrom, turbine	265		
Locobobites	240		
— (chaudières de)	354		
Locomotive routière	242		
Locomotives	245		
Luc Denis, tuyauterie	396		
Lumières	95		
M			
Mâchefers	317		
Machines à cylindres suc- cessifs	6		
— à un cylindre	43		
— de bateaux	245		
— de laminoirs	244		
— demi-fixes	240		
— équicourant	174		
— pilon	214, 236		
— rotatives	249		
— sans mouvement de rotation	178		
— soufflantes	244		
Mahler, calorimètre	315		
Mattresse-tige	3		
Mallet, démarrage des com- pound	187		
Manchon de régulateur	197		
Manivelle	225		
Manographe Hospitalier	36		
Manomètres	14		
Manque d'eau	404		
Marchis, vapeur surchauffée	22		
Marshall, distribution	133		
Marteau pilon	248		
Matières grasses (chaudières)	402		
Matschoss, historique de la mach. à vapeur	1		
Mazout	334		
Mécanismes divers de chan- gement de marche	140		
Mesure des pressions	14		
— des résistances pas- sives	66		
Mesures	vii		
Meyer, détente	145		
Modes d'action de la vapeur	24		
Mollerup, graisseur	233		
Mollier, diagrammé	46		
Moment d'inertie	193		
Montupet, tube	371		
Morin, calcul des cylindres	68		
Moteurs fixes à grande vi- tesse	236		
Moteurs à vitesse modérée	235		
— sans pistons	2, 284		
Multicellulaire (turbine)	263		

N		Poussée axiale.	272
Newcomen	4	Pouvoir calorifique	314
Newton (loi de)	17	Prat, tirage.	339
Niclausse (générateur)	372	Pressé-garniture	221
O		Presse hydraulique (essais).	405
Ordonnée moyenne.	32	Pression atmosphérique	4
Ordonnées.	18	Pression au réservoir des	
Organes des machines	211	compound	70
Oscillant (cylindre).	246	Pressions.	13
Oxyde de carbone	319	Prise d'essai	315
P		Prises de vapeur	396
Pailles	401	Prix de revient.	412
Palier de butée	226, 272	Production de la vapeur	314
Pandynomomètre.	43	Prony (frein de)	38
Papillon	196	Propriétés des vapeurs.	19
Papin	2	Pruden, houille pulvérisée	332
Parallélogramme de Watt. 6.	235	Puissance	12
Parsons, turbine	264	Pulsomètre.	284
Pattes d'araignée.	228	Pulvérisation du combus-	
Pertes de chaleur.	65	tible	332
Pertes de rendement des tur-		Purge des tubes de niveau.	390
bines.	259	Purgeurs.	217
Perte triangulaire des com-		Pustules	402
pound	72	Pyrites	315
Petit cheval	384	Pyromètre Fournier.	16
Pétroles	335	Q	
Phases de la distribution	92	Quadruple expansion.	84
Pièces à mouvement alter-		R	
natif	189	Radians.	191
Pièze.	viii	Raffard, régulateur.	204
Piquage des tôles	408	Rankine, cycle théorique	45
Pistons.	217	Rateau, accumulateur de va-	
Pivot.	226	peur	275
Planimètre.	32	— dynamomètre hydrau-	
Plateau-manivelle	226	lique.	42
Plateaux de cylindre.	217	— éjecto-condenseur.	297
Pompe à air.	289	— équivocourant	174
— alimentaire	384	— garniture hydraulique.	270
— de circulation	308	— trompes	278
— de purge.	58	— turbines à vapeur.	263
Poncelet, calcul des cy-		Rayonnement	17
lindres.	68	Réaction (turbines à)	254
Portatives (machines).	240	Réchauffeurs	374
Porter (régulateur de).	202	Recouvrements des tiroirs	102
Poulie de réduction.	29	Réduction du rendement	49
		Refroidissement de l'eau.	313

Registre	336
Réglage des tiroirs	107
Regnault	20
Régularisation des turbines	268
Régularisation du mouvement	189
Régulateurs à bras croisés	202
— , action	195
— agissant sur l'excentrique	206
— à inertie	209
— types divers	202
Rendement	49
— des injecteurs	282
Reniflard	286
Réservoir des compound, volume	75
Ressorts de régulateurs	203
— en lame de sabre	154
Reuleaux, cinématique	249
Révélateur de Donkin	55
Rider, détente	147
Robinets de jauge	391
— purgeurs	217
Roser (générateur)	367
Rotatives (machines)	249
Rouleau compresseur	242

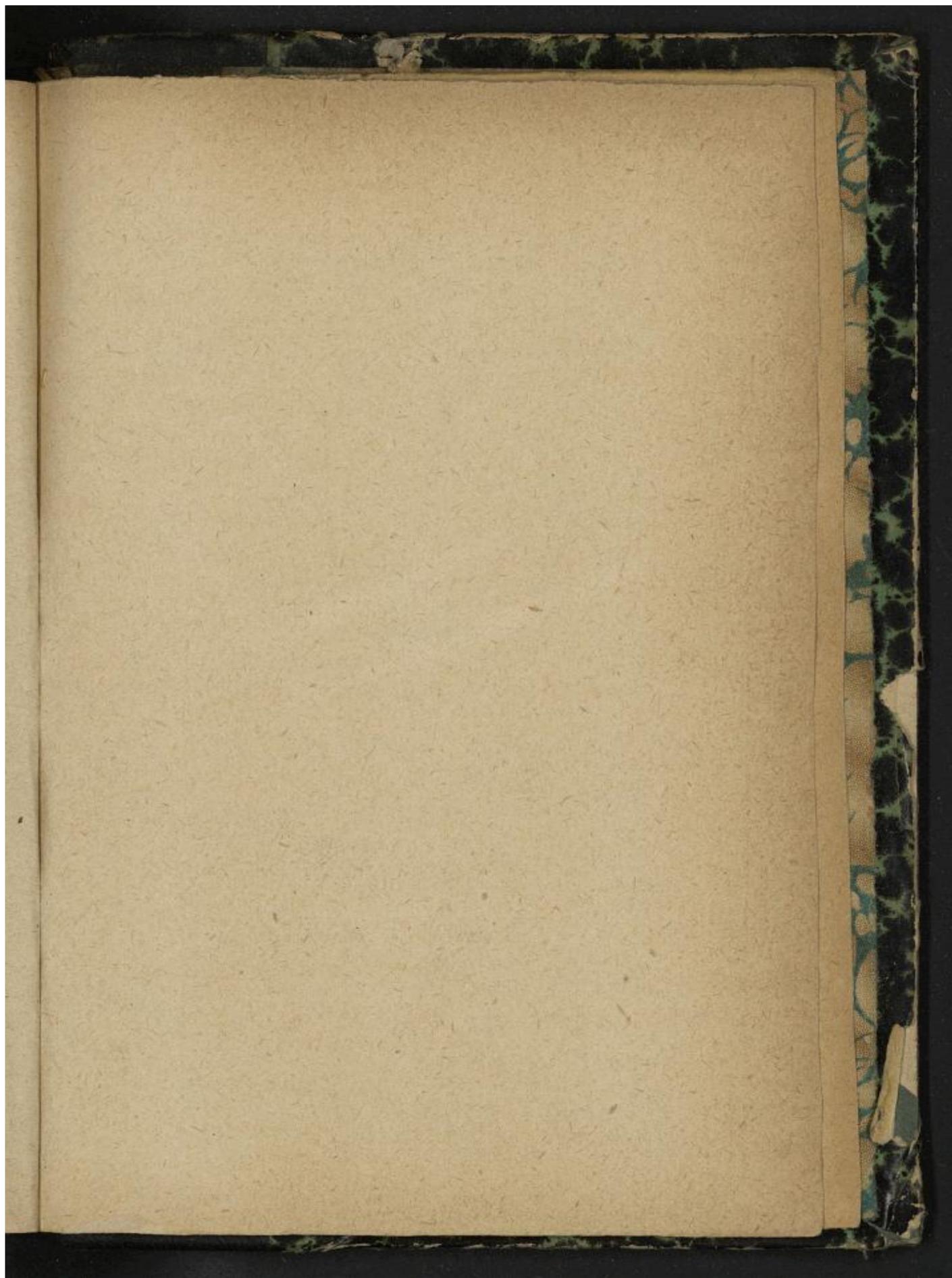
S

Savery	2
Schmidt, surchauffeur	380
— vidange des chaudières	409
Schröter, essais	90
Sécurité (dispositifs de)	412
Sée, refroidissement de l'eau	313
Segments de piston	25, 219
Séguin	352
Sellers, injecteur	281
Semi-tubulaire (chaudière)	354
Sensibilité d'un régulateur	199
Serrage des écrous, danger	407
Services des machines	410
Servo-moteur	139
— — pour régulateur	200
Simple effet (machines à)	239
Smal (équicourant)	177
Société de Pantin, chaudière	357

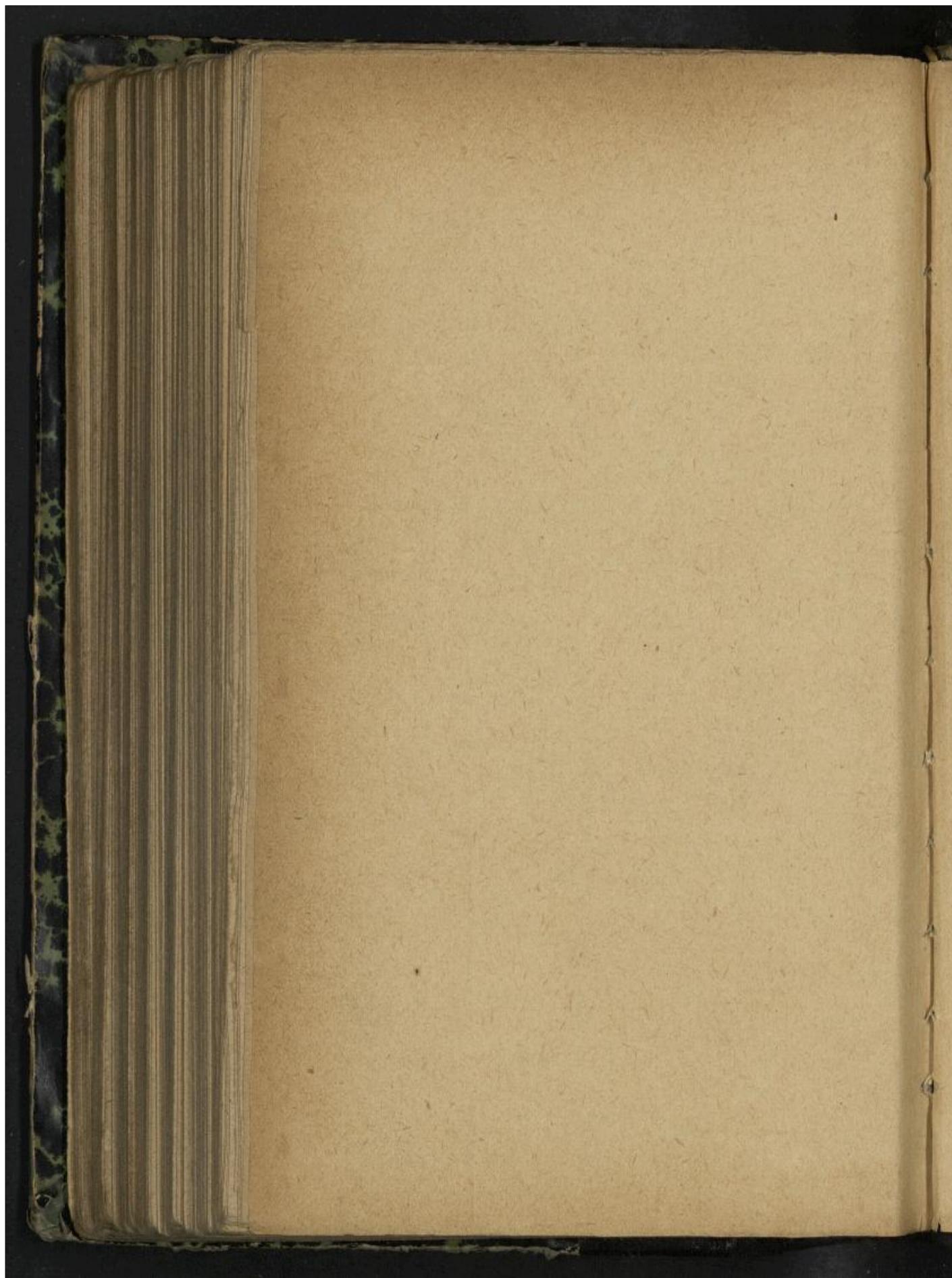
Solignac Grille, chaudière	365
Sommiers	322
Soupape à double siège	163
— à quadruple siège	164
— de pompe à air	296
— de retenue	383
— de sûreté	391
— des cylindres	217
Soupapes (distributions à)	163
Stephenson	118
Sthène	viii
Stirling (chaudière)	372
Sulzer, machines à sou-	
— papes	90, 172
Surchauffe de la vapeur	20
— par laminage	63
Surchauffeurs	377
Surfaces de chauffe	341
Surveillance	405
Système métrique, abréviations	vii
Systèmes divers de coulisses	129

T

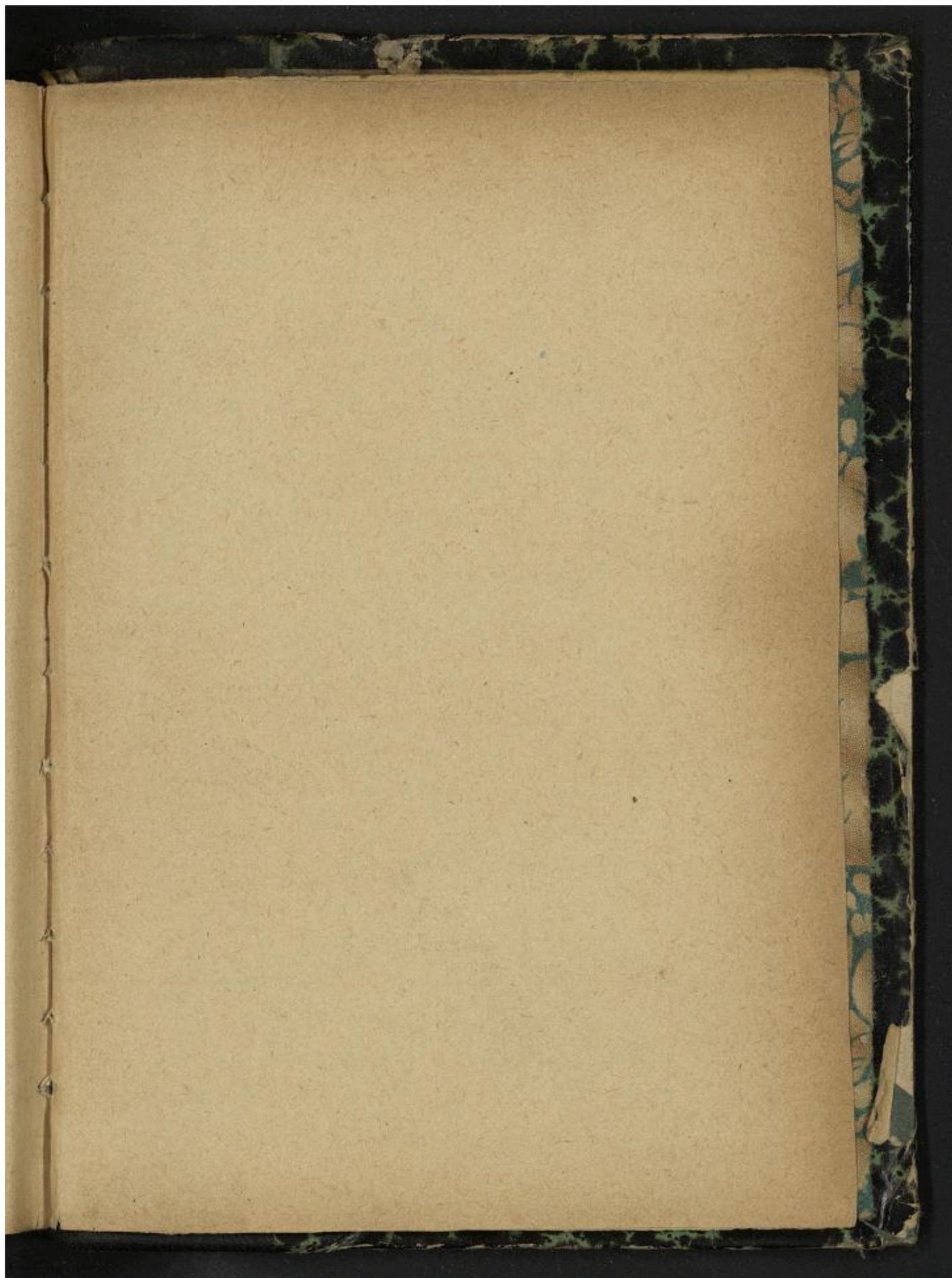
Table des consommations	
théoriques	47
— des lumières	95
— des matières	1
— relative à la vapeur	
d'eau	21
— vapeur d'éther	22
Taillefer (grille)	329
Taquet ou tuile de détente	142
Température	15
Tête de piston	25, 223
Têtes de bielle	25, 223
Thermomètres	15
Tige de piston	25
Timbre	391
Tirage	336
Tirage équilibré	340
Tiroirs	94
Tiroirs à doubles orifices	111
— , formes diverses	111
— à canal	112
— à dos percé	114
— cylindriques	115
— solidaires	112



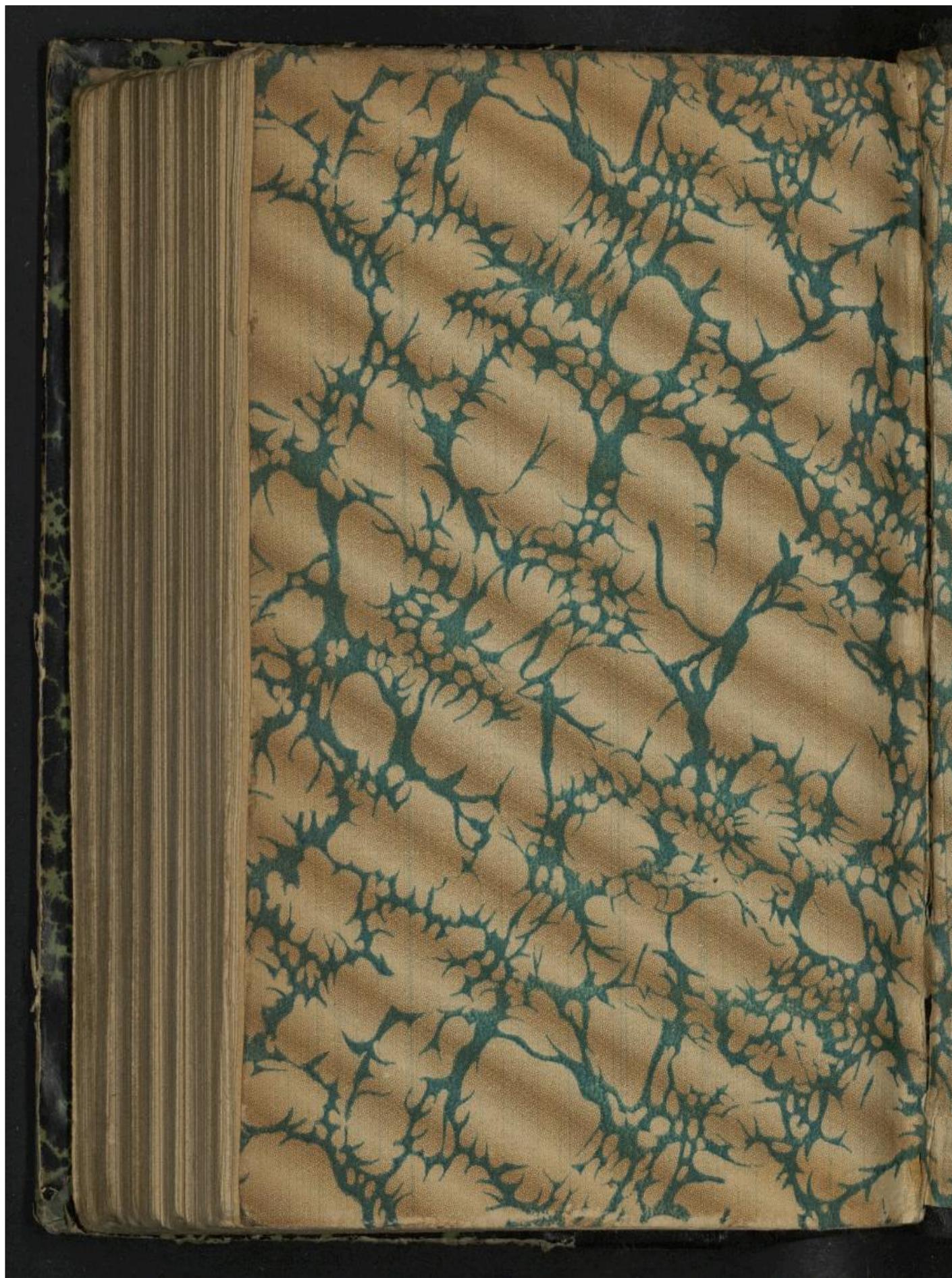
Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



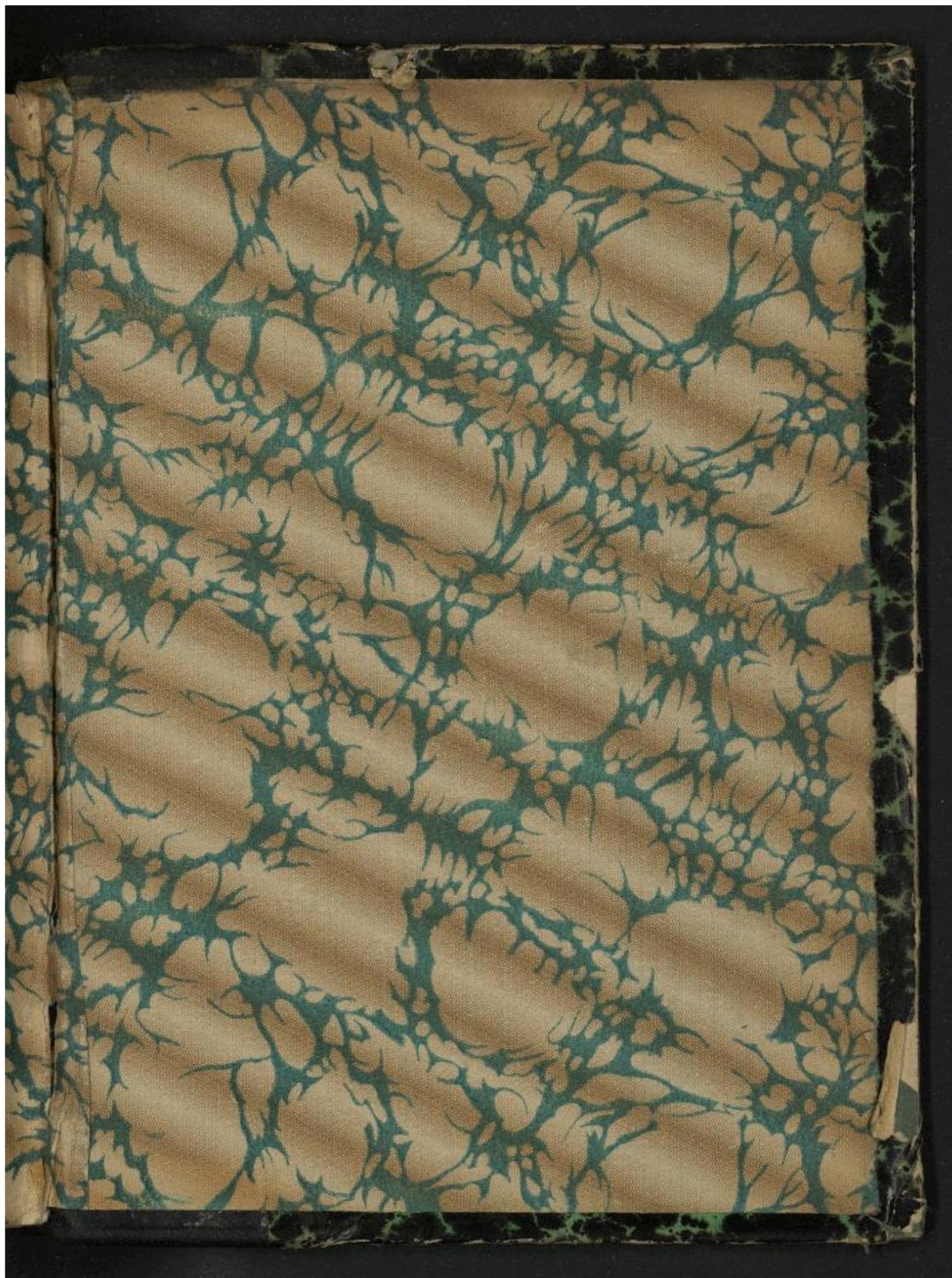
Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



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



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



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