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 nº 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

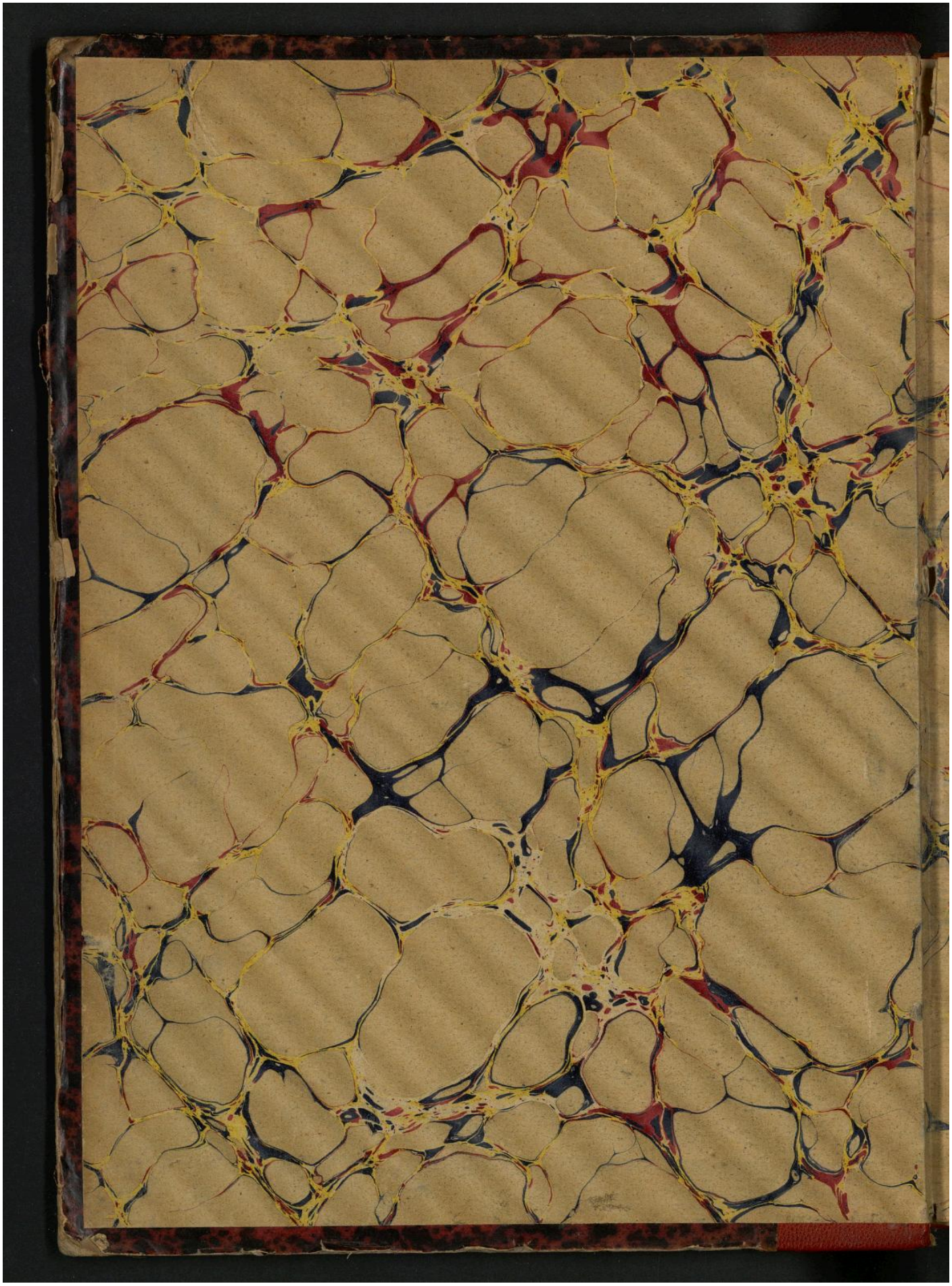
5- L’utilisateur s’engage à respecter les présentes conditions d’utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d’une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

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.

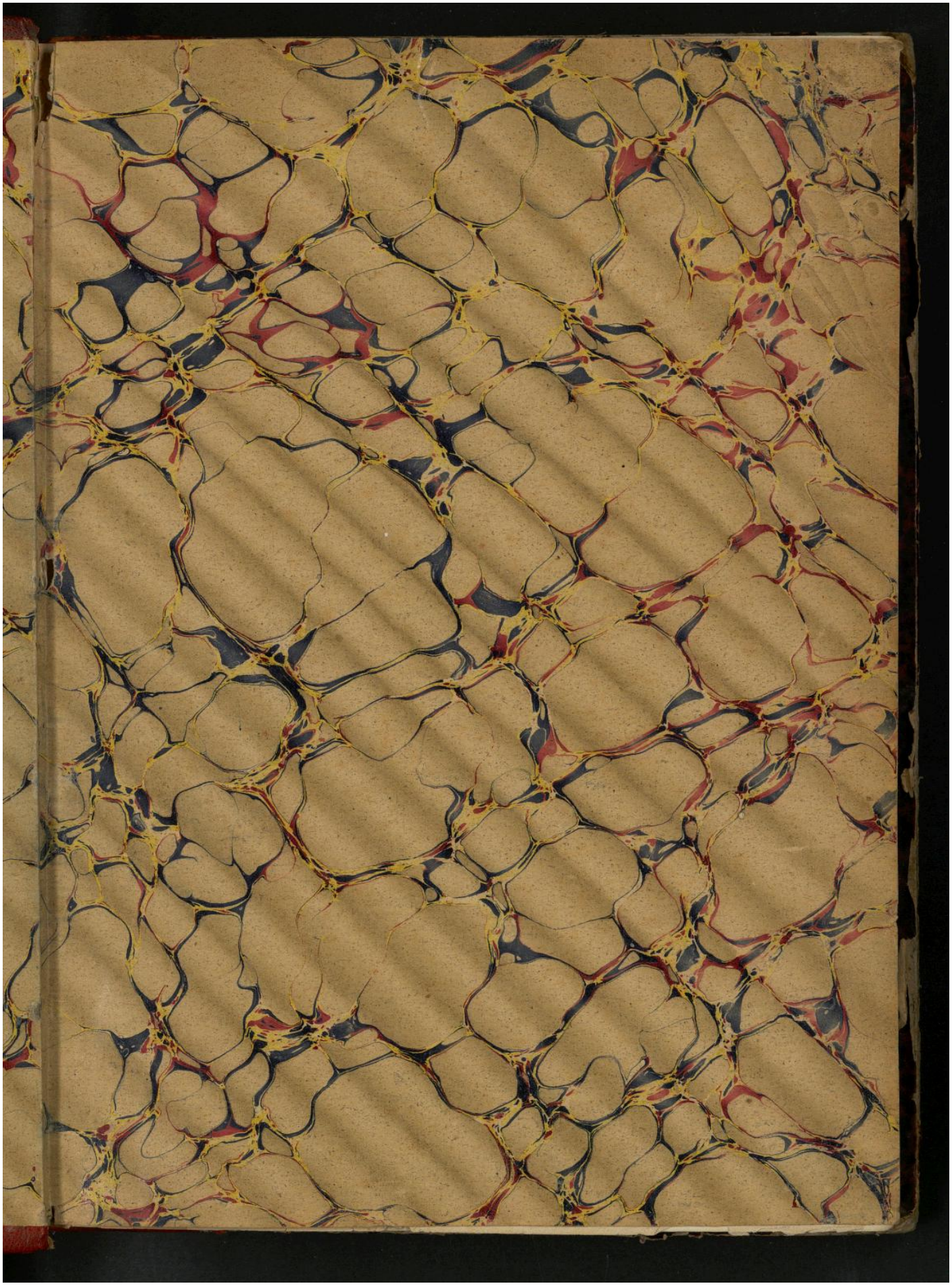
NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA GRANDE MONOGRAPHIE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard
Auteur(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Auteur(s) secondaire(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France)
Titre	Cours de machines
Adresse	[Paris] : [Conservatoire national des arts et métiers], 1907-1914
Collation	4 vol.
Nombre de volumes	4
Sujet(s)	Machines -- Manuels d'enseignement supérieur
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?4DE89_91
LISTE DES VOLUMES	Cours de machines à vapeur
	Cours des machines précédemment de mécanique appliquée aux arts : année 1907-1908
	Cours de machines : année 1910-1911 : mesure de la puissance des moteurs : résumé de leçons faites en novembre et décembre 1910
	Cours de machines : 1ère année du cours : 1913-1914

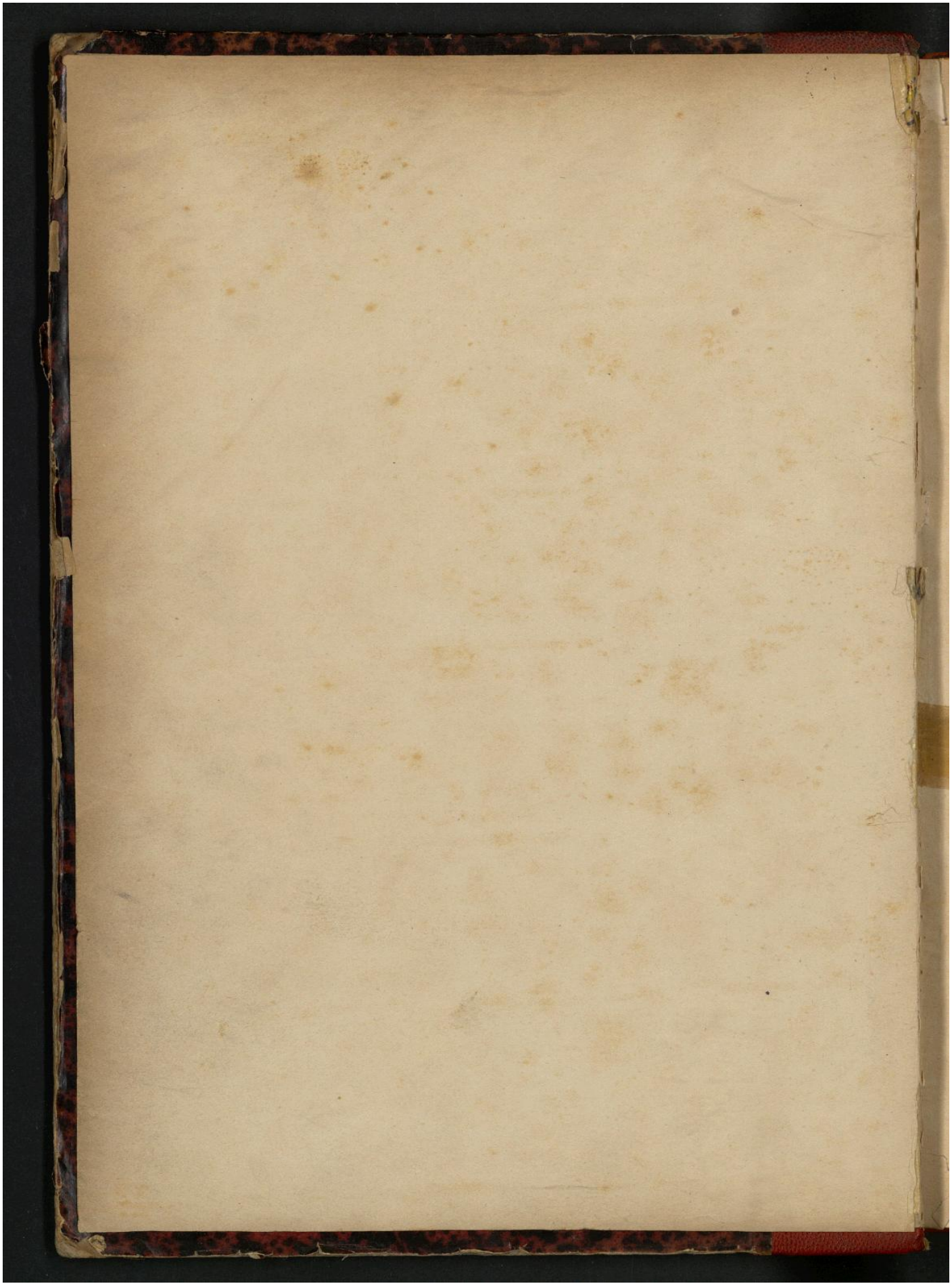
NOTICE DU VOLUME	
Auteur(s) volume	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Auteur(s) secondaire(s) volume	Conservatoire national des arts et métiers (France)
Titre	Cours de machines
Volume	Cours de machines à vapeur
Adresse	[Paris] : [École des Mines], [1907]
Collation	1 vol. (7-349-21 p.) : ill. ; 32 cm
Nombre de vues	392
Cote	CNAM-BIB 4 De 89
Sujet(s)	Automobiles -- Manuels d'enseignement supérieur Condenseurs de vapeur -- Manuels d'enseignement supérieur Machines à vapeur -- Manuels d'enseignement supérieur Moteurs à gaz -- Manuels d'enseignement supérieur Vapeur, Technique de la -- Manuels d'enseignement supérieur
Thématique(s)	Histoire du Cnam Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	20/05/2021
Date de génération du PDF	24/02/2022
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?4DE89



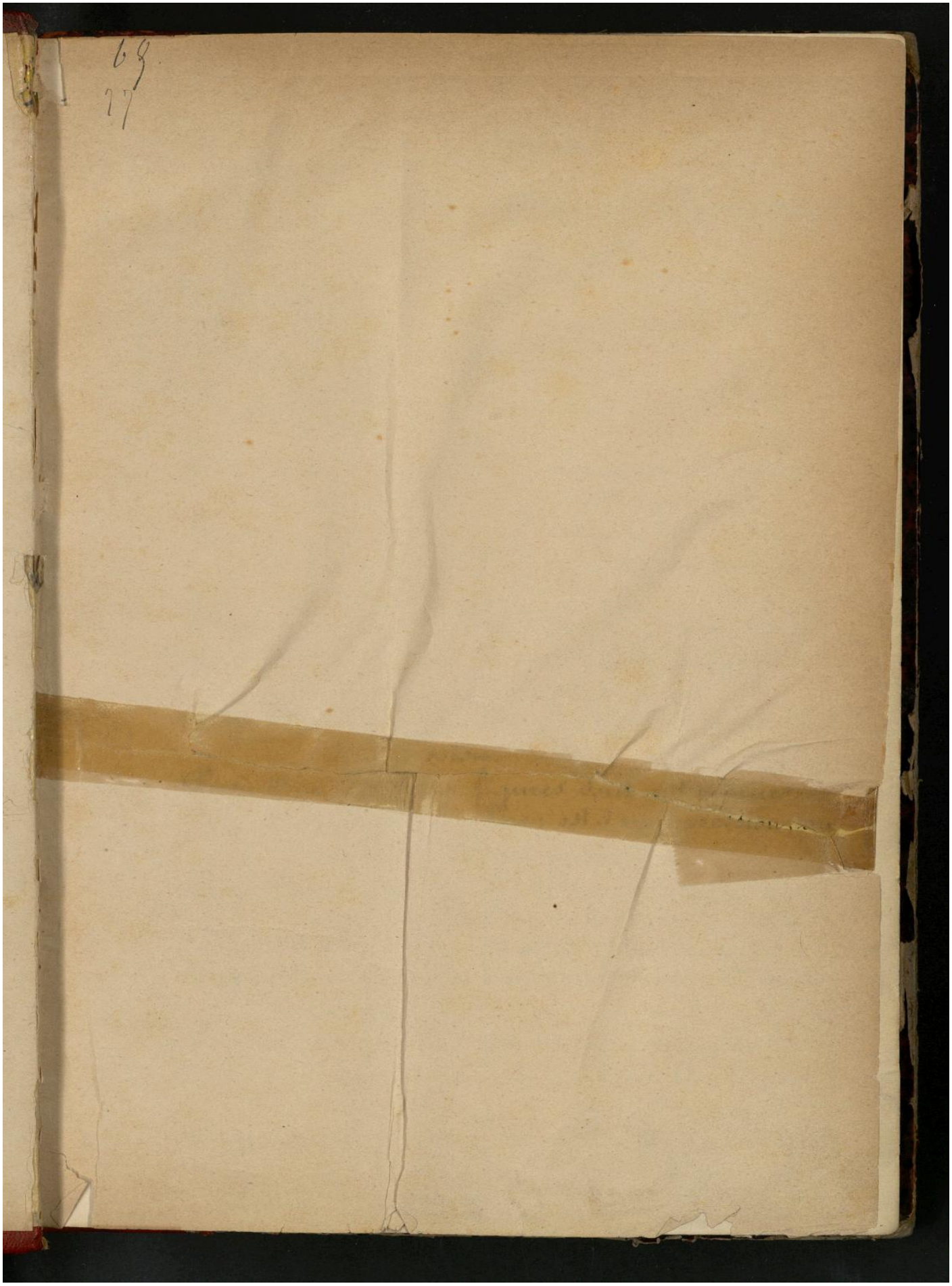
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



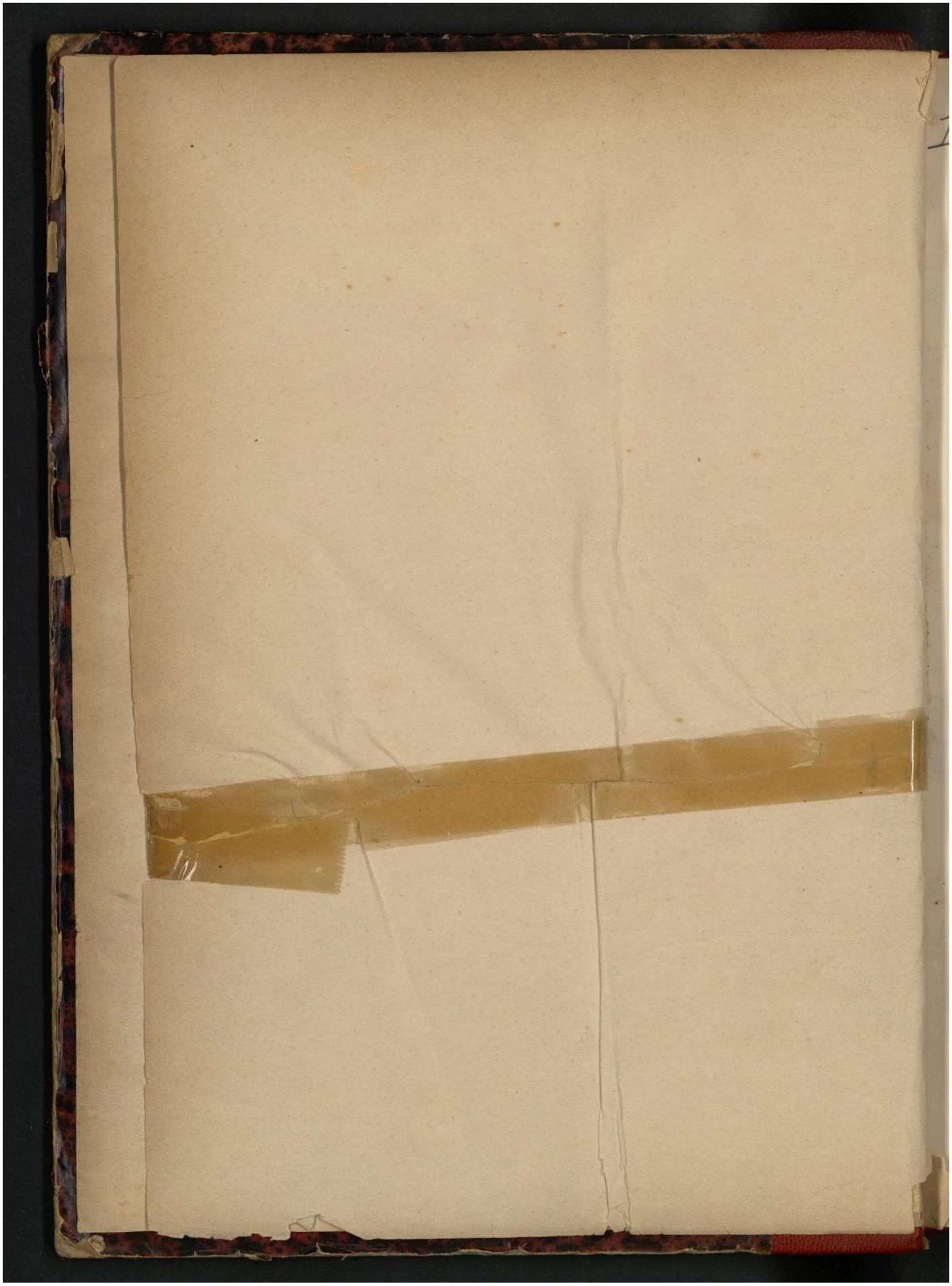
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1 vol. 4° raisin - 89. -De-

H° De 89

Cours de machines à vapeur de M. Sauvage.

BIBLIOTHÈQUE
DU CONSERVATOIRE NATIONAL
des ARTS & MÉTIERS
N° du Catalogue 4° De 89
Prix d'Estimation : 5 f.
Entré le 19 9bre 1907

Erratum.

Page 12.– La figure 5 ne représente pas une grille à chaine.

Page 31 – Ligne 7.– Lire: 500 kg., au lieu de 500 gr.

Page 31.– Avant-dernière ligne.– Lire : demi, au lieu de : aussi.

Page 35.– Ligne 13.– Lire : Dudgeon, au lieu de: sudgeon.

Page 39.– La figure 22 représente un type ancien de chaudière Serpollet.

Page 110.– Ligne 9.– Lire: température, au lieu de : pression.

Page 111.– Les deux figures sont interverties.

Page 116.– Ligne 1.– Lire: est à une pression, au lieu de: est une pression.

Page 116.– Ligne 7.– Lire : ne se vaporise pas, au lieu de : ne se vaporise.

Pages 116 et 117.– Lire ϖ et ϖ', au lieu de: W et W'.

Page 118.– Ligne 5 en remontant.– Lire : θ_1 au lieu de O_1.

Page 155.– Ligne 3 en remontant.– Lire : la figure 39 montre comment, au lieu de: et comment.

Page 159.– Ligne 16.– Ajouter: le procédé de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'extraction n'est plus en usage aujourd'hui grâce à l'emploi du condenseur à surface.

Page 63. – Ligne 3 en remontant. – Lire : on a souvent recours, au lieu de : il faut avoir recours.

Page 69. – Lignes 3, 8 et 26. – Lire : condenseur, au lieu de : condensateur.

Page 75. – Ligne 2. – Lire : $<$, au lieu de : $\ll$.

Page 75. – Lire partout : A et a', au lieu de : B et b.

Page 76. – Ligne 7. – Lire : diagramme, au lieu de : décigramme.

Page 76. – Intervertir les figures 44 et 45.

Page 81. – Lire sur la figure les lettres

o au lieu de A

A' _____ B'

A _____ B

C _____ E

B _____ C

B' _____ C'

D _____ G

C' _____ E'

Ajouter sur la même figure les lettres: a, pied de la perpendiculaire abaissée du point A (B sur la figure) sur l'axe o's' (AD sur la figure).

A" pied de la même perpendiculaire sur A'B' (B'C' sur la figure).

Supprimer D sur la figure.

Page 81. – Ligne 11 en remontant. – Lire : OS, au lieu de : O3.

Page 83. – Ligne 9 en remontant. – Lire B au lieu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de B'.

Page 84. – Ligne 5. – Lire : proportions, au lieu de : propositions.

Page 84. – Dernière ligne. – Lire : l'aire donnée par la quadrature de cette courbe est etc.....

Page 84. – Avant-dernière formule. – Ajouter le signe + dans le 2ème membre.

Pages 84 et 85. – Lire partout : t_1, au lieu de : t_2.

Page 86. – Ligne 6. – Lire : p_1, au lieu de : p.

Page 86. – Ligne 14. – Lire : P_1, au lieu de : P_2.

Page 87. – Ligne 11. – Lire : $x_1 x_1$, au lieu de : $x_1 x_2$.

Page 90. – Dernière ligne. – Lire : t_1, au lieu de : t_2, et ajouter : Le cycle de Carnot exigerait que la condensation partielle eût lieu dans le cylindre.

Page 91. – Lire sur la figure les lettres :

A au lieu de la lettre B_1
B ——— C_1
C ——— C_2
D ——— B_2
E ——— A_2
e ——— a
a ——— b
b ——— c
C' ——— D_2
F ——— D_1

Page 91. – Avant-dernière ligne. – Lire : EABCE, au lieu de : EABCF.

Page 93. – Ligne 11 en remontant. – Lire : F et d au lieu de : E et e.

Page 93. – Ligne 7 en remontant. – Lire : d, au lieu de : e.

Page 93. – Ligne 10 en remontant. – Lire : portion,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au lieu de : position.

Page 95.– Supprimer les accents sur la figure et remplacer D' par C.

Page 97.– Lire sur la figure la lettre :

D'' au lieu de : C
D ——— C'
D' ——— C''
d' ——— c''
e ——— d

Page 114.– Ligne 14.– Lire la formule : $\frac{\text{aire } ABDEF}{\text{aire } AbbFf}$ au lieu de : $\frac{\text{aire } ABCD}{\text{aire } AblldD}$

Page 114.– Ligne 18.– Lire la formule : $\frac{\text{aire } AB'D'E'F}{\text{aire } AB'b'dD}$ au lieu de : $\frac{\text{aire } AB'C'D}{\text{aire } ADb'B'}$

Page 114.– Lire dans le texte : B, au lieu de : B'.

Page 114.– Dernière ligne.– Supprimer : la diminution.

Page 115.– Supprimer la première ligne et commencer à : En réalité.

Page 115.– Ligne 13.– Lire : B, au lieu de B'.

Page 115.– Ligne 10 en remontant.– Lire : CD'E', au lieu de : DEF.

Page 117.– Ligne 8 en remontant.– Lire :

$$W_e = 0,95.\ W_i\ .$$

Page 120.– Ligne 9 en remontant.– Lire : Statique, au lieu de : Statistique.

Page 138.– Ligne 6.– Lire. Corliss, au lieu de : Corlist.

Page 148.– Ligne 3 en remontant.– Lire : i et e, au lieu de : E et I.

Page 151.– Ajouter sur la figure aux points d'intersection des arcs de cercle et du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

demi-cercle inférieur, successivement à partir de la droite les lettres T_2, T'_5, T_3. Mettre T'_1 au point diamétralement opposé à T_1.

La figure s'applique au cas où il y a une avance linéaire. S'il n'y en a pas, il suffit d'imaginer que l'arc $T_6 T_2$ se confond avec l'arc issu de T_1.

Page 151.– Ligne 11 en remontant.– Lire : oT'_1, au lieu de : OT_1.

Page 151.– Ligne 10 en remontant.– Lire : oT'_1, au lieu de OT_2.

Page 153.– Ajouter sur la figure : T'_1, au point diamétralement opposé à T_1.

Page 154.– Ligne 19.– Lire : OT, au lieu de : $O''T$.

Page 154.– Ligne 16.– Lire : 90°8', au lieu de: 90°8'.

Pages 154 et 155.– Remplacer dans le texte les lettres m par les lettres P.

Page 158.– Lire sur la figure : T_2, au lieu de T_1.

Page 163.– Lire sur la figure les lettres :

λ au lieu de ω.
T ——— D.
K ——— t.
t_3 ——— t_5.

Page 163.– Ligne 8 en remontant.– Lire : $XO\,t_2$, au lieu de $XO\,t_4$.

Page 164.– La figure est une coupe transversale et ne montre pas les doubles orifices.

Page 165.– Ligne 7.– Lire : e_1, au lieu de: e'_1.

Page 165.– Ligne 9 en remontant.– Lire : e'_1, au lieu de : e.

Page 169.– Ligne 9.– Lire : par, au lieu de : pas.

Page 171.– 2e croquis.– Lire : E_1, au lieu de : E.

Page 171.– 3e croquis.– Lire : E_2, au lieu de : E.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Page 172.- Ligne 2.- Lire : barres, au lieu de : bases.
Page 173.- Ligne 1.- Lire : barres, au lieu de : bases.
Page 174.- Ligne 14.- Lire : coulisseau, au lieu de : coulisse.
Page 175.- Figure 104.- Ajouter : C'_1 au bas de l'arc $C_1 I_1$.
Page 181.- Ligne 17 en remontant.- Lire : fig. 107, au lieu de : fig. 108.
Page 181.- Lignes 14 et 13 en remontant.- Lire : i et i' au lieu de e et e'.
Page 195.- Figure 121.- Mettre : C au point de contact du levier et du plan.
Page 197.- Ligne 15.- Lire : GOM, au lieu de : COM.
Page 198.- Ligne 12 en remontant.- Lire F-Mj, au lieu de : FMj.
Page 199.- Ligne 5.- Lire : $M R \omega^2 \cos \alpha$, au lieu de : $M \omega^2 \cos \alpha$.
Page 201.- Ligne 15.- Lire : donne, au lieu de : dans.
Page 207.- Ligne 13 en remontant.- Lire : BM, au lieu de : BC.
Page 208.- Ligne 3.- Lire :

$$\frac{\varpi}{g} \text{ au lieu de } \frac{\omega}{g}.$$

Page 217.- Ligne 2 en remontant.- Lire : 2 et 3, au lieu de : deux, trois. (Les chiffres se rapportent aux figures).
Page 219.- Ligne 3.- Lire : condenseur, au lieu de : condensateur.
Page 229.- Ligne 14.- Lire : tirage forcé, au lieu de : tirage naturel.
Page 230.- Ligne 11 en remontant.- Lire : V_1, au lieu de : V_2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Page 233.- Ligne 8 en remontant.- Lire :
$p_2 > 0,58\ p_1$.

Page 234.- Ligne 1.- Lire : $P = W.\omega.\delta$, au lieu de $P = W + \omega + \delta$.

Page 235.- Ligne 14.- Supprimer les mots : "du tube."
Supprimer les lettres dans la description de l'injecteur.

Page 238.- Ligne 11.- Lire le 1er membre de l'égalité : $w + m\,w'$, au lieu de : $W + m\,w'$.

Page 247.- Dernière ligne.- Ajouter à la fin de la ligne le mot : "aubes".

Page 258.- Ligne 5 en remontant.- Lire :
$\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}$ au lieu de $\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{12}}$

Page 260.- Les lettres a et a' de la figure sont interverties.
Le tracé des courbes CB et CB' est défectueux.

Page 264.- Lire sur la figure : B", au lieu de B' (à la température t_2).

Page 271.- Lignes 10 et 11.- Lire : l'aire comprise à l'intérieur du diagramme.

Page 277.- Ligne 8 en remontant.- Lire : t_1, au lieu de : b_1.

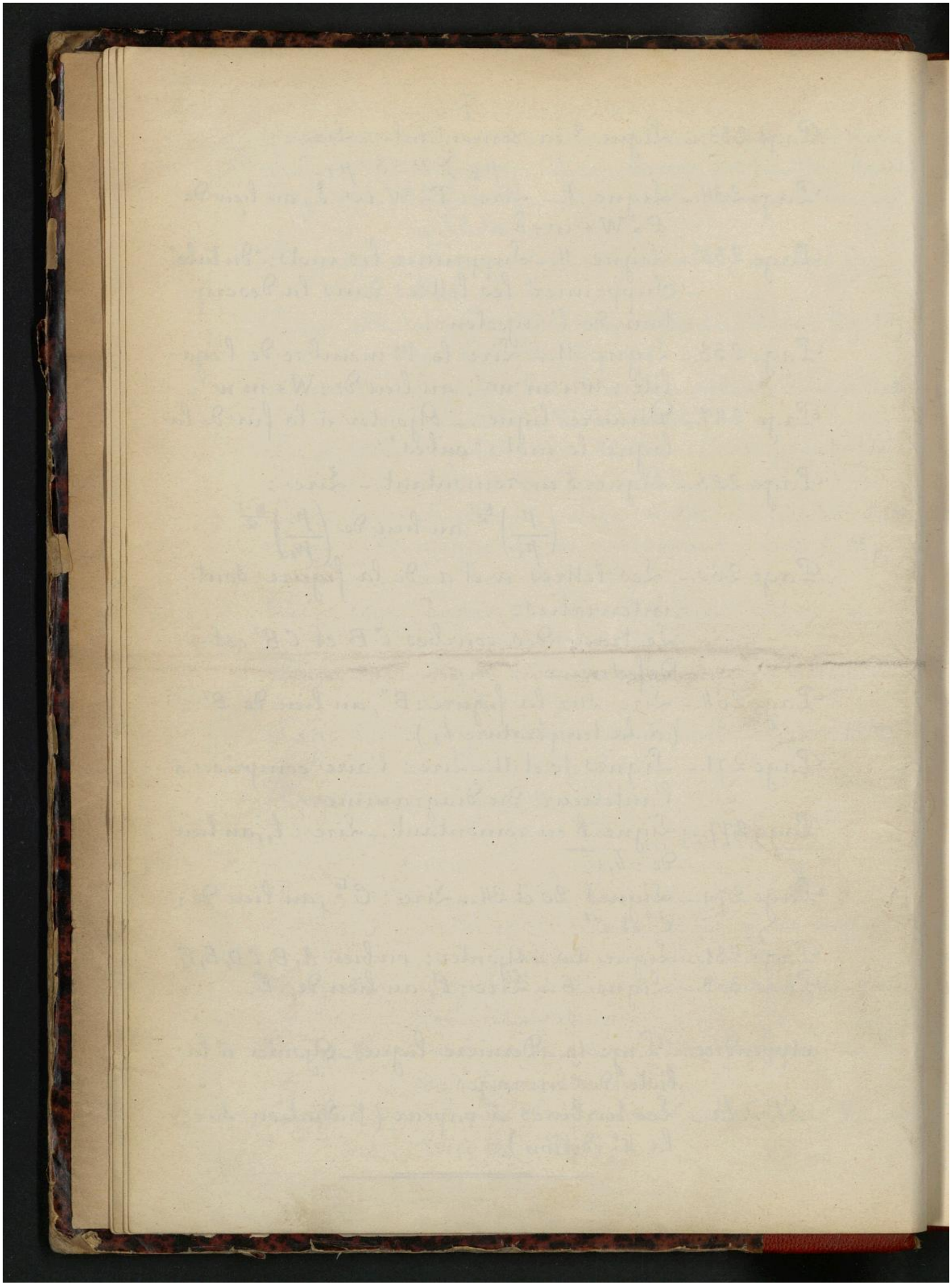
Page 279.- Lignes 20 et 24.- Lire : C^te, au lieu de : C' et C".

Page 281.- Ligne 20.- Ajouter : ou bien $A_1, B_1, C D_1, E_1, F_1$.

Page 303.- Ligne 6.- Lire : F', au lieu de E.

Appendice.- Page 19.- Dernière ligne.- Ajouter à la liste des ouvrages :
Stodola - Les turbines à vapeur (traduction sur la 4e édition).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Machines à vapeur.

I. Production de la vapeur.

1. Combustibles.

Quantité de chaleur dégagée par le combustible. — La quantité de chaleur que doit fournir le combustible d'une machine à vapeur est fonction de la consommation, de la température et de l'état de la vapeur.

Pour produire 1 kg de vapeur saturée sèche, sous une pression p à laquelle correspond une température θ, il faut dépenser une quantité de calories donnée par la formule :

$$Q = 606,5 + 0,305\,\theta.$$

Ceci suppose que l'eau d'alimentation est prise à 0° ; si sa température initiale est θ_0 il faut dépenser :

$$Q = 606,5 + 0,305\,(\theta - \theta_0)$$

Si la vapeur passe dans un surchauffeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui en élève la température de θ à θ', sa chaleur spécifique à pression constante étant 0,5 environ (la valeur 0,48 longtemps admise est contestée), la quantité totale de chaleur à fournir par kg de vapeur, toujours sous une pression p est donc enfin

$$Q = 606,5 + 0,305(\theta - \theta_0) + 0,5(\theta' - \theta)$$

La quantité de chaleur disponible dans le combustible se mesure au calorimètre ; la prise d'essai de ce combustible est assez délicate. L'expérience a montré que l'on n'utilise guère que 60 à 70 % du pouvoir calorifique disponible.

Généralités sur les combustibles.

a) Houille. - Les différentes qualités de houilles sont caractérisées par la proportion de matières volatiles qu'elles contiennent.

Pour fixer la composition de la houille, on commence par déterminer, en séchant à 100°, le poids d'eau qui y est contenu ; le poids d'un échantillon peut, après cette opération, diminuer de 2 ou 3 %. Puis, à la suite d'une calcination en vase clos, les matières volatiles : carbures d'hydrogène, oxygène, azote, se dégagent. (L'état sous lequel se trouvent l'oxygène et l'azote dans le charbon n'est pas encore exactement connu). Si enfin on continue à l'air libre la calcination, le C disparaît

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et il ne reste que des cendres, qui ne sont autres que les matières minérales contenues dans la houille. Le poids des cendres atteint et dépasse souvent 8.10 % du poids du combustible.

Les principales espèces de houilles sont:

1° les anthracites, qui sont les plus anciennes et ne renferment que 2.3 % de matières volatiles;

2° les houilles maigres, qui en renferment 10 %.

3° les houilles demi-grasses 20 %

4° les houilles grasses 25.30 %.

Les houilles demi grasses et surtout les houilles grasses possèdent la propriété de s'agglomérer au feu; les fragments se boursouflent et se collent les uns aux autres.

Grâce à cette propriété, les morceaux en combustion ne passent pas à travers les grilles des foyers. Les houilles grasses sont même tellement agglomérantes que les morceaux deviennent trop gros et empêchent l'air de traverser les grilles. Elles servent à la fabrication du gaz et du coke plutôt qu'à la production de la vapeur. Les houilles demi grasses au contraire, conviennent bien à cet usage.

5° On distingue enfin les houilles sèches à longue flamme, qui contiennent 40 % de matières volatiles et ne sont pas agglomérantes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les houilles telles qu'on les livre aux chaudières, sont souvent classées d'après leur grosseur : on distingue les gros ; les gailleteries d'un prix élevé, qui servent au chauffage domestique, et les menus.

On désigne sous le nom de tout-venant, la houille à peu près telle qu'elle sort de la mine et dont on a extrait seulement les plus gros et les plus petits morceaux. Les menus constituent le combustible le moins coûteux, commodes d'ailleurs lorsqu'ils s'agglomèrent bien (gras et demi gras). Ce sont eux qui proportionnellement renferment le plus de matières inertes ; on peut du reste les soumettre à un lavage qui sépare les minéraux les plus denses du reste du combustible.

6) - Combustibles artificiels. - On emploie souvent des briquettes constituées par des menus agglomérés à l'aide de 8 % de brai. Ce mélange est soumis à une forte pression qui donne aux morceaux la forme de parallélipipèdes ou de cylindres.

Il est à remarquer que le brai agglomère bien les menus maigres à froid, mais sous l'influence de la chaleur, les briquettes ainsi obtenues se désagrègent : il semble que l'action du brai ne soit en quelque sorte que provisoire. Aussi est-il nécessaire que les menus agglomérés contiennent une proportion suffisante de demi gras, qui s'agglomère au feu quand l'action du brai

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cesse. Toutefois on commence à utiliser de nouveaux agglomérants tels que le ricco-carbone, sorte de brai mélangé de résines et de chaux, qui conserve au feu son pouvoir agglomérant.

Le coke est un combustible d'un prix assez élevé. C'est une houille privée de matières volatiles et qui, par conséquent, laisse une forte proportion de cendres, plus forte que la houille primitive. On ne s'en sert guère pour produire la vapeur que lorsqu'il faut absolument éviter toute fumée.

Combustion de la houille. - La houille pure, c'est-à-dire privée de cendres, dégage en brûlant 8500 - 9300 calories par kilogramme. Les autres combustibles de formation plus récente : lignites, bois, tourbes, dégagent beaucoup moins de chaleur.

Il faut théoriquement environ 11 kg d'air pour la combustion de 1 kg de houille de qualité moyenne, ce qui équivaut à 8,5 m^3 d'air à la pression atmosphérique.

Il est nécessaire, en pratique, d'augmenter le volume d'air, sans cependant l'exagérer car l'air en excès emporte inutilement des calories dans la cheminée. Dans la pratique on emploie par kilogramme de combustible 12 à 15 m^3 d'air.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2. - Grilles.

La grille ordinaire est une surface horizontale constituée par des barreaux de fonte ou de fer. L'espace libre entre les barreaux est en rapport avec l'état physique du combustible ; du reste comme on brûle presque toujours des menus et des tout venants, les vides varient généralement de 5 à 10 millimètres.

Barreau de grille

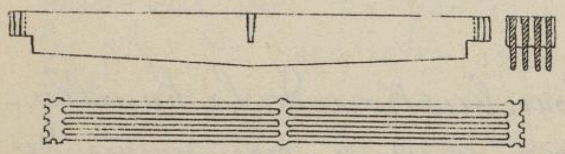


Fig 1

Les barreaux (fig. 1) présentent des saillies qui, s'appliquant les unes contre les autres, maintiennent l'écartement. La grille repose sur des sommiers formés de barres transversales, avec un jeu suffisant pour la dilatation des barreaux.

Les barreaux ont, en général, la forme de solides d'égale résistance. La section transversale est en trapèze, amincie par le bas, pour faciliter la chute des déchets. On y ménage quelquefois des séries de trous ou de coupures pour faciliter l'accès de l'air.

La largeur de grilles peut être quelconque ; la profondeur ne doit pas dépasser 2 mètres.

Porte de chargement. - La porte de chargement s'ouvre souvent vers

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'extérieur ; elle est maintenue par un loquet avec les chaudières à tubes d'eau, la rupture d'un tube donne un jet de vapeur et d'eau bouillante qui n'est pas très dangereux si la porte reste bien close : d'où l'avantage des portes qui s'ouvrent vers l'intérieur en tournant autour d'un axe horizontal : la fermeture peut même se faire automatiquement si la porte est ouverte.

La grille n'affleure pas jusqu'à la porte ; on ménage une petite sole, table en fonte horizontale en avant de la grille.

Au-dessous de la grille se trouve un cendrier, muni souvent d'un fond étanche recouvert d'eau. Les morceaux de combustible incandescents s'y éteignent et l'échauffement du dessous de la grille est notablement diminué. Cette nappe a, en outre, l'avantage de montrer par réflexion les parties inférieures des barreaux, on se rend ainsi facilement compte de leur état de propreté.

Les cendres infusibles (blanches) tombent à l'état pulvérulent à travers les barreaux des grilles ; les cendres ferrugineuses fusibles forment des scories pâteuses, des mâchefers, qui les obstruent.

Différentes espèces de grilles. - La grille ordinaire, simple et commode, se prête aux variations de l'activité du feu. Mais le régime risque d'en être assez

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

irrégulier. Lorsque le combustible est très allumé, les matières volatiles sont déjà dégagées, il reste sur la grille des morceaux de coke incandescent ; l'air passe facilement à travers la grille et le combustible ; la combustion se fait avec excès d'air. En rechargeant le foyer, on bouche les interstices ; puis le charbon se sèche et les matières volatiles distillent. La proportion d'air se trouve réduite au moment où elle devrait être augmentée. Le carbone brûle mal et reste en partie à l'état de noir de fumée dans les gaz.

On peut il est vrai faire une admission supplémentaire d'air au-dessus de la grille, par exemple, au moyen de trous percés dans la paroi de la porte. Mais il est nécessaire d'avoir dans le foyer une température élevée, et l'air, admis comme il vient d'être dit peut être une cause de refroidissement et être quelquefois nuisible au lieu d'être utile.

Il est donc important de faire des chargements aussi fréquents que possible par petite quantité à la fois.

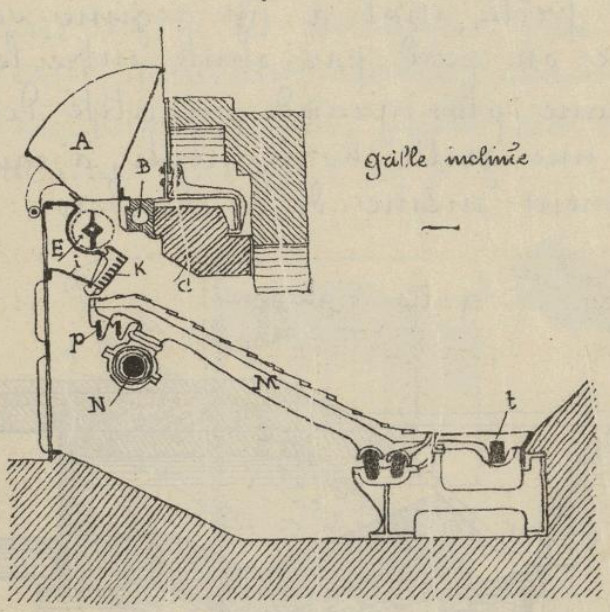
On a imaginé un grand nombre de grilles spéciales pour éviter ces inconvénients en donnant une combustion parfaite et sans fumée, et aussi pour réaliser le chargement mécanique, et le décrassage continu des grilles.

Un premier moyen très efficace consiste à renverser le sens de marche de l'air en le faisant arriver au-dessus de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la grille, c'est à dire dans le même sens que le combustible frais et en faisant sortir les flammes sous la grille. La combustion devient très régulière mais on brûle les barreaux de grilles. On les constitue de tubes à circulation d'eau mais ces appareils sont difficiles à réaliser et à tenir en bon état.

On emploie fréquemment une grille inclinée (fig. 2) dont la pente est un peu moindre que celle prise naturellement par la houille. Le charbon déversé par une trémie se sèche à la partie supérieure de la grille, dégage ses matières volatiles vers le milieu et arrive en bas complètement brûlé. Cette grille est souvent recouverte en partie d'une voûte en briques qui brasse les courants d'air et de gaz.



grille inclinée

Fig 2

Les résidus s'accumulent en dessous de la grille formant un tas qui doit toujours s'élever jusqu'aux barreaux; on bien on ajoute une partie basculante horizontale.

Le réglage est assez délicat, car

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'il y a trop de combustible une partie du charbon arrive sans être brûlé au bas de la grille et se trouve perdue.

Si, au contraire, la quantité de houille est insuffisante, la partie inférieure de la grille reste dégarnie, elle ne porte plus qu'une petite couche de cendres, qui laisse passer un grand excès d'air.

On comprend qu'une telle disposition se prête mal à un régime variable; en outre on perd par chute entre les barreaux une plus grande quantité de charbon qu'avec une grille horizontale, à cause du mouvement même de ce charbon.

grille à gradins

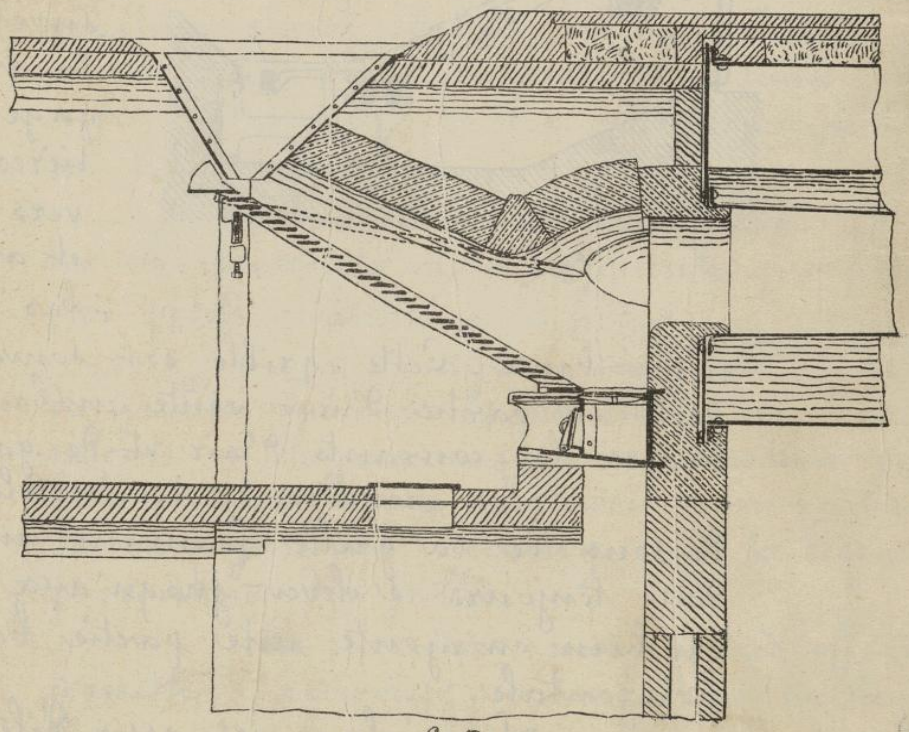
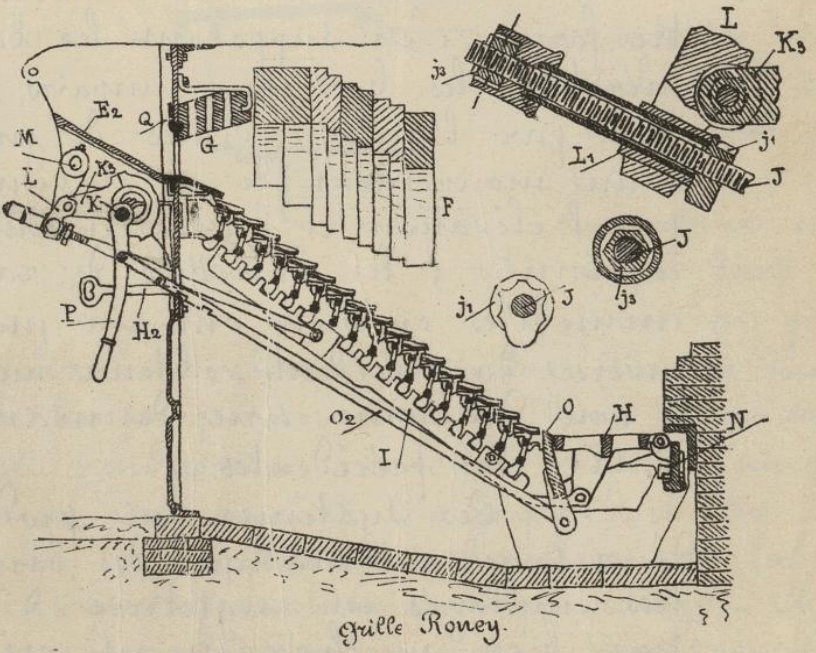


fig. 3.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On emploie également des grilles à gradins (fig. 3) qui ne laissent rien tomber à l'extérieur ; mais les extrémités entourées de combustible se brûlent vite. On s'en sert surtout pour brûler des combustibles très ténus et de faible pouvoir calorifique tels que la sciure de bois.

Une modification de ces grilles a consisté à diminuer la largeur des gradins et à les constituer par de petits barreaux pouvant osciller chacun autour d'un axe horizontal. Telle est la grille américaine Roney (fig. 4)



Grille Roney.

Fig 4

On se sert aussi de grilles horizontales à translation (fig. 5) (grilles Taillefer) formées par une chaîne sans fin passant sur deux rouleaux. Là encore le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Grille à chaîne

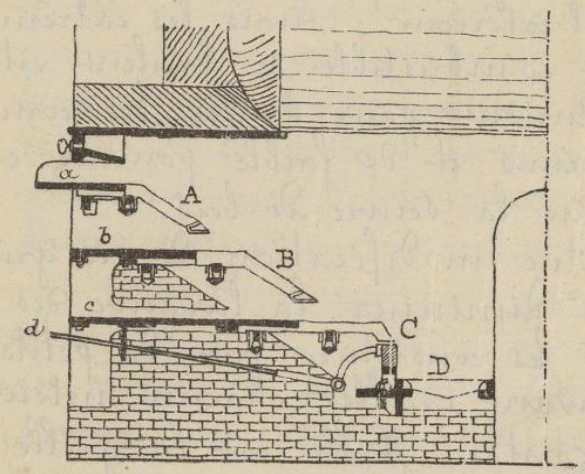


Fig 5

le réglage est délicat et s'effectue en modifiant à la fois le tirage, la quantité de charbon versée par la trémie et la vitesse de translation de la chaîne. Ces grilles sont souvent réalisées sous une autre forme : en supposant les barreaux numérotés, les barreaux impairs sont animés par l'intermédiaire de manivelles d'un mouvement de va et vient commun par l'élévation et l'abaissement de leurs extrémités ; les barreaux de rang pair sont immobiles ou bien ont un mouvement inverse du précédent, obtenu au moyen d'une deuxième série de manivelles calées à 180° des précédentes.

Ces systèmes qui produisent un décrassage automatique des barreaux sont très employés en angleterre. Ils se prêtent bien au chargement mécanique : le combustible élevé verticalement au moyen de norias et transporté horizontalement à l'aide de vis d'Archimède peut être envoyé dans les trémies de chargement. Le débit de la trémie est réglé par un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

distributeur à palettes (fig. 6) dont la vitesse de rotation peut varier à volonté ; on peut aussi introduire le combustible au moyen d'un poussoir dont la vitesse alternative peut être réglée.

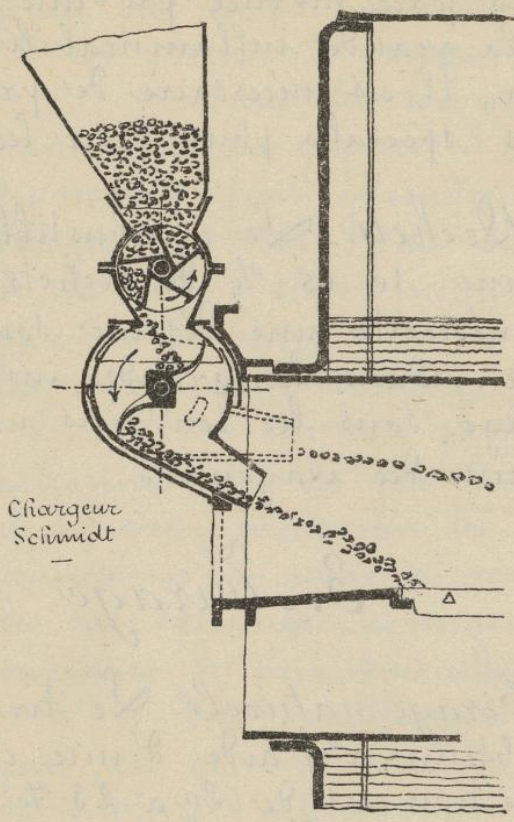


Fig 6

Enfin lorsque le combustible est pulvérisé il brûle très facilement ; on peut donc envoyer dans le foyer un jet de charbon réduit en poudre fine en même temps qu'un courant d'air pour avoir une combustion analogue à celle d'un jet de gaz. L'enceinte du foyer doit être construite en briques qui, chauffées préalablement, se maintiennent au rouge. Chaque grain de charbon forme une parcelle de cendre très ténue qui, emportée par le courant d'air, se dépose dans les carneaux ; ceux-ci doivent donc être fréquemment nettoyés. Ce procédé de chargement a en outre l'inconvénient d'absorber pour le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

broyage du combustible une fraction appréciable de la force motrice produite. Enfin à cause de la grande inflammabilité du jet de charbon, il est nécessaire de prendre des précautions spéciales pour éviter les accidents.

Déchets.- Le combustible donne en moyenne 10.15 % de déchets, dont l'enlèvement nécessite une dépense souvent assez importante. Dans les grandes installations, on ménage sous les cendriers une galerie où circulent des wagonnets.

3.- Tirage.

Tirage naturel.- Le tirage naturel est obtenu à l'aide d'une cheminée dont la section est de 20 à 25 % de la surface de la grille ; la même règle est appliquée dans la construction des carneaux. Une hauteur de 20 à 25 mètres suffit pour le tirage. On arrive, avec ces dimensions, à avoir à la base de la cheminée une dépression de 10 mm d'eau.

Le tirage naturel permet de brûler jusqu'à 100 kg. de houille par mètre carré de grille et par heure, et même un peu plus. Il peut être modéré au moyen d'un registre placé sur le carneau qui aboutit à la cheminée.

Tirage forcé.- Le tirage forcé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

permet d'augmenter le poids de combustible brulé par mètre carré de grille et par heure. Il est obtenu de diverses manières.

Dans les locomotives, l'air est entraîné par la vapeur d'échappement : la dépression peut atteindre dans la boîte à fumée 200 m/m d'eau et la consommation de houille s'élève jusqu'à 400 ou 500 kg par mètre carré et par heure. Ces quantités sont même dépassées.

On emploie parfois des souffleurs actionnés par des jets de vapeur prise à la chaudière ; mais un tel procédé est assez onéreux et n'est guère à recommander que dans des cas spéciaux, comme pour brûler des fines maigres de prix très réduit.

Les ventilateurs sont plus économiques, en général, quand on ne dispose pas de vapeur d'échappement : ils agissent par refoulement, soit dans les cendriers, soit dans une chambre close où sont enfermés et la chaudière et le personnel ; ou bien par aspiration. Cette dernière disposition a l'avantage de n'exiger aucun changement au foyer ; mais il faut remarquer que les ventilateurs agissent dans ce cas sur des gaz chauffés à 250° et dont le volume est presque double de celui qu'ils auraient à la température ordinaire ; il est donc nécessaire que ces ventilateurs débitent deux fois plus en volume que si l'on procède par refoulement.

En somme les avantages du tirage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

forcé sur le tirage naturel sont les suivants:

1° Tandis que dans le tirage naturel on ne brûle pas plus de 100 kilogrammes de houille par mètre carré de grille, ce poids est très augmenté dans le tirage forcé ; il est dans ce deuxième cas à peu près proportionnel au poids d'air passant à travers les grilles et par suite à la racine carrée de la dépression produite ;

2° La dépense de construction de la cheminée, importante lorsqu'on emploie le tirage naturel, se trouve réduite, car on peut en diminuer la section et la hauteur;

3° Le tirage forcé est plus régulier que le tirage naturel;

4° Le tirage naturel ne peut se faire qu'avec des gaz encore chauds (200 à 250°) qui par suite emportent de 15 à 20 % de la chaleur disponible dans le combustible ; le tirage forcé permet au contraire de les évacuer à plus basse température.

La puissance requise pour le tirage forcé est d'ailleurs minime et ne dépasse pas 1 % de la puissance totale produite.

H.—

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4- Transmission de la chaleur.

Surfaces de chauffe.- La transmission de la chaleur se fait à travers la surface de chauffe. Celle-ci se divise en deux parties : la surface de chauffe directe, qui reçoit la chaleur rayonnante du foyer et la chaleur apportée par convection par les gaz chauds ; et au-delà, la surface indirecte qui ne reçoit que la chaleur de convection des gaz.

Rayonnement.- Désignons par T la température de la surface rayonnante, c'est à dire du combustible sur la grille (environ 1200°) et par θ la température de la paroi qui reçoit la chaleur rayonnée par le foyer.

On admet que la quantité de chaleur rayonnée par 1 mètre carré de grille et par heure est égale à

$$37,5 \left(a^{T} - a^{\theta}\right)$$

avec

$$a = 1,0077$$

La valeur de θ est variable suivant la nature des parois : dans certains appareils, tels que les locomotives, à foyer intérieur, la température θ est voisine de celle de l'eau ; pour une première approximation on peut prendre :

$$\theta = 0$$

Lorsque les parois du foyer sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en briques la quantité de chaleur rayonnée devient nulle parce que θ devient à peu près égal à τ.

Dans le cas d'une surface mixte, on étudie séparément les différentes parties dont se compose la paroi.

Quant à la température τ, on peut l'évaluer par les considérations théoriques suivantes : elle est à peu près égale à la température des gaz de la combustion. Or si on brûle n kilos de houille par heure et par mètre carré de surface de gril. le, la chaleur produite est

$$7500\, n$$

en admettant que le pouvoir calorifique de la houille est égal à 7500.

Cette chaleur produite se divise en chaleur rayonnée, égale en vertu de la formule précédente à

$$37{,}5\, a^{\tau}$$

et en chaleur emportée par les gaz ; or si l'on admet que 15 kg d'air sont nécessaires à la combustion de 1 kg de houille, il y aura, en négligeant le poids des cendres, 16 kg de gaz ; si on prend 0,25 pour leur chaleur spécifique et si on suppose l'air pris à 20°, la chaleur emportée ainsi est approximativement

$$16\, n\, 0{,}25\, (\tau - 20)$$

On arrive ainsi à l'équation

$$7500\, n = 37{,}5\, a^{\tau} + 16\, n\, 0{,}25\, (\tau - 20)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

équation qu'on résout aisément par tâtonnements.

La quantité de chaleur rayonnée peut atteindre 20 à 25 % de la chaleur totale.

Convection. - Soit θ_1 la température de l'eau dans la chaudière (160 à 200°); soient τ_1 et τ_2 les températures au début et à la fin de la course des gaz, τ la température intermédiaire des gaz en un point quelconque, et θ' et θ'' les températures des deux faces de la tôle au point considéré: les quantités de chaleur seront évaluées par seconde et par mètre carré de surface de la paroi.

On admet que la quantité de chaleur qui passe des gaz dans la tôle est donnée par la loi de Newton

$$M = K(\tau - \theta')$$

Cette quantité de chaleur traverse la tôle; si k' est le coefficient de conductibilité du métal, et e l'épaisseur:

$$M = \frac{k'}{e}(\theta' - \theta'')$$

Enfin au passage de la chaleur de la tôle dans l'eau

$$M = k''(\theta'' - \theta_1)$$

D'où:

$$M\left(\frac{1}{k} + \frac{e}{k'} + \frac{1}{k''}\right) = \tau - \theta_1$$

ou

$$M = K(\tau - \theta_1)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En fait K diffère peu de k, car ce coefficient k est de beaucoup le plus petit des 3 coefficients considérés.

Connaissant K et par suite M, on en déduit θ' et θ'' qui ne diffèrent pas beaucoup de θ_1. On voit que pour des épaisseurs ordinaires, à cause de la grandeur de k', M est à peu près indépendant de l'épaisseur de la tôle et de sa conductibilité. En réalité, pour de grandes épaisseurs θ' et θ'' augmentent et la dilatation de la tôle devient plus considérable, cause de fatigue pour la chaudière. Le coefficient K qui varie d'ailleurs avec la vitesse des gaz, peut être pris égal à 0,01.

Prenons un élément quelconque de la paroi, en contact avec les gaz à la température τ. A l'extrémité de l'élément ds, la température devient

$$\tau + d\tau \quad (d\tau < 0)$$

Si φ est le poids de gaz débité par seconde, la quantité de chaleur cédée est

$$-\varphi c\, d\tau.$$

En écrivant que cette chaleur passe à travers l'élément ds on aura :

$$-\varphi c\, d\tau = K(\tau - \theta_1)\, ds$$

et en intégrant entre τ_1 et τ_2 $(\tau_1 > \tau_2)$

$$\text{Log}_e \frac{\tau_1 - \theta_1}{\tau_2 - \theta_1} = \frac{K}{\varphi c} S$$

Si donc on connait S et τ_1, cette

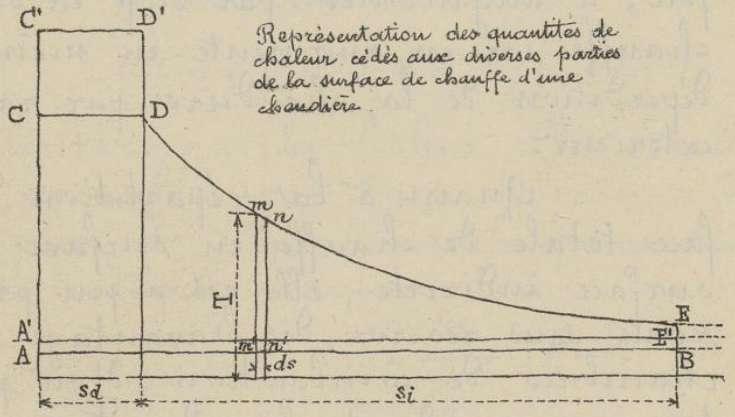
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

formule permet de calculer quelle est la température τ_2 à laquelle se refroidissent les gaz ; inversement si on se donne τ_1 et τ_2 on en déduit S.

On a ainsi trouvé que dans le cas du tirage naturel il fallait prendre une surface de chauffe égale à 35 ou 40 fois la surface de la grille ; avec le tirage forcé les surfaces de chauffe peuvent aller jusqu'à 75 ou 80 fois la surface de la grille.

Représentation graphique de l'action des surfaces de chauffe. – Portons en abscisse la surface de chauffe de la chaudière et en ordonnée la température le long de cette surface (fig. 7) et construisons la courbe dont l'équation est

$$\log \frac{\tau_1 - \theta_1}{\tau - \theta_1} = \frac{K}{\varphi C} S$$



Représentation des quantités de chaleur cédés aux diverses parties de la surface de chauffe d'une chaudière.

Fig 7

On voit que l'aire comprise entre la courbe et son asymptote représente à un facteur constant près la quantité de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaleur cédée par seconde, car l'aire d'un rectangle infiniment petit est égale à

$$(\tau - \theta_1)\, dS$$

expression proportionnelle à la quantité de chaleur transmise par le foyer sur la surface indirecte de chauffe.

Si on veut représenter la quantité totale de chaleur apportée par le foyer, il faut ajouter à l'aire de la courbe l'aire d'un rectangle représentant la chaleur apportée par convection à la surface de chauffe directe à température constante τ_1 et celle d'un autre rectangle représentant la quantité de chaleur apportée par rayonnement.

Il est à remarquer qu'il n'y a pas avantage à pousser trop loin vers la droite la courbe des températures ou si l'on préfère, à augmenter par trop la surface de chauffe car on augmente en même temps la déperdition de la chaudière par rayonnement extérieur.

Quant à la répartition de la surface totale de chauffe en surface directe et surface indirecte, elle est à peu près indifférente sous réserve de l'avantage des grandes chambres de combustion, d'où peu résulter une grande surface directe.

On caractérise souvent une chaudière par le poids de vapeur qu'elle produit par heure, et par mètre carré de surface (par exemple 15 kg de vapeur). Il est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

clair que c'est une moyenne entre des nombres très différents.

Réchauffeurs. — On a supposé constante la température θ_1 dans la chaudière. En réalité l'eau est prise froide ; si elle est envoyée par petites quantités dans la chaudière elle n'y apporte pas de perturbations calorifiques. Mais il arrive souvent qu'on utilise un réchauffeur, récipient dans lequel l'eau est échauffée par les gaz rejetés à la cheminée, avant de pénétrer dans la chaudière.

Ces gaz, circulant en sens inverse de l'eau, la chauffent méthodiquement. Dans ce cas la température de l'eau est variable, soit θ.

Par seconde φ kilogrammes de gaz échauffent φ' kilogrammes d'eau circulant en sens inverse ; d'où

$$-\varphi C d\tau = \varphi' d\theta = K(\tau - \theta) dS$$

en écrivant que la chaleur cédée par le gaz est recueillie par l'eau et passe à travers la paroi de séparation. La première équation, intégrée, donne

$$\tau - \tau_2 = \frac{\varphi'}{\varphi C} (\theta - \theta_0)$$

τ_2 étant comme précédemment la température finale du gaz.

On a d'ailleurs :

$$\frac{\varphi'}{\varphi C} = 2$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

car un poids de gaz de 16 kilogrammes, composé de 15 kilogrammes d'air pour 1 kilog. de houille correspond à la vaporisation de 8 kilogrammes d'eau et comme

$$C = 0,25$$

on a :

$$\frac{\varphi'}{\varphi C} = \frac{8}{16 \times 0,25} = 2$$

En posant la valeur trouvée pour τ dans la 2e équation, il vient :

$$\varphi' d\theta = K(2\theta - 2\theta_0 + \tau_2 - \theta)ds = (\tau_2 + \theta - 2\theta_0)ds$$

En intégrant cette expression, on a une formule permettant de calculer S lors qu'on se donne la température τ_2 initiale des gaz ; ceux-ci sortent à la température

$$\tau'_2 < \tau_2$$

L'eau est chauffée de θ_0 à θ'_0.

Pour que le réchauffeur soit parfait, il faut que

$$\theta'_0 = \theta_1$$

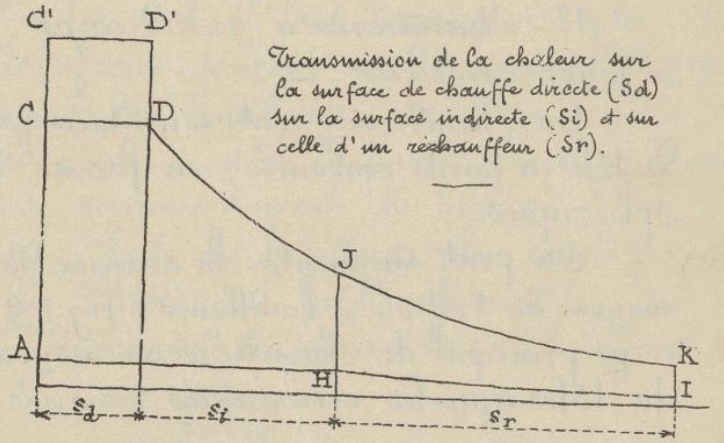
Dans ce cas l'extrémité de la courbe précédente se modifie comme l'indique la figure d'autre part (fig. 8).

La température finale des gaz τ'_2 ne peut descendre très bas, surtout si l'on fait usage du tirage naturel, qui exige des gaz encore assez chauds.

On a cherché à récupérer ces

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

calories emportées par les gaz en les employant à chauffer l'air qui alimente le foyer ; dans ce cas, le tirage forcé devient indispensable, et on rejette les gaz à l'extérieur au moyen d'un ventilateur.



Transmission de la chaleur sur la surface de chauffe directe (Sd) sur la surface indirecte (Si) et sur celle d'un réchauffeur (Sr).

Fig. 8

Dans tout ce qui précède, on a supposé les tôles parfaitement nettes. Or il y a souvent du côté de l'eau des dépôts calcaires qui diminuent la quantité de chaleur transmise et augmentent les températures θ' et θ'' des parois. Des dépôts graisseux provenant des huiles peuvent produire le même résultat et être cause d'une altération rapide des tôles. Il peut arriver aussi que les tôles se recouvrent du côté de la chaudière d'une couche de suie empêchant la chaleur de pénétrer dans les parois. Enfin si l'on oublie d'alimenter en eau la chaudière, la paroi est en présence de vapeur, et les lois de transmission de la chaleur changent. Le coefficient K'' du calcul précédent devient égal à K, et la tôle prend une température qui est moyenne arithmétique entre la température des gaz et de la vapeur, soit $\frac{1200 + 200}{2} = 700°$ Elle rougit et se détériore rapidement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

5.– Etude des chaudières.

On distingue 3 types principaux de chaudières :

1°– Chaudières à grand corps .– a) Chaudières à foyer extérieur .–

Ces chaudières sont constituées par des cylindres de tôle à fonds emboutis, en forme de calottes sphériques.

On peut augmenter la surface de chauffe au moyen de 1, 2 ou 3 bouilleurs (fig. 9), reliés au corps principal de chaudière au moyen de cylindres de tôles appelés cuissards, terminés par des

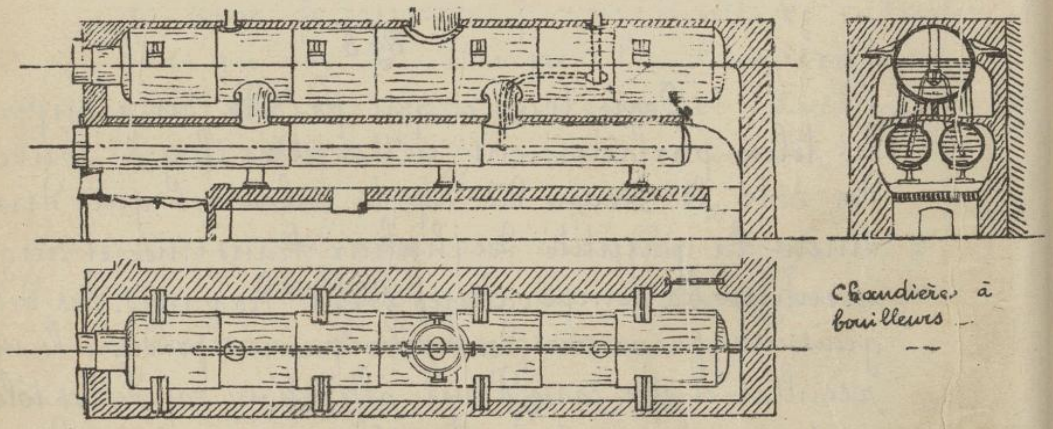


Fig 9

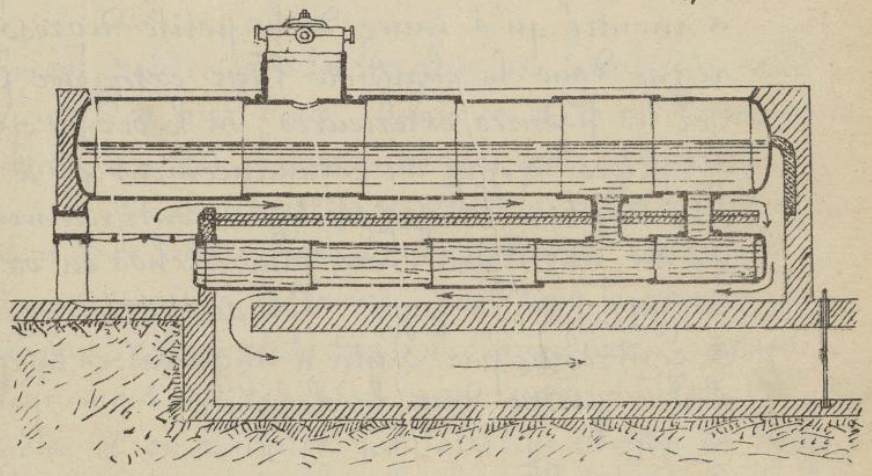
collerettes rivées sur les tôles. Les bouilleurs sont généralement horizontaux, ce qui empêche la formation d'une chambre de vapeur ; les gaz chauds chauffent le bouilleur en circulant à travers les carneaux 1. 2 et 3. Ce dispositif permet de réparer facilement les parties directement en contact avec le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

foyer, qui ne sont autres ici que les bouilleurs. De plus la production de vapeur est régulière, car tout l'appareil est enfermé dans une enceinte en briques formant accumulateur de chaleur. Enfin l'appareil contient de grandes masses d'eau qui forment aussi un volant de chaleur.

D'autre part il faut remarquer que les cuissards offrent souvent un dégagement insuffisant à la vapeur des bouilleurs ; en outre le fond des bouilleurs, c'est-à-dire la partie la plus fortement chauffée se recouvre souvent de tartre.

On a fait des bouilleurs plus courts permettant de chauffer directement la chaudière. (fig. 10) Ces bouilleurs deviennent de véritables réchauffeurs : les



Chaudière à bouilleurs

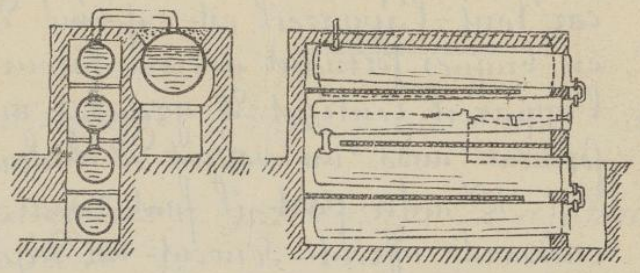
fig 10

gaz se refroidissent en échauffant méthodiquement l'eau de θ_0 à θ_1 degrés. Cette disposition permet de diminuer le volume des maçonneries.

On emploie également des bouilleurs latéraux qui ne sont en réalité que des réchauffeurs (fig. 11)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tous ces types de chaudière ont l'inconvénient



Chaudière à Bouilleurs latéraux

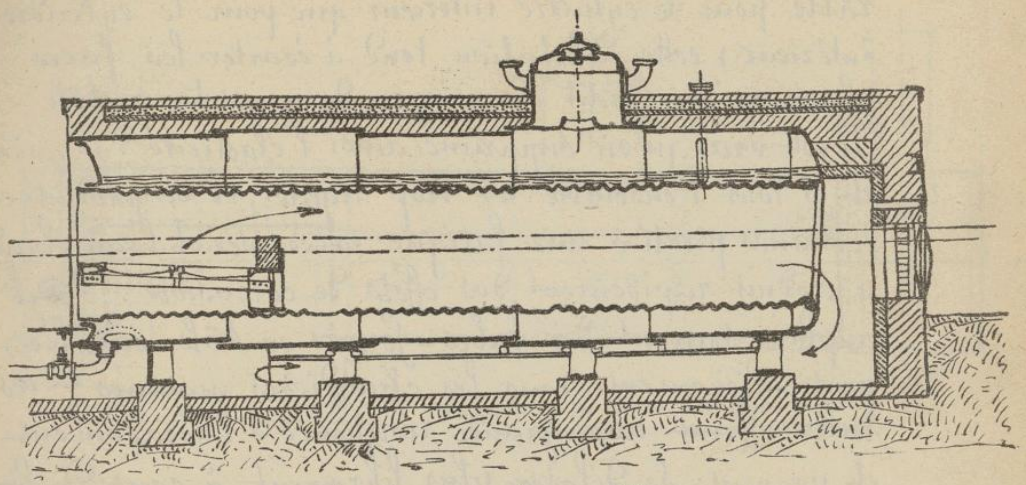
Fig 11

de faire circuler des gaz dans les maçonneries ; ceux-ci passent à travers les fissures emportant de la chaleur inutilisée : En outre l'expérience a montré qu'à cause de la petite dépression qui règne dans la chaudière l'air extérieur peut traverser les fissures extérieures ; on le vérifie en faisant des prises de gaz au commencement et à la fin de leur trajet : les gaz sortants, contrairement à ce qu'on attendrait, sont plus riches en oxygène que les gaz près du foyer. Cet air extérieur s'échauffe et contribue par suite à augmenter la quantité de chaleur perdue dans la cheminée.

b) Foyers intérieurs. — La chaudière la plus simple à foyer intérieur est celle de Cornouailles (fig. 12). Elle est formée par un cylindre en tôle terminé par 2 faces planes traversé suivant sa longueur par un cylindre de plus petit diamètre dans lequel se trouve le foyer. Les gaz chauds suivent le cylindre intérieur, puis passent à travers les carneaux latéraux et vont à la cheminée. Cette disposition du foyer diminue assurément

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la perte par rayonnement. Mais la grille est

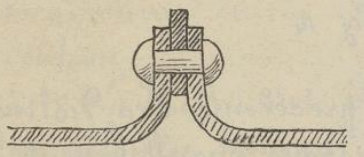


Chaudière de Cornouailles

Fig 12

forcément petite car sa largeur est limitée ; elle convient bien aux bons charbons et donne de mauvais résultats avec des menus maigres par exemple).

Il est à remarquer aussi que les cylindres ne résistent pas aussi bien à une pression extérieure qu'à une pression intérieure, car, dans le premier cas, une légère déformation tend à s'aggraver ; aussi, pratiquement ne dépasse-t-on guère 1.m 20 de diamètre et on renforce les tôles au moyen de bords relevés, rivés ensemble ; les faces latérales des 2 collerettes sont réunies par un anneau métallique qui assure l'étanchéité du joint en permettant le mattage (fig. 13) ; ces rivures sont d'ailleurs soustraites à l'action du feu. Outre la pression, il faut



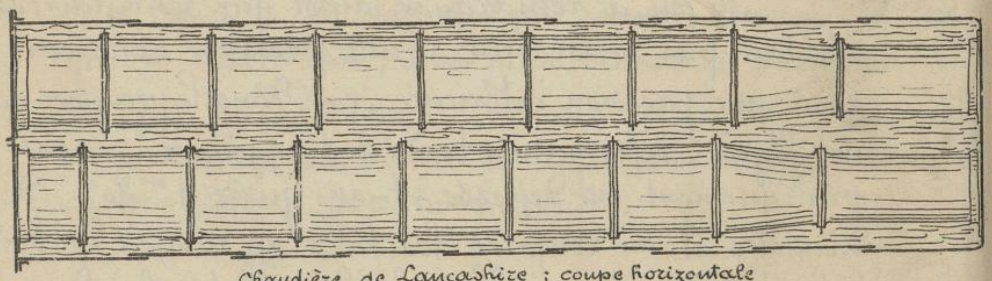
Assemblage des viroles de foyers cylindriques intérieurs : joint Adamson

Fig 13

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

également tenir compte de la dilatation plus considérable pour le cylindre intérieur que pour le cylindre intérieur ; cette dilatation tend à écarter les faces planes qu'on raidit au moyen de goussets en tôle. Il est vrai qu'on supprime ainsi l'élasticité du système, et si tout l'ensemble est trop rigide, il se produit en certaines parties une fatigue excessive et l'eau chaude y produit rapidement des effets de corrosion. On emploie souvent des tubes-foyers en tôle ondulée, particulièrement dans les chaudières marines ; ces tubes offrent une grande résistance à l'écrasement et peuvent se dilater plus librement à cause de leur forme même. L'alimentation doit être soigneusement surveillée, car l'abaissement du plan d'eau laisse le ciel du foyer exposé à la chaleur la plus vive.

La chaudière de Lancashire (fig. 14) qui est



Chaudière de Lancashire ; coupe horizontale
(M.S. Boswell, Proceedings of the Inst. of mechanical engineers)

Fig 14

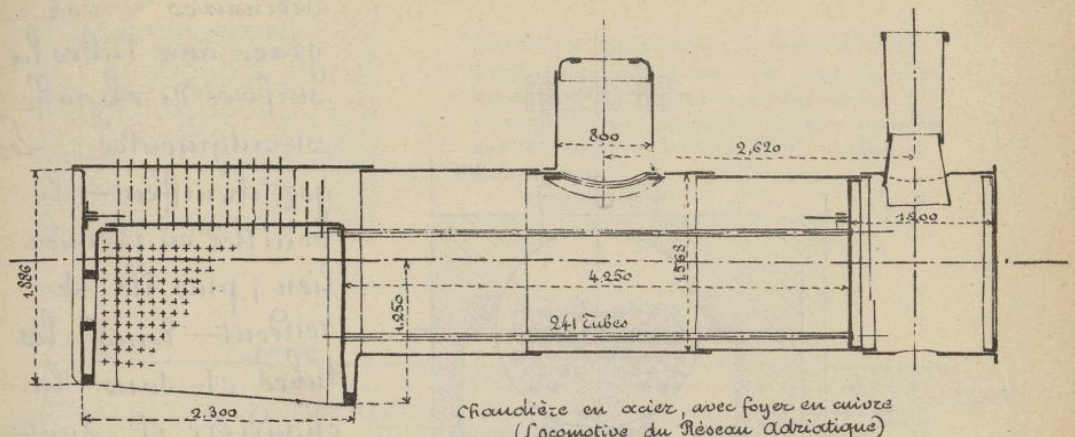
une modification de la précédente s'en distingue parce qu'elle a deux foyers disposés parallèlement à l'intérieur de la chaudière.

2°. Chaudières à tubes de fumée. –

Ces chaudières imaginées par Séguin sont—

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

spécialement employées dans les locomotives (fig. 15)



Chaudière en acier, avec foyer en cuivre
(Locomotive du Réseau Adriatique)

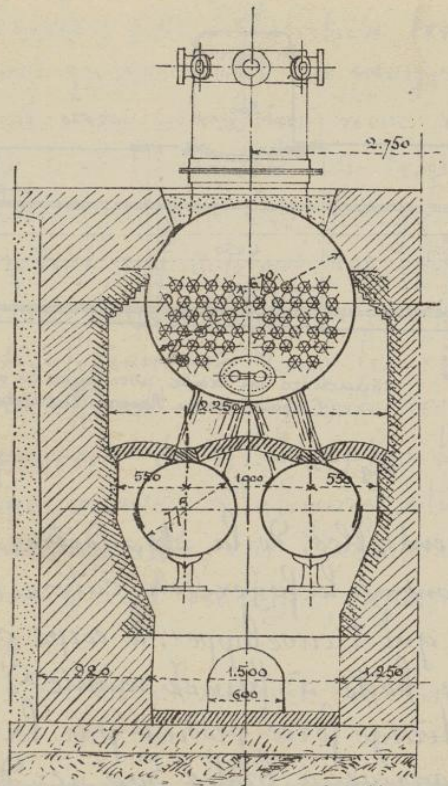
Fig 15

Les parties essentielles de la chaudière ordinaire de locomotive sont : le foyer, en cuivre ou acier ; la boîte à feu qui l'enveloppe, le corps cylindrique terminé par une boîte à fumée munie d'une cheminée. Grâce au tirage forcé produit par la vapeur d'échappement, on arrive à brûler 500 gr. de houille et même davantage en une heure, sur un mètre carré de grille et on obtient une abondante production de vapeur dans une chaudière dont la surface de grille atteint et dépasse même 3 m² et dont la surface de chauffe est de 75 à 80 fois la surface de grille. Certaines chaudières fixes ont la forme locomotive ; mais ce type est compliqué et est assez coûteux.

La plus simple des chaudières tubulaires est un cylindre traversé par des tubes avec un foyer extérieur : telle était la chaudière décrite dans le brevet de Séguin ; souvent on munit cette chaudière de bouilleurs (type dit aussi tubulaire.) De telles chaudières (fig. 16) sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moins longues que les chaudières à bouilleurs ordinaires car grâce aux tubes la surface de chauffe est augmentée. Les gaz chauffent le bouilleur en premier lieu ; puis ils se rendent dans les tubes et sous la chaudière et sont enfin évacués par la cheminée.

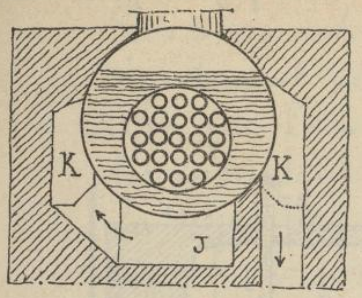


Chaudière tubulaire à bouilleurs de la Cie des Chemins de fer de l'Est.

Fig 16

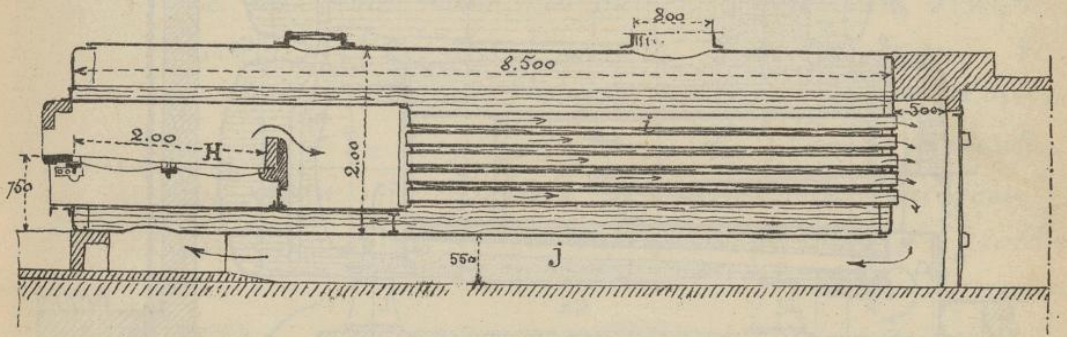
Dans d'autres modèles, les tubes prolongent le foyer intérieur d'une chaudière de Cornouailles. (fig. 17) la jonction est assurée par une plaque tubulaire. Le foyer intérieur peut aussi communiquer avec une chambre d'où les tubes partent "en retour" pour se terminer à une boîte à fumée en tôle entourant la porte de chargement. Lorsque la face postérieure de la chaudière est plane, elle est liée par des entretoises à la face postérieure du cylindre interne, mais le système interne peut adhérer seulement à la paroi intérieure de la chaudière (en reposant sur des supports qui servent uniquement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Chaudière cylindrique à foyer intérieur prolongé par des tubes ; à la sortie des tubes les gaz reviennent sous la chaudière par le carneau J, puis se divisent en deux branches que les carneaux latéraux K, K, conduisent à la cheminée.

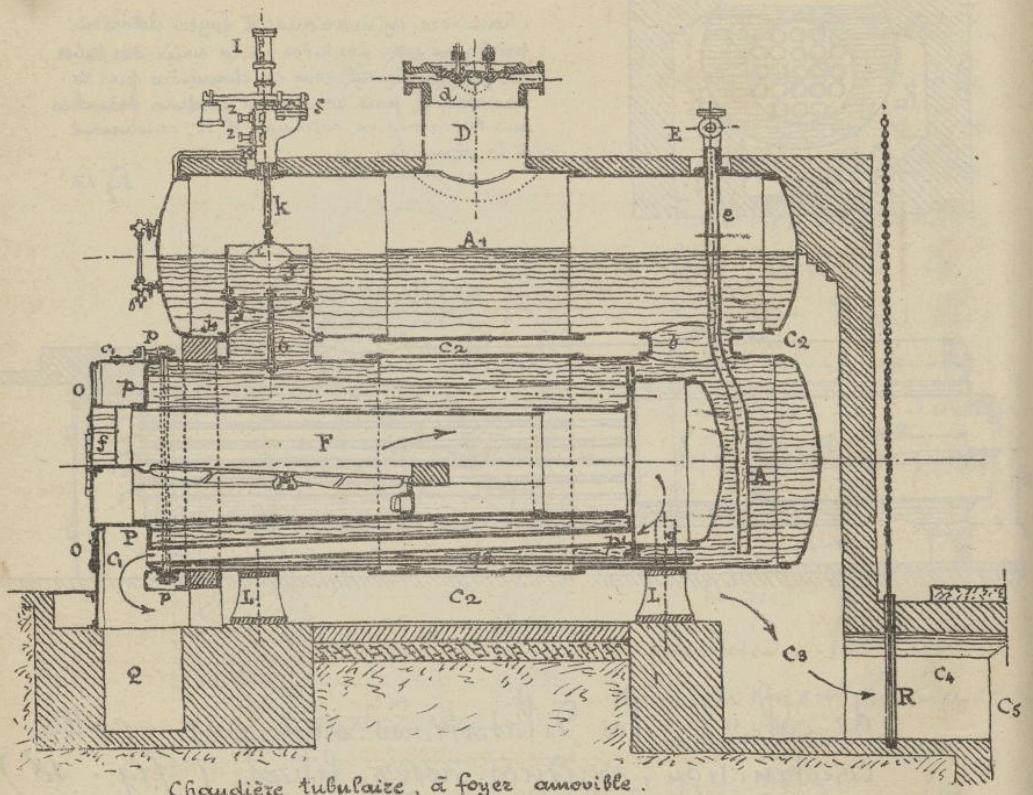
Fig 17



de cales) ; les dilatations sont, par cette construction, rendues assez libres (fig. 18) On rattache le fond de la chaudière au corps cylindrique au moyen de boulons faciles à démonter et qui ne sont pas exposés au contact des gaz chauds. On peut démonter la boîte à fumée et tirer au dehors la partie interne de la chaudière, sujette à l'entartrement, qu'on peut ainsi visiter et nettoyer. Ce dispositif convient particulièrement aux petites chaudières. Les tubes qui entrent dans la construction de ces diverses chaudières sont d'habitude en acier doux ou en fer. On a employé longtemps le laiton pour les locomotives ; mais ce métal plus cher que le fer ne paraît pas présenter d'avantage bien marqué. Le tube en laiton

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

était souvent terminé du côté du foyer par un



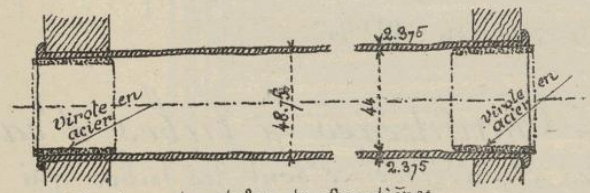
Chaudière tubulaire, à foyer amovible.
Coupe longitudinale.

Fig 18

bout en cuivre rouge parce qu'à la température du rouge sombre le laiton est cassant. Le diamètre des tubes qui varie de 45 à 55 m.m dans une locomotive est généralement plus grand dans une chaudière fixe. Une épaisseur de 2 à 4 m.m suivant le diamètre est en général suffisante pour les tubes. L'usure intérieure produite par les escarbilles entraînées et les corrosions à l'extérieur les amincissent et finissent même par les percer. La longueur des tubes est assez variable; dans une locomotive on ne dépasse guère

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4 mètres de longueur (toutefois certaines chaudières récentes ont des tubes de 5 à 6 m.), leur écartement est de 16 à 18 m/m au minimum afin que l'eau puisse circuler entre eux et que les incrustants ne les maçonnent pas trop vite. La disposition en rangées verticales paraît plus convenable pour le dégagement de la vapeur que la disposition horizontale en quinconce ; l'assemblage des tubes dans les plaques doit être simple, durable et résistant au feu. Pour assurer le joint du tube on l'évase en l'appliquant contre la paroi du trou percé dans la plaque (fig. 19) ; cette opération est effectuée à l'aide d'un "Judgeon" qui consiste en galets entraînés par une broche centrale légèrement conique qu'on fait tourner tout en l'enfonçant progressivement pour écarter les galets ; le trou de la plaque est légèrement conique ; la portion du tube sortant de la plaque tubulaire est en général rabattue sur la plaque ; mais ce sertissage ne paraît pas indispensable. On consolide souvent l'assemblage en enfonçant une virole ou bague conique en acier qui a l'inconvénient de rétrécir la section de passage des gaz. Enfin, on peut entourer le tube d'une manchette en cuivre rouge qui convient surtout lorsque le tube et la plaque sont en acier.



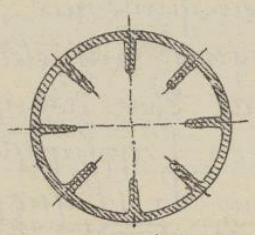
Montage des tubes de chaudières des locomotives des Chemins de fer de l'Est

Fig 19

Les tubes peuvent être considérés comme des tirants qui entretoisent des plaques tubulaires ; il faut

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

remarquer cependant qu'ils 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. On a augmenté la surface de chauffe en contact avec les gaz du foyer en munissant les tubes d'ailettes intérieures (fig. 20) ; on ne leur donne pas un trop petit diamètre afin d'en éviter l'obstruction par des escarbilles. D'ailleurs la suie s'y dépose facilement, et on ramone au moyen d'un jet de vapeur ; le diamètre minimum doit être de 70 m/m ; la saillie formée par les ailettes mesure environ 12 m/m.



Tube à ailettes
Fig 20

3e. — Chaudières à tubes d'eau. —

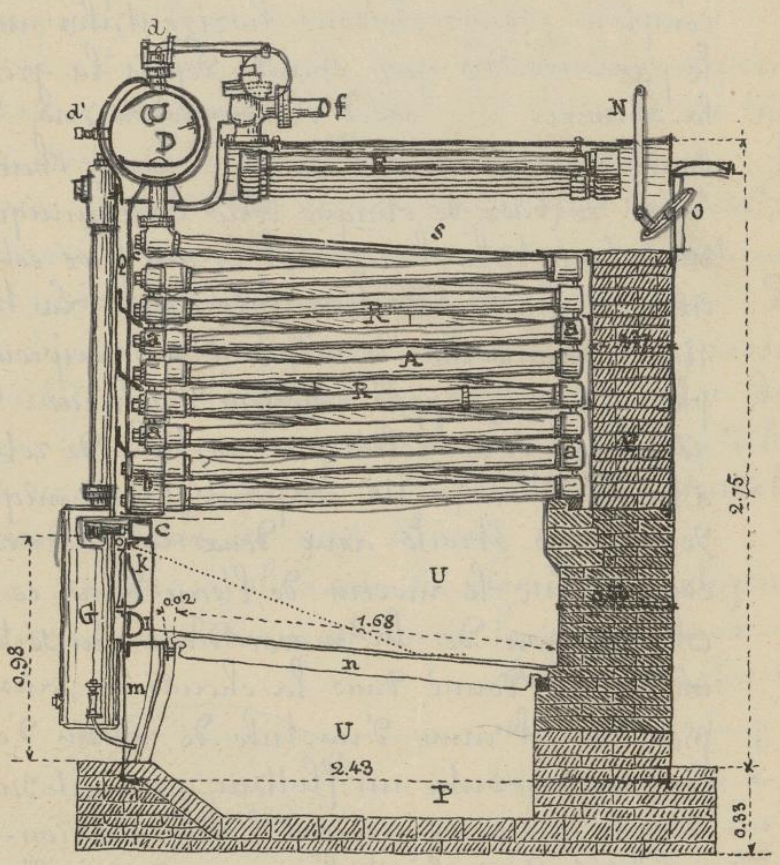
Dans ces chaudières ce sont les tubes qui sont remplis d'eau ; le corps extérieur de la chaudière et les parois du foyer se trouvent donc supprimées ; mais les pièces qui raccordent les extrémités de ces tubes sont souvent compliquées et la fabrication de certaines de ces chaudières est plutôt un travail de construction de machine qu'un travail de chaudronnerie. Ce dispositif permet de loger dans un espace peu étendu une grande surface de chauffe ; la mise en pression est rapide et une explosion ne cause pas de destructions importantes ; en revanche les ruptures de tubes sont dangereuses pour le personnel de service.

Ces chaudières se divisent en 2 types : les chaudières à circulation limitée dans lesquelles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on envoie une quantité limitée d'eau qui se vaporise, et les chaudières à circulation dans lesquelles un courant d'eau n'est vaporisé qu'en partie.

a) Chaudières à circulation limitée. — La plus importante est la chaudière Belleville. (fig. 21). Elle se compose de séries de tubes, généralement de 100 m/m de diamètre, disposés en zig-zag.



Générateur Belleville; Coupe longitudinale —

Fig. 21.

Chaque série de tubes ou élément, se compose de 2 rangées verticales qui se projettent horizontalement sur les 2 tubes inférieurs. Ce tube unique disposé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en serpentin est formé en réalité par la réunion de 15 ou 20 tubes de 2m de longueur et raccordés entre eux par des boîtes dans lesquelles ils sont vissés. Une chaudière est formée par la réunion de plusieurs éléments semblables disposés au dessus de la grille. Cette grille a, dans ce système, l'inconvénient d'être placée un peu près des tubes inférieurs, et la combustion n'est pas toujours très complète ; deux cloisons horizontales augmentent le parcours des gaz chauds depuis la grille jusqu'à la cheminée. Les communications des tubes sont disposées en dehors du courant chaud. Les tubes de base de chaque série communiquent avec un même tube horizontal C_2 qui leur est perpendiculaire, appelé collecteur inférieur. Les tubes supérieurs aboutissent de même à un récipient un peu plus grand C_1 appelé collecteur supérieur. Ces deux récipients sont reliés par un tube de retour extérieur à la chaudière. Un récipient communique par deux tubes étroits aux deux collecteurs. On conçoit que le niveau de l'eau dans ce récipient est fonction de la masse d'eau qui se trouve à un instant donné dans la chaudière ; aussi ce récipient est-il muni d'un tube de niveau d'eau. Il renferme en outre un flotteur qui agit sur un robinet et règle automatiquement l'alimentation. L'eau vaporisée dans les tubes se rend au collecteur supérieur, d'où elle est distribuée aux machines. L'eau d'alimentation arrive également au collecteur supérieur ; elle y pénètre au milieu de la vapeur et par suite s'échauffe immédiatement ; puis elle descend par le tube vertical de retour pour se rendre dans le collecteur inférieur et de là dans les tubes.

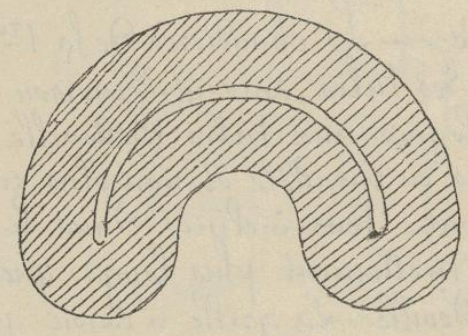
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette eau chauffée abandonne des calcaires provenant de la décomposition des bicarbonates qu'elle contenait auparavant en dissolution. Ces dépôts sont recueillis dans un déjecteur qui prolonge le tube vertical, et qui est muni à sa base d'un robinet d'extraction. On réduit ainsi les incrustations dans les tubes ; d'ailleurs des bouchons démontables, placés sur les boîtes de raccord, permettent de racler l'intérieur des tubes pour en lever ces incrustations.

En débouchant dans le collecteur supérieur, la vapeur entraîne de l'eau ; des chicanes en tôle sont destinées à l'assécher mécaniquement : la vapeur franchit les coudes tandis que l'eau se dépose. On arrive à maintenir une pression constante aux machines au moyen d'un détendeur de pression qui réduit à une valeur fixe la pression variable dans la chaudière. Au sortir de ce détendeur, la vapeur traverse un faisceau de tubes sécheurs qui forment le plafond de la chambre parcourue par les gaz chauds.

Citons également la chaudière Solignac ; le circuit des tubes y est moins long que dans la chaudière Belleville, mais ils sont plus nombreux. On a fixé à leur origine un diaphragme de petite dimension pour que l'eau n'y accède qu'en petite quantité.

La plus petite section des tubes se trouve dans le générateur Serpollet (fig. 22)



Coupe d'un tube Serpollet ; grandeur d'exécution.

Fig 22

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont la capacité est très faible, l'eau circulant dans une fente étroite au milieu d'un gros tuyau chauffé. Une pompe alimentaire y refoule l'eau qui se vaporise immédiatement.

b) Chaudières à circulation. Dans ces générateurs, on désire ordinairement obtenir une circulation d'eau active qui augmente la production de vapeur et maintient toujours les appareils à une pression relativement basse. Un courant d'eau rapide se charge de bulles de vapeur en proportion régulière. Si, au contraire, l'eau ne circule pas d'une manière continue, la vapeur forme des sortes de poches et se dégage difficilement par les passages souvent étroits.

On peut classer ces chaudières à circulation en trois catégories :

1° Les chaudières à tubes, à peu près horizontaux;

2° Les chaudières à tubes à peu près verticaux;

3° Les chaudières à tubes concentrique.

1re Catégorie. — Les chaudières de la 1re catégorie sont constituées par des tubes, souvent d'environ 100 m/m de diamètre, analogues aux tubes Belleville, mais montés dans ce cas en parallèle et non plus en série.

Ces tubes sont tous inclinés dans le même sens et sont habituellement plus longs que dans le générateur Belleville. La grille n'existe que sous la partie antérieure du faisceau de tubes, des chicanes dirigent les gaz chauds autour des tubes, en empêchant l'écoulement direct vers la cheminée.

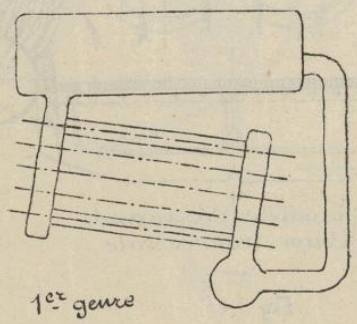
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les dimensions du collecteur supérieur sont en général assez considérables ; il constitue un grand corps cylindrique à moitié plein d'eau ; tantôt il est complètement soustrait à l'action des gaz chauds, tantôt il est chauffé par les gaz qui ont traversé le faisceau de tubes.

Les différents tubes peuvent être réunis entre eux par de petits raccords séparés comme dans le générateur Belleville, ou par des conduits sur lesquels se branchent tous les tubes d'une rangée verticale, ou enfin par des caisses plates en tôle dont les 2 faces planes sont entretoisées et dans lesquelles les tubes s'assemblent à leur extrémité.

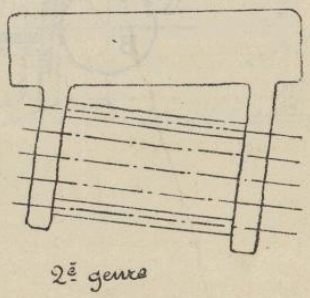
Ce sont les tubes inférieurs qui sont le plus fortement chauffés et qui produisent la vaporisation la plus active, mais en même temps, ce sont eux qui sont le moins bien alimentés en eau, quand l'eau descend directement du collecteur supérieur (fig. 23).

Chaudières à circulation



1er genre

Fig. 23



2e genre

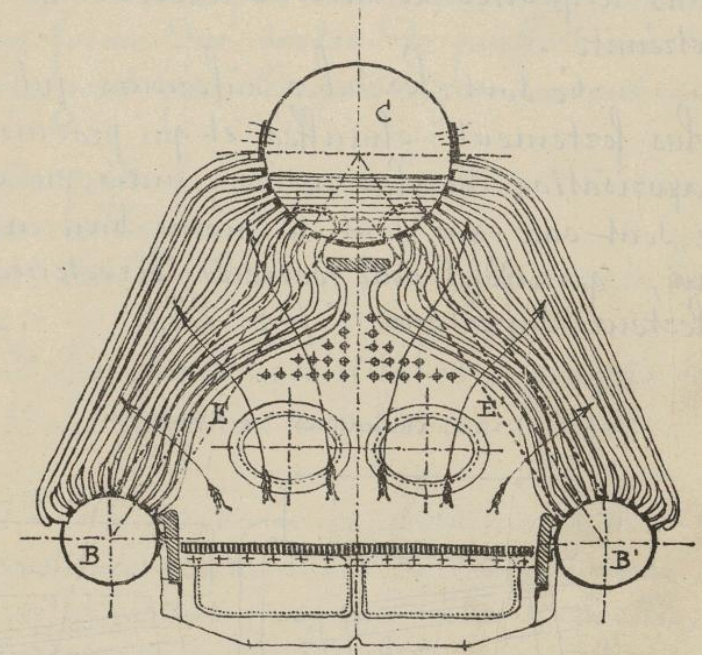
Fig. 24

Aussi certaines chaudières ont un collecteur inférieur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où part en remontant l'alimentation des tubes chauffés ; les 2 collecteurs sont reliés entre eux par un gros tube de retour non chauffé (fig. 24.)

2ème Catégorie. — Ces chaudières comprennent un collecteur supérieur et deux collecteurs inférieurs reliés au précédent par deux faisceaux de tubes entourés d'une enveloppe isolante. La grille est placée entre les deux collecteurs inférieurs et les gaz chauds passent entre les tubes. (fig. 25).



Chaudière Normand
Coupe transversale

Fig 25

Les tubes extérieurs du faisceau sont jointifs : les trous correspondant des plaques sont en quinconce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et les tubes s'infléchissent pour venir au contact à une petite distance de la plaque (fig. 26) Il peut arriver avec de tels dispositifs de chaudières que l'eau descende en sens inverse de la marche normale. Pour éviter cet inconvénient les tubes de la chaudière Thornycroft débouchent dans le collecteur supérieur au-dessus du plan d'eau. Les tubes de retour extérieurs sont alors indispensables.

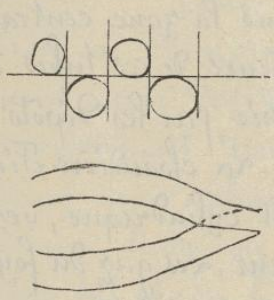
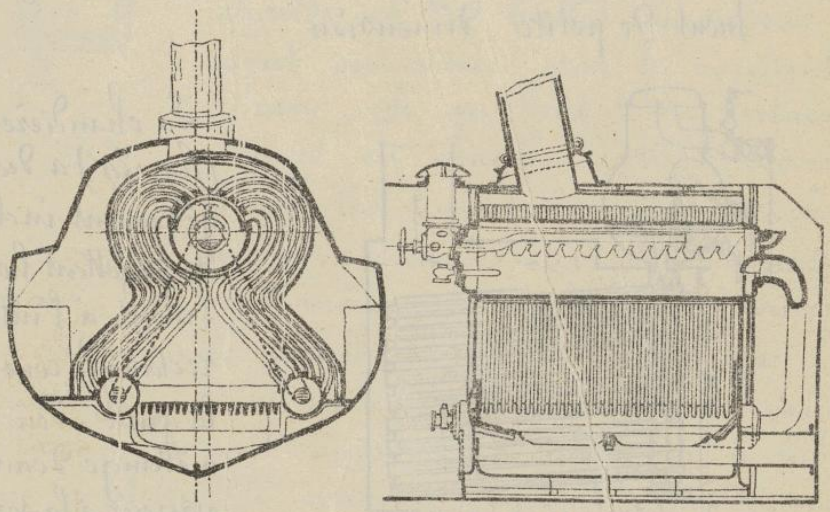


Fig. 26

Les chaudières de cette catégorie sont surtout employées pour les marines militaires. (fig. 27).



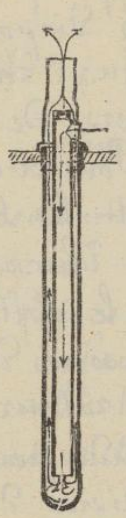
Chaudière Thornycroft

Fig 27

3me Catégorie. — Les chaudières Field utilisent des tubes fermés à une extrémité ouverts à

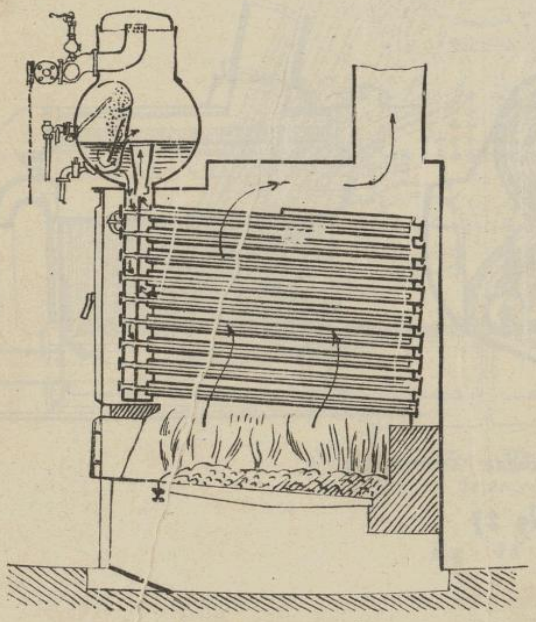
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'autre (fig. 28) et contenant un tube concentrique central d'amenée d'eau. Le dégagement de vapeur se fait donc précisément là où pénètre l'eau d'où accès souvent difficile de cette eau dans la zone centrale. La partie inférieure de ces tubes est quelquefois bouchée par les dépôts des eaux incrustantes. La chaudière Field proprement dite est cylindrique, verticale, à foyer intérieur. Les gaz du foyer chauffent les tubes, puis par une cheminée centrale traversent la chaudière ; ces gaz s'échappent souvent à une température élevée et échauffent trop fortement la partie de la cheminée qui traverse la vapeur. Cette chaudière est généralement de petite dimension.



Tube Field

Fig 28



Chaudière Niclausse (coupe longitudinale)

Fig 29

La chaudière Niclausse (fig. 29) a des tubes légèrement inclinés, qui se projettent horizontalement à l'intérieur du rectangle constitué par la grille. Pour éviter le mélange d'eau et de vapeur à la sortie du tube central on fait partir celui-ci d'une cloison destinée à séparer le courant d'eau descendant du courant ascendant chargé de vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

5. — Théorie de la circulation de l'eau.

Cette question assez délicate a donné lieu à de nombreuses études théoriques. On peut, par des expériences simples, montrer un mouvement analogue au mouvement de l'eau dans une chaudière : Si on adapte les branches d'un tube en U à un récipient rempli d'eau, (fig. 30) et si l'on chauffe une des branches on constate qu'il s'établit un courant d'eau dans le sens indiqué sur la figure. Si l'on continue à chauffer cette branche, l'ébullition se produit dans la région la plus chaude et les bulles de vapeur sont entraînées par le courant d'eau. Si au bout d'un certain temps on chauffe le tube descendant les bulles de cette branche se trouvent encore entraînées par le courant d'eau ; on peut même supprimer la source de chaleur de gauche pour ne laisser que la deuxième, sans renverser le sens de la circulation. On peut aussi faire déboucher le tube qui contient le courant ascendant, au-dessus du niveau de l'eau : le courant s'établit et l'eau retombe dans le récipient. (fig. 31).

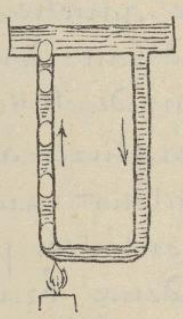


Fig 30

Ces expériences ne reproduisent d'ailleurs pas exactement ce qui se passe dans la réalité : les chaudières, en effet, ont toujours de grandes dimensions et la vapeur qui s'y trouve

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Considérons une chaudière représentée schématiquement par la fig. 32. Au moment de l'allumage et de la mise sous pression l'eau ne se vaporise encore ; mais elle est chauffée le long de la branche inclinée et le mouvement s'effectue sous l'influence de la différence de densité entre les volumes d'eau de droite et de gauche (le poids d'un volume d'eau donné diminue environ de 4,4 % lorsque la température augmente de 100°). Si H est la hauteur moyenne de liquide et si W et W' sont les poids spécifiques de l'eau dans les deux branches, les pressions des deux colonnes d'eau sont respectivement HW et HW'. Si on imagine à la place de la colonne d'eau chaude une colonne d'eau froide exerçant la même pression et de hauteur

$$\frac{HW'}{W}$$

on peut dire que la pression qui détermine le mouvement de l'eau correspond à la hauteur

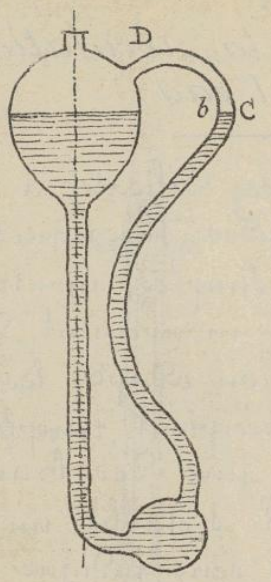


Fig 31

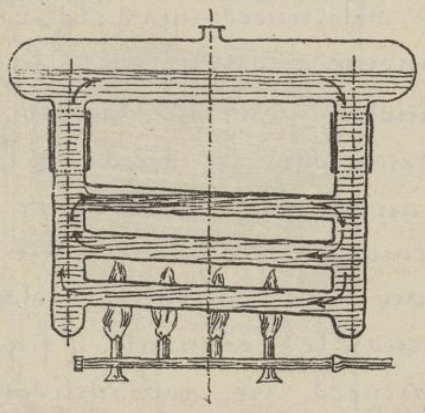


Fig 32

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$H\left(1-\frac{W'}{W}\right)$$

Si on prend $H = 2$ mètres

$$1-\frac{W'}{W}=\frac{1}{20}$$

on trouve une hauteur de 10 mètres d'eau.

Si l'écoulement de l'eau se faisait sans résistance la vitesse serait

$$v=\sqrt{2gH\left(1-\frac{\varpi'}{\varpi}\right)}$$

En réalité, il y a des frottements considérables du liquide contre les parois des tubes et lors des passages dans les parties coudées : la théorie indique qu'il y a une perte de charge proportionnelle à v^2, et les lois de l'hydraulique fournissent une équation d'où on peut tirer v.

Pour étudier ce qui se passe en régime normal on a recours à la théorie dite "de la Densité moyenne". L'eau est vaporisée en partie dans le tube de gauche, et dans cette région de la chaudière on observe un mélange d'eau et de vapeur que l'on considère comme un fluide unique ; cela revient à supposer nulle la vitesse relative de l'eau par rapport à la vapeur : la Densité de ce fluide est la moyenne entre la densité de la vapeur et celle de l'eau.

Dans la pratique on peut même négliger le poids de la vapeur devant celui de l'eau. Avec cette hypothèse on peut encore, avec moins de certitude que précédemment, il est vrai, appliquer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les formules de l'hydraulique, qui donnent une valeur approchée de la vitesse. On se rend compte que cette théorie serait rigoureusement exacte dans le cas d'un tube de très petit calibre; (fig. 33) la colonne liquide serait alors segmentée, les espaces libres entre deux tronçons liquides étant remplis de vapeur: la vapeur et l'eau montant simultanément dans le tube ont rigoureusement la même vitesse.

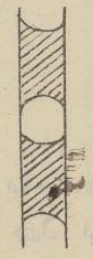


Fig. 33

Cette même théorie serait complètement fausse si on l'appliquait à un recipient de grand diamètre dont l'eau serait portée à l'ébullition: l'eau y prend seulement des mouvements irréguliers. Dans les cas intermédiaires, rencontrés en pratique, les bulles se déplacent un peu plus vite que l'eau, et on ne peut rigoureusement assimiler ce mélange à un fluide homogène. La théorie donne toutefois des résultats suffisamment exacts dans beaucoup de cas.

Détermination de la proportion d'eau et de vapeur.

Soit M le nombre de calories traversant l'unité de surface de chauffe en une seconde. La surface de chauffe totale reçoit M S calories. L'eau étant la température O_1 sous la pression p_1, il faut pour la vaporiser lui fournir la quantité de chaleur τ_1 par kilogramme. Le poids vaporisé par M S calories est donc:

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$\frac{MS}{\gamma_1}$ kg. d'eau

Soit P le nombre de kilogrammes d'eau passant par seconde à travers une section prise dans la chaudière : ce nombre P dépend de la valeur de v au point considéré.

La proportion de vapeur est :

$$x = \frac{\frac{MS}{\gamma_1}}{P} = \frac{MS}{\gamma_1 P}$$

Or les équations de l'hydraulique fournissent une relation entre le carré de la vitesse et $H\left(1-\frac{\varpi'}{\varpi}\right)$; le nombre ϖ' dépend de x, par suite de P et par suite de v ; on arrive à une équation reliant v et H.

Dans un grand nombre de chaudières, tant que la chauffe n'est pas exagérée on observe une vitesse normale de circulation de l'eau : si on force le tirage pour augmenter la vaporisation, des tubes peuvent arriver à se remplir complètement de vapeur, qui s'échappe par les deux bouts ; l'eau ne peut plus entrer dans le tube qui est alors exposé à se brûler. C'est pourquoi il importe d'amener l'eau par des conduites larges et sans coudes inutiles.

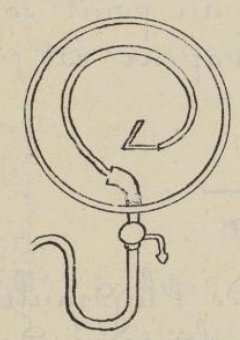
6.- Appareils accessoires des chaudières.

Manomètre. — Les chaudières sont munies d'un manomètre généralement du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

type Bourdon dont les indications sont données par la déformation d'un tube flexible (fig. 34).

L'une des extrémités de ce tube est fixe et communique avec la chaudière ; l'autre est mobile et peut se déplacer d'une petite quantité en entraînant une aiguille indicatrice.



(Fig. 34.)

Le tube de raccordement avec la chaudière est disposé en syphon renversé et se remplit d'eau ; la pression de la vapeur s'exerce donc par l'intermédiaire de cette colonne d'eau et la vapeur elle-même ne pénètre pas dans l'appareil. Ces appareils indiquent la pression effective, différence entre la pression intérieure et la pression atmosphérique.

Soupapes de sûreté. — Une soupape de sûreté doit se soulever dès que la pression de la vapeur atteint une limite fixée (fig. 35).

Les soupapes sont constituées par un disque reposant sur un siège de très petite largeur dont le diamètre intérieur définit la surface circulaire pressée par la vapeur : les surfaces en contact sont rodées et doivent être très étroites car il est nécessaire que la soupape soit en contact avec le siège sur toute la portée prévue ; sinon la vapeur presserait une surfa

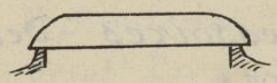


Fig. 35.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus grande qu'on ne le suppose. Lorsque la chaudière ne fonctionne pas, la surface de la portée supporte la charge de la soupape, égale à la pression la plus forte de la vapeur ; le métal ne doit pas s'écraser sous cette charge et cette condition détermine la largeur de la portée. La surface de portée est plane ou conique.

La soupape est guidée verticalement par des ailettes ou par une tige passant à l'intérieur d'une douille ; il est essentiel que ces guides ne donnent pas naissance à un frottement notable et ne puissent se coincer.

Le siège est quelquefois formé d'une pièce annulaire en bronze engagée dans la fonte ; les dilatations inégales des deux métaux peuvent produire une contraction du siège de nature à pincer la soupape et à empêcher son fonctionnement ; il faut aussi veiller à ce que le siège rapporté ne puisse glisser dans son logement car la vapeur le soulèverait avec la soupape sans trouver aucune issue.

La soupape peut être chargée d'un poids directement placé sur elle. Le plus souvent on utilise un levier ; le contrepoids agit à l'extrémité du grand bras tandis que le petit bras charge la soupape, ce qui permet de prendre un poids

$$\mathcal{G} = P \frac{A'O}{AO} \quad \text{(fig. 36).}$$

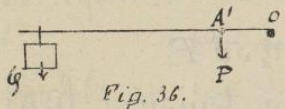


Fig. 36.

On modifierait la formule en tenant compte du poids du levier concentré en son centre de gravité.

La construction doit réaliser avec précision

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les bras de levier prévus dans le calcul ; avec une articulation sur tourillon la position du point d'appui (fig. 37) du levier est mal déterminé ; l'erreur relative faite sur la longueur du petit bras, qui est toujours très court, peut être considérable. Le réglage d'une soupape munie d'un semblable levier peut être difficile. Il est préférable de faire porter le levier sur des couteaux.

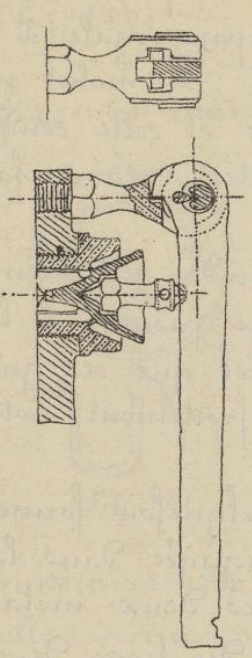


Fig 37

Lorsque la soupape se soulève elle doit laisser se dégager une quantité suffisante de vapeur. Le poids de la vapeur qui sort de la chaudière dépend du débit et de la surface qui lui est offerte ; si la soupape se soulève d'une hauteur l, la surface de dégagement de la vapeur est $\pi D l$; de plus, si P est la pression à l'intérieur de la chaudière le poids de vapeur exprimé en grammes, s'échappant par seconde à travers un orifice de 1 cm² de section est

$$P(15,42 - \log.P)$$

La pression en aval de l'orifice, qui n'est autre que la pression atmosphérique, ne figure pas dans cette formule, applicable seulement si cette pression d'aval est

$$p_2 < 0,58\,P$$

ce qui dans la pratique a toujours lieu.

Cette formule permet de calculer la surface d'échappement qu'il y a lieu d'adopter.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La quantité l se présente toujours avec un grand degré d'incertitude ; quand la soupape est ouverte, la vapeur s'échappe et la pression baisse le long de la veine de vapeur qui se trouve en contact avec cette soupape ; en outre l'air est entraîné par la nappe de vapeur, de sorte que, dès que la soupape s'ouvre, elle tend à se refermer. La pression de la chaudière peut ainsi s'élever au-dessus de la limite supérieure avant que la soupape débite toute la vapeur produite. On a observé des surpressions de plus de 1 kg. par centimètre carré avec les appareils tels qu'ils sont ordinairement établis, pour un même appareil ces surpressions sont d'autant plus grandes que la limite de pression fixée est plus élevée.

La détermination des appareils est établie empiriquement.

On emploie souvent encore l'ancienne formule réglementaire

$$D = 2,6 \sqrt{\frac{S}{n - 0,412}}$$

où D est le diamètre de la soupape en centimètres, S la surface de chauffe de la chaudière en mètres carrés, n la pression absolue en atmosphères.

Il est parfois utile que le chauffeur agisse sur la soupape pour assurer le complet dégagement de la vapeur.

On améliore le fonctionnement de ces appareils en les disposant de telle sorte que la force qui les soulève augmente, ou au moins reste constante, lorsqu'ils laissent échapper la vapeur. (fig. 38)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Telle est la soupape Adams qui repose sur un siège incliné à 45°; on a fait venir de fonte avec la soupape proprement dit une gorge en forme de demi-tore; la gerbe de vapeur, en sortant de la chaudière, contourne le tore et exerce une force supplémentaire qui augmente la levée de la soupape.

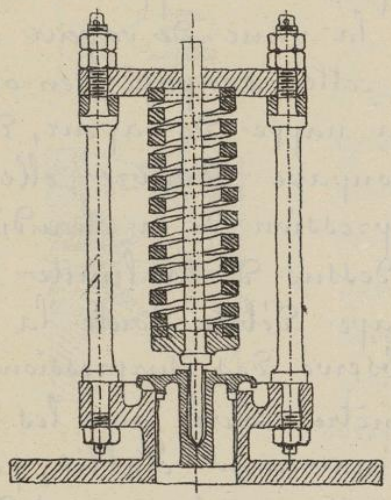


Fig 38.

Il est facile d'accroître 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 pression dans la chaudière; c'est le défaut de certains types à grand débit; et on ne l'évite que grâce à une construction très précise, conformément aux formes déterminées par tâtonnements, et grâce à un entretien très soigné. Pratiquement le fonctionnement d'une soupape est considéré comme satisfaisant lorsqu'à l'ouverture la surpression, et à la fermeture la dépression ne dépassent par $0^{kg},25$ par centimètre carré.

Sur les chaudières qui se déplacent le mouvement fait danser les soupapes chargées par des poids qui sont alors remplacés par des ressorts agissant directement ou par l'intermédiaire d'un levier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Indicateurs de niveau. — Il est nécessaire de connaître à chaque instant le niveau de l'eau dans les chaudières. On emploie en général un indicateur constitué par un tube de verre monté dans deux tubulures en bronze fixées sur la chaudière ; ce tube est maintenu dans chaque tubulure par un presse-garniture qui serre une bague élastique (fig. 39). Deux robinets permettent de fermer les communications avec la chaudière ; un troisième robinet sert à la purge du tube et des communications.

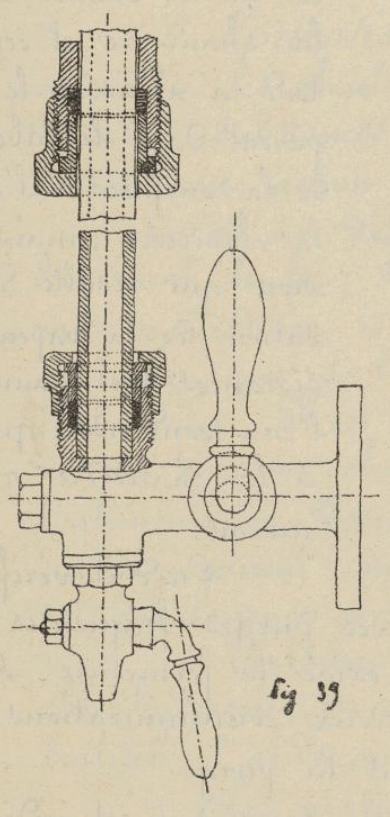


Fig 39

L'appareil doit être disposé de telle sorte qu'on puisse facilement 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 munis d'une tige assez longue pour être manœuvrés sans danger, lorsqu'un tube vient à se rompre.

La fig. 40 montre comment la garniture élastique mal disposée peut venir obstruer le tube, et comment, avec un montage convenable on peut éviter cette obstruction.

Il importe que les communications avec

BIBLIOTHÈQUE CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS CNAM PARIS

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la chaudière soient courtes et directes. Des tuyaux de communication longs et courbés risquent de fausser l'indication du tube de niveau, l'eau qui remplit les tuyaux est moins chaude que celle de la chaudière et cette action tend à abaisser le niveau apparent dans le tube au-dessous de la surface de l'eau dans la chaudière ; mais la dépression qui résulte de la condensation de la vapeur et les résistances au mouvement de l'eau condensée qui redescend à la chaudière relèvent le niveau.

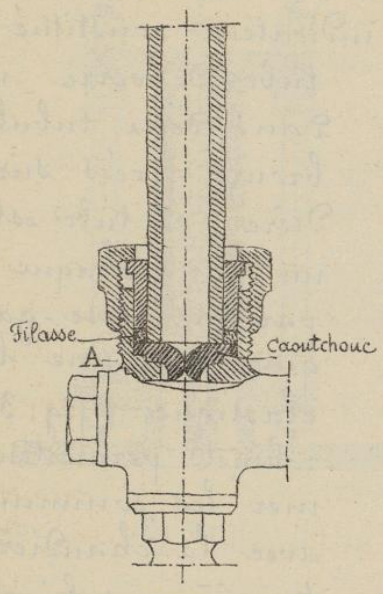


Fig 40

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.

On ajoute souvent à cet indicateur de niveau des robinets de jauge, placés à des hauteurs différentes sur la paroi de la chaudière ; l'un communique normalement avec l'espace rempli d'eau, une autre avec l'espace rempli de vapeur ; un troisième est placé entre les deux précédents.

Enfin, on emploie également des flotteurs ; dans les anciennes chaudières ils transmettaient à l'extérieur l'indication du niveau au moyen d'une tige traversant une garniture généralement trop ou trop peu serrée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On emploie maintenant de préférence le flotteur magnétique constitué par un aimant qui produit le déplacement d'une aiguille d'acier extérieure, à travers un tube de bronze.

Epuration des eaux. — L'eau qui alimente les chaudières est rarement pure; les diverses substances qu'elle renferme ont presque toutes une action nuisible.

L'air dissous dans l'eau peut attaquer lentement le fer; toutefois cette attaque ne paraît se produire d'une manière appréciable, en pratique, que si l'eau contient aussi de l'acide carbonique. Il est donc bon de chasser les gaz dissous par un chauffage préalable de l'eau; l'alimentation dans la vapeur, qui peut produire un dégagement immédiat de ces gaz dissous, est avantageuse à ce point de vue.

Certaines eaux contiennent de l'acide chlorhydrique ou sulfurique; il convient de neutraliser l'acide au moyen d'une base quelconque.

Les matières grasses d'origine animale ou végétale se décomposent à la chaleur des chaudières; il y a formation d'acides gras qui peuvent attaquer les tôles. Ces matières ayant servi au graissage des cylindres se retrouvent dans les condenseurs, et peuvent être amenées dans la chaudière si celle-ci est alimentée par l'eau de condensation. On emploie souvent pour séparer l'eau des matières grasses des filtres formés d'éponges; l'eau versée à la partie supérieure traverse les éponges, dont les cellules retiennent les matières grasses.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les principales impuretés contenues dans l'eau ordinaire sont le bicarbonate de calcium $(CO^3)^2 Ca H^2$ et le sulfate de calcium $SO^4 Ca$; ces corps se précipitent quand on chauffe et on a accumulation de matières solides à la partie inférieure de la chaudière; lorsque ces dépôts sont bourbeux ou pulvérulents on peut facilement les extraire; mais en général 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. Il est préférable, cependant, d'épurer les eaux avant leur entrée dans la chaudière. Pour cela on y ajoute de la chaux et de la soude: la chaux précipite le bicarbonate de calcium en le transformant en carbonate simple; le carbonate de soude donne avec le sulfate de calcium un précipité de carbonate de calcium et du sulfate de sodium qui reste dissous. Le précipité de carbonate de calcium est séparé par décantation par filtration. 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 sodium) sont ajoutés à l'eau en proportions convenables; des chicanes sont disposées pour recevoir les dépôts.

Ces méthodes laissent le sulfate de sodium dissous dans l'eau. En ajoutant après la chaux, de l'aluminate de baryte, sel soluble,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on précipite les éléments du sulfate de chaux à l'état de sulfate de baryte et d'aluminate de chaux. De plus il semble que ce dernier sel facilite le dépôt des autres précipités.

Dans le cas où on emploie l'eau de mer pour alimenter les chaudières, il est nécessaire d'empêcher la concentration indéfinie du chlorure de sodium. On y arrive au moyen de "l'extraction" d'une fraction de l'eau introduite. On extrait constamment le 1/5 de l'eau d'alimentation et 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 complètement, si on l'utilise pour un chauffage méthodique de l'eau d'alimentation, formant un courant inverse.

Lorsque l'eau n'est pas épurée au préalable, on cherche souvent à éviter les dépôts en croûtes dures à l'aide de désincrustants. Le carbonate de soude qui décompose le sulfate de chaux est la base d'un grand nombre de ces produits. Le plus souvent les désincrustants agissent mécaniquement; des matières organiques telles que les pommes 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 déjà entartrées, les désincrustants font parfois détacher les croûtes formées par les dépôts; celles-ci restent dans la masse de l'eau sous forme de plaques et peuvent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chassées par les courants s'accumuler sur les tôles chauffées et en causer l'altération.

7. – Conditions de sécurité de fonctionnement des chaudières.

Epreuves. — 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, dite "*épreuve à la presse hydraulique*" 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 loi du 30 avril 1880 prescrit dans les essais de chaudières une surcharge de 6 kg. par centimètre carré, pour les chaudières fonctionnant à une pression effective inférieure à 6 kg. par centimètre carré, la surcharge est égale à cette pression.

Ces essais sont bons pour vérifier l'étanchéité, car les fuites sont plus difficiles à éviter à froid qu'à chaud. Au point de vue de la résistance, l'épreuve ne constitue pas une garantie complète, il faut y joindre un examen minutieux des tôles.

Pour éviter les projections dangereuses, en cas de rupture, pendant l'essai, il convient que la chaudière soit entièrement remplie d'eau et ne contienne pas d'air. Même avec cette précaution, il n'est pas sûr qu'un tampon en bois, bouchant un orifice, ne puisse être dangereusement projeté; il ne faut pas employer ce moyen simple de fermeture. La pression est mesurée au moyen d'un manomètre étalon monté sur la chaudière.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Règlements sur l'installation des chaudières.—— Les emplacements des chaudières dans les bâtiments et leur éloignement des murs sont soumis à des règlements qui varient suivant les types de chaudières ; à ce point de vue on les divise en trois catégories suivant la valeur du produit de leur volume, exprimé en mètres cubes, par l'excès de la température de la vapeur sur 100°. La chaudière est de la première catégorie quand ce produit est supérieur à 200 ; elle est de la deuxième catégorie quand il est compris entre 200 et 50 ; elle est de la troisième catégorie quand il est plus petit que 50. Dans le cas où l'installation comprend une batterie de chaudière le volume considéré est la somme des volumes des différentes chaudières.

Un décret du 29 Juin 1886 rend obligatoire en France l'emploi de clapets automatiques lorsque plusieurs générateurs dépassant certaines Dimensions sont groupés ensemble. Ces clapets, se fermant quand le débit de vapeur devient excessif empêchent la chaudière de se vider, si la conduite de vapeur vient à se rompre ou si une autre chaudière, branchée sur la même conduite, vient à se déchirer.

L'installation de ces clapets présente parfois quelques difficultés, parce que les fermetures intempestives sont gênantes et même dangereuses, dans certains cas, pour les machines d'extraction par exemple, dont le frein est commandé par la vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A cet égard, il y a lieu de distinguer les simples clapets battant qui empêchent le retour de la vapeur vers la chaudière et dont l'installation ne présente aucune difficulté.

Accidents. — Les chaudières donnent lieu à des accidents plus ou moins graves, depuis les explosions foudroyantes 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. Si 1 Kg. d'eau chaude à 180° est ramené brusquement à supporter la pression atmosphérique, sa température tombe à 100°, il y a donc 80 calories rendues disponibles et qui transformeront en vapeur une fraction de la masse d'eau égale

$$\text{à } \frac{80}{530} = \frac{1}{7} \text{ environ}$$

en prenant la chaleur de vaporisation de l'eau égale à 530 calories. Il y aura donc 1/7 de la masse d'eau transformé en vapeur et qui éprouvera par suite une augmentation considérable et presque instantanée de volume.

Les chaudières à tubes d'eau, à cause du grand nombre des éléments qui les composent donnent lieu à de petits accidents, relativement nombreux. La gravité des accidents 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 sous la poussée de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

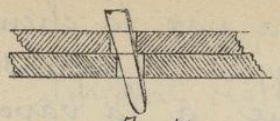
la vapeur, qui s'échappera par la cheminée. On ajoute aussi des trappes d'expansion qui ouvrent une large issue à la vapeur. Il faut que les cendriers soient également munis de portes, qui se ferment du dedans vers le dehors.

Les accidents se rattachent à trois causes d'espèces différentes:

En premier lieu l'appareil peut avoir des défauts originels. Ces défauts peuvent tenir à un vice d'étude; il est souvent difficile de calculer avec précision la fatigue des diverses pièces d'une chaudière, à moins que les formes n'en soient simples; les dilatations inégales des différentes parties produisent des poussées et des tiraillements qui sont loin d'être toujours négligeables.

Le défaut peut tenir à la mauvaise qualité des matériaux employés; la résistance à la rupture des tôles est presque toujours assez élevée; mais la ductilité, qui se manifeste par l'allongement de l'éprouvette avant rupture, par la réussite des essais de pliage et de choc, fait souvent défaut. La tôle est souvent fragile et cassante. Enfin l'exécution peut être défectueuse; les tôles s'altèrent très fréquemment pendant leur travail; il se produit des fissures invisibles à l'extérieur. Il peut se faire aussi que les tôles soient mal assemblées et que les trous de rivure ne se correspondent pas; il faut dans ce cas avoir recours à l'opération du brochage (fig. 41) qui permet de mettre les trous en regard en enfonçant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires


Fig. 41

une broche conique dans l'ouverture ; mais on produit en même temps un écrouissage du métal et des cassures qui pourront dans la suite donner lieu à des ruptures.

En second lieu, la chaudière est soumise à l'usure, cette deuxième cause se superposant souvent à la première. Des corrosions locales se développent à l'intérieur et à l'extérieur de la chaudière.

La corrosion intérieure est quelquefois dûe à l'emploi d'eaux acides ; mais elle se produit aussi avec les eaux les plus pures ; elle paraît provenir de la combinaison de l'action de l'eau et de l'air sur les tôles. Cette attaque se produit aussi quand il reste un peu d'eau dans les chaudières après la vidange ; aussi, lorsque le chômage d'un générateur doit se prolonger, importe-t-il de l'assécher soigneusement.

La corrosion débute souvent par des piqûres isolées ou pustules ; il se forme dans le fond des chaudières des trous qui se remplissent d'une poudre d'oxyde de fer. Ces trous augmentent et arrivent à percer les plaques ; s'ils sont isolés on peut les boucher facilement. Mais ils peuvent par leur extension progressive se réunir et couvrir une grande surface.

Les corrosions produisent aussi des sillons allongés surtout près des rivets, à l'endroit où une tôle cesse de porter contre la tôle contigüe, et dans les parties embouties ; les sillons se creusent également dans les arrondis concaves du côté de l'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les corrosions semblent dûes en partie à une attaque du métal par l'oxygène de l'air; c'est souvent dans le voisinage de l'eau d'alimentation qui contient de l'oxygène dissous que se produisent les corrosions.

Toutefois, les eaux qui paraissent surtout corrosives sont celles qui renferment, outre l'oxygène de l'air, de l'acide carbonique en dissolution. Quant aux corrosions en sillons, elles se forment spécialement dans les parties où la tôle est soumise à des efforts répétés de flexion, qui semblent favoriser beaucoup l'attaque par l'eau.

Dans les parties qui ne sont en contact qu'avec la vapeur, les tôles restent en général intactes.

Les corrosions extérieures sont déterminées principalement par l'action des fuites de l'eau de la chaudière. Cette action destructive s'exerce autour des rivets et de tous les joints mal faits, autour des bouchons autoclaves fréquemment démontés. 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.

Enfin, en troisième lieu, les accidents peuvent provenir de ce que l'on se sert maladroitement ou imprudemment des générateurs ou qu'on en néglige l'entretien.

Il peut arriver qu'on ne les débarrasse pas en temps voulu du tartre qui s'accumule peu à peu, jusqu'à faire rougir les tôles directement chauffées; les soupapes peuvent fonctionner mal et rester collées sur leurs sièges; les indicateurs de niveau, les manomètres être en mauvais état et donner de fausses indications.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le mauvais emploi des appareils, excès de pression ou défaut d'alimentation peut causer un accident.

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. Poussé trop loin, l'excès de pression amène nécessairement une rupture; mais une bonne chaudière supportera, sans grand danger, une certaine surcharge, qui, d'ailleurs, ne doit jamais être tolérée.

Lorsque la chaudière manque d'eau, les tôles ont tendance à rougir et à perdre leur ténacité. C'est surtout dans les chaudières à foyer intérieur que le manque d'eau est dangereux, car les ciels de foyer, une fois découverts, arrivent vite au rouge. Lorsque les tôles sont très ductiles, la pression 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. Le raisonnement et les expériences de "L'Association des propriétaires de machines à vapeur de Manchester" ont montré qu'il n'en était rien; ces expériences ont consisté à abaisser le plan d'eau au-dessous des ciels de foyer, à les laisser s'échauffer jusqu'au rouge, puis à alimenter abondamment. En opérant avec des soupapes calées cette alimentation produisait au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

premier instant une certaine élévation de pression ne dépassant pas 3 kg. par centimètre carré ; puis la pression retombait rapidement.

En opérant pendant que les soupapes soufflaient, on n'a constaté aucune élévation de la pression, qui au contraire s'abaissait bientôt.

Du reste, en faisant le calcul des calories cédées par les plaques de tôle dont la chaleur spécifique est faible à l'eau dont la chaleur de vaporisation est considérable, on trouve qu'il doit y avoir une très faible fraction d'eau vaporisée.

Les tôles des ciels s'altéraient profondément pendant les essais et ont dû être plusieurs fois changées ; mais aucune cassure circulaire ou longitudinale n'est résultée de l'application subite de l'eau froide.

En tout cas, il faut que la tôle soit aussi peu fragile que possible ; car, si une rupture se produit, elle reste locale avec une bonne tôle, elle se développe avec une tôle fragile.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II.— Théorie de la Machine à vapeur.

1.— Résumé historique sommaire.

Les premières machines à vapeur industriel-les remontent au début du 18e Siècle ; elles étaient destinées à épuiser l'eau dans les mines. La vapeur était produite à la pression atmosphérique dans un " alambic " et était introduite dans un cylindre : un piston plongeant dans ce cylindre s'élevait grâce à un balancier qui portait à l'extrémité opposée des tiges de pompes qui faisaient contrepoids : ces tiges s'abaissaient, actionnaient des pompes qui refoulaient l'eau en haut du puits de mine. Lorsque le piston était parvenu au haut du cylindre, on y faisait le vide grâce à une injection d'eau froide, et la pression atmosphérique agissant sur la face supérieure du piston le faisait redescendre dans le cylindre. Cette machine pouvait donner 15 coups par minute. En somme on voit que l'atmosphère joue seulement le rôle d'un contre-poids que la vapeur soulève pendant la course montante : pendant la descente, ce contrepoids restitue le travail qu'il a reçu. Ces machines ont été perfectionnées par Watt. Il eut l'idée de faire la condensation de la vapeur en dehors du cylindre : le cylindre en effet était fortement refroidi par l'injection, et la vapeur qui y

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entrait se condensait en partie, avant d'avoir pu contribuer à élever le piston. En adoptant un condensateur séparé le refroidissement du cylindre subsistait encore, mais était singulièrement diminué.

Watt a également construit des machines à double effet dans lesquelles la partie supérieure du cylindre communique avec le condensateur à la montée et avec la chaudière à la descente, tandis que l'inverse a lieu pour la partie inférieure.

Enfin, Watt eut l'idée de faire travailler la vapeur par détente : elle n'entre dans le cylindre que pendant une fraction de la course du piston, puis elle continue à le pousser en se détendant.

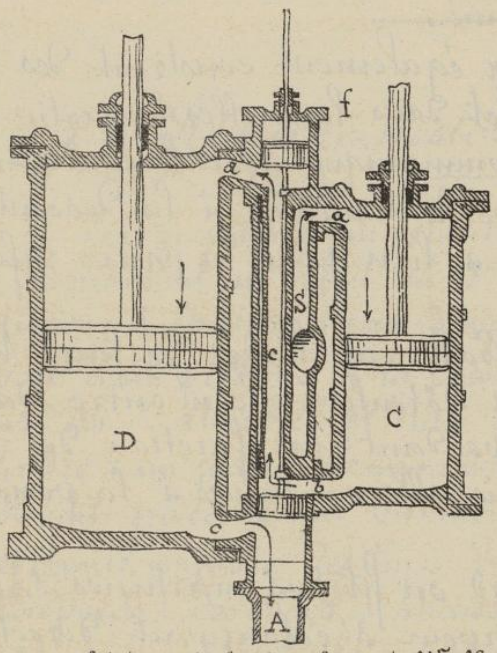
Plus tard on fit des machines sans condensation : la vapeur s'échappait directement dans l'atmosphère ; la pression résistante que doit surmonter le piston pendant son retour, est alors plus grande ; il est ici indispensable que la pression motrice, pendant l'aller soit supérieure à la pression atmosphérique.

Dans toutes les machines primitives la vapeur ne travaillait que dans un seul cylindre qui la recevait de la chaudière et l'évacuait au condensateur

A l'époque de Watt, Hornblower avait construit des machines à deux cylindres ; ces machines reparurent vers 1804 sous le nom de machines de Woolf (fig. 42), la vapeur sortant de la chaudière, pénètre dans un premier cylindre pendant toute la course de son

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

piston, puis pendant le retour de ce piston elle se détend en se transvasant dans un deuxième cylindre plus grand.



Cylindres de la Machine de Woolf, d'après Trégold

Fig 42

Pendant la course descendante la vapeur de la chaudière presse le dessus du petit piston ; la vapeur qui remplissait le petit cylindre se détend dans le grand, et la partie inférieure du grand cylindre communique avec le condenseur. L'inverse a lieu pendant la course montante.

Vers 1856 ces machines ont été transformées en machines Compound : la vapeur traverse encore successivement 2 cylindres de volumes différents ; le plus petit reçoit la vapeur de la chaudière ; elle commence à s'y détendre, puis s'échappe dans un réservoir intermédiaire. Le réservoir alimente à son tour le 2ème cylindre comme le ferait une chaudière. On a ainsi deux machines distinctes, et les pistons n'ont plus nécessairement des positions concordantes comme ceux de la machine de Woolf. Souvent ils attaquent deux manivelles calées droit sur un arbre unique. Les 2 cylindres successifs peuvent avoir même axe et être montés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en tandem : une tige unique porte alors les deux pistons.

Vers 1872 on a commencé à construire des machines à triple expansion. Le 1er cylindre reçoit la vapeur de la chaudière et l'évacue dans un 1er réservoir intermédiaire ; ce réservoir alimente le 2e cylindre dont l'échappement se fait dans un second réservoir ; enfin la vapeur traverse un troisième cylindre plus grand que le second, qui est plus grand lui-même que le premier, puis s'échappe dans le condenseur ou dans l'atmosphère.

Ces machines à quadruple expansion qui ne sont pas encore très répandues ont un 3me réservoir qui alimente un 4me cylindre plus grand que le troisième.

Ces progrès viennent de ce que la pression initiale de la vapeur est beaucoup plus élevé maintenant qu'autrefois. Elle atteint 16, 18 et même 20 Kg par cm2. Enfin on construit maintenant des machines reposant sur un principe absolument différent des précédentes et considéré longtemps comme irréalisable ; Ce sont les turbines dans lesquelles la vapeur s'écoule directement de la chaudière au condenseur sans jamais être complètement arrêtée par des obstacles comme dans les machines à piston. Elle agit sur des autres auxquelles elle imprime un mouvement de rotation autour d'un axe. Ces machines conviennent bien aux très grandes puissances.

Citons enfin les machines rotatives qui ne sont que des machines à pistons ; mais ceux-ci ont un mouvement circulaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les formes en sont très compliquées et l'étanchéité mal assurée.

2. – Application des principes généraux de mécanique et de physique.

Unités.

1° Force. – L'unité de force dans le système métrique est le poids d'une masse étalon de platine. On prend généralement pour valeur de l'accélération due à la pesanteur

$$g = 980,6^{cm}/sec^2$$

2° Travail. – On sait que la valeur du Kilogramme n'est pas constante à la surface de la terre ; pour la pratique des machines les variations en sont insignifiantes. L'unité de travail est le Kilogrammètre.

3° Puissance. – La puissance est la quantité de travail effectuée dans l'unité de temps.

Par nombre de Kilogrammètre en une seconde, on entend presque toujours le nombre moyen pendant une certaine période de marche, car le travail produit n'est généralement pas le même pendant chaque seconde.

L'unité pratique est le cheval-vapeur qui correspond à 75 Kgm. par seconde.

En multipliant une puissance par un temps, on obtient un nombre qui représente un travail. Une machine qui a produit un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cheval pendant 1 heure ou 1 cheval-heure a produit 75 Kgm. par seconde pendant 3600 secondes, soit un travail de 270.000 Kgm.

Nous indiquerons la correspondance entre ces unités du système métrique et les unités du système C.G.S.

1 Kg.	= 980.600	dynes
1 Kgm.	= 9.806	joules
1 Watt	= 0.102	$\frac{\text{Kgm}}{\text{seconde}}$.

4° Pression. — L'état d'un fluide homogène est déterminé lorsqu'on connaît la pression et le volume d'un poids connu. La pression qui s'exprime généralement en Kilogrammes par cm² peut être considérée comme constante à l'intérieur d'une masse gazeuse de volume limité (dans une machine). Lorsque le fluide se détend, le travail élémentaire qui elle effectue est donné par la formule :

$$\int_{v_0}^{v} p\,dv.$$

5° La température. — est déterminée par le thermomètre à hydrogène à volume constant.

6° L'unité de quantité de chaleur est — la grande calorie.

Entropie. — L'entropie est une fonction des quantités de chaleur et des températures.

L'élément différentiel de l'entropie est le rapport $\frac{d\varphi}{t}$ de la quantité infiniment petite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de chaleur $d\varphi$ reçue par un corps à sa température absolue t.

On démontre que si le corps subit une transformation réversible quelconque, qui le ramène à son état primitif, l'intégrale

$$\int \frac{d\varphi}{t}$$

pour cette transformation est nulle. On en conclut qu'il existe une fonction des quantités de chaleur et des températures dont

$$\frac{d\varphi}{t}$$

est la différentielle et qui a une valeur déterminée pour chacun des états du corps. Cette fonction se nomme l'entropie. Si elle est connue ou arbitrairement fixée, pour un état initial, on en calcule la valeur pour un autre état du corps, en imaginant des états intermédiaires tels que la variation d'entropie se détermine aisément; par exemple on amènera le corps du premier au second état par une transformation d'abord adiabatique, puis isotherme. Dans la première opération $d\varphi = 0$ et l'entropie reste constante; dans le 2e, t est constant et

$$\int \frac{d\varphi}{t} = \frac{\varphi_1}{t_1}$$

Il reste à en fixer la valeur initiale: pour l'eau il est commode de supposer l'entropie nulle lorsqu'elle est à la température de 0° centigrade, à l'état liquide, sous la pression de 63 Kg par cm² (pression de la vapeur saturée à 0°).

Pour une transformation irréversible d'un corps, avec retour à l'état primitif, si l'on considère, non pas la température qui il possède, mais celle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des sources de chaleur, on démontre que :

$$\int \frac{d\varphi'}{t} \leq 0.$$

Diagrammes figurant les états d'un fluide. — L'état d'une masse fluide d'un 1 Kg. par exemple dont toutes les parties sont au même état physique est caractérisé par 4 éléments importants : pression, volume, température, entropie. Pour représenter clairement les transformations physiques des fluides il suffit de figurer par des coordonnées 2 des 4 éléments caractéristiques.

Le plus usité de ces diagrammes est le diagramme de Clapeyron dans lequel on prend pour coordonnées les pressions et les volumes.

Ce diagramme met en évidence le travail externe produit par la masse gazeuse, passant de l'état A à l'état B. Il est égal à l'aire A a b B A' (fig. 43).

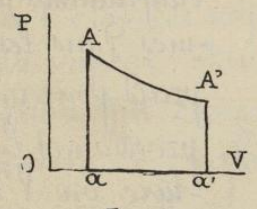


Fig 43

La température apparaît dans ce diagramme par le tracé d'un réseau de lignes isothermes, chacune d'elles donnant à une température déterminée les valeurs correspondantes de la pression et du volume.

Le diagramme entropique a comme abcisses les entropies de 1 Kg. du corps étudié et comme ordonnées les températures absolues.

(fig. 44)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour un accroissement infiniment petit de l'entropie l'aire A A' a a'

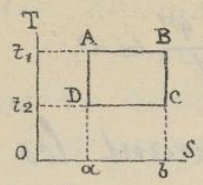


Fig 45

est égale à

$$t.dS = t\,\frac{d\varphi}{t} = d\varphi.$$

C'est la quantité de chaleur reçue par le corps. Le diagramme entropique d'une transformation suivant un cycle de Carnot est un rectangle (fig. 45). On voit clairement sur le diagramme que les quantités de chaleur mises en jeu dans la transformation sont proportionnelles aux températures t_1 et t_2 des deux sources. Soit :

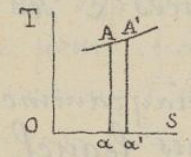


Fig 45

$$\frac{\varphi_1}{t_1} = \frac{\varphi_2}{t_2}$$

On rapproche sur une même figure les deux espèces de diagrammes comme l'indique la figure 46. On déduit de la considération simultanée de ces deux diagrammes les diagrammes dans lesquels on prend pour variables la pression et la température ou l'entropie et le volume.

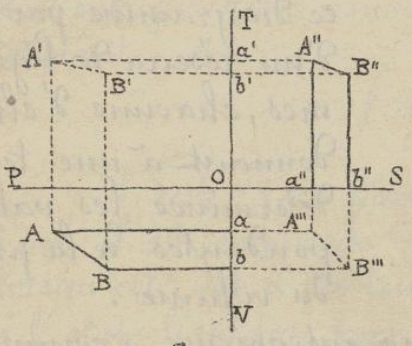


Fig 46

Les échelles des diagrammes doivent être choisies de telle sorte que les surfaces hachurées qui représentent l'une des Kgm et l'autre des calories soient directement comparables : 426 Kgm correspondront

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à la même surface qu'une calorie.

Dans les transformations irréversibles on peut encore tracer des lignes correspondantes telles que A B et A" B", mais les surfaces hachurées ne représentent plus un travail externe accompli et une quantité de chaleur reçue par le fluide évoluant.

Etude physique de la vapeur d'eau. —

Une vapeur est saturée tant qu'elle est en contact par une surface plane avec le liquide qui la produit ; sa pression dépend uniquement de la température et satisfait à une relation de la forme

$$f(t, p) = 0$$

L'état d'un mélange d'eau et de vapeur est défini par la proportion de vapeur, supposée saturée, de ce mélange.

Un des éléments les plus importants à connaître dans l'étude de la vapeur d'eau est la quantité de chaleur mise en jeu pour faire passer l'eau de 0° à l'état de vapeur saturée sèche à θ°, le liquide et sa vapeur étant constamment soumis à la pression qui correspond à cette température : la quantité de chaleur, nécessaire à une transformation d'un corps n'est définie que si la loi de transformation est précisée.

Soit λ la chaleur totale de vaporisation de l'eau ; cette quantité peut être décomposée en deux parties : la chaleur nécessaire pour amener le liquide de 0° à θ°, toujours sous la pression p de la vapeur saturée à θ° et la chaleur de vaporisation qui transforme le liquide

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en vapeur saturée à $\theta°$ sous la pression p.
Désignons, suivant les notations de Zeuner par q et r ces 2 quantités

$$\lambda = q + r$$

Or on a très sensiblement, pour l'eau

$$q = \theta$$

La formule de Regnault donne 2 termes correctifs en θ^2 et θ^3 mais dont les coefficients sont très petits: à la température de 200° on trouve:

$$q = 203 \text{ calories}$$

Pour l'eau $\lambda = 606,5 + 0,305\,\theta$.

Le terme r peut à son tour être décomposé en 2 autres: soit en effet σ le volume primitif occupé par l'eau; quand la vaporisation se produit, le volume devient $\sigma + u$. Si, pour fixer les idées, nous imaginons que l'eau est contenue dans un cylindre, à l'intérieur duquel se meut un piston pesant, la vaporisation de cette eau est capable de soulever le piston et, par suite, d'exercer un travail mécanique extérieur: ce travail est égal au produit de la section Ω du piston par la pression constante de la vapeur et par la course c du piston, soit:

$$\Omega\, p\, c = p\, u$$

u étant l'accroissement de volume. Ce travail correspond donc à une quantité de chaleur

$$A\, p\, u$$

A étant l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur. On peut donc poser

$$r = \rho + A\, p\, u$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et dire que r est la somme de 2 quantités de chaleur : la 1re, ρ, chaleur latente interne produit la modification physique du fluide et la 2me Apu est la chaleur latente externe transformée en travail.

Remarquons qu'une petite part du travail externe correspond à la dilatation de l'eau avant sa vaporisation, mais cette part est si minime, à côté de la portion produite par la transformation en vapeur, qu'on peut la négliger pour simplifier les calculs et supposer, comme nous l'avons fait, que c'est la chaleur de vaporisation seule qui se transforme en deux parts. L'erreur commise n'est pas supérieure à l'erreur possible sur la valeur des quantités de chaleur.

On pourrait obtenir la valeur du produit Apu en mesurant directement u, ce qui est difficile car il faut avoir de la vapeur saturée sèche. Il est plus commode de le calculer par un raisonnement de thermodynamique. Considérons un 1Kg de vapeur d'eau faisant l'évolution du cycle de Carnot entre 2 températures infiniment voisines t et t+dt. Cette vapeur saturée passe de la pression p (fig. 47) à la pression p+dp.

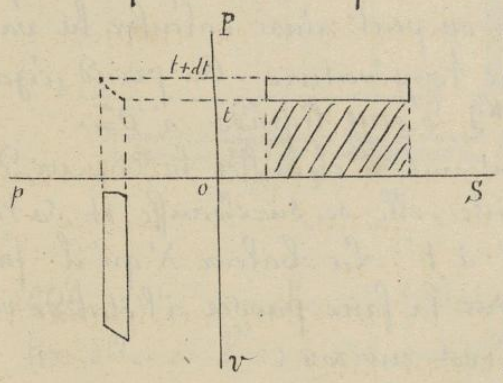


Fig. 47

Sur le diagramme en (p.v) on part du point figuratif du volume σ, situé très près de l'axe ov ; la surface du cycle décrit par le fluide est à un infiniment petit du 2me ordre près,

u dp.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Construisons le même cycle dans le système entropique d'après la règle indiquée plus haut, ce cycle est un rectangle de hauteur dt. Comme d'autre part, lorsque le fluide reste en contact avec la source chaude il est transformé en vapeur, il absorbe la quantité de chaleur r, qui doit être représentée à l'aire infiniment petite près du rectangle, par la surface d'un rectangle de hauteur t, ombré sur la figure. Donc la base du rectangle est

$$\frac{r}{t}$$

. Ceci posé, si l'on écrit que les 2 diagrammes sont équivalents, on arrive à la formule :

$$A u \, dp = \frac{r}{t} \, dt$$

ou

$$A p u = \frac{r p}{t} \, \frac{dt}{dp} .$$

Dans le 2e membre, r, p, t sont connus pour chaque température ; on déduit

$$\frac{dt}{dp}$$

de l'équation empirique qui lie p et t, et on peut ainsi calculer la valeur de u pour chaque température. On prend égale à 0 l'entropie de 1 Kg d'eau liquide à 0°.

Si on continue à chauffer la vapeur d'eau à pression constante, elle se surchauffe et sa température passe de t à t'. La chaleur λ' qu'il faut fournir à l'eau pour la faire passer à l'état de vapeur surchauffée à $t°$ est environ :

$$\lambda' = \lambda + 0,5 (t' - t)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous prenons la chaleur spécifique de cette vapeur surchauffée égale à 0,5 ; dans les ouvrages de Regnault on la trouve égale à 0,48 ; mais des expériences récentes ont montré que la dernière décimale n'était pas sûre et on peut adopter pour le moment la valeur de 0,5.

Cette quantité de chaleur $0.5\,(t'-t)$ peut comme précédemment être divisée en 2 parties qui correspondent l'une au travail externe produit, l'autre au travail interne.

Les différents états de la vapeur d'eau sont mis nettement en évidence sur les diagrammes entropiques (fig. 48). Sur ces diagrammes on prend pour origine le point 0' correspondant à $T = 273$. Les figures tiennent moins de place ; mais il est indispensable dans les questions où interviennent les aires, de les compter à partir de l'axe 03 et non à partir de l'axe 0'S'.

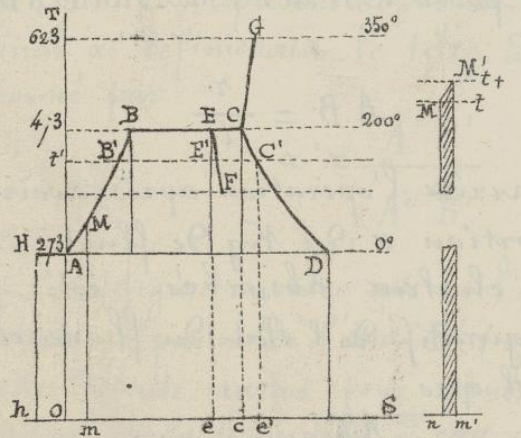


Diagramme entropique de l'eau et élément de ce diagramme pendant l'échauffement de l'eau.

Fig 48

L'échauffement de 1 Kg d'eau entre les températures 273 et t, est représenté par la ligne 0'A. La courbe est telle que l'aire comprise entre elle et l'axe OS soit égale à φ ;

$$\int_{273}^{t_1} \frac{d\varphi}{t} = o'a$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les tables donnent les valeurs calculées de cette expression pour la série usuelle des valeurs de t. La construction graphique ne présente donc aucune difficulté. On peut d'ailleurs admettre soit

$$dq = dt$$

soit

$$dq = c\,dt.$$

c étant la chaleur spécifique moyenne de l'eau entre les températures 273 et t_1, quantité très voisine de 1.

On a alors à calculer :

$$c \int_{273}^{t_1} \frac{dt}{t} = c \operatorname{Log}_e \frac{t_1}{273}$$

Puis l'eau se vaporise à pression constante; pendant cette opération la température t reste constante ; le point figuratif passe de A en B, la droite AB ayant la longueur

$$AB = \frac{r}{t}$$

Si on arrête l'opération après avoir vaporisé la proportion x du Kg de fluide, la quantité de chaleur absorbée est rx. Le point figuratif de l'état du fluide est alors le point C tel que

$$\frac{AC}{AB} = x$$

Si maintenant nous vaporisons l'eau à une série de températures comprises entre 0 et t_1, on obtient au début de la vaporisation une série de points tels que A' et à la fin une série de points B'. Le lieu de ces points B' est une certaine courbe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

analogue à OA mais tournant sa concavité en sens inverse.

On obtient ainsi un diagramme qu'on peut construire une fois pour toutes et qui permet d'étudier plusieurs phénomènes relatifs à la vapeur d'eau.

L'une des plus importantes est celle de la détente de la vapeur enfermée dans un cylindre et poussant un piston. Cette détente est toujours accompagnée d'échanges de chaleur, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, entre la vapeur et les parois du cylindre qui la contient. On étudie d'abord des cas théoriques bien définis et débarassés des complications de la réalité. L'un des plus simples est le cas de la détente adiabatique.

Si nous supposons la vaporisation arrêtée en C, la détente adiabatique qui va abaisser la température de t_1 à t' est représentée par la droite CC'. L'état final x' définissant le titre de la vapeur est donné par

$$x' = \frac{A'C'}{A'B'}$$

La figure montre que si l'on faisait la même détente à partir de l'état B' (vapeur saturée sèche), cette détente aurait pour résultat d'humidifier la vapeur et la proportion d'eau contenue dans le fluide passerait de 0 à la valeur

$$\frac{B_1B'}{A'B'}$$

D'une façon générale on voit que si la détente s'effectue à partir d'un point C voisin de B la proportion de liquide augmente dans le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fluide ; si au contraire la détente s'effectue à partir d'un point voisin de A, c'est la proportion de vapeur qui augmente.

On peut d'ailleurs calculer algébriquement ces propositions d'eau et de vapeur.

On a en effet :

$$A'B' = \frac{z'}{t'}$$

$$A'C' = \frac{z'}{t'}x' = A'A'' + A''C'$$

Mais

$$A'A'' = \int_{t'}^{t_1} \frac{dq_1}{t}$$

Cette quantité est fournie par les tables ; on peut aussi le calculer facilement en le prenant égale à

$$\int_{b'}^{t_2} \frac{dt}{t}$$

De plus

$$A''C' = AC = \frac{z}{t}x.$$

d'où

$$\int_{t'}^{t_1} \frac{dq}{t} + \frac{z}{t}x = \frac{z'}{t'}x'$$

$$\frac{z'}{t'}x' = \frac{z}{t}x + \log_e \frac{t_1}{t'}$$

$$x' = \frac{t'}{z'}\left(\log_e \frac{t_1}{t'} + \frac{z}{t}x\right)$$

A partir de B^1 on peut surchauffer la vapeur, sous la pression constante p. La surchauffe est représentée par une courbe telle que BD et l'aire comprise entre cette courbe et la droite AB est

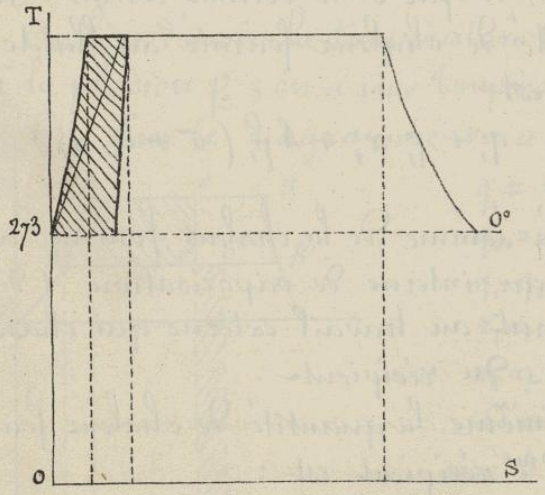
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

égale à $0.5\,(t''-t)$ d'après ce qui a été dit plus haut. La variation d'entropie correspondant au déplacement du point figuratif de l'état de la vapeur, de B en D, est égale à

$$\int_{t_1}^{t''} \frac{dq}{t} = 0.5 \log_e \frac{t''}{t_2}$$

Cette courbe est donc une courbe logarithmique, et on aura une série de courbes analogues partant des points B, B', etc. Si on détend, suivant une ligne adiabatique, la vapeur de la température t à la température t', à partir de l'état représenté par B, on voit sur la figure qu'on obtient à la fin de la détente, soit de la vapeur surchauffée, soit de la vapeur saturée humide.

Sur le diagramme entropique, de la vapeur d'éther (fig. 49.) le lieu des points B' s'incline vers la gauche et si l'on fait une détente adiabatique de la vapeur à partir de B on la surchauffe, au contraire de la vapeur d'eau qui devient humide.



Diagrammes entropiques de l'éther et de l'eau

Fig 49

Laminage de la vapeur.

Lorsque la vapeur traverse un orifice étroit pour passer de la chaudière dans le cylindre elle éprouve une chute

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de pression, souvent considérable ; c'est ce qu'on appelle le laminage de la vapeur. La vapeur subit encore une détente, mais sans fournir de travail externe

Considérons un 1er récipient (fig. 50) où la vapeur est à la pression p ; elle s'écoule à travers un orifice étroit dans un 2me récipient où elle prend la pression p_2. Soit x, le titre de la vapeur dans le 1er récipient ; on se propose de trouver son titre dans le 2me récipient. Nous supposerons la détente adiabatique. Nous pouvons imaginer que la vapeur du récipient R_1 est chassée par un piston P_2 qui le force à traverser l'orifice ; de même dans le récipient R_2 on peut supposer qu'un piston P_2 est poussé par la vapeur. En désignant par q_1 la chaleur du liquide dans le 1er récipient, par ℓ_1 la chaleur interne de vaporisation, par u_1 le volume qu'occuperait le liquide vaporisé complètement à la pression p_1 et par σ le volume initial du liquide, la quantité de chaleur fournie au fluide du 1er récipient est

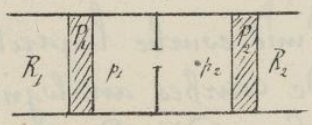


Fig. 50.

$$q_1 + \ell_1 x_1 + A p_1 (\sigma + u_1 x_1).$$

car c'est la somme de la chaleur fournie au liquide, de la chaleur interne de vaporisation et de la chaleur correspondant au travail externe qui chasse le fluide hors du récipient.

De même la quantité de chaleur fournie au fluide du 2me récipient est :

$$q_2 + \ell_2 x_2 + A p_2 (\sigma + u_2 x_2).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En écrivant que ces 2 quantités de chaleur sont égales puisque la détente est adiabatique, on arrive à la relation :

$$q + r_1 x_1 + A\sigma(p_1 - p_2) = q_2 + r_2 x_2$$

en remarquant que

$$p_1 + A p_1 u_1 = r_1$$

$$p_2 + A p_2 u_2 = r_2$$

d'après les notations indiquées précédemment. Si on remarque que σ est très petit par rapport à u_1 et u_2 et peut être négligé, on obtient la relation

$$q_1 + r_1 x_2 = q_2 + r_2 x_2$$

d'où l'on tire x_2

On trouve que $x_2 > x_1$

ce qui montre que la vapeur s'assèche.

Si $x_2 = 1$ la vapeur est surchauffée dans le 2e récipient et on a :

$$q_2 + r_1 x_1 = q_2 + r_2 + 0{,}5(t_2' - t_2).$$

Au lieu d'avoir la température t_2 qui correspond à la pression p_2, on a une température plus élevée.

Sur le diagramme on a (fig. 51)

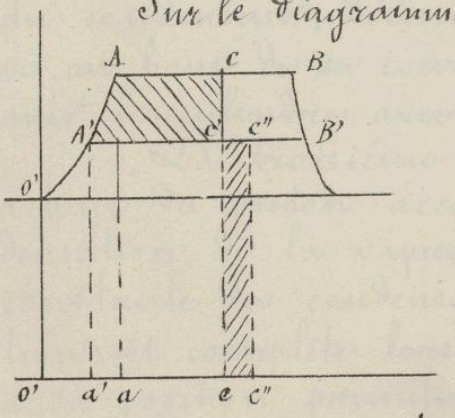


Fig. 51.

q_1 = aire $o o' A a$

q_2 = aire $o o' A' a'$

$q_1 - q_2$ = aire $A' A a a'$

$r_1 x_1$ = aire $A C c a$

$r_2 x_2$ = aire $A' C'' c'' a'$

d'où

aire $A' A a' a$ + aire $A C c a$ = aire $A' C'' c'' a'$

d'où en retranchant les parties

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

communes à ces aires

$$\text{aire } C'C''c''c = \text{aire } A'ACC'$$

Le laminage de la vapeur a été utilisé dans un appareil qui sert à mesurer le titre de la vapeur.

On se sert d'un tube percé de trous par lesquels entre la vapeur à la pression p, et qui laisse écouler la vapeur par un orifice étroit, suivi d'un tube plus large où règne la pression atmosphérique r_a et dans lequel on place un thermomètre (fig. 52). D'après ce qui vient d'être dit si x est le titre de la vapeur qui entre dans le tube et si θ'_a est la température observée au thermomètre, on aura l'égalité

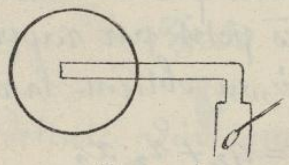


Fig. 52

$$q_1 + r_1 x = q_p + r_a + 0.5(\theta'_a - \theta_a).$$

q_1 et r_1 sont donnés par les tables, de même q_a, r_a, et θ_a (voisin de 100°). Cette équation permet de calculer x.

Si la vapeur prise dans la chaudière était très humide, elle sortirait du tube sans être surchauffée et le thermomètre indiquerait $\theta'_a = \theta_a$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3. - Théorie de la Machine à vapeur.

1° *Machine parfaite.* - Nous imaginerons d'abord une machine à vapeur parfaite et nous étudierons la dépense de vapeur.

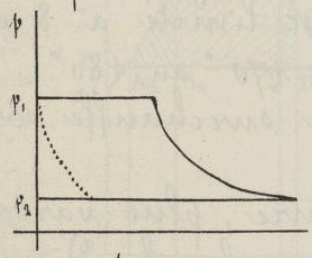


Fig. 53.

Nous supposerons (fig. 53) qu'il s'agit d'une machine à pistons.

La première phase dans le fonctionnement de la machine est dite phase de pleine pression : la vapeur entre dans le cylindre et pousse le piston, puis on ferme l'admission.

La deuxième phase est une détente adiabatique de la vapeur qui continue à pousser le piston, tandis que sa pression diminue jusqu'à la pression du condenseur. Lorsque le piston est arrivé au bout de sa course on fait communiquer le cylindre avec le condenseur.

La troisième phase comporte le retour du piston accompagné de la condensation de la vapeur à la température constante du condenseur. Si la condensation est complète lorsque le piston revient à sa position primitive, nous disposons d'un poids d'eau égal au poids de vapeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

venue de la chaudière.

La quatrième phase consiste à ramener l'eau de la température t_2 du condenseur à la température t_1 de la chaudière.

Dans les machines, la température de la vapeur dans la chaudière dépend de la pression. Il est rare qu'on dépasse 200° centigrades qui correspondent à une pression de plus de 15 kg par centimètre carré. Souvent on se limite à 8 ou 10 kilogs c'est-à-dire à 170° ou 180°.

Le cas de la surchauffe est examiné plus loin.

La température, plus variable dans le condenseur que dans la chaudière, descend rarement au-dessous de 25°.

Dans les machines sans condenseur, la vapeur, en s'échappant dans l'atmosphère, prend la température qui correspond à la pression, c'est-à-dire 100° quand la pression est exactement une atmosphère.

Le cycle de la vapeur que nous venons d'indiquer n'est pas un cycle de Carnot. Si la machine devait fonctionner suivant un cycle de Carnot, il faudrait dans la troisième phase que la communication avec le condenseur cessât au moment où il resterait dans le cylindre un mélange d'eau et de vapeur à la température t_1 tel qu'une compression adiabatique le transformerait en eau liquide à la température t_2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur le diagramme cette nouvelle phase est représentée par la ligne adiabatique tracée en pointillé.

En toute rigueur même, le diagramme ne comporte pas de point sur l'axe des pressions, pour tenir compte du petit volume σ occupé par le liquide et l'adiabatique que nous venons de tracer serait légèrement décalée vers la droite.

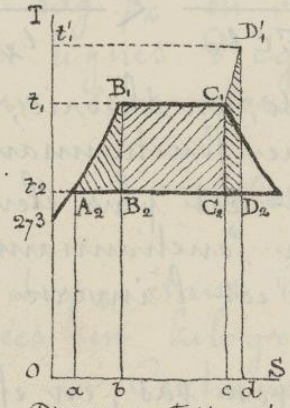


Diagramme entropique des cycles de la machine à vapeur

Fig 54

Sur le diagramme entropique (fig. 54) le cycle de Carnot correspondrait au rectangle A B C D dont l'aire représente la proportion de chaleur transformée en travail, et on sait que

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} = \frac{t_1 - t_2}{t_1}$$

Si maintenant, comme dans le cas précédent, on suppose la condensation complète, et si on réchauffe l'eau de t_2 à t_1, l'évolution du fluide est représentée par le cycle A B C E.

La quantité de chaleur nécessaire pour réchauffer l'eau est représentée par l'aire E A a e qui s'ajoute à la chaleur de vaporisation A B b a. La quantité de chaleur représentée par l'aire E A B C F est transformée en travail externe, travail

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus grand que dans le cas du cycle de Carnot. Mais le rendement, c'est à dire la fraction de chaleur fournie par la source chaude qui est transformée en travail, est moindre, car il est manifeste sur la figure que :

$$\frac{\text{aire } ABCE}{\text{aire } ECbe} < \frac{t_1 - t_2}{t_2}$$

Cependant si, en théorie, le rendement d'une machine fonctionnant suivant un cycle de Carnot est plus élevé que celui d'une machine fonctionnant suivant le cycle précédent, c'est l'inverse qui a lieu dans la pratique.

On ne dispose pas, en effet, d'une source chaude à t_1, mais des gaz chauds de la combustion, qui entretiennent la température t_1 de la chaudière, mais qu'on peut refroidir au-dessous de cette température, en élevant, dans un réchauffeur, celle de l'eau d'alimentation prise à t_2. La chaleur de ces gaz qui serait perdue dans le cas du cycle de Carnot est utilisée dans le cas actuel, et par suite la dépense de combustible est moindre. Il est donc préférable de s'approcher autant que possible de cette évolution plutôt que de chercher la réalisation du cycle de Carnot.

On peut déterminer pour une série de valeurs de p_1 et p_2 le nombre N de kilogrammètres produits par un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

kilog. de vapeur d'où on déduit le nombre K de kilogr. de vapeur nécessaire pour produire un cheval heure :

$$K = \frac{270.000}{N}$$

On représente K sur des abaques, où on porte p_1 et p_2, ou mieux $\log p_1$ et $\log p_2$ en ordonnées et en abscisses. Les lignes d'égale consommation de vapeur sont alors des droites et :

$$K = 0,85 + \frac{6,95 - 0,92 \log p_1}{\log p_1 - \log p_2}$$

p_1 et p_2 étant les pressions absolues exprimées en kilogramme par cm^2.

Certaines machines emploient la vapeur surchauffée à pression constante de la température t_1 jusqu'à t'_1. On voit sur le diagramme entropique que la chaleur reçue par la vapeur augmente d'une quantité représentée par l'aire

$$BEC'C + CC'be$$

dont la position $BEC'C$ se transforme en travail et comme on a manifestement

$$\frac{\text{aire } BEC'C}{\text{aire } BEeb} > \frac{t_1 - t_2}{t_1}$$

le rendement total est légèrement augmenté.

En réalité nous verrons un peu plus loin que la surchauffe corrige l'action défavorable des parois du cylindre.

Remarquons qu'on ne peut plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

assimiler ce nouveau cycle suivant lequel évolue la vapeur à un cycle de Carnot fonctionnant entre les températures t'_1 et t_2, car l'eau reçoit toujours dans la chaudière, la plus grande partie de sa chaleur à la température t_1. On doit supposer qu'on introduit ici une source chaude supplémentaire.

2° *Machines réelles.* - En pratique on ne peut obtenir le rendement du cycle théorique, et plusieurs causes se combinent pour réduire le travail que produit la vapeur.

a) *Détente incomplète.* - Il est en général, impossible de pousser la détente de la vapeur d'eau jusqu'à la pression finale qui est souvent très basse. Aux températures des sources froides dont on dispose habituellement, sa tension est très faible et le volume qu'elle occuperait serait de 100 à 150 fois le volume initial. Il est donc nécessaire de produire une chute brusque de pression pour ne pas donner des dimensions exagérées au cylindre. Le diagramme (fig. 55) montre clairement que si à la fin de la

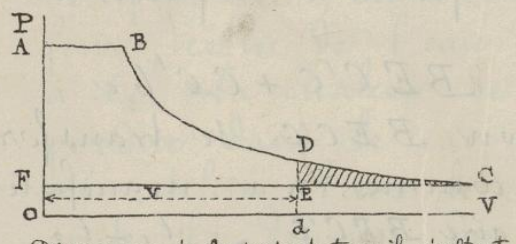


Diagramme de la perte de travail résultant d'une détente complète.

Fig 55

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

course du piston la pression tombe brusquement de D en E, il y a une portion notable du travail que pourrait effectuer la vapeur qui n'est pas recueillie.

Sur le diagramme entropique, (fig. 56) on voit que la détente adiabatique ne s'effectue que jusqu'en C. Si on imagine la vapeur refroidie à volume constant dans le cylindre même, de manière à ce que sa pression s'abaisse de d D à d E, l'évolution de la vapeur diffère un peu de ce qu'elle est dans la réalité, mais le travail recueilli dans le cylindre n'est pas modifié. Dans ces conditions, on mène par le point C qui correspond à la pression d D une ligne d'égal volume C E, qu'on construit en partant du diagramme pression, volume, et la figure montre quelle est la quantité de chaleur transformée en travail mécanique.

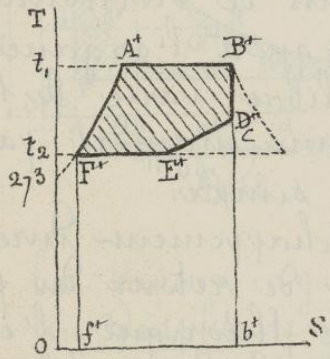


Diagramme entropique avec détente incomplète

Fig. 56

+ + +

b) Espace libre. — On doit 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 des organes et du jeu des articulations, que l'usure augmente. Cette distance est assez largement calculée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour qu'une petite quantité d'eau, se rassemblant dans le fond, ne risque pas de défoncer le cylindre.

Le jeu du piston est souvent de 5 à 10 millimètres sur chaque fond du cylindre.

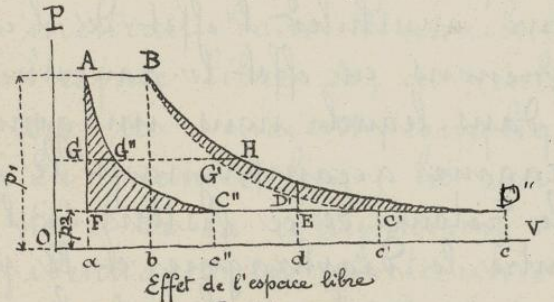
L'espace libre comprend en outre le volume des conduits de distribution depuis le cylindre jusqu'à l'organe d'obturation; l'espace libre varie de 1 % jusqu'à 20 % du volume engendré par le piston dans sa course simple.

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

Remarquons d'ailleurs que si l'espace libre, au moment de l'admission de vapeur, était complètement vide, le fluide qui le remplirait, n'aurait aucun travail externe à produire. La chaudière n'aurait à fournir que la chaleur latente interne ρ et non celle qui se transforme en travail externe $A p u$. En réalité l'espace libre n'est jamais entièrement vide; mais la pression y est inférieure à celle de la vapeur admise, qui doit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seulement fournir un travail de compression réduit inférieur à $A p u$. Il est facile de voir que la présence de l'espace libre augmente le travail fourni par la machine.



Effet de l'espace libre
Fig 57

Soit, en effet, (fig. 57) $o a$ le volume de l'espace libre. On peut imaginer que la vapeur qui le remplit est séparée de la vapeur agissant sur le piston par un diaphragme mobile, libre de se déplacer dans le cylindre, de telle sorte que la pression soit toujours la même sur ses deux faces.

La courbe de détente du poids de vapeur contenue dans l'espace $O a$ étant représentée par la courbe $A D'$ et celle de la vapeur contenue entre le diaphragme et le piston étant $B D$, courbe ordinaire de détente, la courbe de détente de la masse totale de vapeur est une courbe $B D''$ dont les abscisses sont à chaque instant celles de $B D$ augmentées de celles de $A D'$, ces dernières comptées à partir de $A a$.

Le travail produit est donc augmenté de l'aire $B D D''$ et cette augmentation de travail correspond à la détente du volume $O a$ de vapeur ; mais le travail qu'il pourrait donner par son admission à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pleine pression est perdu ; en outre l'interruption de la détente en E e, quand le piston est au bout de sa course, contribue à réduire ce travail supplémentaire.

On pourrait grâce à la compression de la vapeur annihiler l'effet de l'espace libre : reprenons en effet le raisonnement précédent, dans lequel nous imaginions un diaphragme accompagnant le piston. Pendant le retour de ce piston, si l'espace compris entre le diaphragme et le piston moteur communique seul avec le condenseur pour l'échappement, le volume D" D' de vapeur va passer au condenseur tandis que le volume o d' dont la pression est également p_2, restera dans le cylindre.

Quand le piston atteindra le diaphragme, il le repoussera, en comprimant la vapeur, qui sera ainsi ramenée à la pression initiale p_1 dans l'espace libre o a au moment où va recommencer une nouvelle course.

En réalité le diaphragme mobile n'existe pas; mais on obtient le même effet en interrompant la communication du cylindre avec le condenseur au moment où le piston, revenant de c vers a, passe par le point D'.

Le diagramme du travail produit qui serait A B D F si l'espace libre n'existait pas est transformé en un diagramme de même surface A B D" D' et la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaudière n'a à fournir que la vapeur remplissant l'espace b puisque l'espace libre est rempli de vapeur à la pression initiale.

La compression de la vapeur permettrait donc d'annihiler l'action de l'espace libre si, en réalité, plusieurs causes ne venaient compliquer cette action. En premier lieu, les conditions de la détente et de la compression ont été supposées identiques; en particulier, dans la théorie, on les suppose adiabatiques avec même proportion d'eau dans la vapeur à la fin de la détente et au commencement de la compression.

De plus, comme on l'a dit plus haut, on ne pousse pas la détente de la vapeur jusqu'à la pression p_2, sans quoi il faudrait donner, surtout dans le cas actuel, des dimensions exagérées au cylindre et on serait conduit à augmenter les frottements et les échanges de chaleur avec l'extérieur par les parois ; on pourrait même être amené à augmenter ainsi la capacité dont on cherche à compenser l'action.

On est donc obligé d'interrompre la détente en E et de perdre une partie du travail dû à la présence de l'espace libre on ne peut alors comprimer la vapeur dans l'espace libre qu'en dépensant sur elle un travail supplémentaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

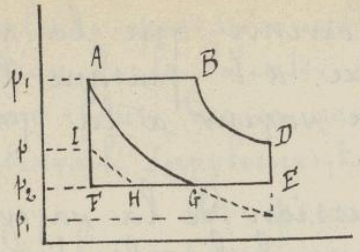


Fig. 58

1° une façon générale on peut remplir l'espace libre avec la vapeur de la chaudière au moment de l'admission, soit interrompre la condensation en G, et dépenser du travail mécanique pour comprimer la vapeur restant dans le cylindre à la pression p_2, soit enfin adopter une solution intermédiaire et faire décrire à la vapeur un cycle analogue au cycle A B D E H I (fig. 58). En pratique, dans les machines à condensation c'est la seule vapeur de la chaudière qui remplit l'espace libre à la pression p_1 ; dans les machines à échappement à air libre on fait une compression importante sur la vapeur restant dans le cylindre.

c) Action des parois. — Pendant la course du piston, des échanges calorifiques se produisent entre la vapeur et l'eau d'une part et les parois des cylindres d'autre part, comme l'ont montré les travaux de Hirn.

La marche générale du phénomène est la suivante :

au moment de l'admission les parois métalliques du cylindre viennent d'être en contact avec la vapeur refroidie par l'échappement ; par suite une partie de la vapeur de la chaudière entrant dans le corps

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cylindrique a pour seul effet de réchauffer les parois froides et se condense sur elles.

S'il existe de l'eau froide dans le cylindre, au moment où commence l'admission, elle s'échauffe également aux dépens de la vapeur.

Pendant la détente, la pression et la température s'abaissent : une partie de l'eau condensée pendant l'admission peut alors se vaporiser de nouveau, aux dépens de la chaleur prise antérieurement par les parois. C'est surtout pendant l'échappement que cet effet se produit ; mais l'eau condensée dans le cylindre ne peut y être entièrement revaporisée car la détente adiabatique de la vapeur donnerait déjà une certaine quantité d'eau à la fin de la course du piston et, en outre, si bien enveloppé que soit le cylindre, il perd extérieurement un peu de chaleur.

On peut se rendre compte de la quantité de vapeur condensée sur les parois du cylindre : il suffit pour cela de déterminer le volume de la vapeur à la pression p_1 de la chaudière qui entre dans le cylindre, en tenant compte du remplissage de l'espace libre on en déduit le poids P théorique de vapeur entrant dans le cylindre à chaque coup de piston.

Si d'autre part on mesure directement la consommation de vapeur on trouve un poids $P' > P$

$P' - P$ représente le poids de vapeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déposée par condensation sur les parois. On trouve que

$$P' - P = 0,3\,P \text{ jusqu'à } 0,5\,P$$

Il est indispensable dans ces mesures de s'assurer de l'étanchéité des pistons et des distributeurs, car la présence de fuites, qui auraient aussi pour effet d'augmenter la consommation de vapeur, fausserait les résultats.

L'étude théorique de cette question est difficile car on ne connaît pas bien les coefficients caractérisant les échanges de chaleur entre la vapeur et les métaux ; en outre les parois que baigne la vapeur ne sont pas placées dans les mêmes conditions : le plateau du cylindre, la face du piston, l'espace libre sont constamment en contact avec la vapeur pendant toute son évolution sur une des faces du piston. Au contraire la vapeur n'est en contact avec la paroi latérale du cylindre qu'à mesure que celle-ci est découverte par le piston. Les diverses zones de cette surface sont donc dans des conditions différentes, compliquées par l'action alternative de la vapeur sur les deux côtés du piston.

Enfin l'état de ces deux sortes de surface n'est pas le même : la surface cylindrique est bien polie et constamment graissée, tandis que les fonds sont relativement rugueux, et les rugosités

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

augmentent la surface effective sur laquelle se condense la vapeur. Les enduits gras, l'air mélangé à la vapeur paraissent être autant de facteurs dont il faut tenir compte dans cette étude.

L'étude expérimentale des échanges de chaleur entre la vapeur et les parois a été faite par Hirn. On mesure d'abord le poids ϖ de vapeur introduite dans le cylindre par coup de piston. Pour cela on fait fonctionner la machine pendant plusieurs heures de manière à ce qu'elle produise toujours le même travail par coup de piston et qu'elle tourne avec une vitesse uniforme.

On note le poids de vapeur dépensé en jaugeant l'eau d'alimentation de la chaudière, ou bien en dirigeant l'échappement dans un condenseur à surface, dans lequel on mesure l'eau condensée.

En divisant le poids d'eau dépensé par le nombre de tours, on obtient la dépense de vapeur par tour. Cette vapeur amène une quantité de chaleur Q qu'on détermine en connaissant le titre de la vapeur, par la considération du diagramme entropique. Pendant l'échappement c'est à dire dans la phase 3.4

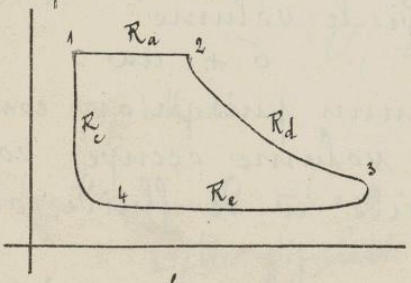


Fig. 59

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 59) le poids ϖ sort du cylindre entraînant avec lui la quantité de chaleur q' qu'on peut mesurer. A la fin de la détente, le cylindre contient encore le poids ϖ' d'eau et de vapeur, de sorte que dans la phase 2.3 le poids total de vapeur est

$$\varpi + \varpi'$$

Ceci posé, appelons :

R_a la quantité de chaleur que la vapeur reçoit des parois pendant l'admission ; évidemment $R_a < 0$

R_d la quantité de chaleur cédée par la vapeur pendant la détente,

R_c et R_c les mêmes quantités relatives aux phases 3.4 et 4.1.

Remarquons aussi que si l'on connait le volume v et la pression p d'un fluide ainsi que la proportion x de vapeur qui y est contenue, on a facilement son poids ϖ et inversement si on connait v p ϖ on en déduit x.

En effet les diagrammes permettent de trouver v connaissant p ; de plus 1 kilogramme de fluide à la pression p occupe le volume

$$\sigma + ux$$

u étant connu puisqu'on connaît p, σ étant le volume occupé par 1 kil. d'eau. Le poids ϖ de fluide occupe donc le volume

$$v = \varpi (\sigma + ux)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Telle est la relation qui lie x et ϖ.

Cette formule étant démontrée nous pouvons étudier les expériences de Hirn.

On part du point A ; soit U_4 l'énergie interne de la vapeur à ce moment, on aurait facilement sa valeur si on connaissait le poids de fluide ϖ' restant dans le cylindre et pour cela il faudrait connaître x.

Hirn suppose

$$x = 1$$

L'expérience montre en effet que l'eau est à peu près entraînée et qu'à la fin de la détente il ne reste dans le cylindre que de la vapeur saturée sèche.

On a donc :

$$U_4 = \varpi' (q_4 + \rho_4) \qquad (1)$$

q_4 étant la quantité de chaleur absorbée par le liquide pour passer à cette température, et ρ_4 étant la chaleur latente interne de vaporisation.

Avant l'admission, la température est remontée à t_1 et nous avons toujours le poids ϖ' ; donc

$$U_1 = \varpi' (q_1 + \rho_1) \qquad (2)$$

Mais

$$U_1 = U_4 + R_e - A T_e \qquad (3)$$

Cette égalité signifie que la différence entre les énergies internes dans les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

états 1 et 4 provient de la chaleur Re positive ou négative reçue par les parois et de la chaleur $-AT_e$ transformée en travail mécanique, quantité positive dans le cas actuel car

$$T_e < 0$$

puisque le fluide reçoit du travail.

La quantité T_e est connue et on l'obtient en faisant la quadrature de l'arc de courbe 4 - 1.

A la fin de l'admission, la vapeur possède l'énergie :

$$U_2 = (\varpi + \varpi')(q_2 + \rho_2 x_2) \qquad (4)$$

Le titre x_2 du fluide est connu, car on connaît son poids, son volume et sa pression.

Comme plus haut on a la relation

$$U_2 = U_1 + R_a + \varpi (q + \rho x) - AT_a \qquad (5)$$

qui montre que la quantité de chaleur reçue entre les états 1 et 2 provient de la chaleur reçue des parois

$$R_a < 0$$

de la chaleur apportée par la chaudière, égale à

$$\varpi (q + \rho x)$$

et enfin de la chaleur transformée en travail mécanique.

Dans cette égalité x est très sensiblement égal à 1 et T_a s'évalue par la quadrature de l'arc 1 - 2.

De même :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$U_3 = (\varpi + \varpi')(q_3 + \rho_3 x_3) \qquad (6)$$

et

$$U_3 = U_2 + R_d - A T_d \qquad (7)$$

Enfin :

$$U_4 = U_3 + R_c - A T_c - q' \qquad (8)$$

q' étant la quantité de chaleur qui va au condenseur et qu'on peut mesurer directement à l'aide d'un calorimètre.

Enfin en écrivant que la paroi ne produit pas de chaleur, on a l'égalité :

$$R_a + R_d + R_e + R_c + d = 0$$

d étant le nombre de calories perdues à l'extérieur par coup de piston.

Les huit premières équations permettent de déterminer les 4 quantités R_a R_d, R_e, R_c. La dernière peut servir à calculer d. Comme ce nombre est faible, il est préférable de le déterminer directement, par exemple en introduisant de la vapeur dans le cylindre de la machine arrêtée, et de mesurer la quantité condensée en une heure.

L'équation (9) sert ainsi d'équation de contrôle.

Les résultats obtenus sont les suivants :

$R_a < 0$ grand en valeur absolue
$R_d > 0$ faible
$R_e > 0$ grand

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

R_c faible.

Ce dernier terme a un signe variable et semble provenir de la superposition de deux échanges de chaleur de signe contraire.

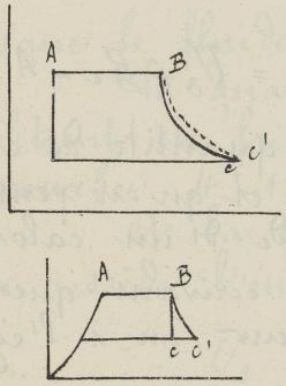


Fig. 60

Le diagramme (fig 60) montre que le fluide recevant de la chaleur pendant sa détente, la courbe théorique BC doit être remplacée par la courbe BC' située au-dessus.

Sur le diagramme entropique, on obtient une courbe qui s'écarte un peu à droite de la droite BC.

La courbe réelle de détente se rapproche plus que la courbe théorique d'une hyperbole équilatère, et pratiquement l'arc d'hyperbole équilatère représente le phénomène de détente avec une approximation suffisante.

Il serait faux de dire, comme on le fait souvent, que la détente suit la loi de Mariotte, car cette loi qui s'applique aux gaz suppose essentiellement la température constante, tandis que celle de la vapeur varie considérablement pendant la détente.

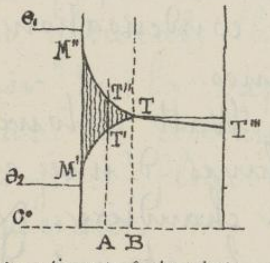
L'étude de la répartition des températures à l'intérieur de la paroi métallique peut être faite à l'aide d'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couple thermo électrique en perçant dans le métal des orifices de différentes profondeurs.

Ces mesures ont montré que l'oscillation de la température à la surface du métal de la paroi, suit celle de la masse fluide avec une amplitude moindre.

Ces oscillations de la température dans le métal ne se font sentir qu'à une faible distance de la paroi interne.



Variations de la température dans la paroi d'un cylindre dépourvu d'enveloppe de vapeur. Fig 61

L'écart des températures extrêmes diminue à mesure que le flux calorifique s'enfonce dans la paroi, puis la température devient constante. (fig. 61). La température représentée par l'ordonnée BT est appelée température moyenne de la paroi. On a d'ailleurs

$$\theta_m > \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

Enfin à partir du point T, la température décroit linéairement et lentement.

Des expériences ont montré que lorsque θ_2 varie de 100° à 40°, θ_m varie peu. Cette température moyenne semble plutôt dépendre des températures au début et à la fin de la détente ; quand la phase de détente diminue, l'influence des parois diminue également.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La cause paraissant produire l'échange le plus actif de chaleur entre la vapeur et le métal des parois est la condensation de la vapeur ainsi que la vaporisation de l'eau: la vapeur surchauffée, en l'absence de l'eau, semble céder un nombre de calories bien moindre.

Enveloppe de vapeur. — Les remarques précédentes montrent qu'il y a intérêt à diminuer la condensation de la vapeur dans les machines.

A cet effet, Watt entourait les cylindres de ses machines d'une enveloppe de vapeur, prise à la chaudière. L'utilité de cette enveloppe a été longtemps discutée: à ne considérer que le refroidissement extérieur, elle est plutôt nuisible; elle rayonne au dehors par une surface plus grande que celle du cylindre et le rayonnement est plus intense car la température de cette enveloppe, constamment égale à celle de la chaudière, est supérieure à celle du cylindre. On perd à chauffer l'enveloppe H à 5 % du poids total de vapeur consommée par la machine.

Mais l'enveloppe donne aux parois une température plus élevée ce qui diminue les échanges de chaleur, la condensation à l'admission est moins abondante et la proportion d'eau revaporisée pendant la détente est plus forte; la dépense de vapeur dans le cylindre peut

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être réduite de 15 %. Tout compte fait, l'expérience indique en employant une enveloppe, 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. Il faudrait même, pour qu'elle fût tout à fait efficace, qu'elle enveloppât le piston, ce qui n'a pas lieu en général, bien qu'il soit possible d'amener de la vapeur à l'intérieur des pistons par des conduites dans les tiges et des tuyaux flexibles ou des corps de pompe spéciaux.

L'enveloppe est desservie 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 le remplisse entièrement et qu'il ne s'y forme jamais de poches d'air ou d'eau.

La nécessité d'évacuer l'eau condensée complique le montage. Cette eau est chaude, et pour ne pas la perdre, on la ramène en général à la chaudière : si la machine est voisine de la chaudière qui l'alimente, et montée à un niveau supérieur, un simple tuyau, aboutissant à la partie inférieure de la chaudière, y ramène l'eau de l'enveloppe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut également renvoyer 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.

Les robinets purgeurs manœuvrés à la main ou automatiquement, assèchent les enveloppes de la façon la moins satisfaisante, et laissent souvent perdre de l'eau chaude.

Lorsqu'on emploie l'autre mode d'alimentation de l'enveloppe c'est à dire lorsqu'on y fait circuler la vapeur avant son entrée dans la chaudière elle entraine l'eau condensée et des dispositions spéciales ne sont plus nécessaires pour l'extraire : la vapeur arrive dans le cylindre un peu plus humide, ce qui ne paraît pas avantageux.

La théorie de Hirn appliquée aux machines munies d'enveloppes donne l'équation

$$R_a + R_d + R_e + R_c + d - e = 0$$

e étant le nombre de calories fournies par l'enveloppe qu'on peut mesurer par une jauge des eaux de purge.

Autres moyens de diminuer l'action des parois.

La vapeur surchauffée se comporte comme un gaz et l'échange de chaleur avec les parois est beaucoup moindre que dans le cas d'une vapeur saturée qui se condense, la présence de la petite couche d'eau augmentant dans le rapport de 1 à 20 la quantité de chaleur absorbée par le métal.

On a imaginé de placer dans le cylindre allongé 2 pistons montés sur la même tige (fig. Cal) en écartant ces pistons d'une distance un peu supérieure à la course, ils isolent dans le cylindre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

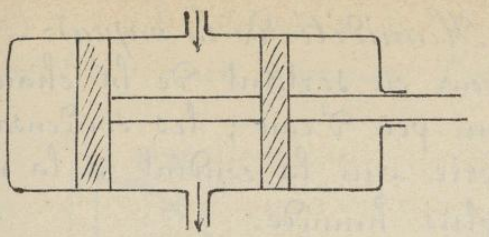


Fig. 62

une chambre qui peut être remplie de vapeur par un orifice constamment ouvert. Un deuxième orifice à la partie inférieure, sert au départ de l'eau formée par condensation. Avec cette disposition on voit que l'on réchauffe la paroi un instant avant que la vapeur utile n'y pénètre. De plus, la chaleur de l'enveloppe ne traverse plus la fonte, et la vapeur chauffe directement la surface cylindrique, exactement comme le ferait la vapeur d'admission dans une machine dépourvue d'enveloppe. Enfin l'action de l'enveloppe s'étend au piston.

d) Fuites. - Les fuites de vapeur augmentent évidemment la consommation; en général il est aisé de supprimer les fuites visibles vers l'extérieur; mais il est difficile d'apprécier celles qui se produisent à l'intérieur de la machine, à moins qu'elles ne soient fort abondantes.

C'est autour des pistons et des organes de distribution que la vapeur peut fuir. On peut dans certains cas se rendre compte des défauts d'étanchéité à l'aide des robinets purgeurs: si, par exemple, de la vapeur s'échappe par un robinet purgeur du cylindre, bien que l'appareil distributeur n'en doive pas admettre, cet appareil n'est pas étanche. Si après démontage on s'est assuré de son bon état et si la vapeur, admise sur une face du piston, s'échappe par le purgeur situé de l'autre côté, c'est qu'elle fuit autour du piston. Plus les pressions sont élevées, plus il est difficile d'obtenir des joints étanches et plus une fuite dépense de vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

e) Humidité de la vapeur.

La vapeur en sortant de la chaudière peut entraîner un peu d'eau ; les condensations dans la tuyauterie qui la conduit à la machine, la rendent plus humide.

L'humidité de la vapeur augmente la quantité d'eau présente dans le cylindre à la fin de l'admission d'où résulte, d'après ce qui a été dit précédemment un échange de chaleur plus actif avec les parois.

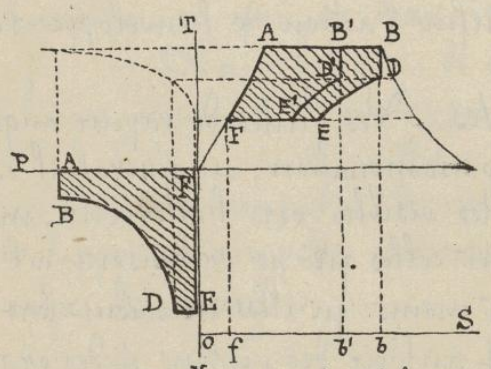
L'humidité a également pour effet de diminuer le rendement qui dans le cas de la vapeur sèche serait (fig. 63)

$$\frac{\text{aire } ABCD}{\text{aire } AB'd D}$$

et dans le cas de la vapeur humide

$$\frac{\text{aire } AB'C'D}{\text{aire } AD\,b'B'}$$

que le deuxième rapport est moindre que le premier.



Travail de la vapeur sèche et de la vapeur humide
Fig 63

f) Laminage de la vapeur.

La distribution par un tiroir à fermeture progressive donne lieu à un laminage et on constate vers la fin de l'admission un abaissement de la pression, marqué sur le diagramme de l'indicateur par un trait tel que AB' (fig. 64). C'est à partir de B' que se fait la détente, de sorte que le point B' est un point d'inflexion sur le diagramme. La diminution

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de travail est représentée par l'aire BCC'B'A. En réalité, pour apprécier l'effet de laminage au point de vue de la consommation de vapeur, il faut imaginer une admission à pleine pression AB", telle que la courbe de détente issue de B" vienne passer par le point B. Le travail perdu par suite du laminage est représenté par l'aire AB"B'. On peut dire que ce travail perdu se retrouve sous forme de calories dans la vapeur qui est asséchée.

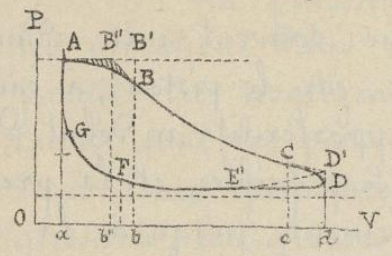


Diagramme avec laminage de vapeur à l'admission (AB) et à l'échappement
Fig 64

Au moment où s'ouvre l'orifice d'échappement, la pression peut surpasser beaucoup celle du condenseur, par suite de l'insuffisance de la détente.

Pour éviter une contrepression trop forte au début de la course de retour, on ouvre souvent l'orifice d'échappement avant le fin de la course ; la pression s'abaisse suivant une courbe telle que DEF ; on profite ainsi de la marche relativement lente du piston de part et d'autre du fond de course.

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

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en est un peu augmentée. L'aire ombrée sur le diagramme montre le travail perdu à la fin de la détente.

On effectue souvent une admission anticipée de la vapeur, car le piston, à cause de l'espace libre, supporterait au début de sa course une pression trop faible, et la pression est ramenée graduellement jusqu'à la valeur initiale.

g). Pertes de Chaleur.

Malgré l'action des enveloppes isolantes, les conduites, les cylindres, les boîtes à vapeur dégagent constamment des calories. La quantité de chaleur traversant les parois d'un récipient se calcule d'après les lois de la conductibilité.

On remédie à cette perte de calories à l'aide d'enveloppes isolantes. Ces enveloppes sont souvent constituées par une couche d'air, maintenue contre la paroi chauffée par une gaîne en tôle mince.

Certaines substances, composées de parties qui laissent beaucoup de vides, telles que le liège, le feutre, s'opposent au rayonnement et au mouvement de l'air, tout en étant par elles-mêmes peu conductrices; ces substances sont de bons isolants. Elles réduisent à la moitié ou même au tiers la quantité de chaleur abandonnée par le métal nu.

h). Pertes mécaniques.

Le travail de la vapeur sur le piston, ou travail indiqué de la machine, n'est pas recueilli en totalité, car les frottements du moteur en consomment une part. Le travail effectif, qui est le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

travail disponible sur l'arbre du moteur est réduit d'autant.

La puissance absorbée par les chocs et les vibrations dans une machine en bon état, paraît être négligeable. Les principales pièces frottantes 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 absorbe un travail important en frottant sur sa table. Les pompes du condenseur et les pompes alimentaires prennent également leur part du travail indiqué. Il est difficile de prévoir quel est le travail absorbé par les frottements d'une machine, en calculant les forces qui appuient l'une contre l'autre les pièces frottantes, car les coefficients de frottement varient suivant le graissage et suivant le serrage des garnitures.

Si W_i représente la puissance indiquée et W_e la puissance disponible, on a

$$W_i > W_e$$

Dans la marche normale on a pour quelques machines

$$W_e = 0,95\ W_i$$

Fréquemment on descend jusqu'à

$$W_e = 0,75\ W_i$$

Le travail indiqué est mesuré au moyen de l'indicateur.

Indicateur.— Pour figurer le travail recueilli dans un cylindre, on porte en abscisses le volume occupé à chaque instant par la vapeur, ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce qui revient au même la course du piston qu'elle presse, et en ordonnées la pression. L'indicateur réalise sur une machine en marche ce tracé théorique.

L'appareil imaginé par Watt (fig. 65) était constitué par un cylindre de 40 ᵐᵐ/₁₀ de diamètre environ; communiquant constamment avec le cylindre moteur; un petit piston, dont l'une des faces est en contact avec la vapeur et dont l'autre face est pressée par un ressort à boudin peut s'y mouvoir.

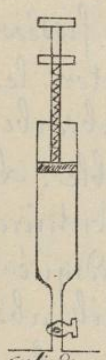


Fig. 65.

La pression de la vapeur comprime plus ou moins le ressort et si K est la tension du ressort, on a à chaque instant

$$S(p - p_a) = K$$

p_a étant la pression atmosphérique.

On connait K grâce à un tarage préalable.

L'index montre à chaque instant la pression du fluide, qu'on peut lire sur une graduation convenable. L'appareil est donc un manomètre.

Pour avoir les volumes on ajoute à l'appareil une planchette verticale qui suit le mouvement du piston, et l'index est remplacé par un crayon traçant une courbe sur la planchette; ce crayon inscrit la pression pour chaque position du piston.

La planchette fut ensuite remplacée par un barillet oscillant autour d'un axe vertical, sous l'action d'une ficelle entraînée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le piston et d'un ressort de rappel. Une feuille de papier est enroulée sur le cylindre.

L'inscription sur le papier se fait dans les mêmes conditions qu'avec la planchette, car on peut considérer le cylindre comme constamment tangent à la planchette au point où le crayon écrit.

Quand les flexions du ressort sont exactement proportionnelles aux pressions, la surface du diagramme représente le travail indiqué. On peut mesurer cette surface au planimètre, et déterminer ainsi l'ordonnée moyenne du diagramme, c'est-à-dire la hauteur du rectangle ayant même surface; 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 pendant l'aller et le retour est la différence des deux ordonnées moyennes, pendant l'aller du piston et pendant son retour.

On étudie de même le diagramme sur l'autre face du piston de la machine.

Plusieurs conditions sont nécessaires au fonctionnement précis de l'indicateur: il faut que la pression, pour qu'on puisse la mesurer, soit la même, à chaque instant, dans les différentes parties de la masse de vapeur qui remplit le cylindre moteur. Cette égalité de pression est en général réalisée, au moins en exceptant les passages d'arrivée et de sortie de la vapeur, sur lesquels il ne conviendrait pas de brancher l'indicateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

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.

La position du barillet doit correspondre constamment à celle du piston moteur ; la commande simple, par ficelle, avec ressort de rappel, n'établit pas exactement cette correspondance, quand la machine tourne vite.

Le piston de l'indicateur devrait à chaque instant occuper la position d'équilibre qui correspond à l'égalité de la pression de la vapeur et de la tension du ressort. Cette condition à peu près réalisée avec les machines lentes ne l'est plus avec les machines rapides. L'indicateur de Watt ne fonctionne pas bien pour des vitesses supérieures à 50 ou 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 statistique qui correspondrait à la pression de la vapeur. Cet effet, particulièrement sensible au moment de l'admission de la vapeur est appelé effet de lancé du piston (fig. 66). Les oscillations qui prennent naissance s'amortissent grâce aux frottements. Il est assez difficile de mesurer le travail sur de tels diagrammes ; on y parvient en joignant par un trait les positions moyennes prises par le crayon pendant les périodes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'oscillations.

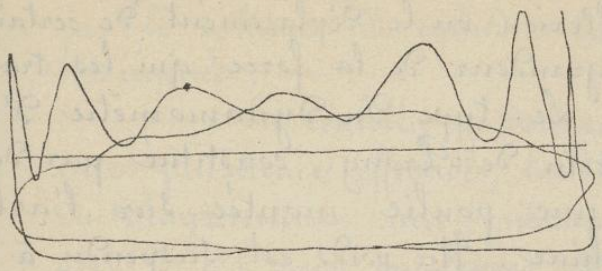


Fig. 66

On réduit ce grave inconvénient en diminuant l'inertie du piston; on ne donne plus que 20 m/m de diamètre au cylindre de l'indication et on y met des pistons plus légers. De plus on emploie des ressorts très raides, dont la course ne dépasse guère 1 m/m pour une pression de 1 $\frac{kg}{cm^2}$.

Mais pour rendre le diagramme plus commode à lire et à planimétrer, on amplifie le mouvement du piston par un pantographe.

Il semblerait à priori que malgré la faible amplitude des oscillations du piston, le diagramme devrait être analogue au précédent, car l'appareil amplificateur qui augmente la course du piston devrait augmenter en même temps les oscillations. L'expérience montre qu'il n'en est rien, sans doute parce que les oscillations sont beaucoup plus rapides et par suite s'amortissent beaucoup plus vite que dans les anciens indicateurs.

Outre la détermination du travail indiqué, les diagrammes servent aussi à se rendre compte de la marche générale de la machine et des réglages de la distribution.

Puissance effective. — Elle se mesure au moyen d'un dynamomètre.

On distingue les dynamomètres d'absorption

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui dépensent le travail en frottements et les dynamomètres de transmission, qui font connaître, par la flexion ou le déplacement de certaines pièces, la grandeur de la force qui les traverse.

Le type du dynamomètre d'absorption est le frein de Prony, constitué par des sabots serrant une poulie montée sur l'arbre de la machine. Un poids est suspendu à l'extrémité d'un levier, rattaché aux sabots, et ce levier doit rester horizontal. L'appareil étant en équilibre, c'est le frottement des sabots qui maintient le levier horizontal, en soulevant le poids de P kg. à l'extrémité du levier de L mètres. L'arbre faisant n tours par minute, la puissance en kgm. par seconde est

$$\frac{2\pi n}{60} PL.$$

Ce montage ne s'applique guère qu'aux machines de petite ou de moyenne puissance.

Les dynamomètres de transmission s'interposent entre un moteur et l'arbre qu'il commande, ou sur une transmission quelconque.

Pour les grandes puissances, on peut utiliser une dynamo dont on connait le rendement avec précision ; en mesurant l'intensité et la tension du courant qu'elle produit, on en déduit immédiatement le rendement du moteur à vapeur qui l'actionne.

Inversement pour calculer les dimensions du cylindre d'une machine qui produit une puissance donnée dans des conditions déterminées, on représente ces conditions par le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diagramme d'indicateur dont on mesure l'ordonnée moyenne. Le produit de cette ordonnée moyenne par le volume du cylindre doit avoir une valeur déterminée.

En réalité, on demande à la machine une puissance effective, tandis que l'on déduit du diagramme une puissance indiquée ; le rapport de ces deux puissances se déduit des analogies connues.

Ayant le volume du cylindre, on en déduit, en faisant appel à d'autres considérations les valeurs de S et de L.

Théorie des machines à expansion multiple.

1° *Machines Compound.* — La machine Compound comprend deux cylindres : le petit cylindre ou cylindre à haute pression et le grand cylindre ou cylindre à basse pression. Le rapport des volumes de ces deux cylindres est habituellement compris entre 2 et 3.

Pour représenter le cycle théorique de la vapeur, on divise le diagramme ABEFG (fig. 67) tracé entre les pressions extrêmes p_1 et p_2 par la droite DC correspondant à la pression intermédiaire du réservoir, p'_1.

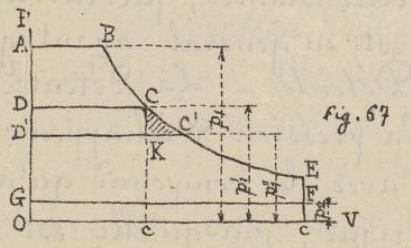


fig. 67

Le travail effectué par les deux cylindres et représenté par la somme des aires ABCD et DCEFG pourrait être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fourni par le grand cylindre seul, recevant directement le volume AB de vapeur à la pression p_1.

Si on introduisait dans le grand cylindre un volume de vapeur plus grand, représenté par D'C', la vapeur prendrait dans le réservoir intermédiaire la pression correspondante p''_1 et on aurait un déchet sur le travail total fourni, qui serait représenté par l'aire CKC'.

Dans ces conditions le petit cylindre fournirait le travail ABCKD' et le grand, le travail D'C'EFG.

Il faut cependant ajouter que dans le passage de la vapeur du réservoir au grand cylindre, celle-ci s'assèche comme nous l'avons indiqué plus haut, et le point C' se trouve légèrement rejeté vers la droite, ce qui compense en partie la perte de travail représentée par CKC'.

Le diagramme entropique montre également quelle est la chaleur perdue correspondant au travail CKC' lorsque la vapeur passe du premier cylindre dans le réservoir.

Ce premier aperçu ferait juger la machine Compound inférieure à la machine monocylindrique ; l'examen des diverses conditions réelles de l'évolution de la vapeur, dans le compound, montre une série de circonstances, favorables ou non, dont la résultante est en général avantageuse.

a) Détente. – La détente reste incomplète quand la pression d'échappement p_2 est basse, aussi bien avec le compound qu'avec la machine monocylindrique, puisqu'elle est forcément limitée au volume du dernier cylindre. Elle peut même être incomplète dans le petit cylindre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b) Espace libre. — L'effet de l'espace libre est atténué dans la machine Compound. Si Oa et Oa' (fig. 68) représentent les espaces libres des deux cylindres et s'il n'y avait aucune compression de la vapeur, la chaudière devrait remplir l'espace libre du petit cylindre Oa plus petit que Oa', 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 Oa' du grand cylindre.

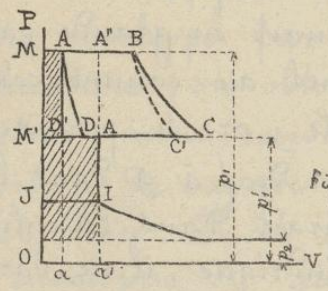


Fig 68

Dans la machine monocylindrique c'est la vapeur à la pression p_1 de la chaudière qui remplit Oa' ; la quantité de vapeur ainsi dépensée est plus grande.

Enfin le petit cylindre se prête à une compression complète de la vapeur qui y reste à la fin de la course du piston, vu la chaleur élevée de la pression d'échappement. Dans le grand cylindre on peut faire une compression qui relève la pression jusqu'à la valeur OI plus voisine de la pression p'_1 que de la pression p_2 ; le poids de vapeur du réservoir consommée pour remplir cet espace libre se trouve ainsi réduit.

c) Action des parois. — 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_2 dans le grand, tandis qu'elle oscillerait entre θ_1 et θ_2 dans le grand cylindre seul.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette réduction des écarts de température diminue la condensation de la vapeur de la chaudière dans le petit cylindre, qui, de plus, présente des parois moins étendues que le cylindre d'une machine simple. Enfin, nous avons vu que la condensation tenait en grande partie à la différence des pressions au commencement et à la fin de la détente ; or, si, par exemple, le volume de vapeur varie de 1 à 9 dans la détente totale qui se produirait dans le cylindre d'une machine monocylindrique, il ne varie que de 1 à 3 dans chacun des deux cylindres de la machine Compound, d'où moindre condensation.

La vapeur condensée dans le petit cylindre se vaporise en partie pendant la détente et pendant l'échappement au réservoir. Dans le réservoir, s'il est bien enveloppé, il ne se produit guère de condensation. Lorsque la vapeur pénètre dans le grand cylindre, elle se condense à nouveau, en partie ; l'eau condensée se vaporise partiellement pendant la détente et l'échappement final.

Il y a donc une partie de la vapeur qui se condense deux fois successivement ; les poids condensés dans les deux cylindres peuvent être voisins l'un de l'autre, mais ne sont pas nécessairement égaux.

On étudie ces phénomènes comme sur un cylindre unique, en relevant les diagrammes à l'indicateur et en déterminant les quantités de chaleur cédées par la chaudière et reçues par le condenseur.

Les enveloppes de vapeur s'appliquent aux machines Compound qui se prêtent à des combinaisons

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

assez variées. Le premier cylindre doit nécessairement être rechauffé par la chaudière ; on l'enveloppe souvent par la vapeur même qui va y pénétrer

Quant au deuxième cylindre, il peut être enveloppé 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. Il est souvent préférable d'alimenter l'enveloppe du grand cylindre par la vapeur détendue jusqu'à une pression voisine de celle du réservoir ; cette enveloppe peut même être constituée par le réservoir intermédiaire ; mais la vapeur est alors plus humide lorsqu'elle pénètre dans le cylindre.

Le réservoir peut aussi être réchauffé par une enveloppe, et même par un faisceau tubulaire, où circule la vapeur de la chaudière, la vapeur y est alors séchée et 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 paraissent peu favorables à ce réchauffage du réservoir, qui, en général, augmenterait plutôt qu'il ne réduirait la dépense totale de vapeur.

d) Fuites. — L'effet des fuites intérieures est diminué dans la machine Compound,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

car la chute totale de pression est partagée en deux par le réservoir intermédiaire.

e) Humidité de la vapeur. — L'influence de l'humidité de la vapeur est à peu près la même ; elle augmente les échanges de chaleur avec les parois.

La surchauffe s'applique avec avantage à ces machines ; 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.

f) Laminage. — La disposition Compound augmente la perte de travail causée par le laminage, puisque la vapeur est laminée à l'admission et à l'échappement des deux cylindres successifs.

g) Pertes de chaleur. — La disposition Compound augmente la surface extérieure des appareils ; une machine monocylindrique se réduit au cylindre à basse pression seul de la Compound équivalente. Ajoutons que cependant la différence entre les déperditions de chaleur dans les deux genres de machines est faible, car la température est assez réduite dans le grand cylindre, les hautes températures étant localisées dans le petit.

h) Pertes mécaniques. — La multiplicité des organes de la Compound semble augmenter les résistances passives ; mais la réduction des pressions diminue le frottement de la plupart de ces organes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Construction.

Nous terminerons ce chapitre en donnant, comme dans le cas des machines simples quelques indications sur la construction des machines Compound.

Les cylindres sont déterminés par les diagrammes.

Pour une estimation rapide on peut tracer le diagramme ABDEF qui produirait dans un cylindre unique tout le travail demandé.

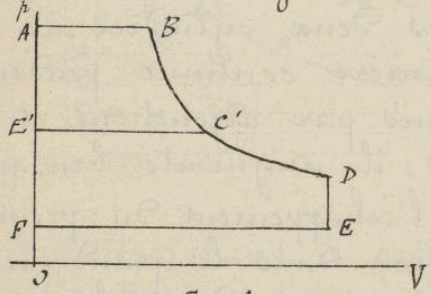


Fig. 69.

De ce diagramme, on déduit le volume du cylindre à basse pression.

Puis on le découpe en deux parties ABC'E' et E'C'DEF auxquelles on donne, en général, des surfaces égales. La longueur E'C' donnent alors le volume du cylindre à haute pression.

Cette méthode rapide et peu précise doit être complétée par l'étude des diagrammes prévus, faite en tenant compte des variations de pression dans le réservoir intermédiaire.

Ces variations de pression doivent d'ailleurs être rendues aussi faibles que possible, et pour cela il y a intérêt à ce que la capacité de ce réservoir soit suffisamment grande, sans toutefois en exagérer le poids,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'encombrement et la perte extérieure de chaleur.

Pour déterminer ces fluctuations, on détermine graphiquement le volume occupé par la vapeur dans le réservoir et dans les portions des cylindres qui communiquent avec le réservoir, pour les différentes positions de la machine pendant un tour complet.

L'épure donne donc pour une position quelconque de la machine le volume occupé par la vapeur, volume qui se compose du réservoir et d'une fraction du volume de chacun des deux cylindres. Ce total varie d'une manière continue pendant certaines périodes, puis par adjonctions et retranchements brusques : il augmente brusquement lorsque s'ouvrent l'échappement du premier cylindre et l'admission dans le grand ; les réductions se produisent quand l'échappement et l'admission se ferment. De là résultent des variations dans le poids et la pression de la vapeur.

On constate que les variations de pression sont petites quand le volume du réservoir atteint celui du grand cylindre.

Conclusion. — Ce qui précède explique que la machine Compound présente des avantages sur la machine simple. En outre, elle permet de détendre suffisamment la vapeur avec une assez faible détente dans chacun des cylindres. L'effort moteur pendant une course varie moins que dans la machine monocylindrique et la disposition Compound

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

permet de tirer bon parti de la distribution simple par tiroir.

Machine de Woolf.

Cette machine est une machine Compound sans réservoir interposé entre les cylindres, réunis entre eux par un simple conduit de vapeur. Pour construire le diagramme théorique du travail de la vapeur (fig. 70), on représente en AB le volume initial de vapeur à la pression p_1, qui pénètre dans le premier cylindre et qui s'y détend jusqu'à un volume h 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 deuxième cylindre suivant la courbe IE. Enfin la vapeur s'échappe dans le condenseur à la pression p_2 pendant le retour du piston du deuxième cylindre. Le travail total est représenté par l'aire ABEFD.

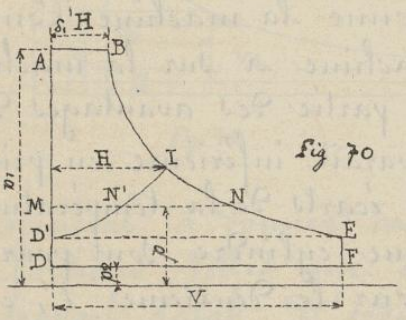


fig 70

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 pression motrice sur le grand piston. Cette courbe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ID' se déduit aisément de la courbe IE ; pour une pression p quelconque, MN représentant le volume total occupé par la vapeur, MN' est le volume contenu dans le petit cylindre, N'N le volume dans le grand.

Le travail du petit cylindre est donc représenté par l'aire ABID' ; celui du grand par IEFDD' ; cette répartition est bien différente de celle que donne la machine Compound.

Cette machine a sur la machine monocylindrique une partie des avantages de la Compound ; mais elle 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 deuxième t'_1 et t'_2, t'_1 étant plus élevée 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.

Certains types de cette machine, et notamment le type primitif de Woolf ont de grands espaces libres, dont la compression peut en partie compenser l'action, mais moins facilement que dans la Compound, car la pression finale à l'échappement du petit cylindre est plus faible, et la pression initiale d'admission dans le grand cylindre plus forte.

Machines à triple expansion. — La théorie des machines à triple expansion est analogue à celle des machines Compound ; un cylindre à haute pression reçoit la vapeur de la chaudière à la pression p_1, et la laisse échapper

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

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 à la pression p''_1 ; la vapeur traverse ensuite le cylindre à basse pression, qui communique enfin avec le condenseur.

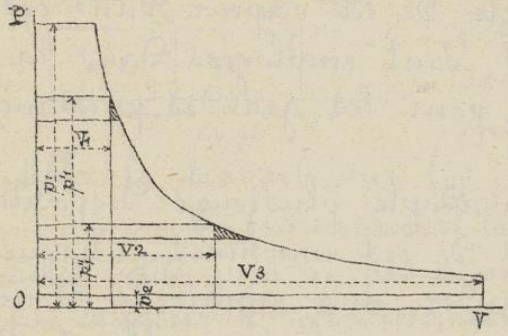


Fig 71

On cherche en général à donner aux trois cylindres des proportions telles que chacun produise le tiers du travail total. D'ordinaire les volumes forment à peu près une progression géométrique dont la raison est 2,5 (fig. 71).

Toutefois la pression p_1 est, en général, plus élevée que dans la Compound. Parfois on a transformé d'anciennes machines compound par addition d'un premier cylindre avec relèvement de la pression aux chaudières.

Les pressions initiales des machines à triple expansion atteignent et dépassent 12 kg. par mètre carré.

Au point de vue du rendement, ces machines présentent les avantages et les inconvénients amplifiés des machines Compound.

On voit, en particulier, que la perte de travail par laminage de la vapeur est augmentée, la vapeur subissant six chutes de pression successives.

Mais d'autre part, à égalité des pressions

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

extrêmes, on réduit les écarts extrêmes de température dans chaque cylindre, l'influence des espaces libres, et on facilite la compression complète de la vapeur dans ces espaces. Ces machines sont employées dans la marine et, à terre, pour les grandes puissances et fortes pressions.

On adopte plusieurs dispositions pour les cylindres de ces machines. Chaque cylindre peut commander une manivelle d'un arbre unique, les trois manivelles étant calées à 120° (fig. 72).

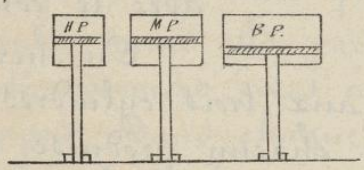


Fig. 72.

Pour n'avoir que deux manivelles calées à 90°, ce qui simplifie la construction de l'arbre et lui donne une longueur moindre, on adopte diverses combinaisons. On place en tandem deux des cylindres ; souvent on divise un des cylindres en deux, ce qui en donne quatre au total, formant deux groupes en tandem ; il paraît alors logique de couper en deux le plus grand des trois cylindres ; (fig. 73) quelquefois on divise le cylindre à haute pression.

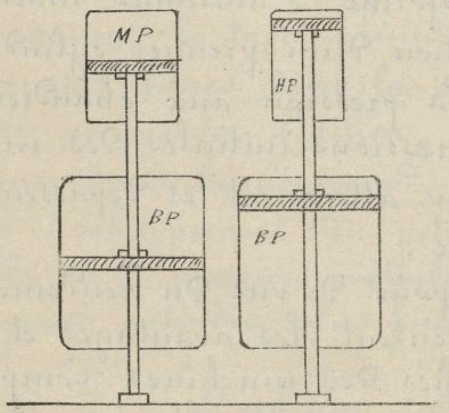


Fig. 73.

De très grand appareils ont trois manivelles et cinq cylindres (fig. 74) par exemple deux demi-cylindres à haute pression, un cylindre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à moyenne pression et deux demi-cylindres à basse pression.

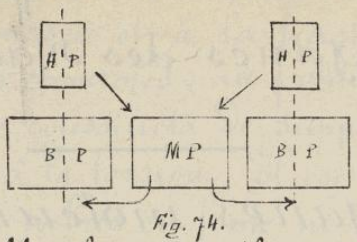


Fig. 74.

Il y a un grand nombre d'autres combinaisons possibles; ces arrangements sont faits pour répartir aussi également que possible le travail sur les manivelles.

On fait en général les réservoirs intermédiaires 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 comparer directement les diagrammes, on les transforme, en ramenant toutes les ordonnées à une échelle unique, et en modifiant les abscisses de manière à les rendre proportionnelles aux volumes des cylindres (diagrammes totalisés fig. 75).

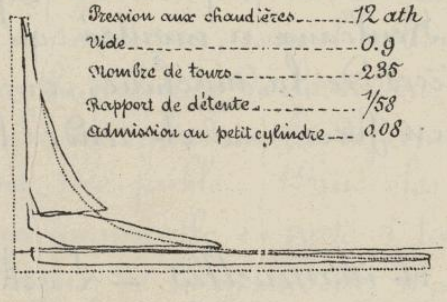


Fig. 75.

3°. *Machines à quatruple expansion.* — On pousser plus loin la division du diagramme théorique, en employant 4 cylindres successifs et 3 réservoirs intermédiaires. C'est ce qu'on fait parfois aujourd'hui pour des machines marines et fixes, avec une pression initiale de 15 kg. par centimètre carré et au-delà. La quatruple détente se prête bien à l'emploi de deux groupes en tandem, avec 2 manivelles à angle droit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — Étude des différents organes des machines.

I. Organes moteurs.

Les organes moteurs des machines transforment le mouvement alternatif du piston en un mouvement circulaire.

Ils comprennent 4 parties essentielles :

le piston et les pièces du piston ;

la bielle articulée sur l'extrémité de la tige du piston et sur la manivelle ;

l'arbre et sa manivelle ;

le bâti qui réunit l'arbre au cylindre moteur.

On peut être surpris de trouver le bâti rangé dans la catégorie des organes moteurs, et il se différencie des autres pièces en ce qu'il est immobile, mais Reuleaux a montré qu'étant données ces 4 pièces de la machine, on peut arbitrairement en fixer une et rendre les trois autres mobiles.

1° Arbres et manivelles. — L'arbre peut avoir en principe une orientation quelconque ; dans la pratique, on le fait presque toujours horizontal. Il est perpendiculaire à l'axe du cylindre. Ce dernier est soit horizontal soit vertical et plus rarement incliné. Dans le premier cas la machine est appelée machine horizontale ; dans le 2e elle est dite machine verticale ; la machine pilon est une machine verticale dont le cylindre est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

toujours au dessus de l'arbre.

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 des coussinets de support, travaille à la flexion et à la torsion. Il est forgé en acier ou en fer; les arbres en fonte ne sont plus guère employés pour des machines à vapeur.

La manivelle est rapportée à l'extrémité de l'arbre, ou bien, l'arbre est coudé quand les manivelles sont comprises entre les paliers; les coudes sont forgés avec l'arbre, ou bien celui-ci 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.

2°. — Bâtis et Fondations. — Il est nécessaire que, sous l'action des forces développées par la pression de la vapeur sur le piston et sur le fond du cylindre, la déformation élastique du bâti soit très faible. 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 2 paliers quand la bielle motrice s'articule sur un coude au milieu de l'arbre.

Certaines machines horizontales comportent une plaque de fondation, ou un bâti plat sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lequel se boulonnent le cylindre et le palier. Cette disposition était fréquente dans les anciennes constructions. Mais on voit plus souvent le bâti Corliss ou à baïonnette (fig. 76) qui rattache directement le cylindre au palier.

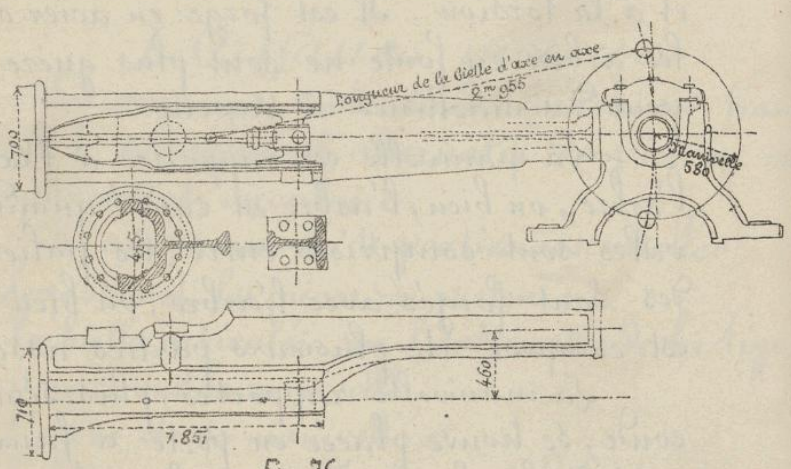


Fig 76

Dans le dispositif Corliss le palier peut être fondu avec la baïonnette.

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 a quelquefois monté le cylindre sur une glissière longitudinale, qui en permet le déplacement; c'est une complication qui paraît peu utile en général: les pièces et les assemblages sont assez compressibles pour se prêter sans inconvénient à cette dilatation, ou bien les boulons de fixation du cylindre ont un peu de jeu dans leurs trous.

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.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais il ne faut pas d'assemblages trop rigides 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. Les fondations des machines fixes se composent de massifs en maçonnerie, construits avec des pierres de taille ou en béton. Ces fondations transmettent au sol des vibrations parfois gênantes ; on emploie quelquefois des blocs de caoutchouc pour les arrêter.

3°. — Cylindres. — Les cylindres peuvent être fondus d'une seule pièce avec leur enveloppe de vapeur, ou bien cette enveloppe peut être formée par une chemise rapportée. Cette 2ème solution est en général préférée à la 1ère, car elle permet d'employer deux métaux distincts : l'un qui convient pour y faire frotter un piston, l'autre qui est essentiellement un métal résistant : on a récemment coulé de grands cylindres en acier, et on y a rapporté des chemises de fonte.

La base du cylindre qui regarde l'arbre, ou couvercle, peut être fondue avec le cylindre ou bien rapportée comme le plateau opposé qui se nomme le fond. Ces plateaux de base sont construits pour résister à la rupture, ou si elle se produit, doivent en localiser les effets. Or, il peut y avoir accumulation d'eau dans les cylindres, ce qui, par compression, peut produire des " coups d'eau ", lorsque le piston est à fond

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de course. Il est préférable dans ce cas qu'il n'y ait qu'une simple rupture du plateau plutôt qu'une rupture du cylindre, et c'est pourquoi on donne au plateau une résistance moindre qu'au cylindre; on y creuse souvent une gorge servant d'amorce de rupture.

4ᵉ.— *Pistons et garnitures.* — Il est bon d'alléger autant que possible le piston, pour réduire les effets de l'inertie, les vibrations qui en résultent, et l'usure des cylindres horizontaux. On lui donne souvent une forme creuse, raidie par des nervures intérieures, qui permet de concilier la légèreté et la résistance. Le piston est forgé ou coulé en fonte ou en acier.

L'emmanchement de la tige doit être solide, et garanti contre le desserrage en service, que les vibrations pourraient provoquer. On peut employer l'emmanchement conique exécuté à la presse hydraulique ou en chauffant le piston pour le dilater: ce montage est simple et solide, au moins jusqu'au diamètre de 500 à 600 m/m. Habituellement, l'assemblage est maintenu par un écrou, l'emmanchement de la tige étant conique ou cylindrique, avec une embase à l'opposé de l'écrou. Quelquefois la tige est forgée avec le piston.

Le joint étanche entre le piston et le cylindre, s'obtient à l'aide de bagues élastiques ou segments, presque toujours en fonte, parfois garnis de métal antifriction. Ces bagues ont un diamètre égal à celui du cylindre augmenté de 10 mm environ. Pour les diamètres ne dépassant pas 700 ou 800 m.m., on se contente d'une simple

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bande métallique de 0,35 m/m de largeur : la bague est fendue, puis resserée et tournée. Chaque bague est engagée dans une rainure du piston.

Pour les grands diamètres, une série de ressorts assurent le contact des segments avec le cylindre. Il est néceſaire aussi que le plat de la bague soit en contact avec la gorge tournée sur le piston ; la pression de la vapeur l'appuie contre cette gorge. On monte généralement 2 bagues sur un piston.

Il peut y avoir, surtout lorsque la bague s'use, une petite fuite de vapeur aux points de jonction des deux extrémités de cette bague ; on y remédie en partie en substituant à la coupure droite de la bague une coupure en trait brisé. On peut également munir les bagues de contre-joint, petites lames de cuivre fixées à une extrémité de la bague pouvant coulisser sur l'autre extrémité.

On est d'ailleurs conduit à laisser un peu de jeu entre les extrémités d'une bague neuve, afin qu'elle ne se coïnce pas dans le cylindre si elle s'échauffe par suite d'un frottement anormal.

Les bagues ne constituent pas seulement une garniture étanche, mais souvent elles portent une partie du poids du piston, dans les machines horizontales ; et dans les machines verticales elles s'opposent aux déplacements transversaux.

Nous avons dit plus haut que ces bagues étaient en fonte, et même en fonte tendre ; si elles étaient en acier, ce ne seraient pas elles, mais bien le cylindre lui-même qui s'userait par suite des frottements ; on conçoit alors qu'il soit plus économique de remettre à une machine de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nouvelles bagues plutôt qu'un nouveau cylindre.

Il est intéressant d'examiner comment le piston est supporté dans une machine horizontale: il peut porter sur le fond du cylindre, soit directement, soit en appuyant sur l'intérieur de la bague. Ces solutions ne sont pas très satisfaisantes; la 2e en particulier donne une portée insuffisante pour le piston, et les rainures tendent à s'excentrer.

On munit souvent le piston d'une contre-tige, c'est-à-dire d'une tige sortant par le fond du cylindre opposé à celui par lequel sort la tige motrice. Le piston est quelquefois construit de façon à ne pas toucher le cylindre et les bagues servent exclusivement à l'obturation; cette contre-tige s'emmanche parfois dans un patin supporté par des glissières des deux côtés; le piston monté au milieu de la tige qui relie les 2 patins la fait fléchir; les garnitures de tige doivent permettre un déplacement transversal.

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 3 points, qui peuvent ne pas rester exactement en ligne droite, par suite d'usures inégales.

A l'extérieur du cylindre 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.

Il est bon de se rendre compte de la façon

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont on veut faire travailler les garnitures de la tige : elles sont munies de bagues en bronze qui doivent avoir une longueur suffisante, si les garnitures sont chargées par le poids du piston ; si elles ne doivent qu'assurer le joint, il faut permettre les déplacements latéraux qui résultent des flexions de la tige en marche et des usures.

Dans les machines verticales le poids du piston n'agit pas sur le cylindre ; on n'a guère à se préoccuper que des vibrations transversales. Toutefois dans les machines marines ces vibrations prennent une grande importance.

La garniture de tige comporte la bague de fond (fig. 77) et le presse garniture serré sur des goujons de manière à comprimer la matière

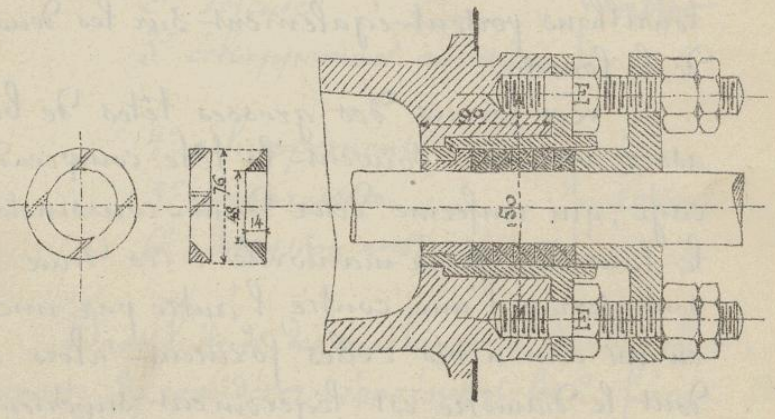


Fig 77

molle qui assure le joint. L'étoupe que brûle la vapeur à très haute température, a été remplacée généralement par des tresses d'amiante, ou par des bagues en métal blanc tendre constituées par un alliage de plomb et d'étain.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La tige s'emmanche dans la crosse de piston qui porte les patins coulissant dans les glissières, et le tourillon, sur lequel s'articule la bielle.

Dans les grandes machines, on prévoit des moyens de réglage des patins pour compenser l'usure. Dans les petites machines, on se contente du réglage par l'addition de cales contre les patins ou sur les supports des glissières.

5e. Bielles. — La bielle présente une articulation à chaque bout : la petite tête de bielle s'articule sur la tête de piston, et la grosse tête sur le tourillon de la manivelle. La petite tête est simple ou en forme de fourche. Cette 2me 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.

Les formes des grosses têtes de bielles sont assez variées : souvent la tête comprend une cage, qui renferme deux demi-coussinets, embrassant le tourillon de la manivelle ; ces deux moitiés sont serrées l'une contre l'autre par une clavette ou un coin à vis ; elles forment alors un œil dont le diamètre est légèrement supérieur à celui du tourillon. L'usure ovalise cet œil : le joint étant perpendiculaire au grand axe de l'ovale, on rattrape le jeu en limant la face de contact des coussinets, ou en retirant des cales minces disposées d'avance, et en serrant de nouveau les coussinets à bloc l'un contre l'autre.

La petite tête peut ainsi présenter une disposition de réglage, d'ailleurs, comme elle s'use

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moins que l'autre, parce qu'elle n'a qu'un mouvement d'oscillation de faible amplitude sur son pourillon, ce réglage est moins utile.

Le réglage d'une tête augmente ou raccourcit la longueur de la bielle. 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.

2. — Organes de la Distribution.

La distribution comprend 6 phases, qui sont, à partir de la position à fond de course du piston :

1° admission	aller
2° détente	aller
3° échappement anticipé	aller
4° échappement	retour
5° compression	retour
6° admission anticipée	retour

Dans l'étude des machines à double effet, il importe de considérer séparément les 2 faces du piston.

Le problème de la distribution peut être envisagé de deux façons : on peut à priori déterminer la distribution la plus avantageuse, c'est-à-dire fixer d'avance la durée de chacune des six phases de la distribution, et établir un mécanisme approprié.

On a l'habitude dans ces questions de déterminer les phases en centièmes de la course du piston ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut aussi ne pas se fixer d'avance la marche complète de la distribution et adopter des organes simples, comme le tiroir ordinaire.

Etude de la distribution par tiroir.

Le tiroir sert à distribuer la vapeur des deux côtés du piston.

Le cylindre présente 2 conduites une à chaque extrémité, aboutissant à une surface plane bien dressée, dite table des lumières ; les deux orifices des conduits sont les lumières ; ces deux lumières sont indépendantes entre-elles. Ces lumières peuvent être obturées par une plaque mobile, glissant sur la table des lumières et qui est le tiroir. Ce tiroir se meut à l'intérieur d'une boîte à vapeur qui communique avec la chaudière pour la marche de la machine. Quand le bord c du tiroir (fig. 78)

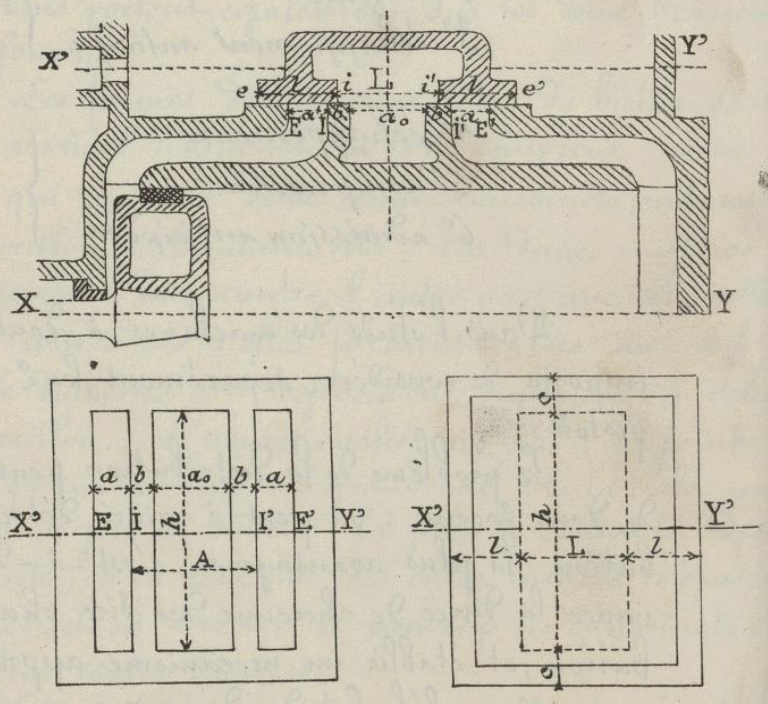


Fig. 78

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mobile coïncide avec le bord E fixe de la lumière, la communication entre le cylindre et la boîte à vapeur s'ouvre et on a admission de la vapeur, et cette admission dure jusqu'au moment où, le tiroir revenant vers la gauche, e revient devant E. L'admission cesse alors, et c'est la détente qui se produit dans le cylindre.

Pour assurer l'échappement, on a construit une cavité à l'intérieur de la plaque, communiquant constamment, par une troisième lumière, avec le condenseur. Dans ces conditions, lorsque, le tiroir revenant à gauche, le bord intérieur mobile du tiroir i passe devant I, le cylindre communique avec le condenseur et l'échappement se produit.

Pour étudier la distribution par tiroir, on est donc ramené à étudier les mouvements de 4 couples de points à savoir :

le mouvement de	e	par rapport à	E
– id –	i	– id –	I
– id –	e′	– id –	E′
– id –	i′	– id –	I′

Le mouvement du tiroir est produit par un mouvement circulaire qu'on transforme en mouvement alternatif rectiligne. Cette transformation peut être effectuée au moyen d'une manivelle. L'angle que fait la manivelle du tiroir avec celle du piston est

$$M\hat{O}T = \frac{\Pi}{2} + \delta \quad (fig.\ 79)$$

δ étant "l'angle d'avance", compté à partir de la manivelle motrice dans le sens du mouvement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le mouvement du tiroir est complètement défini lorsqu'on connaît l'angle δ ainsi que le rayon r de la manivelle du tiroir.

Cette manivelle ne peut être placée en bout d'arbre. Pour éviter de couder l'arbre, on profite

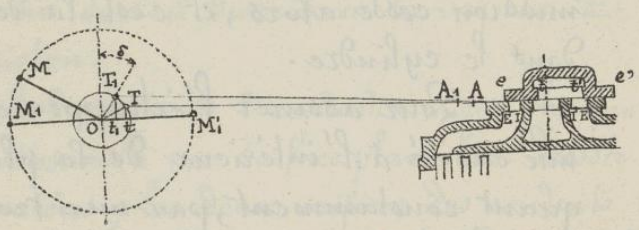
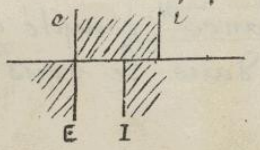


Fig. 79

de la faible longueur de la manivelle OT, et on la transforme en excentrique. Il suffit pour cela de grossir le tourillon de la manivelle, jusqu'à ce qu'il vienne enfermer l'arbre ; on peut alors monter ce tourillon grossi sur l'arbre sans être obligé de le couder, ce qui simplifie l'exécution de cet arbre.

L'excentrique est entouré du collier d'excentrique, qui est la tête de la bielle ou barre d'excentrique, dont l'autre extrémité s'articule sur la tige du tiroir.

Fonctionnement du tiroir. — Nous étudierons d'abord l'admission sur la face du piston située du côté de l'arbre de la machine ; pour cela si on appelle E et I les bords intérieur et extérieur du tiroir, il faut étudier le mouvement de e par rapport à E (fig. 80)



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le mecanisme de commande est défini par le rayon d'excentricité x et par l'angle de ce rayon et de la manivelle motrice, compté dans le sens du mouvement de rotation et généralement défini par l'angle d'avance δ, (fig. 81) ou avance angulaire, qui est l'excès de l'angle précédent sur un angle droit; on doit connaître aussi la longueur de la bielle ou barre d'excentrique T, A. Enfin le côté e est à une distance invariable de A que l'on doit également connaître.

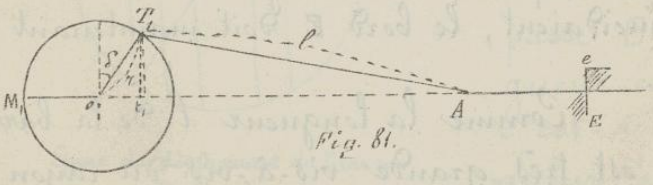


Fig. 81.

Avec toutes ces données, on pourra, en supposant que OT, soit la position initiale du rayon d'excentricité quand le piston est à fond de course, étudier le déplacement du bord e du tiroir pendant un tour complet de la machine.

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.

Supposons d'abord que, lorsque le piston est à fond de course e coïncide avec E. Cela revient à dire qu'il n'y a pas d'admission anticipée. Nous pouvons évidemment, au lieu d'étudier le mouvement de e, étudier celui de A.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

De plus, si de A comme centre avec un rayon égal à l on décrit l'arc de cercle T, t_1, on pourra de même au lieu d'étudier le mouvement de A étudier le mouvement de ce point t situé constamment à la distance invariable l de A. Nous supposerons aussi que le bord E de la lumière a subi la même translation que le bord e, et, puisqu'à l'origine du mouvement e et E coïncidaient, le bord E doit maintenant se trouver en t_1.

Comme la longueur l de la barre d'excentrique est très grande vis-à-vis du rayon d'excentrique r, on a un tracé très approché de l'épure en prenant les projections orthogonales sur le diamètre M_1M des points de la circonférence. Il est d'ailleurs très facile de trouver la position des différents points t correspondant aux différentes positions de T sur le cercle, en traçant l'arc de cercle de rayon égal à l à l'aide d'un gabarit simple (fig. 82) construit en taillant le petit côté d'une équerre à dessin suivant le rayon voulu.

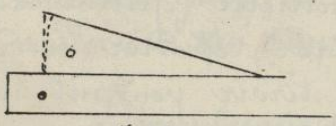


Fig. 82

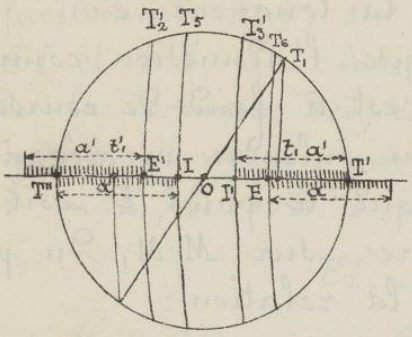
Ceci posé, lorsque T se déplace (fig. 83) à partir de T_1 vers la droite, l'admission se produit, augmente et passe par un maximum quand T a tourné de l'angle $90° - \delta$; puis l'ouverture d'admission décroît et se ferme lorsque T passe en T_2.

Elle a donc eu lieu pendant que T décrivait l'angle $180° - 2\delta$.

Pour l'échappement on doit suivre le mouvement du bord i du tiroir par rapport au bord fixe I de la lumière. Transportons les points

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

i et I sur la droite M M$_1$ vers le point E d'une longueur égale à ei ; le mouvement relatif ne change pas ; mais i se confond avec le point t, qui figurait le bord e ; après ce transport, I vient en I$_1$, ayant dépassé E d'une longueur égale à ei - EI, c'est-à-dire d'une longueur égale à l'excès de la largeur de la bande du tiroir sur



Epure du déplacement du tiroir sur les lumières

Fig 83

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 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$_2$.

A partir de OT$_5$, on entre dans la phase de compression.

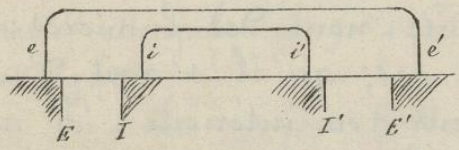


Fig. 84

Les déplacements du même point t sur le diamètre horizontal M M$_1$ montre comment se fait la distribution sur l'autre face du piston, si on lui fait représenter successivement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les bords e' et i' du tiroir (fig. 84) il faut pour cela supposer les points fixes E' et I' déplacés vers E respectivement de la longueur du tiroir ee' et de la longueur ei'.

Pour que l'admission commence quand le piston est à fond de course, mais à l'extrémité du cylindre opposée à la précédente, il faut que le point E' soit la projection circulaire sur M M, du point T'_1, ce qui donne la relation :

$$EE' = 2r \sin \delta$$

L'arc $T_1 T_2$ correspond à la phase d'admission. L'échappement anticipé commence au point T'_3 dont I' est la projection circulaire ; puis l'ouverture augmente et se ferme en T_5.

Il arrive souvent que les points T_5 et T'_3 d'une part, T_3 et T'_5 d'autre part, se confondent ; cela a lieu lorsque $ii' = II'$, ce qu'on exprime en disant que le tiroir n'a pas de recouvrement intérieur. Les mouvements de i par rapport à I et de i' par rapport à I' se confondent.

D'une façon générale, on appelle recouvrements du tiroir, les distances entre les bords extérieur ou intérieur du tiroir et les bords de même nom des lumières ; on dit suivant les cas, qu'il s'agit d'un recouvrement extérieur ou intérieur. Il arrive quelquefois que le recouvrement intérieur du tiroir est négatif, ce qui veut dire que pendant un instant les deux lumières communiquent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

simultanément avec le condenseur.

Cette définition séparée des deux recouvrements n'est pas indispensable, car on voit facilement que, sur la figure, les longueurs EI et $E'I'$ qui interviennent ne dépendent que de la somme des recouvrements: en effet, puisque nous avons, par construction, placé le point i en E, le bord I est rejeté en I_1, et

$$EI_1 = iI$$

c'est-à-dire que EI_1 est la différence entre la largeur de la bande du tiroir et celle de la lumière, et par suite est la somme des deux recouvrements.

Le raisonnement est le même pour $E'I'$.

Ces remarques montrent qu'il est inutile, dans le tracé de l'épure, de s'occuper de la symétrie du tiroir.

Proposons-nous maintenant de rechercher, pour chaque position du tiroir, la position correspondante du piston.

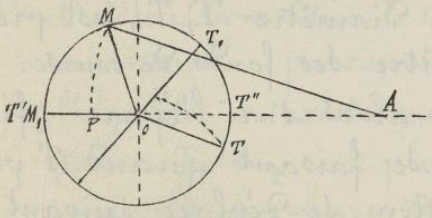


Fig. 85.

La manivelle motrice (fig. 85) se projette sur la figure suivant un rayon OM qui suit à une distance angulaire constante et égale à $90° + \delta$ 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

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

égaux, ce qui revient à un changement d'échelle pour l'un d'eux.

Pour une position quelconque de OT, il faudrait donc tracer OM, tel que l'angle $M\hat{O}T$ fût égal à $90° + \delta$, puis la bielle motrice MA; au lieu d'étudier le mouvement du piston, on peut étudier le mouvement de ce point A. On peut encore transporter ce point A à l'intérieur du cercle O, comme on l'a fait pour le tiroir, en traçant l'arc de cercle MP de rayon AM, ou en projetant circulairement M sur le diamètre horizontal.

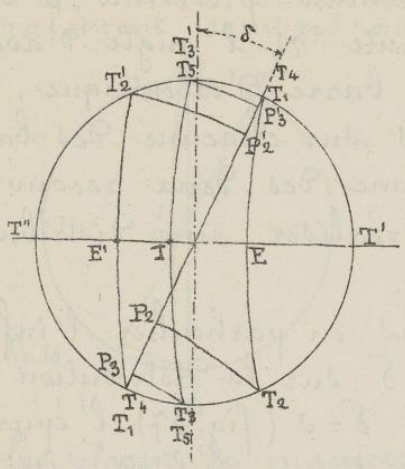
Il est évident qu'on simplifiera encore les tracés, si, au lieu de mener tous ces rayons OM à la distance angulaire $90° + \delta$ de OT, on suppose qu'on fasse tourner de cet angle $90° \delta$ vers OT, une fois pour toutes le système de rayon OM, ainsi que le diamètre horizontal T'T''. OM se confond alors avec O''T et doit se projeter sur le diamètre $T_1 T'_1$; on n'aura plus qu'à mener l'arc de cercle projetant TP; le mouvement de P sur le diamètre $T_1 T'_1$ est précisément celui du piston entre ses fonds de course.

On voit alors sur l'épure (fig. 86) que l'admission se faisant quand T parcourt l'arc $T_1 T_2$, le piston se déplace suivant $T_1 m_2$. La détente s'effectue lorsque le piston parcourt l'espace $m_2 m_3$, à ce moment commence l'échappement anticipé; le piston arrive à fond de course en T_4, puis revient et l'échappement cesse lorsqu'il passe par la position m_5. De m_5 à T_1 se fait la compression.

Sur l'autre face du piston, l'admission

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a lieu pendant le parcours $T'_1 m'_2$. Puis l'admission se ferme, et la détente s'effectue pendant le trajet $m'_2 m'_3$ (on suppose dans le cas actuel, pour simplifier l'épure, que m'_3 coïncide avec m_5, ou que T'_3 coïncide avec T_5 ; nous avons vu qu'il en était ainsi lorsque le recouvrement intérieur est nul). En m_3 commence l'échappement anticipé ; en T_1 le piston est à fond de course, et l'échappement cesse lorsque le piston repasse par la position m'_5 qui coïncide avec m_3. Enfin de m'_5 à T'_1 a lieu la compression de la vapeur.



Distribution sans avance linéaire ni recouvrements intérieurs

Fig 86

La figure montre bien quelle est l'influence de l'obliquité des bielles ; pendant l'admission sur les deux faces du piston, la manivelle parcourt deux angles égaux, mais l'égalité n'existe pas pour les parcours du piston : $T_1 m_2$ est plus petit que $T'_1 m'_2$, puisque la courbure des arcs projetants $T'_2 m'_2$ et $T_2 m_2$, réduit le parcours $T_1 m_2$ de l'une des faces du piston celle située du côté de l'arbre et allonge le parcours $T'_1 m'_2$ de la face opposée. 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.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Inversement, on peut chercher à déterminer les éléments précédents, à savoir: le rayon d'excentricité r, l'angle d'avance δ, la longueur de la barre d'excentrique, la somme des recouvrements sur chacune des bandes du tiroir, et la somme des deux recouvrements intérieurs, pour réaliser une distribution donnée à l'avance.

Etudions en particulier l'influence de la variation de δ sur la distribution: lorsque $\delta = 0$ (fig. 87) l'épure montre que l'admission dure pendant un demi-tour, et l'échappement pendant l'autre demi-tour.

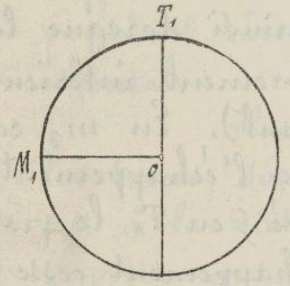


Fig. 87.

Le tiroir n'a aucun recouvrement.

C'est un dispositif quelquefois employé, par exemple dans le cas d'un servomoteur, où l'on veut que la marche puisse se faire à un point quelconque de la course du piston; si on excepte le point mort, la lumière est toujours ouverte. On applique aussi ce dispositif quand le fluide moteur est l'eau et non la vapeur; l'eau en effet étant incompressible, n'agit sur le piston que par admission et échappement.

Sous ces réserves, la machine doit toujours comprendre une période de détente, et par suite δ ne doit pas être nul.

Lorsque l'angle d'avance augmente, les parcours du piston pendant l'admission diminuent; pour $\delta = 45°$ l'admission est déjà peu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

près 50 %.

Dans les machines fixes δ est généralement compris entre 35° et 45°.

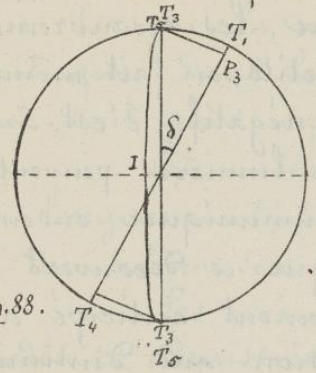


Fig. 88.

Si nous refaisons l'épure (fig. 88) en supposant, comme nous l'avons déjà fait, les avances linéaires nulles, ainsi que la somme des recouvrements intérieurs, les points I et i se confondent, et on peut les placer de manière que les longueurs $P_3 T'_4$ et $P'_3 T'_1$ soient égales. On peut supposer par exemple que les points T_3 et T_5 sont sur un même diamètre vertical, et dans ces conditions on aura:

$$P_3 T_4 = P'_3 T_1 = r(1 - \cos\delta)$$

L'égalité de ces deux segments signifie que le parcours du piston est le même pendant l'échappement anticipé et pendant la compression, et cela, sur les deux faces du piston. La formule montre aussi que lorsque δ augmente, l'échappement anticipé augmente; par suite on ne peut obtenir une admission courte qu'en augmentant en même temps l'échappement anticipé.

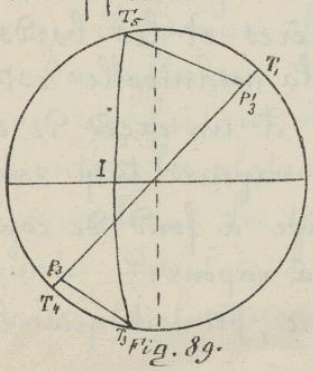


Fig. 89.

Cherchons maintenant quel est l'effet du recouvrement intérieur.

Lorsqu'il augmente, les points I, T_3, T_5 se déplacent vers la gauche, l'échappement anticipé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est réduit ; mais la compression augmente ; il en est de même sur l'autre face du piston (fig. 89).

En pratique, les recouvrements intérieurs restent très petits, on fait même des recouvrements intérieurs négatifs, c'est-à-dire que les orifices des deux lumières peuvent être ouverts ensemble et communiquer ensemble avec le condenseur ; lorsque ce découvert intérieur augmente, l'échappement anticipé augmente, et c'est la compression qui diminue.

Nous avons jusqu'ici négligé l'influence de l'admission anticipée.

Lorsqu'il y a admission anticipée, (fig. 90) la lumière d'admission est ouverte d'une quantité E lorsque la manivelle passe en T_1. Cette admission anticipée est particulièrement utile dans les machines rapides ; elle assure dans l'espace libre du cylindre l'établissement de la pression de la chaudière, dès le début de l'admission proprement dite.

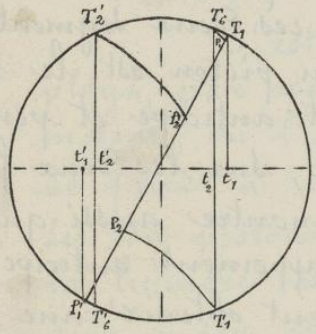


Fig. 90.

Les avances linéaires c'est-à-dire les distances cE et $c'E'$ entre les bords extérieurs des lumières et les bords extérieurs du tiroir lorsque la manivelle est en P_1 peuvent aussi remédier à un excès de compression, en permettant à la vapeur trop comprimée, lorsque le piston arrive à fond de course, de refluer dans la boîte à vapeur.

Sur l'épure, on voit que lorsque la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

manivelle est en T_6 et le piston en P_6, la lumière s'ouvre, la quantité $t_2 t_1$ représente l'avance linéaire E du tiroir ; la lumière se ferme lorsque la manivelle passe par T_2, et on voit que dans le cas actuel les points T_1 et T_2 ne sont plus symétriques.

De même, sur l'autre face du piston, la longueur $t'_1 t'_2$ représente l'avance linéaire E' du tiroir sur la deuxième lumière.

Les avances linéaire allongent les périodes d'admission qui cessent non plus quand le point t repasse en t_1 ou en t'_1 ; mais quand il passe en t_2 ou en t'_2.

En donnant au tiroir, pour la lumière la plus voisine de l'arbre une avance linéaire E plus grande que pour l'autre lumière E', on augmente le parcours $T_1 P_2$ plus que $T'_1 P'_2$; on rapproche ainsi de l'égalité ces deux parcours du piston pendant l'admission sur les deux faces. Mais en même temps, la différence entre les plus grandes ouvertures des deux lumières augmente.

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. La tige reliant le tiroir à la bielle est souvent munie dans ce but d'écrous de réglage qui font varier sa longueur. Ce procédé est peu recomman-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dable, car s'il permet de régler commodément la longueur de la tige, il permet à un ouvrier maladroit de la dérégler encore plus facilement.

Le seul examen de la longueur géométrique de phases ne donne pas une idée suffisante d'une distribution ; les laminages de vapeur y ont une action fort importante, surtout dans les machines rapides.

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

Le laminage dépend essentiellement de la section des orifices des lumières, et les tracés précédents tiennent compte de la longueur de la lumière, mais non de sa hauteur. Les convenances de construction ne permettent guère que cette hauteur dépasse beaucoup le diamètre du cylindre. La section convenable des passages se détermine à l'aide des formules approximatives qui donnent la relation entre la vitesse de la vapeur, s'écoulant d'une enceinte dans une autre, et la différence de pression dans ces deux enceintes. On en déduit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans chaque cas les sections de passage qui limitent à une valeur déterminée la chute de pression.

En pratique les calculs sont compliqués, car, à cause de l'ouverture et de la fermeture graduelles des lumières la vitesse d'écoulement de la vapeur varie d'une façon continue ; on peut chercher à ne pas dépasser certaines limites de vitesse pour l'écoulement de la vapeur, lors des plus grandes ouvertures de lumière à l'admission et à l'échappement.

Souvent on se contente de règles empiriques très simples pour déterminer les orifices de passage, on suppose le piston animé de sa vitesse moyenne qui est égale à

$$\frac{4\,R\,n}{60},$$

R étant le rayon de la manivelle motrice, 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 seconde. Si la section du piston est p fois plus grande que celle de la lumière, on en conclut que la vitesse de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vapeur est p fois plus grande que celle du piston. En conséquence, la surface ouverte de la lumière d'admission se calcule en multipliant la surface du piston par le rapport de sa vitesse moyenne au nombre choisi entre 25 et 60.

Il devient difficile d'obtenir des sections aussi grandes qu'on le désirerait pour les machines qui tournent rapidement et dans les cylindres de très grand diamètre.

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

L'épure que nous avons indiqué précédemment est connue sous le nom d'épure de Reech.

On doit à Zeuner un tracé approximatif qui néglige l'obliquité de la barre d'excentrique.

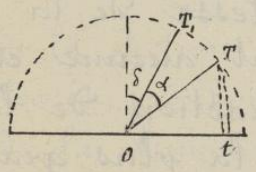


Fig. 91.

Quand la machine a tourné d'un angle α (fig. 91) à partir du point mort de la manivelle motrice, le déplacement du tiroir, rapporté à sa position moyenne, est supposé égal à la projection ot du rayon de l'excentrique oT, et

$$ot = x = r \sin(\delta + \alpha)$$

Pour représenter x, on décrit un cercle (fig. 92) dont le diamètre est égal au rayon r de l'excentrique ; on trace l'angle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$yoT = \delta$ et on mène ox perpendiculaire sur oy. On mène la droite oK faisant avec ox l'angle α.

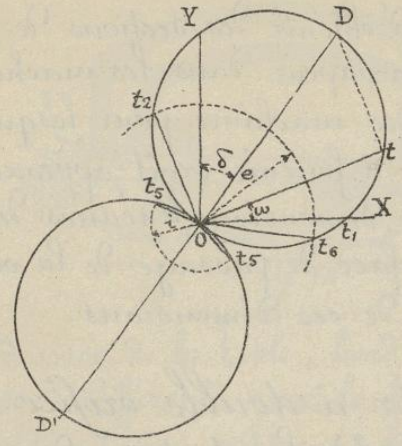


Diagramme de Zeuner donnant approximativement le tiroir (Ot), pour une rotation ω à partir du point mort de la manivelle motrice.
Fig 92

On a

$$OK = OT \sin(\delta + \alpha) = x$$

On peut ainsi avoir x en fonction de δ et réciproquement.

Pour connaître les phases de la distribution, on décrit deux cercles ayant leur centre en o, et dont les rayons sont le recouvrement extérieur e et le recouvrement intérieur i du tiroir placé dans sa position moyenne.

On a ainsi les deux valeurs de l'angle α correspondant l'une à l'admission anticipée soit $\alpha = \widehat{Xot_6}$ et l'autre à la fin de la l'admission soit $\alpha = \widehat{Xot_4}$.

De même on a les deux valeurs de l'angle α correspondant, l'une à l'échappement anticipé soit

$$\alpha = \widehat{Xot_3}$$

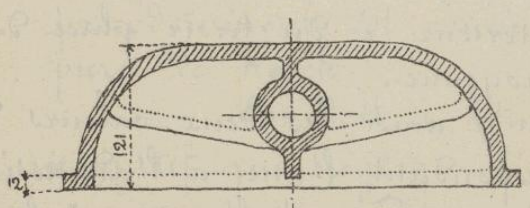
et l'autre au commencement de la compression soit

$$\alpha = \widehat{Xot_5}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Formes diverses de tiroir. — Il est souvent difficile d'obtenir des sections de passage suffisantes pour la vapeur dans les machines rapides et dans les grandes machines pour lesquelles le volume de vapeur à fournir croît approximativement comme le cube de dimensions linéaires de la machine tandis que la surface de passage de la vapeur croît comme le carré de ces dimensions.

a) Tiroir à double orifice. — Avec ce tiroir (fig. 93), 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'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.

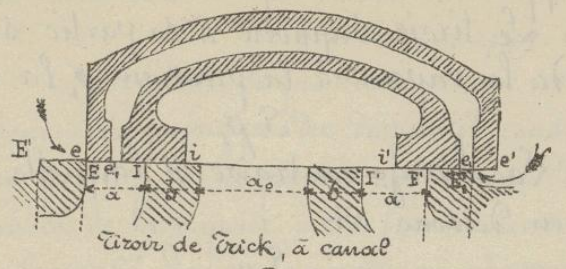


Tiroir à double orifice (Coupe longitudinale)
Fig 93

b) Tiroir à canal. — Le tiroir à canal (fig. 94) augmente les sections de passage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seulement pour l'admission de la vapeur.



Tiroir de Trick, à canal
Fig 94

Au moment de l'ouverture de l'admission, les bords E et e sont en contact; le bord e', 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 2 fois plus vite. La même action se produit avant la fermeture de la lumière d'admission. L'échappement se fait sans modification. Les cotes sont telles que le canal ne vient jamais communiquer avec la lumière d'échappement, et ne fait pas communiquer ensemble deux lumières d'admission.

Le canal du tiroir fonctionne de même lors de l'ouverture de la lumière de droite; alors le bord e_2 vient coïncider avec le bord E_2 de la table.

c) *Tiroirs à compensateur.* – Ces tiroirs sont destinés à diminuer la force de frottement, souvent considérable dans les tiroirs ordinaires.

Le travail absorbé par le frottement d'un tiroir est difficile à prévoir, car la pression qu'il supporte ainsi que le coefficient de frottement varient.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce travail peut être assez considérable, et surtout l'usure et le grippement des surfaces sont à craindre.

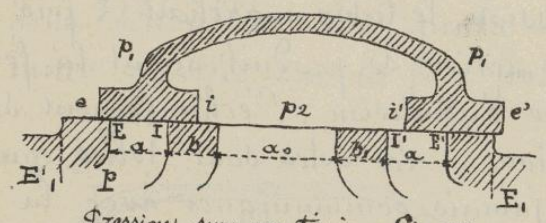
Le tiroir supporte à sa partie supérieure, du fait de la vapeur à la pression p_1 la charge

$$S p_1$$

La charge contraire à laquelle il est soumis en dessous est

$$S p_2$$

p_2 étant la pression d'échappement. Cette valeur est en réalité un peu trop faible, car sur la figure 95, par exemple, la partie E', e' de la surface inférieure du tiroir supporte la pression p_1 de la boîte à vapeur et la partie EI supporte la pression variable p du cylindre.



Pression sur un tiroir Fig 95

La charge à laquelle est soumise le tiroir est donc

$$KS(p_1 - p_2)$$

K étant un coefficient plus petit que 1.

Du reste, on ne préoccupe pas de déterminer rigoureusement K, car, ce qui importe c'est la valeur du travail perdu par frottement, et pour le calculer il faut multiplier l'expression précédente par le coefficient de frottement qui est mal connu. Ce coefficient varie avec le graissage et l'état des surfaces. La valeur 0,20 serait très défavorable ; avec le coefficient 0.05, le frottement serait plus doux, mais il paraît pouvoir se réduire bien au dessous de cette valeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Finalement le travail perdu par frottement pendant une course du tiroir est

$$2 f K S (p_1 - p_2) . C$$

On réduit le frottement au moyen du compensateur. Le principe du dispositif consiste à soustraire une portion de la partie extérieure du tiroir à l'influence de la vapeur. On forme une enceinte de surface S' dans laquelle on n'exerce que la pression p_2 au moyen de cloisons qui la séparent de la boîte à vapeur :

Il faut prévoir l'usure et le soulèvement du tiroir, ce qui oblige à permettre un déplacement vertical du compensateur.

L'espace circonscrit par le compensateur communique avec l'échappement à l'aide d'un trou percé dans le dos du tiroir ou dans le plateau.

La surface ainsi isolée doit être déterminée de telle sorte que, dans toutes les positions du tiroir, il y ait toujours une pression assez forte qui l'applique sur la table ; si cette surface est trop grande, le tiroir risque de se soulever par moments, et il en résulterait une fuite de vapeur. En général la portion soustraite à la pression ne dépasse pas 0,5 à 0,6 de la surface totale du tiroir. L'étanchéité n'est jamais complète, ce qui cause une dépense supplémentaire de vapeur.

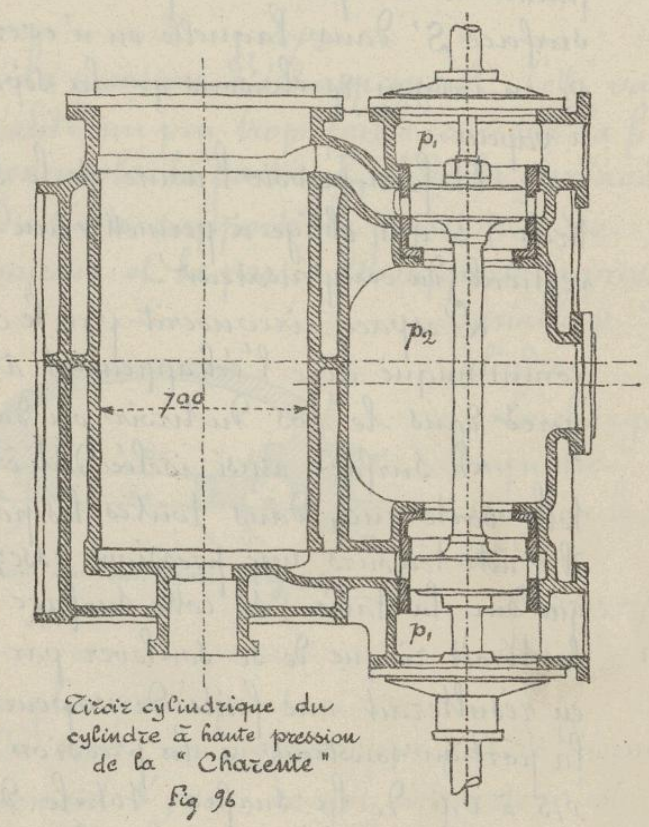
d) Tiroirs cylindriques. — La boîte à vapeur devient un cylindre où se meuvent deux pistons solidaires conduits par la tige du tiroir (fig. 96). Ces pistons se déplacent sur deux lumières annulaires, enroulées autour de ce cylindre. La surface de passage de la vapeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est considérablement augmentée puisque la longueur EI restant la même que dans le tiroir ordinaire, la hauteur de la lumière est à peu près égale ici à

$$\frac{2}{3}\,\pi D$$

D étant le diamètre du cylindre de la boîte à



Tiroir cylindrique du cylindre à haute pression de la "Charente"
Fig 96

vapeur. La vapeur est admise de part et d'autre de ces deux pistons ; l'échappement se fait entre eux. On voit qu'il n'y a plus besoin d'installer de lumière d'échappement ; il suffit d'une conduite quelconque.

La vapeur est distribuée exactement comme dans le cas d'un tiroir ordinaire. Les lumières annulaires sont coupées par une série de barrettes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pleines, qui maintiennent les pistons et empêchent qu'ils n'accrochent les bords.

On obtient avec ce système un équilibre complet, sauf à la surface de sortie de la tige des pistons ; pour avoir l'équilibre parfait, il suffit de placer une contre-tige, sous réserve de la pression qui peut agir à l'intérieur des bagues élastiques.

Les pistons sont munis de bagues élastiques, parfois au nombre de 4 par piston, groupées 2 par 2 avec joints croisés. La pression de la vapeur, jointe à l'élasticité de la bague a tendance à l'appliquer contre la paroi du cylindre. Un rétrécissement de la bague, diminuant son adhérence avec la paroi du cylindre équivaudrait au soulèvement d'un tiroir ordinaire et produirait des fuites de vapeur. On a même construit des pistons distributeurs sans bagues, parfaitement ajustés à frottement doux dans leur cylindre. Mais il paraît difficile de les maintenir suffisamment étanches. Le cylindre porte une chemise d'acier sur laquelle frottent les pistons et qu'on peut remplacer.

Ces tiroirs cylindriques se prêtent à l'interversion des côtes d'admission et d'échappement. Avec un tiroir plan il y aurait soulèvement de l'appareil ; avec le tiroir cylindrique, il suffit de déplacer de 180° le rayon de l'excentrique qui conduit les pistons. Dans les machines verticales il est utile d'équilibrer le poids du tiroir : on peut le faire au moyen d'un piston, constamment poussé de bas en haut par la vapeur. Avec un tiroir cylindrique, il suffit d'augmenter le diamètre du piston supérieur et d'effectuer l'interversion des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

côtés d'admission et d'échappement. On a une force constante qui pendant la descente s'oppose à la force de la pesanteur et pendant la montée, réduit l'effort que doit transmettre le mécanisme de commande.

Coulisse de Stephenson. — La distribution simple par excentrique et tiroir ne convient que pour les machines dont l'arbre tourne toujours dans le même sens. Souvent, au contraire, il est nécessaire que l'arbre puisse tourner à volonté dans un sens ou dans l'autre ; telles sont les machines marines pour lesquelles la marche arrière n'est d'ailleurs qu'exceptionnelle, les locomotives, les machines d'extraction.

Soit OT le rayon d'excentricité (fig. 97) qui donne une distribution convenable, pour un sens de rotation qu'on appellera marche avant ; OT est calé à $90° + \delta$ 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 $90° + \delta$ en arrière de OM_1 ; ce 2me excentrique donnerait la même distribution pour une rotation en sens contraire de l'arbre ou marche arrière.

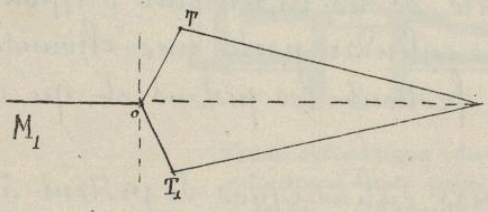


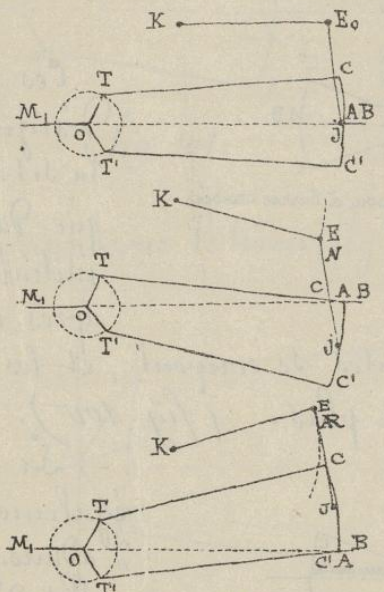
Fig. 97.

On pourra donc obtenir deux marches, en employant deux excentriques, chacun conduisant sa bielle, à condition de relier la tige du tiroir

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'une ou l'autre de ces bielles.

Dans le système imaginé par Stephenson, les deux extrémités des barres d'excentriques sont reliées par une pièce appelée coulisse ayant la forme d'une rainure circulaire (fig. 98) Une pièce appelée coulisseau, fixée à la tige du tiroir peut se déplacer dans cette rainure. Le point B est donc assujetti à rester sur la coulisse et à se mouvoir en ligne droite suivant l'axe du tiroir.



Coulisse de Stephenson à barres droites ; arbre de relevage dans ses positions moyennes et extrêmes

Fig 98

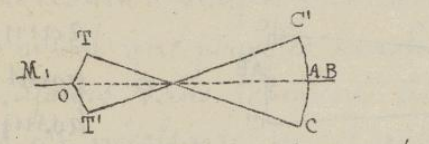
En outre, un point J de la coulisse est fixé à une bielle de suspension EJ, articulée en J et à l'extrémité E d'un levier KE fixé sur un arbre K dit arbre de relevage.

Quand on fait tourner cet arbre de manière à amener E en E_1, le point A vient sur OM_1 et c'est l'excentrique OT' qui conduit le tiroir. L'arbre de relevage est immobilisé dans cette position. Quand, au contraire, on fixe KE dans la position KE_2, c'est l'excentrique OT' qui commande le tiroir. On obtient ainsi les marches avant et arrière par la manœuvre de l'arbre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de relevage.

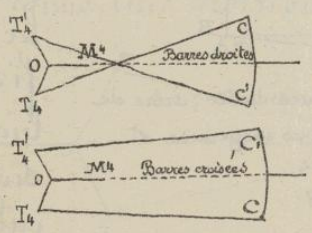
Les bases d'excentriques sont parfois montées différemment, OT commandant l'extrémité inférieure de la coulisse et OT' l'extrémité supérieure (fig. 99) Les barres sont dites croisées ou fermées, tandis que dans la 1re disposition elles sont dites droites ou ouvertes.



Coulisse de Stephenson à barres croisées

Fig 99

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. 100).



Barres après une rotation de 180°

Fig 100

La coulisse constitue également un mécanisme d'admission variable. Il suffit d'imaginer le levier de l'arbre de relevage fixé dans une position KE, intermédiaire entre KE_1 et KE_2. Le point de la coulisse qui se trouve sur la tige du tiroir est intermédiaire entre A et A', (fig. 101) et le tiroir va prendre un mouvement bien défini qu'on peut déterminer par le calcul ou par une épure.

Une méthode due à Guinotte permet d'étudier ce mouvement d'une façon simple et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

suffisamment approchée, pourvu que les bases d'excentriques soient assez longues par rapport au rayon. Cette méthode s'applique à toutes les coulisses commandées par deux excentriques qui peuvent être de rayons différents

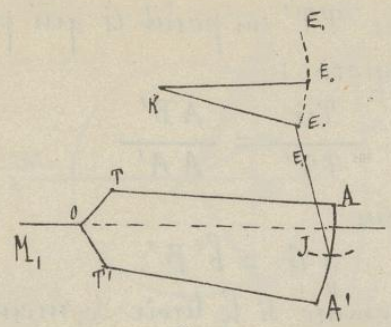


Fig. 101.

Supposons le tiroir (fig 102) commandé par le

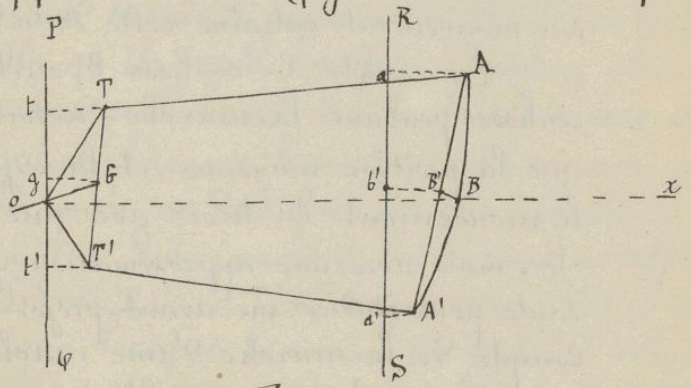


Fig. 102.

point B ; au lieu d'étudier le mouvement de ce point B lui-même, nous supposerons la coulisse rectiligne, et nous étudierons le mouvement de B', projection de B sur la corde A A'.

Supposons que les projections horizontales TA et T'A' des deux barres d'excentrique soient égales à l ; cela revient à négliger leur obliquité, par suite les projections sur Ox des déplacements des points A et A' sont égales aux projections sur la même droite des déplacements de T et de T', et on peut construire une droite RS parallèle à Pφ, telle que l'on ait constamment :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$A\,a = T\,t$$
$$A'\,a' = T'\,t'$$

Prenons alors sur TT' un point G qui partage cette droite dans le rapport :

$$\frac{TG}{TT'} = \frac{AB'}{AA'}$$

On en déduit que

$$g\,G = b'\,B'.$$

et tout se passe comme si le tiroir se meut à l'aide d'un excentrique de rayon OG. Cet excentrique est appelé excentrique fictif du tiroir ; on peut le substituer à la coulisse, et la connaissance de son mouvement entraîne celle de la distribution.

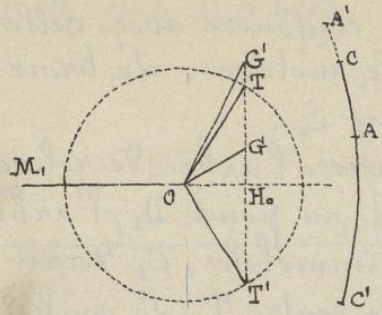
En réalité la coulisse B oscille un peu sur la coulisse pendant la marche, de sorte que B n'en est que la position moyenne, et la règle ne donne pas le mouvement du tiroir avec une exactitude complète, mais avec une approximation généralement suffisante pour étudier un avant-projet ou pour se rendre compte de la marche d'une machine.

Dans chaque cas, l'épure exacte seule peut faire connaître le degré de précision de la méthode. Souvent, on emploie, pour l'étude définitive un modèle représentant la distribution projetée.

Pour la coulisse de Stephenson ordinaire, avec deux excentriques OT et OT' ayant même rayon et même angle de calage, on voit sur la figure 103 que l'excentrique fictif variera comme OG, le point G allant de T en T'. On obtient ainsi une 1re représentation approximative de la distribution : en considérant la marche-avant,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par exemple, on voit l'angle d'avance croître de 5° à 90° : la période d'admission diminue depuis une certaine valeur initiale, tandis que les périodes d'échappement anticipé et de compression s'allongent.

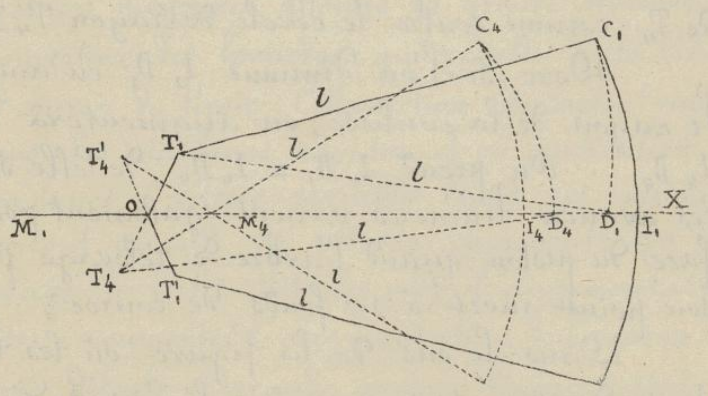


Excentriques fictifs de la coulisse de Stéphenson

Fig 103

On peut pousser plus loin cette étude, en considérant certaines positions du tiroir, en particulier celle qu'il prend lorsque le piston est à fond de course : il laisse sur la lumière une ouverture E qui est l'avance linéaire ; cette avance peut être nulle, mais ne doit jamais être négative, c'est-à-dire qu'il ne doit jamais se transformer en retard.

Soient $T_1 C_1$ et $T'_1 C'_1$ les positions des barres d'excentrique lorsque la manivelle motrice est à son point mort OM_1 (fig. 104). L'arbre de relevage



Variation des avances linéaires du tiroir pendant la manœuvre de l'arbre de relevage de la coulisse de Stephenson à barres droites.

Fig 104

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est supposé d'abord dans sa position moyenne, ou, comme on dit, à son point mort, expression qu'il ne faut pas confondre avec celle qui s'applique à la manivelle motrice. Le tiroir présente une avance linéaire E_0.

Si on manœuvre l'arbre de relevage jusqu'à amener C_1 sur Ox, au point D_1, l'arbre de la machine étant immobile, C_1 décrit un cercle de rayon $T_1 C_1$ et de centre T'_1. Le coulisseau, et par suite le tiroir, se déplace de $I_1 D_1$; l'avance linéaire devient $E_0 - I_1 D_1$.

Il semble qu'on puisse donner à $I_1 D_1$ une valeur arbitraire et qu'on puisse en particulier l'annuler, en déterminant la coulisse par les 3 points C_1 D_1 C'_1. Mais il n'en est pas ainsi, car il faut se préoccuper de l'avance linéaire pour l'autre face du piston, quand la manivelle est en OM_4, OT' en OT_4, OT' en OT'_4 et la coulisse en $C_4 I_4 C'_4$. Si le tiroir donne une avance linéaire E'_0, avec l'arbre de relevage au point mort, cette avance deviendra quand l'arbre de relevage sera à fond de course $E'_0 - I_4 D_4$, le point D_4 étant obtenu en décrivant de T_4 comme centre le cercle de rayon $T_4 D_4$.

Donc si l'on diminue $I_1 D_1$ en augmentant le rayon de la coulisse, on augmentera d'autant $I_4 D_4$. On prend $I_1 D_1 = I_4 D_4$, de telle sorte que les avances linéaires varient également pour chaque face du piston quand l'arbre de relevage passe de son point mort à ses fonds de course.

Dans le cas de la figure où les barres sont droites, ces avances linéaires diminuent à mesure que l'arbre de relevage s'éloigne de sa position moyenne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut géométriquement trouver le rayon que doit avoir la coulisse pour qu'il y ait égalité de $I_1 D_1$ et $I_4 D_4$ (fig. 105).

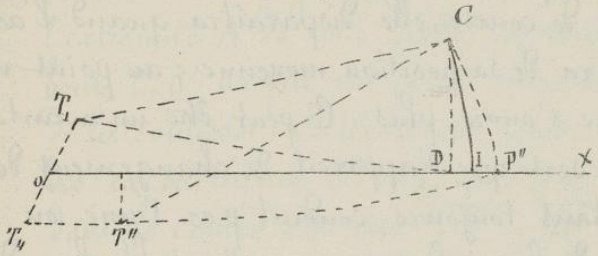


Fig. 105.

Pour rapprocher ces deux longueurs, on transporte le centre T_4 en T'', en menant $T_4 T''$ parallèle à Ox et prenant $CT'' = T_1 C$. On décrit les 2 cercles de centres T_1 et T'' avec le rayon $T_1 C$. On obtient ainsi 2 points D et D'' qui doivent être équidistants de I. En réalité, on prend pour rayon de la coulisse le rayon $T_1 C$ lui-même qui diffère très peu du rayon obtenu par la construction précédente.

La même construction appliquée au cas des barres croisées montre qu'au contraire les avances linéaires augmentent quand l'arbre de relevage passe de sa position moyenne à ses positions extrêmes. 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 grande diminution de l'ouverture des lumières, qui résulte de la réduction de la course du tiroir. Cette action est surtout avantageuse dans les machines rapides et en particulier dans les machines à vitesse variable: dans ces machines, c'est surtout quand la vitesse augmente qu'on fait usage de fortes détentes. Or l'augmentation de vitesse comporte l'augmentation de l'avance linéaire; forte détente et grande avance linéaire, sont comme on vient de le voir, deux conditions de marche compatibles dans le cas des barres droites, en particulier

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lorsque l'arbre de relevage est voisin de sa position moyenne.

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, la lumière ne s'ouvre plus. 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 extrémité de la coulisse : 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 équivalents à une coulisse. (fig. 106) : avec les barres droites :

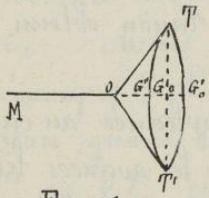
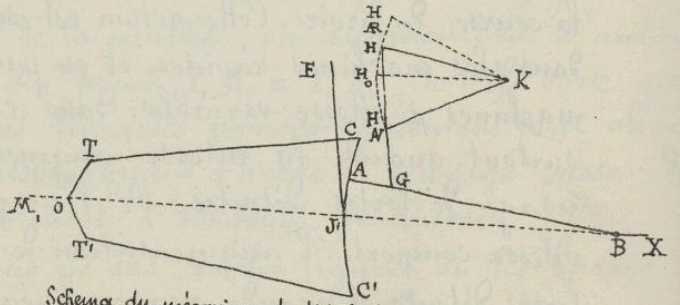


Fig. 106.

avec les barres droites les centres de ces excentriques forment l'arc d'une courbe TG'_oT' au lieu d'être placés sur la corde TT'. La distance $G_oG'_o$ représente l'accroissement 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''_oT'

Outre la coulisse de Stephenson, il existe un grand nombre de types de coulisses. La coulisse de Gooch, ou coulisse renversée, (fig. 105) est commandée comme celle de Stephenson par 2 barres TC et T'C' ; elle tourne sa convexité vers l'arbre



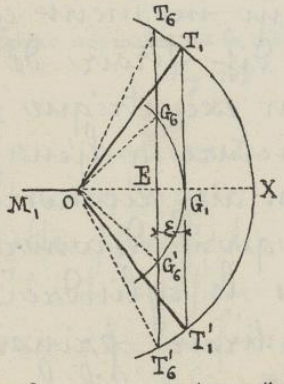
Schema du mécanisme de distribution par coulisse de Gooch

Fig 105

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur, et elle est suspendue 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 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 TT'. Le rayon de la coulisse est la longueur même de la bielle AB ; par conséquent, quand la manivelle motrice est au point mort, comme l'indique la figure, 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. Cette coulisse donne donc des avances linéaires constantes pour toutes les positions de l'arbre de relevage.

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 (fig. 206) situés sur la corde T_1 T'_1, et l'admission anticipée se produit pendant le parcours d'un angle d'autant plus grand que le rayon qui varie de OT_1 à OG est plus petit.



Variation de la période d'admission anticipée, avec avance linéaire constante

Fig 206

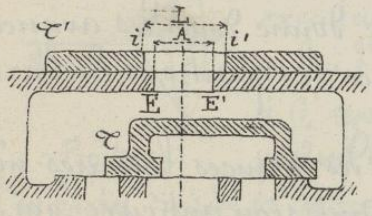
Le mécanisme de Gooch demande une longueur plus grande que celui de Stephenson, pour être monté dans des conditions analogues, puisqu'il faut loger en plus la bielle AB.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Distribution à deux tiroirs. – Avec un tiroir conduit par un excentrique, ou par une coulisse, qui donne à peu près la même distribution que des excentriques fixes, 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.

Le système de Gouzenbach (fig. 107) comprend un tiroir ordinaire, réglé pour une grande admission et une compression modérée : ce tiroir 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 un deuxième tiroir, dit tiroir de détente, pièce conduite par un excentrique spécial.



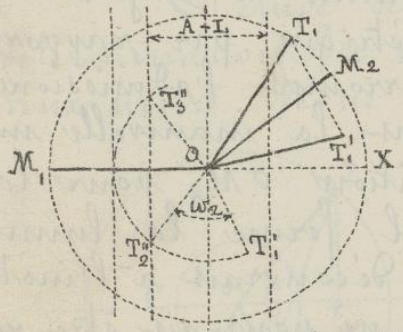
Coupe schématique de la distribution Gouzenbach
Fig 107

Si cette fermeture a lieu avant que le tiroir principal n'ait recouvert la lumière d'admission qu'il découvre, la vapeur contenue dans le cylindre et dans la boîte autour du tiroir principal, va se détendre, jusqu'à ce qu'il ferme à son tour la lumière d'admission ; la détente

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'achève alors dans le cylindre seul.

Ce système introduit un espace libre supplémentaire pendant la détente. 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 qu'il découvrait ; enfin la section de passage, offerte à la vapeur par l'ouverture de la boîte doit être suffisante, et, 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.



Epure approchée de la distribution Meyer
Fig 108

On voit (fig. 108) que l'admission est interrompue par le contact des bords e et e' du tiroir avec les bords E et E' du couvercle de la boîte.

On peut étudier cette distribution en projetant sur M, M', le centre de l'excentrique qui conduit la glissière. Quand cette projection passe sur les points E ou E', l'orifice de la boîte à vapeur s'ouvre et se ferme.

Si OT_1' est la position du rayon de l'excentrique qui commande la glissière

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lorsque la manivelle motrice passe par son point mort OM_1, l'admission est interrompue quand ce rayon vient en OT'_2, et à partir de ce moment la détente commence. La boîte à vapeur reste fermée jusqu'à ce que le rayon OT passe dans la position OT'_3 et ainsi de suite. Le mouvement correspondant du piston s'obtient en projetant les points T sur la droite $T'_1 O T'_4$.

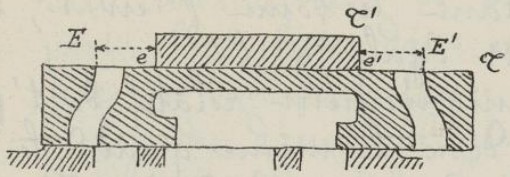
Pour modifier la détente, on modifie la course de la glissière au moyen d'un mécanisme qui revient à modifier le rayon OT. On voit sur la figure qu'avec une course moindre de la glissière, l'admission a lieu pendant une rotation plus longue.

Comme la vapeur pénètre de nouveau dans la boîte quand le rayon OT passe par la position symétrique par rapport à M, M'_1 de celle qui interrompt l'admission, il faut qu'à ce moment la manivelle motrice ait dépassé la position OM_2 pour laquelle le tiroir principal ferme la lumière du cylindre qu'il découvrait à l'instant précédent, ce qui ne pourrait être réalisé pour une valeur trop petite de OT (en supposant l'angle MOT donné). On a ainsi une limite inférieure de la course de la glissière, correspondant à une valeur donnée de l'angle que font entre eux les rayons de la manivelle motrice et de l'excentrique OT. On fait souvent, du reste, cet angle voisin de 180°.

Ce dispositif est défectueux à cause

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

De l'augmentation de l'espace libre. On peut le réduire (fig 109) en supprimant la cloison sur laquelle se meut la glissière et en la posant directement sur le tiroir principal.

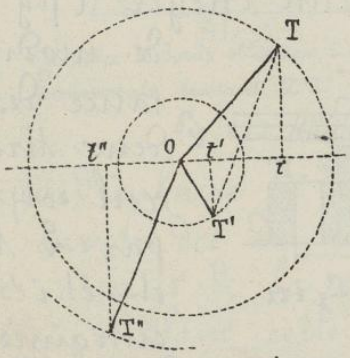


Montage de la glissière sur le dos du tiroir
Fig 109

Ce tiroir est alors muni de deux lumières spéciales, ajoutées au-delà de ses bords extérieurs, et la face supérieure en est dressée.

L'admission est interrompue quand la glissière vient fermer l'une de ces deux lumières spéciales du tiroir.

L'étude de la distribution exige la détermination du mouvement relatif des deux tiroirs. Nous le déterminerons approximativement en négligeant l'obliquité des bielles des tiroirs (fig 110) OT et OT' étant les rayons des 2 excentriques, dans une position quelconque, un point de l'un des tiroirs se meut comme la projection t de T et un point de l'autre, comme la projection t' de T', et le problème revient à étudier le mouvement de ces deux points, l'un par rapport à l'autre. Quand ces 2



Composition des excentriques
Fig 110

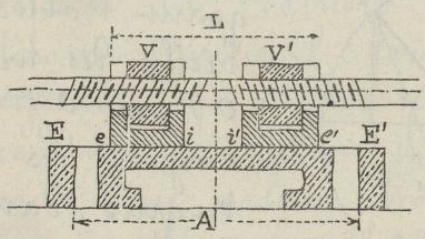
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

points coïncident, il y a fermeture. On en menant la droite $o\tau''$ égale et parallèle à $\tau\tau'$ et projetant le point τ'' en t'', la longueur ot'' est égale à tt'.

Le mouvement relatif de t' par rapport à t est donc le même quand le mouvement absolu de t''. Si donc E_1 représente la position du bord E_1 de la lumière supplémentaire, il y aura ouverture et fermeture pour les positions $o\tau''$ et $o\tau_1''$, et si l'excentrique $o\tau''$ convient avec une glissière qui se meut sur une plaque fixe, c'est en réalité l'excentrique $o\tau'$, diagonale du parallélogramme construit sur $o\tau$ et $o\tau''$ qui donne la même distribution, quand la glissière se meut sur le dos du tiroir.

On peut obtenir des variations dans la période d'admission grâce à plusieurs dispositifs.

La détente Meyer (fig. 111) permet de modifier la distance des bords des deux tiroirs. L'appareil est constitué par 2 taquets e i et e' i' qui sont entraînés par deux écrous V et V', à pas de vis de sens contraire vissés sur la tige de commande. Lorsqu'on tourne la tige, les écrous ne pouvant tourner puisqu'ils sont fixés au tiroir glissent tous deux en sens inverse, ce qui modifie la longueur ee'. Cette rotation

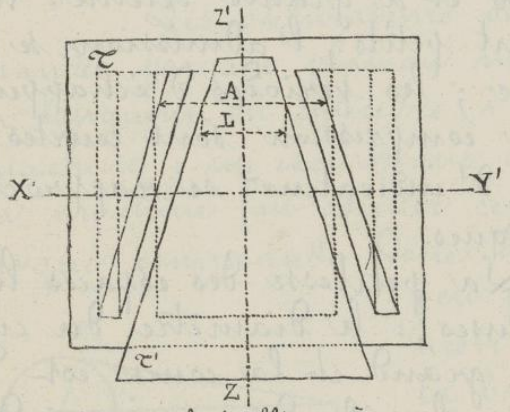


Détente Meyer Fig 111

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut se faire pendant la marche : la tige est reliée au mécanisme qui lui donne son mouvement de va et vient et d'autre part elle glisse dans un manchon carré fixe, qu'on peut faire tourner à volonté à l'aide d'un volant. Cet appareil permet d'obtenir dans de bonnes conditions une admission variable de part et d'autre d'une valeur moyenne quelconque.

Cette distribution a été modifiée par Rider (fig. 112).



Glissière à bords obliques, à manœuvre transversale, suivant ZZ'

Fig 112

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 qu'on déplace suivant une direction z z' perpendiculaire à x'y'. Les lumières ouvertes sur le dos du tiroir ont des bords parallèles à ceux de la plaque.

Sous cette forme simple, le dispositif ne serait pas commode ; mais imaginons qu'on enroule sur un cylindre de révolution autour de l'axe x'y' les deux surfaces planes du tiroir et de la plaque qui frottent l'une contre l'autre ; les bords obliques deviennent des hélices, et l'effet du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déplacement transversal s'obtient par une rotation de la plaque devenue cylindrique autour de son axe. Un faible déplacement angulaire du taquet cylindrique produit les variations de détente, qui exigent plusieurs tours de la vis à filets opposés de Meyer. Cet appareil peut être commandé par un régulateur.

Distribution Corliss. — Corliss s'est proposé de construire des machines à faible admission et à grande détente. Les espaces libres sont petits, l'admission se fait sans laminage ; les périodes d'échappement anticipé et de compression sont courtes. Le diagramme d'indicateur se rapproche des tracés théoriques.

La petitesse des espaces libres tient à deux causes : le diamètre du cylindre n'est pas grand et la course est longue, ce qui réduit le vide dû au jeu indispensable laissé par le piston à fond de course, et les lumières sont courtes.

La vapeur est distribuée par quatre obturateurs, un pour l'admission et un pour l'échappement à chaque bout du cylindre ; dans les machines horizontales, les distributeurs d'échappement sont placés à la partie inférieure pour assurer l'écoulement de l'eau condensée.

Ces distributeurs sont des tiroirs oscillant sur des tables cylindriques qui se projettent dans les coins du cylindre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

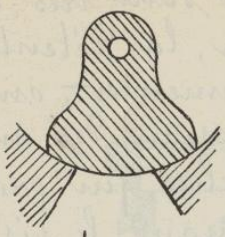


Fig. 113

Les axes d'oscillations des obturateurs (fig. 113) sont perpendiculaires à l'axe du cylindre. La pression de la vapeur ainsi que de petits ressorts appliquent sur sa table le distributeur, qui ne fait pas corps avec l'axe d'oscillation, mais peut s'en éloigner légèrement. Pour que l'obturateur d'échappement soit ainsi pressé contre sa table, il est monté à l'intérieur du cylindre dans l'espace libre.

Les obturateurs sont souvent commandés par un plateau monté au milieu de la longueur du cylindre, à l'extérieur de la machine ; un excentrique calé sur l'arbre de la machine fait osciller ce plateau. Cet excentrique commande donc les obturateurs à peu près comme un tiroir unique (fig. 114) : la barre d'excentrique commande le mouvement du point A, lequel est relié par des bielles aux distributeurs. 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.

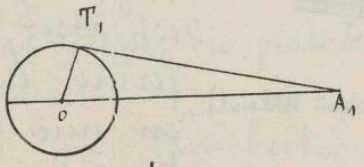
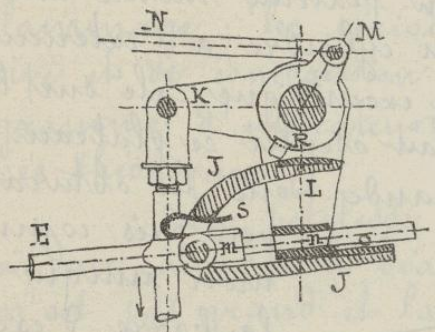


Fig. 114

L'angle d'avance de l'excentrique est généralement petit ; aussi comme avec le tiroir ordinaire, la période d'admission se prolonge pendant presque toute la course du piston, et les périodes d'échappement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

anticipé et de compression sont très courtes; avec une telle distribution, la détente est à peu près nulle. Pour l'augmenter, on ajoute aux distributeurs d'admission des mécanismes de rappel et des déclics qui provoquent une brusque fermeture quand le piston a parcouru une fraction de sa course : on réalise ainsi une courte période d'admission suivie d'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.

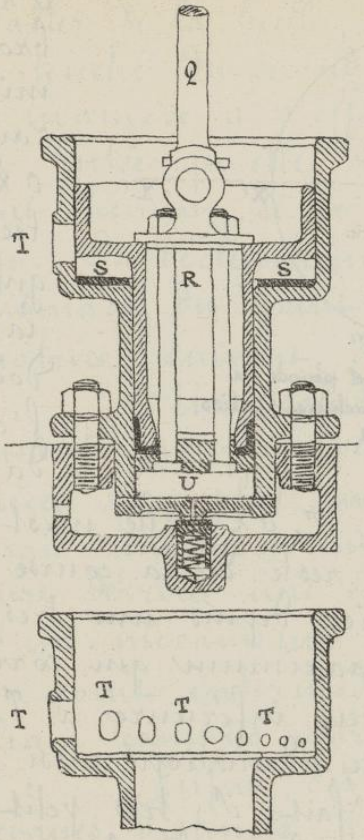


Déclic Harris Corliss (d'après Uhland)
Fig 115

C'est un ressort qui ferme le distributeur quand la rencontre d'une butée le déclenche (fig. 115). Ce ressort est assez fort pour fermer l'admission en une faible fraction de seconde.

Un tampon pneumatique (fig. 116) ou dash-pot arrête l'appareil, une fois la lumière fermée : il est constitué en principe par un piston qui descend dans un cylindre au moment où le déclenchement se produit : ce cylindre contient de l'air qui s'échappe par des trous T percés dans la paroi à des hauteurs différentes et dont le diamètre diminue à mesure qu'on s'abaisse; il résulte de cette disposition que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



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.

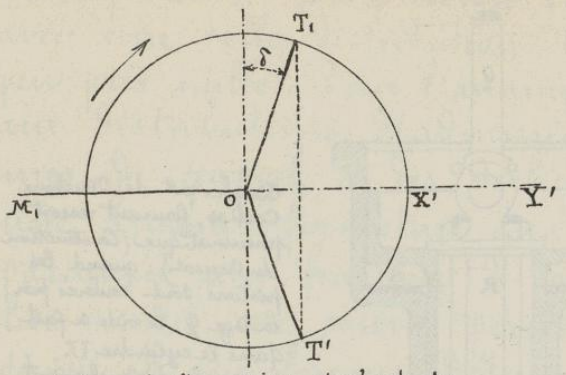
Fig 116

la vitesse du piston s'amortit progressivement.

La butée B n'est pas fixe ; elle peut être déplacée et le déclic par suite, fonctionne plus ou moins tard ; on peut ainsi modifier la période d'admission et faire varier le travail produit par coup de piston.

Le déclenchement du déclic (fig. 117) n'est possible que pendant le parcours de l'angle TOX' par le rayon de l'excentrique : les pièces commandées par l'excentrique prennent en effet leurs plus grands écarts quand le rayon OT atteint la direction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Calage de l'excentrique et période de déclanchement des Machines Corliss.
Fig 117

O X', puis rebroussent chemin quand ce rayon dépasse O X'. Si la butée est trop éloignée pour que la pièce qu'elle doit déclencher l'atteigne pendant ce parcours angulaire T, O X', elle n'est plus rencontrée pendant le reste de la course : l'admission peut varier depuis une très faible valeur jusqu'à un maximum qui correspond à une rotation un peu inférieure à T, O X'; c'est pour avoir une admission aussi grande que possible qu'on fait δ très petit et elle a lieu au plus pendant les 30 ou 40 centièmes environ de la course ce qui suffit amplement ; en marche normale l'admission ne dépasse guère 15 ou 20 centièmes.

Dans le cas des 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.

Ce double déclenchement peut s'obtenir en munissant la bielle qui commande l'obturateur d'admission de deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déclics pouvant fonctionner l'un pendant l'aller de la bielle, l'autre pendant le retour; la touche du second déclic doit être articulée de manière à s'effacer pendant l'aller, sous la butée qu'elle rencontrera en rebroussant chemin, si le premier déclic n'a pas agi. Ce déclenchement paraît précaire au voisinage du point mort de la manivelle motrice, suivant oX'.

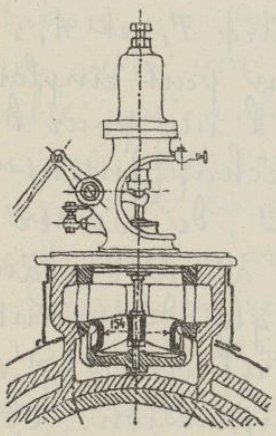
Une solution qui paraît plus satisfaisante en principe, consiste à donner aux pièces non plus un mouvement alternatif mais un mouvement continu et de leur faire décrire une courbe fermée au moyen d'un mécanisme qui revient à les lier à un point intermédiaire de la barre d'excentrique compris entre T_1 et A_1.

Enfin, on peut employer deux excentriques distincts, l'un pour l'admission, l'autre pour l'échappement. On n'est plus obligé, alors, de donner à l'excentrique un très petit angle d'avance, et on peut fixer cet angle de manière à réaliser à l'aide des distributeurs d'échappement une certaine compression. Cette compression peut être utile pour compenser l'effet des espaces libres, qui conservent une certaine importance, et pour éviter l'application brusque de la pleine pression de la vapeur sur le piston. D'autre part avec la fermeture par déclenchement l'excentrique d'admission peut avoir une avance angulaire δ négative.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Distribution par soupapes. — Les soupapes sont parfois employées pour distribuer la vapeur dans les machines. Elles peuvent ouvrir ou fermer des orifices, mais ne peuvent établir des communications multiples comme les tiroirs. Elles ne présentent pas de frottements et se prêtent bien à l'emploi de la vapeur surchauffée.

La soupape repose sur un siège de forme conique ou plan : l'angle au sommet du cône est souvent droit. Si la soupape était simple, il faudrait une très grande force pour la soulever. Aussi emploie-t-on les soupapes à double siège (fig 118) constituées par l'ensemble de deux soupapes réunies par un tube : la vapeur exerce sa pression des 2 côtés et la charge est équilibrée. Le siège inférieur est souvent un peu plus étroit que le siège supérieur, ce qui lui permet de passer à travers l'ouverture supérieure, et la pression qui résulte de la différence des diamètres est utile pour assurer la portée.



Soupape à double siège type tubulaire avec ressort et dash-pot (dans l'enveloppe cylindrique supérieure)
Fig 118

La soupape de Cornouailles, antérieure à la précédente, peut cependant être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

considérée comme en étant dérivée par inversion cinématique : les sièges fixes sont à l'intérieur de l'obturateur constitués par une pièce mobile en forme de cloche.

Le mécanisme de commande doit fermer rapidement les soupapes, mais sans choc violent sur le siège. On est obligé de freiner, mais pendant un temps très court. Pour régler la marche des soupapes, il est bon de se rendre compte de leur fonctionnement, ce qui s'effectue à l'aide d'appareils analogues à l'indicateur de Watt donnant la course verticale de la soupape correspondant à la course du piston.

La fermeture brusque s'obtient au moyen d'un ressort qui tend constamment à fermer la soupape ; le freinage se fait à l'aide d'un dash pot dont la disposition a été indiquée plus haut. On a employé également la vapeur elle même (fig. 119) qui, se trouvant au moment de la fermeture, entre la soupape et son siège amortit le choc.



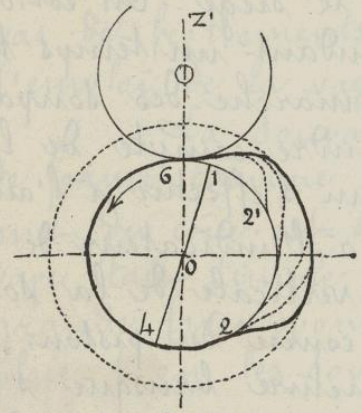
Fig. 119

D'une façon générale, on peut dire que la construction d'une soupape doit être exécutée avec une grande précision. Quand cette construction est soignée, on a une bonne distribution, avec des fermetures étanches, en dépensant peu de travail en frottements.

La commande est effectuée au moyen d'un arbre auxiliaire parallèle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'axe du cylindre et tournant à la même vitesse que l'arbre principal qui le commande par roues d'angle. Cet arbre porte des cames qui manœuvrent les tiges des soupapes, en agissant sur des boutons sphériques. Chaque came présente deux parties circulaires de rayon différent, raccordées par une courbe à inflexion. Une soupape est ainsi soulevée pendant que l'arbre tourne de l'angle 6 o 2 (fig. 120).



Cames pour la soupape d'admission de la distribution Anderson
Fig 120

Ce dispositif se prête à l'admission variable : il suffit d'imaginer une série de cames voisines présentant des angles 6.o.2 ayant tous un côté o 6 commun, mais un côté o.2 variable ; en substituant ces cames l'une à l'autre, on a bien des périodes d'admission variables.

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.

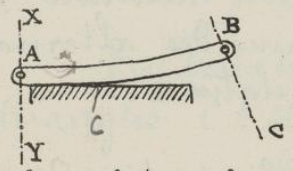
En réduisant l'angle 6.o.2, on arrive à un point mort où il est nul au-delà, on peut reproduire un tracé symétrique correspondant à la marche en sens contraire. Les manchons qui commandent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les cames d'échappement se déplacent avec les deux autres ; mais ces cames ont toutes même profil pour un sens donné de marche.

On peut également commander les soupapes par des excentriques : il peut y en avoir 4 ou 2 ; dans ce cas chaque excentrique doit donner lieu à deux mouvements rectilignes distincts, l'un relatif à l'échappement et l'autre à l'admission.

On applique souvent pour la transmission le levier roulant (fig. 121) formé par une tige AB légèrement courbe qui s'appuie constamment sur un plan. Le mécanisme de commande est fixé en B, le point d'appui C du levier se déplace jusqu'en C', de sorte que le bras de levier AC augmente constamment ; la soupape se déplace donc lentement au début de sa course et rapidement à la fin. Inversement quand le point B remonte la soupape se ferme presque complètement pendant un temps très court, et la fin de la fermeture se fait lentement.



Levier roulant pour la commande d'une soupape suivant XY
fig 121

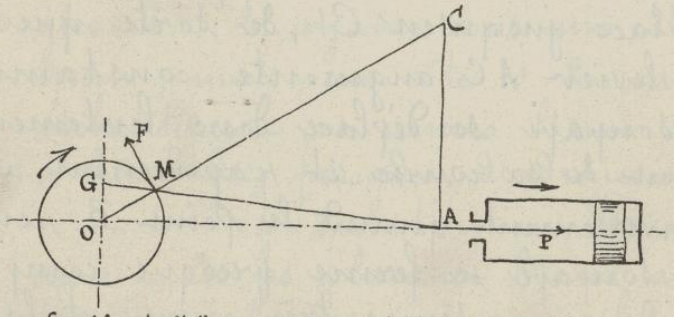
On emploie enfin des mécanismes à déclic, avec butée variable par l'action d'un régulateur. La soupape d'admission est soulevée par un excentrique jusqu'à ce qu'un déclic la laisse échapper.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3. – Organes de Régularisation.

Certaines machines sont sous la surveillance constante d'un conducteur : c'est le cas des locomotives, des bateaux, des treuils, etc... ; leur mouvement est réglé à la main. Mais souvent on tient à ce qu'une machine marche à une vitesse constante, c'est à dire qu'elle fasse toujours le même nombre de tours par minute et que, pendant un tour, sa vitesse angulaire reste constante : cela est nécessaire dans le cas des machines conduisant des alternateurs ou employées dans les filatures.

a) Régularisation du mouvement par tour. – Dans une machine à piston, le moment moteur est variable.



Equilibre de l'effort du piston et de la résistance à l'extrémité de la manivelle.

Fig 122

La force agissant sur le piston est (fig. 122)

$$F = S(p-p')$$

en supposant égales les deux surfaces du piston, ce qui n'a d'ailleurs pas lieu s'il n'y a pas de contre tige. Cette force F est la force motrice.

Pour avoir le moment moteur du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

système supposé en équilibre, il suffit d'appliquer le théorème du travail virtuel.

Soit F' la force tangentielle appliquée en M à l'extrémité de la manivelle, qui fait équilibre à une traction due à une poussée du piston. Un déplacement infinitésimal de la bielle AM est assimilable à une rotation autour du centre instantané C, intersection de la manivelle OM prolongée et de la normale en A à l'axe du cylindre. Le théorème du travail virtuel donne

$$F' \times CM = F \times CA$$

En tenant compte de la similitude des triangles CAM et OCM on a :

$$\frac{CM}{CA} = \frac{R}{OG} = \frac{F}{F'}$$

d'où

$$F' = \frac{F}{R} \times OG$$

et le moment moteur est $F' \times OG$; comme F est constant, ce moment varie proportionnellement à OG

Pendant le mouvement, cette relation entre la force motrice F' et celle qu'on peut supposer appliquée à l'extrémité de la manivelle n'existe plus ; elle n'est vraie qu'en équilibre statique ; pendant le mouvement, il faut tenir compte de l'inertie des pièces. Dans une étude rigoureuse du problème, il faudrait considérer les trois espèces de mouvement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que peuvent prendre les pièces : un mouvement de rotation (manivelle) ; un mouvement rectiligne alternatif (piston et sa tige) et enfin un mouvement curviligne compliqué (bielle).

Ce dernier mouvement peut être simplifié en imaginant que l'on concentre en A 1/3 du poids de la bielle et les 2/3 en M.

L'accélération de ces masses exige une certaine force ; c'est une fraction de F'. Lorsque le mouvement est, à proprement parler, accéléré, cette fraction de la force F' est absorbée ; pendant le ralentissement, les masses restituent une force qui s'ajoute à F'.

Négligeant comme il vient d'être dit l'action précise du corps de la bielle, si M est la masse à mouvement rectiligne et j son accélération, il faut pour calculer la force F' perpendiculaire à la manivelle substituer à la force F', la force F'Mj.

On est ainsi ramené au calcul de l'accélération j pour chaque position du piston. Nous supposerons que l'arbre tourne avec une vitesse angulaire uniforme, ce qui n'a évidemment pas lieu, puisque ce sont précisément les variations de la vitesse angulaire que l'on cherche à corriger. Nous négligerons d'abord l'obliquité de la bielle (fig. 123). La vitesse de M est alors $R\omega$ et celle de sa projection est :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$v = R\omega \sin\alpha = R\omega \sin \omega t$$

d'où :

$$j = \frac{dv}{dt} = R\omega^2 \cos\alpha$$

$$Mj = M\omega^2 x \cos\alpha$$

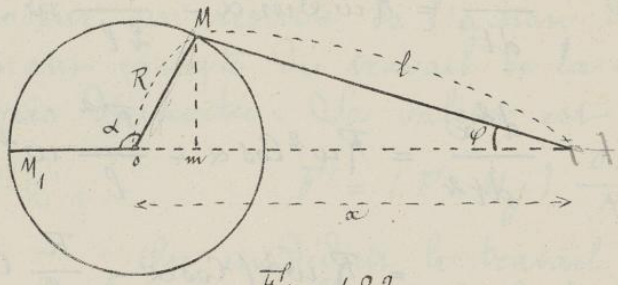


Fig. 123.

Cette expression représente la projection de la force centrifuge en supposant la masse du piston concentrée en M. On voit que les maxima de cette force sont aux points morts.

On peut maintenant tenir compte de l'obliquité de la bielle. On voit immédiatement que

$$\begin{cases} x = l\cos\varphi - R\cos\alpha \\ l\sin\varphi = R\sin\alpha \end{cases}$$

d'où on tire :

$$\cos\varphi = \sqrt{1 - \frac{R^2}{l^2}\sin^2\alpha}$$

et en remarquant que $\frac{R^2}{l^2}$ est au plus égal à 1/25 (sauf exceptions), on peut écrire avec une approximation bien suffisante :

$$\cos^2\varphi = 1 - \frac{R^2}{2l^2}\sin^2\alpha$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où :

$$x = l - \frac{R^2}{2l}\sin\alpha - R\cos\alpha$$

$$= -R\cos\alpha + l - \frac{R^2}{4l}(1 - \cos 2\alpha)$$

$$\frac{dx}{dt} = R\omega\sin\alpha - \frac{R^2}{2l}\omega\sin 2\alpha$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = R\omega^2\cos\alpha - \frac{R^2}{l}\omega^2\cos 2\alpha$$

$$= R\omega^2\left(\cos\alpha - \frac{R}{l}\cos 2\alpha\right)$$

Cette valeur de l'accélération peut être considérée comme la somme de deux autres : le premier terme est la projection sur OM, de l'accélération due à la force centrifuge agissant sur la masse concentrée en M ; le deuxième terme représente la même accélération, mais appliquée en un point M' situé à l'extrémité d'une manivelle fictive de rayon

$$R \times \frac{R'}{l}$$

et tournant deux fois plus vite que la première.

Ce terme correctif change de sens d'un point mort à l'autre. En prenant un terme de plus dans le développement en série du radical, on aurait un autre terme correctif qui représenterait la même accélération que précédemment, mais appliquée à une troisième manivelle plus

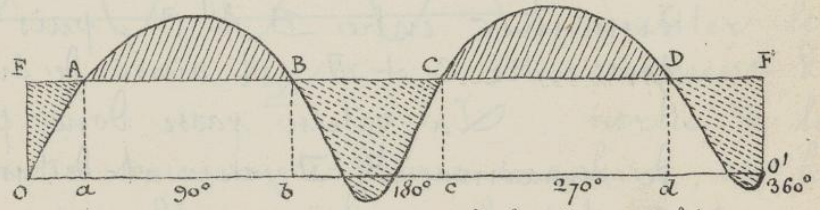
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

petite que les précédentes et tournant quatre fois plus vite que la première.

Volants. — On a donc déterminé, pour chaque position de la manivelle d'une machine pendant un tour, l'effort tangentiel moteur qui résulte de l'action du piston en tenant compte du travail de la vapeur et des forces d'inertie. Sa valeur est

$$F' = (F - Mj)\frac{OG}{R}$$

On en déduit le travail produit, en multipliant cet effort par le trajet du centre de la manivelle. Le développement sur une ligne droite ox de ce trajet circulaire, (fig. 124) avec des ordonnées égales aux diverses valeurs de F' dans une certaine courbe.



Efforts, moteur et résistant, sur l'arbre d'une machine à un cylindre

Fig 124

L'aire comprise entre cette courbe et l'axe ox mesure le travail ; les portions de la surface qui descendent au-dessous de cet axe représentent un travail résistant à déduire du reste. Elles correspondent aux phases de compression. La figure s'applique au cylindre unique d'une machine à double effet.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le travail résistant des appareils commandés, auquel s'ajoute celui des résistances passives du moteur, peut de même varier suivant une loi comme pendant un tour : une surface limitée par une courbe et par l'axe Ox le représente. Si nous le supposons uniforme, il est représenté par un rectangle de hauteur OF.

Dans la marche à l'état de régime, le travail moteur pendant un tour est égal au travail résistant : la surface du rectangle est donc égale à la valeur algébrique de la surface limitée par la courbe O A M B C D O'.

La force motrice est donc tantôt plus grande, tantôt plus petite que la force résistante. Par suite, entre les points A et B, la vitesse va augmenter ; elle va diminuer entre B et C, puis réaugmenter entre C et D, et ainsi de suite.

La vitesse passe donc par une série de maxima B, D, etc... et de minima A, C, etc...

Le théorème des forces vives permet de calculer les variations de la vitesse depuis un minimum, jusqu'à un maximum, ou entre deux positions quelconques de la machine, quand on connaît toutes les masses en mouvement.

Soit T l'excès du travail moteur sur le travail résistant, on a l'égalité :

$$T = \frac{1}{2} \sum m (v'^2 - v^2) = \frac{1}{2} (\omega'^2 - \omega^2) \sum m r^2$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$= \omega (\omega'' - \omega') \Sigma m r^2$$

ω étant la vitesse moyenne.

On voit que la différence

$$(\omega'' - \omega')$$

ne dépasse pas une certaine valeur. Or ω et ω sont donnés ; donc pour diminuer la variation de vitesse angulaire, il faut augmenter le moment d'inertie.

Cette méthode s'applique aux machines à 2 ou 3 cylindres : la figure s'applique au cas où les deux manivelles seraient à angle droit : il y a à chaque instant deux efforts moteurs qui s'ajoutent (fig. 125).

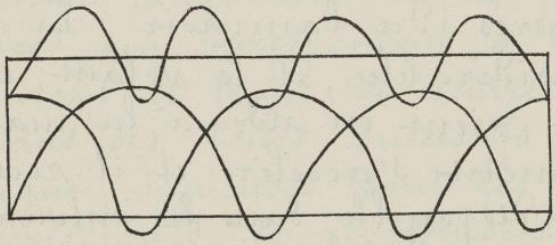


Fig. 125.

Pour augmenter le moment d'inertie de la partie tournante d'une machine, on la munit d'un volant, dont on peut augmenter soit la masse, soit le rayon.

Comme le poids d'un volant augmente les frottements de l'arbre moteur sur ses coussinets, il semble qu'on ait intérêt à prendre des volants légers, à grand rayon. On est alors limité par la difficulté d'installation d'une trop grande roue et surtout par la nécessité de la faire assez résistante ; la jante est faite en fonte, et, pour ne pas la faire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

travailler trop fortement à la traction, on ne dépasse pas à la périphérie la vitesse de 30 mètres par seconde.

On peut faire des volants en acier fondu qui peuvent recevoir des vitesses notablement plus grandes mais ils ne sont pas encore entrés dans la pratique.

Les volants ne servent pas seulement de régulateurs de vitesse angulaire, mais aussi d'accumulateurs de travail. Cet emploi est fréquent dans les machines de laminoirs, où les résistances autres que les frottements, sont intermittentes : pendant que la barre se profile entre les cannelures du laminoir, la résistance est considérable, et le volant, en ralentissant, vient en aide à la machine, son mouvement s'accélère et il recueille le travail disponible dans les intervalles entre les passages des barres.

Pour emmagasiner ainsi un travail considérable, il faut non seulement donner une grande masse au volant—, mais surtout lui imprimer une grande vitesse, inadmissible avec la fonte ; en construisant le volant en fer, au lieu de le fondre, ou bien en formant la jante avec un fil d'acier enroulé sur un tambour en tôle, on peut atteindre des vitesses bien plus grandes à la périphérie de la roue.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

61. — Régularisation de la vitesse moyenne. — Le volant ne peut empêcher l'accélération ou le ralentissement qui résultent du défaut d'équilibre entre la puissance motrice et la résistance. Pour éviter cette variation, quand la résistance vient à croître ou à diminuer, il faut modifier de même la puissance : c'est le rôle des régulateurs, qui augmentent ou réduisent le travail moteur de la vapeur par tour de la machine.

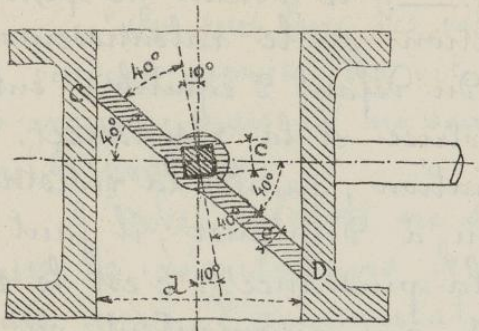
On représente les variations de la vitesse angulaire en les portant en ordonnées, qui correspondent à des abscisses figurant le trajet du centre de la manivelle dans ses tours successifs ; on obtient une ligne sinueuse dont les petites oscillations périodiques se reproduisent à chaque tour, et peuvent être réduites par l'augmentation du volant : grâce à l'action du régulateur, cette ligne est contenue entre deux limites plus ou moins rapprochées, mais en tout cas, plus écartées que les deux limites données par le volant pendant un seul tour.

Le régulateur fait varier le travail, soit en réduisant la pression de la vapeur amenée au cylindre, soit en modifiant la longueur de l'admission.

Dans les appareils de première espèce, la pression de la vapeur est réduite par un papillon de forme elliptique (fig. 126)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tournant autour d'un axe, qui se trouve dans la conduite d'amenée de la vapeur.



Papillon commandé par un régulateur (d'après G. Marié)

Fig 126

Les variations de laminage de la vapeur produisent des variations de pression.

Lorsque ces appareils sont voisins de leur fermeture complète, un petit déplacement produit une variation considérable de la pression, tandis qu'ouverts en grand ils sont bien moins sensibles.

On emploie dans le même but des soupapes équilibrées qu'un faible effort suffit à manœuvrer. Ces réglages peuvent être faits à la main et donnent des résultats satisfaisants dans le cas fréquent où le travail d'un moteur ne doit pas varier à chaque instant entre des limites étendues.

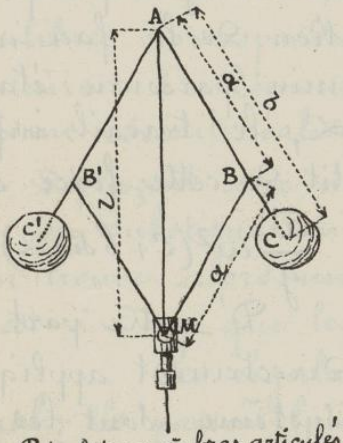
L'inconvénient de ces dispositifs vient de ce qu'ils ne modifient pas instantanément la pression en aval, car une certaine quantité de vapeur a dépassé le papillon au moment où il agit. C'est cette même cause de retard qui se manifeste dans une machine Corliss; dès que l'obturateur d'admission sur un côté du piston vient de se refermer, la vapeur est engagée dans le cylindre et y produit un travail

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déterminé ; il n'y a plus de réglage que sur l'admission suivante, de l'autre côté du piston.

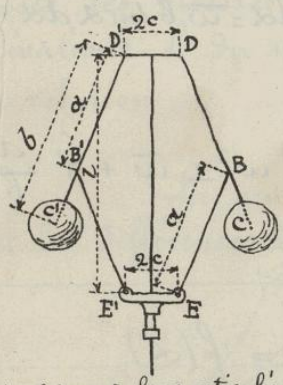
Il importe que le volume compris entre le papillon et le cylindre soit aussi réduit que possible.

Avec les deux modes de régulation on emploie surtout les régulateurs à force centrifuge : (fig. 127, 128, 129) ils sont constitués par des masses fixées à l'extrémité de bras articulés sur un axe vertical. Ce pendule conique est rattaché à un manchon qui glisse sur l'axe et s'élève à mesure que les boules s'écartent de la verticale. Par construction, les longueurs des deux tiges AB et BC sont souvent égales.



Régulateur à bras articulés sur l'axe vertical tournant

Fig 127



Régulateur à bras articulés à la distance c, de l'axe vertical tournant

Fig 128

On peut facilement trouver la position d'équilibre relatif de l'appareil, sous l'action de la pesanteur et de la force centrifuge, pour une vitesse connue de l'axe vertical qui est entraîné par le moteur. Nous négligerons le poids des tiges.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La force d'inertie d'entraînement qui se réduit à la force centrifuge est

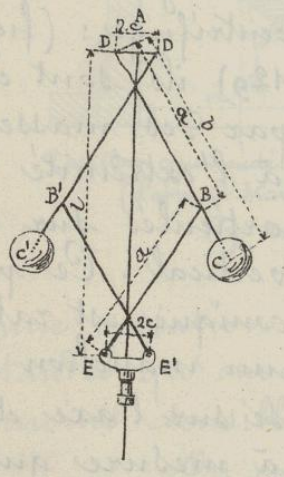
$$\frac{\varpi}{g}\omega^2(c+b\sin\alpha)$$

Le chemin infiniment petit que décrit son point d'application est

$$-b\times d\alpha,$$

et l'angle que fait la direction de la face avec le chemin parcouru étant égal a α, le travail infiniment petit de cette force est:

$$\frac{\varpi}{g}\omega^2(c+b\sin\alpha)\,b.d\alpha\cos\alpha$$



Régulateur à bras croisés

Fig 129

D'autre part les forces directement appliquées au système sont les poids ϖ et Φ et leurs travaux virtuels sont:

$$\varpi\, b\, d\alpha\sin\alpha+\frac{\Phi'}{2}.2a\sin\alpha.d\alpha.$$

D'où l'égalité:

$$\frac{\varpi}{g}\omega^2(c+b\sin\alpha)b.\cos\alpha.d\alpha=\varpi b\sin\alpha\,d\alpha+\Phi a\sin\alpha.d\alpha$$

ou:

$$\frac{\varpi}{g}\,\frac{b\sin\alpha+c}{\operatorname{tg}\alpha}\,\omega^2=\varpi+\Phi\frac{a}{b}.$$

Si on pose

$$\frac{b\sin\alpha+c}{\operatorname{tg}\alpha}=f(\alpha)$$

on aura:

$$\omega^2=\frac{g}{\varpi}\times\frac{\varpi+\Phi\frac{a}{b}}{f\alpha}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Donc à une valeur donnée de α correspond une valeur de la vitesse angulaire du système ; et aux valeurs extrêmes α_1 et α_2 de l'angle α correspondent des valeurs ω_1 et ω_2 ; on détermine les éléments du régulateur de façon à rapprocher ces deux valeurs des vitesses extrêmes. On a même cherché à obtenir des régulateurs isochrones, dont toutes les positions d'équilibre correspondent à une même vitesse angulaire. On démontre aisément que l'isochronisme serait réalisé si le centre de la boule se déplaçait sur une parabole ; à cette parabole on substitue un arc de cercle osculateur. On trouve alors une valeur négative pour C, c'est-à-dire que les bras sont croisés.

Ces régulateurs isochrones fonctionnent mal ; ils passent facilement d'une extrémité à l'autre de leur course, donnant ainsi d'énormes variations du travail moteur par coup de piston.

On peut représenter graphiquement le fonctionnement du régulateur ; il suffit de porter en abscisses les vitesses angulaires et en ordonnées les élévations l du manchon, liées à l'angle α par la relation

$$l = 2a(1 - \cos\alpha)$$

La course totale du manchon, soit L, est la différence des deux valeurs extrêmes l_1 et l_2 correspondant aux limites de l'angle α (fig. 130).

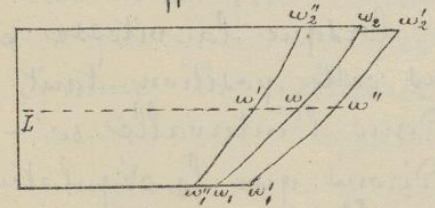


Fig. 130.

En réalité, cette courbe ainsi que l'équation obtenue précédemment représentent la relation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moyenne entre l'angle α et la vitesse angulaire ω.

Le manchon n'est pas soumis à la force φ, mais à une force tantôt plus grande, tantôt plus faible ; en effet, soit K la résistance, à peu près constante sur un appareil donné, provenant des frottements du manchon et des organes de réglage qu'il doit déplacer. Quand le manchon descend il est soumis à la force $\varphi - K$; quand il monte, c'est la force $\varphi + K$ qui agit sur lui.

L'équation qui lie ω^2 a α se décompose donc en deux équations qui sont:

$$\omega^2 = \frac{\overline{\omega} + \frac{a}{c}(\varphi \pm K)}{f(\alpha)} \times \frac{g'}{\overline{\omega}}$$

Pour chaque valeur de α, on a deux valeurs de la vitesse angulaire correspondant à $\varphi + K$ et à $\varphi - K$, c'est-à-dire à l'élévation et à l'abaissement du manchon, ou bien à l'accélération et au ralentissement de l'appareil. On obtient alors deux nouvelles courbes, situées de part et d'autre de la courbe moyenne correspondant à une résistance K nulle

Si le manchon se trouve dans une certaine position lorsque la vitesse est ω, il ne quittera pas cette position tant que la vitesse restera dans l'intervalle $\omega' - \omega''$.

Nous dirons que le régulateur est d'autant plus sensible que ces deux courbes sont plus rapprochées, la sensibilité peut être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

définie par le rapport

$$\frac{\omega}{\omega''-\omega'}$$

ω étant la vitesse moyenne.

Cette expression dépend non-seulement du régulateur, mais aussi des pièces qu'il commande.

On a

$$\frac{\omega}{\omega''-\omega'} = \frac{1}{2}\,\frac{\omega'+\omega''}{\omega''-\omega'} = \frac{1}{2}\,\frac{(\omega'+\omega'')^2}{\omega''^2-\omega'^2}$$

et en remarquant que ω' et ω'' diffèrent peu l'un de l'autre on peut mettre ce rapport sous la forme :

$$\frac{\omega'^2+\omega''^2}{\omega''^2-\omega'^2} = \frac{2\left(\overline{\omega}+\frac{a}{b}\varphi\right)}{2\,\frac{a}{b}\,R} = \frac{\overline{\omega}+\frac{a}{b}\varphi}{\frac{a}{b}\,R}$$

car en supposant que ω'' diffère infiniment peu de ω', la transformation faite sur cette expression est vraie, à un infiniment petit près du deuxième ordre.

On voit que pour augmenter la sensibilité on peut augmenter $\overline{\omega}$, et c'est ce qui est réalisé dans le régulateur de Watt, on augmente φ, et c'est ce qui caractérise le régulateur de Porter. Cette deuxième solution est souvent préférable à la première, car il est plus commode d'accroître φ pour ne pas faire tourner de trop grosses boules. Comme la résistance des mécanismes commandés par l'appareil s'ajoute au poids du manchon ou s'en retranche, on voit immédiatement sans calcul qu'elle trouble le fonctionnement de l'appareil d'autant moins que ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

poids est plus fort. En augmentant P il est nécessaire d'augmenter ω ; en multipliant convenablement la vitesse angulaire de l'arbre de la machine pour la commande du régulateur. Le poids du manchon peut être remplacé par l'action d'un ressort moins encombrant que le manchon, et l'on n'est plus obligé de placer verticalement l'arbre du régulateur ; le système est donc applicable à des machines mobiles, et peut être calé facilement au bout d'un arbre horizontal, disposition commode quand la machine tourne vite.

Dans plusieurs modèles, le poids P ou le ressort qui en tient lieu, ne sont pas montés sur l'axe du régulateur, mais en un point quelconque du système de tringles: cette disposition permet de faire varier commodément le poids P ou la tension du ressort, suivant les applications du régulateur, de manière à réaliser la meilleure marche; ce système donne lieu à des frottements plus considérables, l'équilibre des forces s'exerçant entre des pièces, les unes tournantes, les autres fixes.

Dans une étude plus approchée du régulateur, il faut tenir compte de ce que les boules n'occupent pas à chaque instant la position qui correspond à la vitesse angulaire dans l'équilibre relatif. L'amplitude de la déformation du régulateur est augmentée par l'inertie radiale du système, qui dépasse la position d'équilibre correspondant à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nouvelle vitesse, puis oscille en deçà et au-delà de cette position. Ce mouvement ne dépend pas seulement du régulateur, mais aussi du système qu'il commande, du moteur dont il gouverne la marche, et même des appareils que ce moteur actionne. En tout cas, il importe que ces oscillations aient une amplitude aussi faible que possible, et qu'elles s'éteignent rapidement. On emploie parfois, dans ce but un frein à huile; un piston se meut dans un cylindre rempli d'huile; la partie supérieure et la partie inférieure du corps cylindrique sont reliées par un tube latéral, présentant un étranglement qui s'oppose aux déplacements brusques sans trop gêner le fonctionnement normal.

Dans le cas des machines à expansion multiple un régulateur ordinaire n'est pas suffisant; nous avons déjà dit au début de ce chapitre que l'action du régulateur devait être prompte, afin que la machine n'ait pas le temps de prendre des écarts notables de vitesse, qui produiraient des oscillations à longue période. C'est précisément ce qui a lieu dans une machine à plusieurs cylindres, avec réservoirs intermédiaires, qui ne possède qu'un régulateur avant l'admission au premier cylindre; la quantité de vapeur engagée dans la machine et qui doit y terminer son évolution est considérable, et la machine fait souvent plusieurs tours avant que la pression ne se soit modifiée dans le troisième cylindre.

On n'évite cet effet que par une action

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

simultanée sur l'admission, dans chacun des cylindres.

Régulateurs agissant sur le calage de l'excentrique. — Beaucoup de machines à rotation rapide ont un tiroir commandé par un excentrique à calage variable, en relation avec un régulateur qui diminue le rayon de l'excentrique et augmente l'avance angulaire quand la vitesse s'accroît. Ces régulateurs se composent de ressorts et de masses pesantes placées dans une poulie calée sur l'arbre de la machine.

Le centre de l'excentrique peut se déplacer (fig. 131) suivant un arc de cercle $T_1 T_0$, la poulie d'excentrique reliée à un cercle K est sollicitée par une bielle AB, tirée par une masse M, qui peut pivoter autour d'un axe P. Cette masse est attirée vers le centre par un ressort R, et elle prend pour chaque vitesse de rotation de la machine, une position d'équilibre sous l'action de la force centrifuge et du ressort antagoniste fixé en D, caractérisée par l'égalité des moments de la force centrifuge et de la tension du ressort par rapport à l'articulation de la masse.

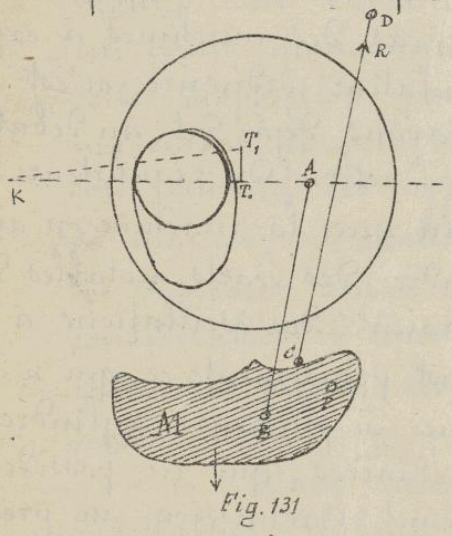


Fig. 131

On voit que quand la vitesse croît, le centre de l'excentrique se rapproche de T_0. Les trois points K, P, D, fixes dans le mouvement relatif,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

se trouvent dans le volant ou sur un plateau spécial calé sur l'arbre.

On ajoute une deuxième masse égale à la première ; munie également d'un ressort, afin de doubler les forces en jeu et d'éviter le balourd de l'arbre.

Cet appareil doit mettre en jeu des forces considérables pour vaincre les frottements et la force d'inertie du tiroir. On emploie généralement des tiroirs équilibrés, le plus souvent cylindriques, dont le frottement est faible. On s'arrange également de façon à ce que le frottement de la tige dans la garniture ne soit pas trop fort, et que la masse du tiroir, de sa tige et de sa bielle soit petite, pour limiter les forces d'inertie. Enfin, on adjoint à l'appareil un frein à huile, qui empêche les déplacements rapides de l'excentrique pendant un tour de la machine.

4. Dispositions des organes dans quelques machines particulières.

---

a).— *Machines à grande vitesse.*— La vitesse des machines est généralement comprise entre 60 et 300 tours par minute.

Les machines rapides offrent des avantages sur les machines lentes à puissance égale, leur encombrement est moindre ; l'effet des parois est diminué. En revanche le laminage de la vapeur y est plus considérable, et on est obligé de faire des distributions par tiroir ; de sorte que la consommation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de vapeur est plus considérable que dans les machines lentes ; leur entretien est plus onéreux et elles s'usent plus vite malgré les progrès faits par les appareils de graissage.

On emploie notamment le graissage sous pression : l'huile est envoyée par une pompe entre les surfaces frottantes. Les organes frottants sont placés dans un carter qui recueille l'huile.

Le graissage sous pression a le défaut d'être précaire ; si la distribution d'huile cesse dans une partie de la machine, celle-ci est exposée à des avaries graves.

Ces machines à grande vitesse sont employées pour actionner des dynamos, les deux machines sont montées sur le même arbre et on évite de cette façon les intermédiaires de transmission. Signalons à propos des machines rapides, une application intéressante des machines à simple effet : Dans les machines à double effet, les efforts changent de sens pendant un tour ; comme les articulations des bielles offrent toujours un peu de jeu, si la machine est rapide, ce changement de sens des efforts est accompagné de chocs qui s'aggravent par l'usure des pièces. Au contraire, avec la machine à 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 deuxième moitié de la course de retour,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

car les forces d'inertie changent toujours de sens dans un même tour de la machine.

On pourra éviter les chocs avec une machine à échappement libre et à forte compression ; lorsqu'on fait usage d'un condenseur on augmente la contre-pression à l'aide d'un matelas d'air refoulé par un piston spécial.

b) Machines à cylindres oscillants. — Dans ces machines la tige du piston (fig. 132) s'articule directement sur le bouton de la manivelle, et le cylindre oscille sur deux tourillons, ces tourillons sont creux et servent à l'arrivée et au départ de la vapeur ; des garnitures s'opposent aux fuites ; un renvoi spécial commande le tiroir porté par le cylindre oscillant.

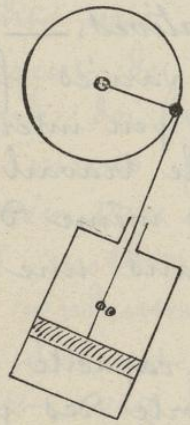


Fig. 132

Cette machine qui a l'avantage de tenir peu de place, puisqu'elle ne comporte pas de bielle, a été utilisée dans la marine.

Reulaux a montré qu'au point de vue cinémati. que il n'y avait aucune différence essentielle entre cette machine et une machine ordinaire ; tandis que dans ce deuxième cas, la manivelle a tenu autour du point (1), est articulée en deux sur la bielle b, articulée en trois par le piston C (fig. 133) qui se déplace d'un mouvement

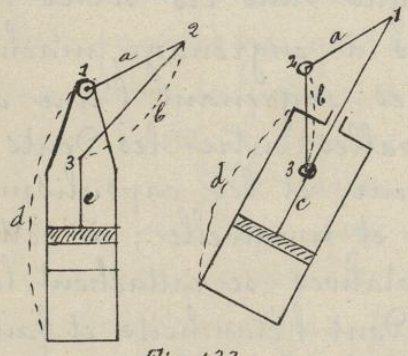


Fig. 133.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alternatif par rapport au bâti fixe d, Dans le cas qui nous occupe, on peut dire que la manivelle tourne autour du point 2, que la pièce 6 est fixe et que 6 se déplace d'un mouvement alternatif par rapport à 6. La disposition générale des organes diffère ; mais les mouvements des pièces les unes par rapport aux autres restent les mêmes.

Machines rotatives. — Ces machines de formes très variées forment une classe de moteurs peu intéressants en pratique. En théorie, le travail de la vapeur est exactement le même dans une machine rotative et dans une machine à piston.

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 les cylindres.

On distingue dans ces sortes de machines les capsulismes à engrenage, machines formées par deux roues engrenant l'une avec l'autre avec des intervalles entre les dents, destinés à recevoir la vapeur, et les capsulismes dérivés du système bielle et manivelle ; à cette catégorie des machines rotatives se rattachent les machines dites "à disque" dont l'étanchéité est faible et qui ne servent utilement que lorsque les différences de pression mises en jeu sont faibles. On les emploie parfois comme compteurs d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

5.– Organes de Condensation.

1° Condensation par mélange. La vapeur est liquéfiée par le contact direct de l'eau froide. Le condensateur à mélange reçoit la vapeur d'échappement et une injection d'eau finement divisée, qui maintient une température relativement basse, souvent de 30 à 40° ; la tension correspondante de la vapeur saturée est de 43 à 75 grammes par centimètre carré, tension mesurée par une colonne de mercure de 32 à 55 millimètres ; la pression effective dans le condenseur est plus considérable, car il contient de l'air ; cet air y pénètre surtout avec l'eau d'injection qui le renferme en dissolution et le dégage, 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 continuellement ; c'est le rôle d'une pompe, appelée improprement pompe à air, munie de clapets d'aspiration qui s'ouvrent du condenseur dans le corps de pompe et de clapets de refoulement s'ouvrant au dehors.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La quantité d'eau nécessaire au service d'un condenseur dépend du poids de vapeur qu'il doit recevoir ainsi que de la température θ_0 que possède l'eau devant servir à la condensation et de la température θ_2 qu'on veut entretenir dans le condenseur.

Soit φ le nombre de kilogrammes d'eau nécessaires pour condenser 1 kil. de vapeur. La vapeur qui passe de l'état gazeux à l'état liquide apporte au condenseur sa chaleur totale de vaporisation λ; l'eau apporte $\varphi\,\theta_0$ calories. En écrivant que la chaleur apportée par la vapeur et l'eau de condensation sert à donner au condenseur la température θ_2, on a l'équation calorimétrique :

$$\lambda + \varphi\,\theta_0 = (\varphi + 1)\,\theta_2$$

$$\varphi = \frac{\lambda - \theta_2}{\theta_2 - \theta_0}$$

Cette valeur de φ est un peu trop grande, car la chaleur apportée par la vapeur d'eau est plus petite que λ : on peut admettre en effet qu'il y a à peu près 10 % des calories apportées par la vapeur qui se transforment en travail ou sont dissipées dehors ; en outre le kilogramme de vapeur fourni peut ne pas être absolument sec. Toutes ces circonstances sont négligées dans le calcul. Mais la température θ_0 est rarement connue avec exactitude et ne reste guère constante, non

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

non plus que θ_2. Aussi la précision n'est-elle pas nécessaire dans le calcul de L. On prend pour L 20 à 30 kg.

En pratique on règle l'arrivée de l'eau par l'ouverture du robinet d'injection, de manière à maintenir une température et une pression convenables. Il faut remarquer que si on augmentait beaucoup L, la température baisserait un peu dans le condenseur, et par suite la tension de la vapeur d'eau, mais la quantité d'air augmenterait, et la pression résultant de la vapeur et de l'air à l'intérieur du condenseur pourrait augmenter.

La pompe à air doit extraire pour chaque kilogramme de vapeur consommé par la machine $(L+1)$ kilog. d'eau, ainsi que l'air qui a pénétré dans le condenseur. Pour un calcul précis, il faut déterminer, dans chaque expérience la proportion de l'air tenu en dissolution par l'eau ; on estime souvent que l'air dissous occuperait, sous la pression atmosphérique, à 15°, 1/20 du volume de l'eau. Il y a donc à la température t_0, sous la pression atmosphérique p_a dans L kilogrammes d'eau, $\frac{L}{20}$ litres d'air.

A la température t_2, si p''_2 est la pression qu'aurait l'air seul, son volume est :

$$\frac{L}{20} \times \frac{t_2}{t_0} \times \frac{p_a}{p''_2} \text{ litres}$$

Ce volume s'ajoute au précédent.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En outre, il peut pénétrer dans le condenseur un peu d'air, provenant de l'eau d'alimentation de la chaudière et des fuites de la machine ou du condenseur même: la pompe à air doit également l'extraire; si n est ce volume d'air la pompe doit avoir un volume:

$$V = \varphi + 1 + \frac{\varphi}{20} \cdot \frac{t_2}{t_1} \cdot \frac{p_a}{p''_2} + n$$

On prend souvent la valeur élevée de 100 l par kilog. de vapeur.

La mise en marche de la pompe exige une dépense de travail: ce travail est celui d'une pompe à eau jouant pendant le retour du piston, à celui d'un compresseur d'air. Cette pompe expulse, par coup de piston, à peu près 1/3 de son volume sous forme d'eau et 2/3 sous forme d'air.

A cause des chocs et des frottements des veines fluides, la puissance absorbée par cette pompe est 2 à 3 % de la puissance indiquée. Malgré cette dépense il y a intérêt à employer la condensation qui augmente cette puissance de 10 à 20 %.

Dispositions des condenseurs. - Les machines isolées commandent ordinairement leur pompe à air; quand le cylindre est horizontal, le piston de cette pompe peut être attelé en tandem à la contre tige du piston. Souvent aussi le condenseur est placé en contre bas, dans les vides ménagés dans les fondations de la machine; la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pompe à air, horizontale ou verticale, est menée par un balancier. Enfin le condenseur peut être tout à fait séparé de la machine; la pompe étant commandée par une transmission ou par un moteur auxiliaire : cette disposition est adoptée principalement dans le cas où un même condenseur sert à plusieurs machines distinctes.

Le condenseur lui-même est constitué par une boîte en fonte, soumise extérieurement à la pression de l'atmosphère; des nervures en consolident les faces planes. La forme n'a aucune importance. Les joints sont aussi peu nombreux que possible, car ils risquent de laisser rentrer l'air à moins qu'ils ne soient noyés dans une bâche pleine d'eau.

Les condenseurs portent des plateaux de visite, et des robinets de vidange. Le volume est 2 ou 3 fois plus grand que celui de la pompe à air, ce qui atténue les variations de pression.

Les clapets d'aspiration sont placés au fond du condenseur : ceci tient à ce que, la vapeur ayant, dans le corps de pompe la même pression que dans le condenseur, l'eau n'entre dans la pompe qu'à cause de la faible pression exercée par l'air dans le condenseur; avec cette disposition inférieure des clapets, le poids de l'eau s'ajoute à cette faible pression : ces organes doivent être légers : les clapets à charnière se mattent vite par les chocs. Le caoutchouc

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

risque de s'altérer à la chaleur. Les petits disques en cuivre, dits clapets Corliss, sont employés avec succès. Avec ces clapets on peut employer pour la pompe un piston ordinaire plein, qui se combine bien avec la disposition horizontale à double effet. On emploie avec succès le piston plongeur à simple effet, notamment dans les machines à grandes vitesses: il importe, en effet, pour la bonne marche de la pompe que l'eau puisse suivre le piston; or la force qui pousse l'eau, pendant l'aspiration dans le corps de pompe d'un condenseur est faible: l'accélération qu'elle peut prendre est étroitement limitée. Le plongeur au contraire peut marcher rapidement pourvu que les sections de passage de l'eau à travers les clapets soient assez grandes. Le fonctionnement de ces clapets étant toujours délicat, on a essayé de les supprimer (fig. 134);

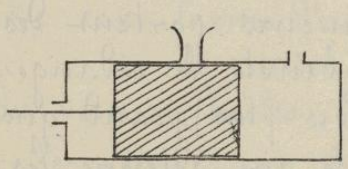


Fig. 134.

dans certaines pompes, l'eau et l'air pénètrent par des lumières percées au milieu du cylindre et découvertes par un piston épais en fin de course.

Lorsqu'on emploie un condenseur central on se sert souvent du condenseur barométrique (fig. 135); cet appareil réalise la séparation des fonctions.

L'eau arrivant en A coule dans un tube vertical de haut en bas en passant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

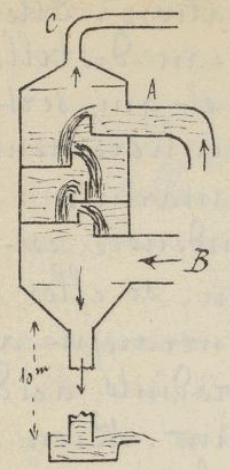


Fig. 135.

sur des chicanes. La vapeur entre en B et se condense au contact de l'eau. En C se trouve une pompe aspirant l'air seul.

L'eau s'écoule à la partie inférieure par un tube vertical, long de 10 mètres moins et plongeant dans une bâche. La pression est moindre dans cet appareil que dans un condenseur ordinaire. Cet appareil exige que l'on monte l'eau de condensation à 10 mètres ; mais cette ascension est facilitée par la faible pression qui règne en C.

Tous ces appareils exigent beaucoup d'eau. Lorsqu'elle est rare, on peut l'employer plusieurs fois en la faisant refroidir ; on la met en contact avec l'air, ce qui l'amène à 20 ou 25° environ ; le refroidissement est dû surtout à l'évaporation, et la dépense d'eau est alors presque égale à celle d'une machine à échappement libre : pour refroidir l'eau, on la laisse tomber par filets à l'intérieur d'une sorte de cheminée dans laquelle circule un fort courant d'air : cet air monte par tirage naturel si l'appareil est assez haut ; on force le tirage si l'appareil est petit.

2° Condenseur à surface. — Dans ces condenseurs, la vapeur ne se mélange

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus à l'eau de condensation. Elle forme en se condensant de l'eau distillée qu'on renvoie aux chaudières et qui sert indéfiniment, disposition particulièrement commode dans les machines marines.

Mais l'eau condensée est chargée de matières grasses qui, si elles sont de nature organique, pourraient altérer les tôles en donnant des produits acides sous l'influence de la chaleur. Bien que cet inconvénient n'existe plus guère par suite de l'emploi des huiles minérales, il est néanmoins utile de filtrer l'eau à sa sortie du condenseur.

Ces condenseurs à surface donnent un vide meilleur que les condenseurs à mélange, car, par suite de leur fonctionnement même, l'air dissous dans l'eau ne s'y introduit pas. Mais ils sont plus coûteux à cause de la grande surface métallique d'échange.

La pompe à air subsiste dans le condenseur à surface ; mais les dimensions en sont moindres que dans le condenseur à mélange, 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 on n'en réduit généralement pas les dimensions au strict minimum, afin de pouvoir faire fonctionner à la rigueur l'appareil comme condenseur à mélange.

Le condenseur à surface porte

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aussi une pompe de circulation qui fait passer dans l'appareil l'eau de refroidissement.

La puissance totale absorbée par ces deux pompes est à peu près la même que celle qui est prise par la pompe à air du condenseur à mélange.

Ce condenseur est formé par un récipient cylindrique avec deux plaques de tête où s'emmanchent les tubes. Leur diamètre extérieur est d'environ 2 centimètres, leur épaisseur de 1 m/m à 1 m/m 5 ; ils sont en cuivre ou en laiton, souvent étamés pour résister à l'attaque des matières grasses.

Le montage dans les plaques se fait à l'aide d'une garniture serrée par une presse garniture filetée 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 de papier, etc... Si les tubes sont longs, on les supporte par une plaque intermédiaire. 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.

Pour établir un condenseur, on doit déterminer la surface condensante S et la quantité d'eau de circulation L nécessaire pour chaque kilog. de vapeur envoyée par la machine.

La température de l'eau disponible est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

θ_0. On veut entretenir au condenseur une température θ_2. L'eau de refroidissement sort, non plus à θ_2 comme dans les condenseurs à mélange, mais à une température θ_0' inconnue à priori et plus faible que θ_2. — Ceci posé, soit un condenseur condensant 1 kil. de vapeur par seconde; On a vu dans l'étude des chaudières que par mètre carré de surface métallique le nombre de calories passant par seconde est : $M = K(\theta_2 - \theta)$ (1)

θ étant la température de l'eau, variable en chaque point et K un coëfficient numérique que l'on peut prendre égal à 0,45.

D'autre part en écrivant que la chaleur emportée par l'eau est égale à la chaleur apportée par la vapeur on a l'équation : $\varphi(\theta_0' - \theta_0) = \lambda - \theta_2$ (2)

λ étant la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et, comme nous l'avons dit, un peu supérieur à la valeur des calories réellement amenés par la vapeur d'eau.

Soit maintenant un élément de surface dS à température θ; le poids φ d'eau passant par seconde absorbe $\varphi d\theta$ calories. D'après la formule (1), ces calories ayant été transmises par la surface métallique dS, on a la formule (3)

$$\varphi d\theta = K(\theta_2 - \theta) dS$$

ou :

$$K dS = \varphi \frac{d\theta}{\theta_2 - \theta}$$

En intégrant le 1er membre entre 0 et S, le 2e entre θ_0 et θ_0' il vient :

$$KS = \varphi \log_e \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_2 - \theta_0'} \quad (3)$$

En éliminant θ_0' entre (2) et (3) on arrive enfin à la formule :

$$KS = \varphi \log_e \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_2 - \theta_0 - \frac{m}{\varphi}}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en posant : $m = \lambda - \theta_2$

On peut se donner S ou L et calculer l'autre quantité. Toutefois, il ne faut pas sortir de certaines limites, de manière à ne pas exagérer le travail de la pompe de circulation. En outre la donnée θ_0 est variable suivant les circonstances. Dans la pratique on prend pour S une valeur aussi grande que possible et on fait varier L à l'aide d'une pompe spéciale.

On prend souvent $L = 50$ et $S = 0^{m2}1$ par cheval heure ; le cheval heure correspondant à une dépense de 8 kilog. de vapeur.

Dans une chaudière avec tirage naturel, on produit jusqu'à 40 kilog de vapeur par mètre carré de surface de chauffe et par heure ; ce qui prouve que la surface du condenseur est à peu près la moitié de celle de la chaudière.

Des appareils indicateurs simples permettent de suivre la marche des condenseurs. Le plus commode est le baromètre, dont la colonne peut être réduite, puisqu'il n'indique que des pressions bien inférieures à celles de l'atmosphère.

On emploie souvent l'indicateur de vide qui donne la différence entre la pression atmosphérique et la pression effective dans le condenseur. La pression atmosphérique est donc le zéro de l'appareil ce qui est un défaut puisque ce zéro n'est pas fixe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IV.- Machines fonctionnant par l'écoulement de la vapeur.

1- Théorie de l'écoulement de la vapeur.-

Nous nous proposons d'étudier les lois de l'écoulement permanent d'un fluide passant d'une enceinte où règne la pression p_1 à une enceinte dont la pression est p_2.

Nous admettrons d'abord que l'écoulement se fait par filets parallèles (fig. 136). Considérons 1 Kilogramme du fluide. Dans la première enceinte il possède l'énergie interne U_1 ; si v_1 est le volume de ce Kg. de vapeur à la pression p_1, en sortant par l'orifice il est refoulé par le travail $p_1 v_1$, équivalent à la quantité de chaleur $A p_1 v_1$. Si en outre on suppose que le fluide descende d'une hauteur h avant de passer dans l'orifice, le travail accompli de ce chef par le Kilogramme de fluide est h Kilogrammètres, correspondant à A h calories. Enfin ce même fluide reçoit des parois une quantité Q de chaleur pendant son écoulement.

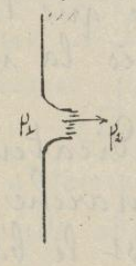


Fig. 136

D'autre part lorsqu'il a franchi l'orifice, et qu'il est dans l'enceinte à pression p_2, ce Kilogramme possède l'énergie interne U_2, accomplit en refoulant le fluide du réservoir un travail égal

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à $p_2 v_2$ et possède une vitesse W résultant de la différence de pression qui lui donne une force vive égale à $\frac{W^2}{2g}$. En écrivant que l'énergie calorifique du fluide est le même avant et après son passage à travers l'orifice, on arrive à l'équation :

$$U_1 + A p_1 v_1 + A h + \varphi = U_2 + A p_2 v_2 + \frac{A W^2}{2g}$$

Remarquons que la quantité de chaleur φ communiquée au liquide pendant l'écoulement peut être considérée comme équivalente à la variation d'énergie interne du fluide augmentée du travail de dilatation exercé par le fluide qui passe du volume v_1 au volume v_2, ce qui donne :

$$\varphi = U_2 - U_1 + A \int_{v_1}^{v_2} p \, dv$$

d'où en combinant ces deux équations :

$$\frac{W^2}{2g} = p_1 v_1 - p_2 v_2 + \int_{v_1}^{v_2} p \, dv$$

en négligeant le terme h qui est généralement très faible.

Si on porte en abcisses les valeurs du volume et celles de la pression en ordonnées, on obtient le diagramme de la fig. 137 : la partie curviligne se détermine dans chaque cas lorsqu'on connaît la loi de détente du fluide. L'aire limitée par cette courbe est précisément égale à $\frac{W^2}{2g}$.

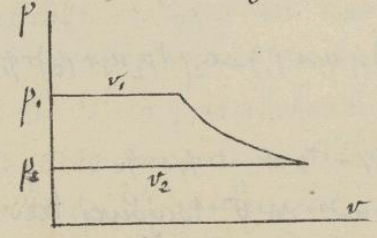


fig. 137.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit sur la figure que cette expression représenterait le travail du fluide pris à la pression p_1, agissant sur un piston dans un cylindre de volume v_2, et qui se détendrait suivant la même loi.

Appliquons ce qui précède au cas particulier de la vapeur d'eau.

Reprenons l'équation primitive en y négligeant les deux termes φ et Ab qui sont généralement très petits.

$$\frac{A w^2}{2g} = A(p_1 v_1 - p_2 v_2) + U_1 - U_2 .$$

Supposons la vapeur d'eau saturée, humide, contenant la proportion x_1 de vapeur.

A la pression p_1, 1 Kilogramme de fluide occupe le volume :

$$v_1 = u_1 x_1 + \sigma$$

Pendant l'écoulement le titre change, et en aval de l'orifice on a :

$$v_2 = u_2 x_2 + \sigma$$

l'énergie interne du fluide est en amont de l'orifice

$$U_1 = q_1 + \rho_1 x_1$$

et en aval

$$U_2 = q_2 + \rho_2 x_2$$

Donc :

$$\frac{A w^2}{2g} = x_1 (A p_1 u_1 + \rho_1) - x_2 (A p_2 u_2 + \rho_2) + q_1 - q_2 + A\sigma (p_1 - p_2).$$

$$= r_1 x_1 - r_2 x_2 + q_1 - q_2$$

en négligeant le terme en σ toujours très faible par rapport aux autres et en remarquant suivant les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

notations relatives à la vapeur d'eau que

$$A p_1 u_1 + l_1 = r$$

Dans l'équation précédente r_1, r_2, q_1, q_2 se trouvent dans les tables ; x_1 doit être connu. Quant à x_2, on le calcule dans l'hypothèse admise de l'écoulement adiabatique. On l'obtient facilement (fig. 138) par la considération du diagramme entropique, et on trouve

$$x_2 = \frac{A'C'}{A'B'}$$

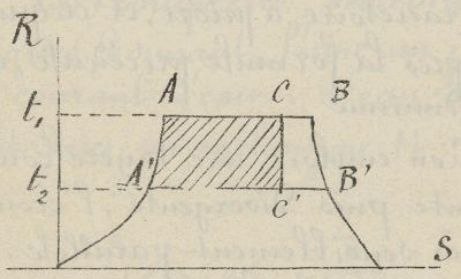


Fig. 138.

La quantité de chaleur

$$\frac{A w^2}{2g}$$

est représentée par l'aire ombrée ; on retrouve le cycle de la machine idéale à piston.

En calculant ainsi w, on trouve des valeurs très grandes, qui dépassent 1 Kilomètre par seconde quand p_2 est faible. Il est vrai qu'on a supposé un écoulement par filets parallèles et ce n'est vrai que pour une pression

$$p_2 > 0{,}58\, p_1 .$$

L'écoulement parallèle n'est donc pas toujours réalisé et dans ce cas le jet de vapeur s'épanouit et constitue une surface d'une forme analogue à celle d'un paraboloïde. Ce n'est pas comme dans un liquide incompressible, le produit de la section par la vitesse d'écoulement, mais le débit en poids qui est constant, c'est-à-dire le produit :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$P = w + \omega + \delta.$$

de c vitesse par la section et par la masse spécifique de la vapeur δ.

Si l'on admet qu'à l'intérieur du jet la pression passe progressivement de p_1 à p_2, on trouve que la section de la veine passe par un minimum lorsque

$$p = 0.58\, p_2$$

Au delà w et ω augmentent en même temps, ce qui paraît contradictoire à priori, et ce qui s'explique facilement d'après la formule précédente, en remarquant que δ diminue

Lorsqu'on emploie une tuyère convenablement tracée, convergente puis divergente, l'écoulement à la sortie est très sensiblement parallèle. Si la tuyère a, au contraire, la forme convergente, la pression de la vapeur à sa sortie de l'ajutage est égale à $0.58\, p_2$; si donc la pression p_2 est inférieure à cette valeur, la pression de la vapeur s'abaisse brusquement et le jet liquide s'évase.

Ce nombre égal à 0.58 pour la vapeur d'eau varie suivant la nature des fluides, mais reste toujours voisin de 0,5.

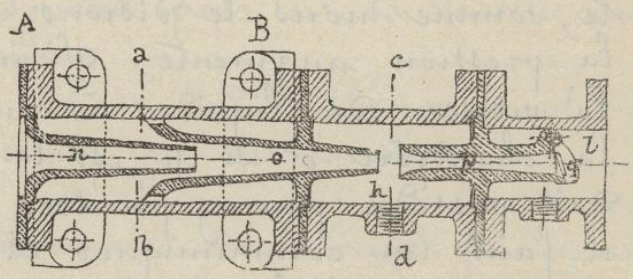
2e Injecteurs.

Théorie de l'appareil. – L'injecteur qui sert à refouler l'eau dans les chaudières, est un appareil qui ne comprend aucune pièce mobile: l'action motrice de la vapeur se transmet directement à l'eau qu'elle doit entraîner.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le fonctionnement de l'injecteur est continu : la vapeur y produit avec l'eau une veine fluide animée d'une grande vitesse ; cette veine s'engage dans un tube divergent où la pression du tube augmente à mesure que la vitesse diminue ; cette pression devient assez forte pour dépasser celle de la chaudière.

Réduit à ses parties essentielles, l'injecteur (fig 139) comprend deux tuyères T et T' concentriques donnant, l'une un jet de vapeur et l'autre un courant d'eau. L'eau et la vapeur se mélangent dans un mélangeur M ; le jet fluide pénètre



Ancien injecteur de locomotives des chemins de Fer du Nord.—
n, tuyère de vapeur ; — (arrivée de l'eau, (non visible sur cette coupe) dans le plan a b
o mélangeur (chambre, cheminée) ; — trop plein, dans le plan c d
p, divergent, avec clapet q
Fig 139

ensuite dans le divergent D où la vitesse diminue et où la pression augmente. Un clapet de retenue q empêche la vidange de la chaudière quand l'injecteur cesse de fonctionner.

Si le divergent recevait une veine entièrement liquide, sans mélange de vapeur ni d'air, on calculerait aisément, d'après la loi de Bernoulli,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la vitesse la plus faible qui permettrait à cette veine de surmonter la pression de la chaudière. Dans un trajet horizontal continu, avec un mouvement permanent, sans chocs ni frottements, le total des quantités dites hauteur due à la vitesse et hauteur piézométrique est constant pour un liquide incompressible:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p'}{\varpi} = C^{te}$$

Dans une conduite divergente, la vitesse du liquide diminue à mesure qu'il traverse une section plus grande, par suite, comme nous le disions précédemment, la pression augmente. Si nous négligeons la vitesse du liquide à son entrée dans la chaudière et si p' est la pression qu'il doit posséder pour y pénétrer, la vitesse qu'il faut lui communiquer est:

$$\frac{W^2}{2g} = \frac{p' - p.}{\varpi}$$

A cause des frottements la pression finale se trouve diminuée et on se sert de la formule:

$$\frac{W^2}{2g} = 1,4 \frac{p' - p}{\varpi}$$

En lançant un jet d'eau dans le divergent à une vitesse de 60 ou 80 mètres par seconde, l'eau peut pénétrer dans une chaudière où règne une pression de 10 kg. par centimètre carré.

En réalité, le mélangeur ne lance pas dans le divergent un jet d'eau pure; la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mesure du débit des injecteurs le prouve; on vient de calculer la plus faible vitesse nécessaire pour une pression donnée ; en la multipliant par la section à l'entrée du divergent, on aurait la plus petite valeur du débit par seconde.

L'expérience indique des débits beaucoup moindres que ce débit théorique.

La veine n'est donc pas formée uniquement d'eau, mais d'un mélange d'eau et de vapeur, auquel s'ajoute parfois de l'air. La loi du mouvement dans le divergent est alors moins simple, parce que le poids spécifique du fluide peut varier pendant le trajet. On prend souvent pour ϖ la densité moyenne du fluide.

Pour étudier théoriquement l'injecteur, on exprime par des équations que l'énergie totale reste la même dans les diverses sections normales de la veine fluide, animée d'un mouvement permanent ; cette même énergie totale reste constante, si l'on considère deux sections du courant de vapeur et du courant d'eau, avant leur réunion dans le mélangeur.

Cette méthode fait connaître diverses relations entre la vitesse, la pression, la température aux divers points du courant.

Une équation approximative se déduit simplement du théorème des quantités de mouvement et donne la vitesse dans le mélangeur.

Supposons que pour 1 kg. de vapeur débité dans l'injecteur, il y ait m kilogrammes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'eau.

D'après le théorème des quantités de mouvement dans lequel n'entrent pas de forces extérieures car la pression est presque uniforme dans le mélangeur et la pesanteur est à peu près perpendiculaire à la direction du mouvement.

Si donc w et w' sont les vitesses d'arrivée de la vapeur et de l'eau, la vitesse W dans le mélangeur satisfera à l'égalité

$$W + m w' = (1 + m) W$$

ou sensiblement

$$w = (1 + m) W.$$

en négligeant le deuxième terme, qui est faible car la vitesse d'arrivée de l'eau est petite.

La vitesse W doit être grande, car la pression qui règne dans le mélangeur est voisine de la pression atmosphérique ; il communique en effet avec l'atmosphère par l'intermédiaire d'un trop-plein qui sert à l'amorçage. Il peut même arriver que la pression dans le mélangeur soit inférieure à la pression atmosphérique, car le jet de vapeur fait le vide autour de lui. C'est là d'ailleurs un inconvénient car il y a des rentrées d'air dans la chaudière, ce qui est une cause d'altération des tôles, et dans le condenseur, ce qui y augmente la contre-pression. On remédie à cet appel d'air en fermant le mélangeur par une soupape automatique.

La température de la veine fluide ne doit pas être trop élevée afin qu'elle existe à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'état liquide sous la pression atmosphérique. La température dans le divergent varie de 80° à 110°. On le calcule en additionnant les calories apportées par la vapeur et par l'eau.

$$\theta(1+m) = \lambda + m\theta_0$$

on néglige dans cette égalité les calories qui se transforment en force vive.

On voit que si l'on se fixe un maximum pour θ, comme

$$m = \frac{\lambda - \theta}{\theta - \theta_0}$$

on se donne par cela même un minimum pour m; c'est-à dire que le nombre de kilogrammes d'eau entraînés par 1 kilog. de vapeur ne peut s'abaisser au-dessous d'une certaine valeur pour que l'injecteur fonctionne bien. Cette limite est d'autant plus basse que l'eau d'alimentation est plus froide.

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 vapeur qu'il reçoit échauffe l'eau d'alimentation et la refoule. Il ne faut pas en conclure que l'injecteur est une machine thermique ayant un rendement extraordinaire; en réalité, l'injecteur dépense beaucoup de vapeur, mais sans la perdre, car elle sert à échauffer l'eau d'alimentation.

Pour l'alimentation des chaudières ordinaires, non munies de réchauffeurs, ce chauffage préalable de la vapeur au moyen de la vapeur n'a pas d'inconvénient, puisqu'il faut toujours fournir à l'eau les calories nécessaires,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soit après, soit avant l'entrée dans la chaudière; il y a même avantage pour la conservation et la bonne marche des appareils à ce que l'eau y pénètre chaude. Mais avec un réchauffeur qui épuise toute la chaleur des gaz de la combustion et échauffe l'eau au moyen d'un sous-produit des foyers, autrement perdu, l'injecteur cesse d'être économique.

Fonctionnement. — L'injecteur peut être aspirant, c'est-à-dire que l'eau est prise plus bas que le mélangeur, la pression y est inférieure à la pression atmosphérique. Tel est l'injecteur Giffard.

Le réglage de l'afflux de vapeur s'y fait en tirant plus ou moins l'aiguille qui se trouve dans la tuyère d'amenée de vapeur; l'arrivée de l'eau se règle en déplaçant la tuyère dans le mélangeur. D'autres injecteurs n'aspirent pas et reçoivent l'eau en charge.

L'amorçage diffère un peu suivant les classes d'injecteurs: dans le deuxième cas, on laisse arriver l'eau qui s'écoule par le trop-plein, puis on ouvre progressivement la prise de vapeur, la vitesse du jet augmente; il s'échappe d'abord par le trop-plein, jusqu'à ce qu'il pénètre dans la chaudière; parfois un excès d'eau continue à couler par le trop-plein; cette perte cesse quand on réduit convenablement l'ouverture de la prise d'eau.

Si au contraire l'injecteur est aspirant, il faut d'abord que le jet de vapeur, en s'écoulant par le trop-plein, entraîne l'air et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diminue assez la pression dans la chambre pour que l'eau y soit appelée ; la mise en train continue alors comme pour l'appareil non aspirant. Un petit jet auxiliaire de vapeur sert souvent à cet effet préalable de l'eau. La température θ_0 de l'eau d'alimentation ne doit pas être trop élevée, sans quoi le jet de vapeur ne se condense pas, et l'appareil ne peut s'amorcer. La limite de θ_0 dépend beaucoup du type de l'appareil ; on ne dépasse guère 50°.

Ces appareils sont très utilisés sur les locomotives ; dans le cas des machines fixes, on emploie plutôt des pompes alimentaires. Ces pompes peuvent être actionnées directement par la machine elle-même, ce qui est facile lorsque la vitesse de rotation n'est pas grande. Avec ce dispositif, il n'y a pas d'alimentation pendant les arrêts, et la pompe marche inutilement quand on suspend l'envoi d'eau ; dans ce cas, l'eau aspirée est renvoyée à la bâche ou bien le conduit d'aspiration est fermé par un robinet.

Ces motifs font préférer généralement pour les appareils, la commande de la pompe par un moteur spécial ou petit cheval. Bien souvent, ces machines consomment beaucoup de vapeur. Supposons une machine à vapeur dépensant 8 kg. de vapeur par cheval-heure, et dont la chaudière est à la pression de 10 kg. par cm^2. La pompe doit fournir un travail qui serait à peu près équivalent à 800 kg. soit $\frac{1}{300}$ du travail total. Pour une telle proportion, si, comme cela arrive souvent, le petit cheval consomme par cheval-heure, 5 fois plus de vapeur que le moteur principal, l'alimentation dépense 3 % de la vapeur produite ; et on trouve souvent des consommations plus élevées. — On atténue cette perte en employant la vapeur qui actionne le petit cheval, à échauffer l'eau d'alimentation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3. - Turbines à vapeur.

La turbine est un appareil capable de recueillir l'énergie disponible dans un jet de vapeur, s'écoulant d'une chaudière dans un condenseur ou dans l'atmosphère.

La turbine à vapeur, comme la turbine hydraulique se compose de deux parties : l'une fixe, par où s'écoule la vapeur est appelée distributeur ; l'autre mobile, constitue la turbine proprement dite et est formée par une couronne munie d'aubes.

La construction des turbines repose sur les deux principes suivants : l'entrée du jet fluide dans la couronne mobile doit avoir lieu sans choc, et le fluide doit sortir de l'appareil avec une vitesse aussi faible que possible.

Le distributeur est muni d'aubes placées en face des aubes de la partie mobile, reliée elle-même à l'arbre généralement horizontal (fig. 140).

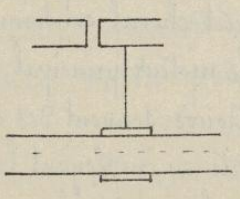


Fig. 140.

Soient u, la vitesse de la roue, v, la vitesse de la vapeur à sa sortie du distributeur, w, la vitesse relative de la vapeur par rapport à la couronne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

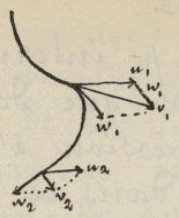


Fig. 141

mobile. Cette vitesse relative s'obtient en composant u_1 et v_1 et peut être aisément déterminée. Pour qu'il n'y ait pas de choc, il faut que la direction de w_1 soit tangente à l'aube de la couronne, ce qui en détermine la direction. A la sortie de l'aube (fig. 141) la vapeur a une vitesse relative w_2 ; l'aube a la vitesse

$$u_2 = u_1$$

On peut donc déterminer la vitesse absolue v_2 de la vapeur à sa sortie de la couronne.

La direction des filets fluides caractérise les turbines axiales et les turbines radiales qui sont centrifuges ou centripètes.

L'admission est totale quand elle se fait sur toute la circonférence de la couronne, ou partielle.

Enfin, on classe les turbines en turbines à impulsion et turbines à réaction. Dans les premières, la pression de la vapeur baisse de la valeur supérieure p_1 à la vitesse inférieure p_2 dans le distributeur ; elle a donc acquis toute sa vitesse en entrant dans le récepteur qu'elle parcourt sous la pression p_2. Les sections normales des aubes du récepteur sont constantes dans ces appareils.

Dans les secondes, au contraire, la pression finale p_2 n'est pas atteinte par la vapeur à la sortie du distributeur ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

elle est à une pression p intermédiaire entre p_1 et p_2, et ce n'est que dans la couronne mobile que sa pression s'abaisse de p à p_2. On voit que dans ce cas la vitesse d'entrée de la vapeur dans la couronne mobile est moindre que dans le cas précédent.

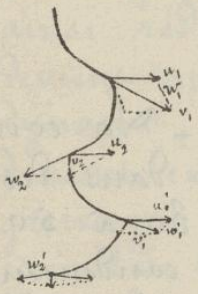
En outre, l'excès de pression du fluide sur la pression qui règne à l'extérieur, produit une fuite par le vide qui existe entre le distributeur fixe et la couronne mobile, vide qui peut être fort réduit, mais qu'on ne supprime jamais.

Turbines multiples. — Dans ces turbines, la vapeur traverse successivement une série de couronnes mobiles, enfilées sur le même arbre et séparées par des distributeurs fixes : c'est comme une série de turbines qui seraient étagées le long d'une chute d'eau très élevée ; la vapeur s'écoule successivement d'un distributeur à l'autre, sous des différences assez faibles de pression, ce qui en réduit la vitesse.

Dans les premières turbines, en effet, on s'est trouvé arrêté par les grandes vitesses des appareils : la vitesse d'entrée de la vapeur dans la couronne mobile était de 1000 mètres par seconde, cette couronne était animée à la périphérie d'une vitesse pouvant atteindre 300 mètres par seconde, et on atteignait des vitesses de 20 000 tours

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par minute. Avec de telles vitesses angulaires la construction devient très difficile : en vertu de la force centrifuge, une masse de 1 gramme exerce, dans certains cas, une tension de 80 kilogrammes. C'est précisément pour remédier à ces inconvénients qu'on a imaginé les turbines multiples.


Fig. 142.

Avec une seule turbine on n'arriverait pas à réduire suffisamment la vitesse de rotation de la couronne mobile, car on voit sur la figure 142 que si u_1 et par suite u_2 sont trop petits, comme v_1, w_1 et w_2 sont grands, on obtient une grande valeur pour v_2, ce qu'il faut éviter.

Avec plusieurs turbines, la vitesse v s'abaisse peu à peu et on peut arriver à une vitesse finale suffisamment faible.

On peut avoir jusqu'à 60 distributeurs.

La turbine est surtout employée actuellement comme moteur à grande puissance : les turbines de petite dimension peuvent sans doute rendre des services ; elles paraissent néanmoins notablement inférieures aux moteurs à piston. On construit couramment aujourd'hui des turbines de 6000 Kw. Pour une vitesse linéaire donnée, il y a avantage à construire des machines de grand rayon, car on diminue leur vitesse angulaire. Cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vitesse angulaire descend à 3000, 1500 ou même 750 tours par minutes: ces nombres correspondent aux vitesses angulaires que doivent prendre des alternateurs à 2, 4 ou 8 pôles pour produire un courant alternatif de fréquence f_0.

On est même descendu, dans le cas des machines marines à 180 tours par minute.

Condensation. – La consommation de vapeur diminue dans des proportions considérables, de 30 à 50 % quand l'échappement se fait au condenseur, avec une très faible contre pression. On emploie généralement de grands condenseurs à surface.

Turbine de Laval. – Cette turbine, exposée à Paris en 1889 est à impulsion et à admission partielle. Elle ne comporte qu'une seule couronne mobile: la vapeur est lancée sur cette couronne par quelques ajutages de forme divergente ou par un seul.

Dans les turbines hydrauliques, on adopte souvent pour valeur de la vitesse de la couronne mobile, la moitié de la vitesse de l'eau, soit

$$u_1 = \frac{v_1}{2}$$

ici on adopte:

$$u_1 = \frac{v_1}{3}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et on obtient encore une vitesse de sortie de la vapeur un peu grande.

La vitesse de ces turbines est considérable et varie de 30 000 à 15 000 tours par minute. Pour ralentir cette vitesse, on fait usage d'un train d'engrenages hélicoïdaux, où le pignon a 10 fois moins de dents que la roue. Le nombre de tours est ainsi réduit au dixième, et la machine devient applicable à la commande d'une dynamo, ou bien d'autres transmissions réduisent encore la vitesse angulaire. Ces engrenages qui doivent être soigneusement exécutés tournent à l'intérieur d'une boîte. Tout l'appareil fonctionne d'ailleurs en vase clos.

La couronne est entourée d'une frette en acier. Il serait difficile de centrer rigoureusement l'arbre tournant avec la couronne ; aussi réalise-t-on en quelque sorte un centrage automatique en employant un arbre long, mince et flexible. En ne calant pas le disque au milieu de cet arbre, une flexion se produit à la mise en marche ; mais l'arbre se redresse quand la vitesse atteint une certaine valeur.

Turbine Curtis. — Cette turbine (fig. 143) très répandue aux Etats Unis, est constituée par quelques couronnes mobiles montées sur le même arbre et autant de distributeurs. Dans le tracé des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

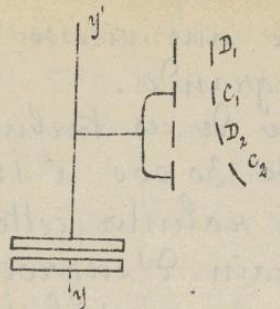


Fig. 143

on tient compte de la dilatation continue de la vapeur à mesure qu'elle se détend, en élargissant leurs sections.

L'axe de ces turbines est généralement vertical, ce qui constitue une difficulté de construction. Curtis a employé le système de plateaux de Girard : le bas de l'axe est fixé à un plateau mobile, tournant au-dessus d'un plateau fixe ; les frottements sont presque annulés par interposition entre ces deux plateaux d'une nappe fluide d'huile ou d'eau sous pression.

Cette turbine est à admission partielle et variable ; la variation d'admission est produite par une variation du nombre des orifices du distributeur laissant passage à la vapeur. Ce système entraine certaines difficultés pour une utilisation complète de la vapeur ; il faut aussi faire varier l'admission partielle dans les divers groupes successifs.

Turbine Parsons. — Cette turbine est constituée par un tambour tournant à l'intérieur d'un cylindre en fonte. Les aubes fixes sont fixées à la paroi ; les aubes mobiles sont fixées au tambour. On réalise ainsi une série de distributeurs fixes et de couronnes mobiles. Le diamètre de l'enveloppe de fonte (fig. 144) ne reste pas constant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

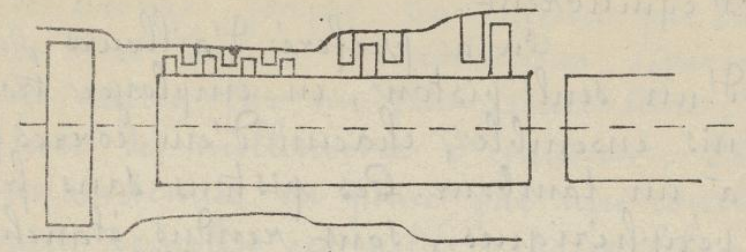


Fig. 144

il augmente à mesure qu'on s'éloigne de la prise de vapeur; on obtient ainsi une augmentation de section des aubes correspondant à la dilatation de la vapeur. Les diamètres des turbines varient donc par échelons, alors qu'il semblerait plus logique de les faire varier d'une manière continue, l'ensemble des turbines formant un cône.

On dispose trois tambours en série, constituant trois systèmes d'aubes fixes et mobiles. Toutes ces aubes ont de très faibles dimensions. Le jeu qui existe entre ces pièces est assez considérable ; il en résulte des fuites latérales entre les aubes et les parois.

Ce système donne lieu à une grande poussée axiale sur l'aube, poussée due à l'action de la vapeur sur les aubes mobiles, et égale sur le premier tambour à $S(p_1 - p'_1)$, sur le deuxième $S_2(p'_1 - p''_1)$ et sur le 3e $S_3(p''_1 - p_2)$.

On équilibre cette poussée au moyen d'un piston compensateur de section convenable ; l'arrivée de vapeur se fait entre ce piston et le premier tambour,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de sorte que les deux poussées en sens inverse s'équilibrent.

On a préféré d'ailleurs, au lieu d'un seul piston, en employer trois, réunis ensemble, chacun d'eux correspondant à un tambour. Ces pistons sans frottements périphériques, sont rendus étanches au moyen d'une série de collets extérieurs qui s'engagent dans des cannelures correspondantes taillées dans la partie fixe.

L'arbre est porté par deux paliers qui doivent être toujours bien graissés. Si ces paliers reposaient sur la couronne de fonte, comme cela semble naturel, ils seraient en relation l'un et l'autre avec la vapeur et le condenseur, et il y aurait forcément entraînement d'eau et d'huile. C'est pourquoi on préfère les placer à l'extérieur du cylindre en fonte, et l'arbre y pénètre à travers des garnitures étanches.

Le graissage est assuré au moyen d'une pompe qui refoule de l'huile sous pression entre l'arbre et le coussinet, disposition qui réduit considérablement les frottements et l'usure des pièces métalliques.

L'usure des aubes semble être assez rapide dans la turbine Laval et très lente dans la turbine Parsons.

Il faut également tenir compte dans le montage des dilatations inégales des aubes.

Enfin, il est bon de permettre à l'arbre une très légère flexion. Dans ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur le coussinet est constitué par un anneau de bronze, formé lui-même par la réunion de trois bagues concentriques, séparées les unes des autres par un petit espace libre, d'une fraction de millimètre d'épaisseur. Elles sont maintenues en place par une couche d'huile qui remplit ces petits espaces libres et qui forment comme un bourrelet élastique sur lequel repose l'arbre.

Régularisation des turbines. - La régularisation du mouvement peut s'obtenir à l'aide d'un régulateur à force centrifuge. Ce régulateur agit sur un papillon équilibré, qui, ouvrant ou fermant la conduite d'amenée de vapeur, agit sur la pression de cette vapeur.

Nous avons vu que dans les turbines Curtis le régulateur agit en faisant varier l'admission partielle. Dans les turbines Parsons, l'admission est intermittente : un petit servo-moteur actionne une soupape qui, à intervalles fixes envoie des bouffées de vapeur plus ou moins longues.

Application à la marine. - Dans le cas des navires, il faut prévoir une marche arrière : on monte sur le même arbre, dans la même boîte une 2e turbine dont le sens de rotation est inverse du sens dans lequel tourne la première. En marche avant, on a une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

turbine tournant à vide, dans une atmosphère de vapeur à la pression p_2.

On emploie souvent sur les navires trois turbines : une turbine centrale qui reçoit la vapeur à haute pression et la laisse échapper dans deux turbines latérales.

La question de la poussée axiale disparait ici, car l'hélice produit elle-même une poussée axiale qui équilibre celle dûe à la turbine. On peut donc dire que dans un navire à turbines, la poussée due à l'hélice est supprimée, ou plutôt elle est reportée sur les fonds de la boîte. Le palier de la butée n'a plus qu'un rôle accessoire.

V - Etude des Compresseurs.

Compression de l'air. - La compression de l'air est obtenue au moyen d'un compresseur, formé en principe d'un cylindre muni de deux clapets (fig. 145) à l'intérieur duquel se meut un piston.

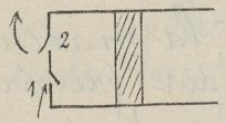


Fig. 145

Lorsque le piston se meut de gauche à droite, le clapet 1 s'ouvre et il y a aspiration de l'air dans le cylindre. Lorsque le piston revient en sens inverse,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le clapet 1 se ferme, l'air se comprime dans le cylindre, et quand sa pression atteint une certaine valeur, le clapet 2 s'ouvre et le piston continuant sa course refoule l'air dans un réservoir.

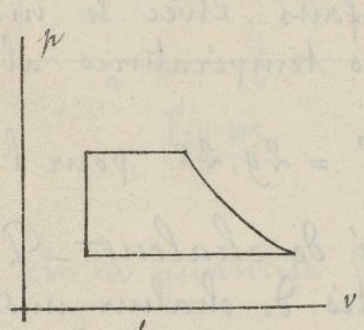


Fig. 146.

Le cycle décrit par le point représentatif de l'état de l'air a la forme indiquée sur le diagramme (fig. 146).

Nous assimilerons, dans la théorie qui va suivre, l'air à un gaz parfait.

Soit 1 kilog d'air pris sous une pression p_0 et ayant un volume v_0 à la température absolue

$$t_0 = 273°$$

Si, laissant son volume fixe, nous l'amenons à avoir une pression p', sa température se modifie et devient t. On sait qu'il y a proportionnalité entre les pressions et des températures, d'où :

$$p' = \frac{p_0}{t_0} \cdot t$$

Dans le cas de l'hydrogène, c'est la définition même de la température. Si maintenant nous faisons sur cette masse de gaz une transformation isotherme elle suivra la loi de Mariotte ; p et v étant respectivement la pression et le volume final, on aura la relation :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$p v = p' v_0 = \frac{p_0 v_0}{t_0} t$$

ou

$$p v = R t$$

C'est la loi qui régit la compressibilité des gaz parfaits. Avec le mètre, le kilogramme et les températures absolues comme unités,

$$R = 29,28 \text{ pour l'air.}$$

Quantité de chaleur. – Pour déterminer les quantités de chaleur mises en jeu dans ces opérations, nous appliquerons la loi des chaleurs spécifiques : la quantité de chaleur mise en jeu pour échauffer un gaz à volume constant ou à pression constante est proportionnelle à la température atteinte. Cette loi approchée aux températures ordinaires, devient inexacte aux températures élevées.

Soient c et C les chaleurs spécifiques des gaz à volume constant et à pression constante pour tous les gaz parfaits :

$$\frac{C}{c} = 1,41 = K$$

Supposons qu'un gaz, étant à la température t_1, soit échauffé à la température t_2, sa pression restant constante, son volume change et passe de v_1 à v_2. Ecrivons que la quantité de chaleur absorbée par le gaz est utilisée pour produire le travail externe de dilatation ainsi que la variation d'énergie interne du gaz.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

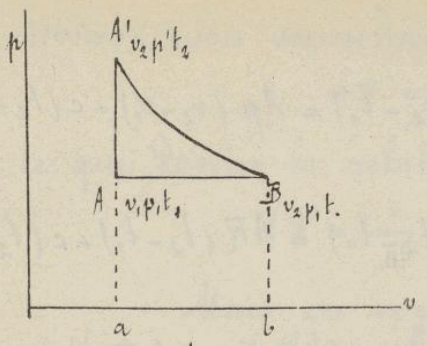


Fig. 147

Puisque la pression reste constante (fig. 147) le gaz absorbe la quantité de chaleur

$$C(t_2 - t_1) = Kc(t_2 - t_1)$$

Le travail externe fourni par le gaz pour passer de A en B est

$$p(v_2 - v_1)$$

et la quantité de chaleur équivalente est:

$$Ap(v_2 - v_1)$$

Quant à l'énergie interne, elle ne dépend que de la température dans un gaz parfait; si cette température ne change pas, l'énergie interne reste invariable. Ceci posé, la variation d'énergie de la masse gazeuse passant de l'état A à l'état B est le même que si cette masse passait de A en A' puis de A' en B, l'arc A' B représentant une ligne isotherme et étant figuré sur le diagramme par un arc d'hyperbole équilatère. Mais lorsque le gaz passe de A' en B son énergie interne ne change pas; donc la variation d'énergie interne de la masse gazeuse passant de l'état A à l'état B est le même que si elle passait de A en A'. Mais lorsque le gaz passe de l'état A à l'état A', son volume restant constant, la quantité de chaleur qui lui est fournie, correspondant à la variation d'énergie interne est égale à

$$c(t_2 - t_1).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Donc finalement nous arrivons à l'égalité

$$Kc(t_2 - t_1) = Ap(v_2 - v_1) + c(t_2 - t_1)$$

ou :

$$Kc(t_2 - t_1) = AR(t_2 - t_1) + c(t_2 - t_1)$$

ou :

$$(K-1)c = AR$$

relation paramétrique dont on peut expérimentalement déterminer l'exactitude, puisque tous les termes qui y figurent sont mesurables.

Travail correspondant à la compression. — Nous étudierons indifféremment le travail à fournir à l'air pour le comprimer ou le travail fourni par la détente de ce même gaz : ces deux travaux sont égaux et de signe contraire.

Considérons 1 kilog. d'air auquel on cède une quantité de chaleur infiniment petite $d\mathcal{Q}$. Cette quantité de chaleur correspond à une variation d'énergie interne et à un certain travail extérieur $p\,dv$, d'où l'égalité :

$$d\mathcal{Q} = c\,dt + Ap\,dv$$

et en intégrant

$$\mathcal{Q} = c(t_2 - t_1) + A\int_{v_1}^{v_2} p\,dv$$

On peut dans l'expression de $\mathcal{Q}$ éliminer la température : il suffit pour cela de tenir compte de la relation :

$$pv = Rt$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou :

$$dt = \frac{1}{R}(p\,dv + v\,dp)$$

ce qui donne la relation :

$$dQ = \frac{C}{R}v\,dp + \left(\frac{C}{R} + A\right)p\,dv$$

Mais en vertu de la relation paramétrique établie plus haut,

$$\frac{C}{R} + A = \frac{KC}{R}$$

d'où :

$$dQ = \frac{C}{R}(v\,dp + K\,p\,dv)$$

On considère principalement deux modes de compression, donnant l'un, un minimum, et l'autre un maximum du travail : c'est la compression isotherme et la compression adiabatique.

Le travail développé par une détente isotherme est (fig. 148)

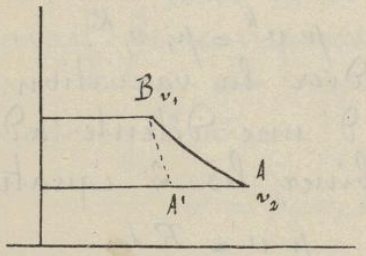


Fig. 148.

$$\mathcal{C} = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv \quad p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v}$$

ou :

$$\mathcal{C} = p_1 v_1 \log_e \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \log_e \frac{p_1}{p_2}$$

La même formule s'applique à la compression : le signe seul est changé.

Pour avoir le travail développé par une détente adiabatique se faisant suivant BA' le travail est :

$$\mathcal{C} = \int_{v_1}^{v'_2} p\,dv$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On le calcule en considérant la formule :

$$\mathcal{Q} = c\,(t'_2 - t_1) + A\int_{v_1}^{v_2} p\,dv$$

dans laquelle on fait

$$\mathcal{Q} = 0$$

d'où :

$$\mathcal{C} = Ec\,(t_2 - t'_2)$$

Les considérations précédentes permettent d'ailleurs de trouver facilement l'équation des courbes adiabatiques ; en effet, puisque

$$d\mathcal{Q} = 0$$

l'équation différentielles de ces courbes est :

$$v\,dp + K\,p\,dv = 0$$

ou :

$$\frac{dp'}{p} + K\,\frac{dv}{v} = 0$$

ou

$$p\,v^K = p_1\,v_1{}^K$$

Pour étudier la variation de température résultant d'une détente adiabatique, il suffit de combiner les 2 équations :

$$p\,v = R\,t$$

$$p\,v^K = p_1\,v_1{}^K$$

ce qui donne :

$$\frac{t}{t_2} = \left(\frac{v_1}{v}\right)^{K-1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{12}} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{0,29}$$

La température s'abaisse pendant la détente et inversement, elle s'élève dans la compression.

Dans la pratique, la compression

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

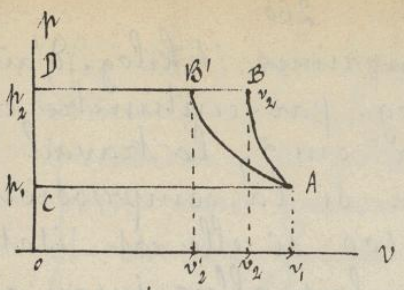


Fig. 149

est presque adiabatique, surtout si elle est rapide.

Dans les calculs numériques (fig. 149) on se donne la pression initiale de la masse d'air, sa pression finale, ainsi que la température initiale.

Pour calculer le travail de compression isotherme relatif à 1 kilogramme d'air, on applique la formule :

$$\mathcal{C} = p_1 v_1 \log \frac{p_2}{p_1} = R t_1 \log \frac{p_2}{p_1}$$

où on a, par exemple :

$$t_1 = 288°$$

Pour la compression adiabatique, le travail de compression de cette masse d'air de 1 kilog. est représenté par l'aire $CAB'D$ et est égal à :

$$\mathcal{C}' = p_1 v_1 + p_2 v_2 + Ec\,(t_2 - t_1)$$

$$= (Ec + R)(t_2 - t_1) = K Ec\,(t_2 - t_1)$$

t_1 est connu et t_2 se calcule par la formule

$$t_2 = t_1 \times \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,29}$$

Dans le cas de l'air :

$$K Ec = 100$$

Si, par exemple :

$$t_1 = 300°$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et si l'on veut comprimer 1 kilog. d'air de la pression de 1 kilog. par centimètre carré à celle de 2 kil. par cm², le travail dépensé est de 6500 kgm. si la compression est adiabatique et 6100 si elle est isotherme.

Si on voulait aller jusqu'à 10 kil. par centimètre carré, on dépenserait dans le premier cas 28200 kgm et 20400 dans le deuxième.

On consomme un excès de travail dans la compression adiabatique, qui est perdu par radiation thermique : l'air qui, à la fin de la compression occupe le volume v'_2 à la température t_2 se refroidit jusqu'à la température t_1, tandis que son volume passe de v'_2 à v'_1.

Espace libre. – Il existe, en réalité, dans le cylindre du compresseur, comme dans celui de la machine à vapeur un espace libre. Il y reste un volume d'air à la pression p_2, à la fin de la course du piston. Lorsque le piston revient en sens inverse, cet air se détend, et ce n'est que lorsque sa pression est descendue à la valeur p_1 que les soupapes d'admission de l'air extérieur s'ouvrent.

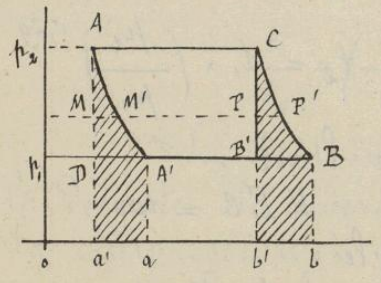


Fig. 150

Tout se passe comme si le volume du cylindre au lieu d'être ab n'était que a'b.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig 150). Le débit de l'appareil se trouve diminué et cela d'autant plus que la compression est plus forte. Il deviendrait nul pour une pression p_2 suffisamment élevée et on ne ferait que comprimer l'air dans l'espace libre.

On pourrait croire que la présence de l'espace diminue considérablement le rendement du compresseur, puisque l'on est obligé de comprimer une masse d'air inutile qui ne servira qu'à remplir l'espace libre. Il n'en est rien, car cette même masse d'air, lorsque le piston revient en arrière, c'est à dire de a vers b, se détend et restitue alors au compresseur un travail moteur. Ce travail est représenté par l'aire A A' a a'.

On voit par un raisonnement analogue à celui qui a été fait lors de l'étude de l'espace libre dans les machines à vapeur, que le travail dépensé pour comprimer la masse d'air inerte est représenté par l'aire C B' b' b B dans laquelle

$$bb' = a\,a'$$

et telle que toute abscisse telle que PP' soit égale à l'abscisse M M' de même ordonnée; et 2 semblables aires sont évidemment égales. En réalité, il y a cependant une petite dépense supplémentaire de travail qui tient à ce que l'air ne se comporte pas comme un ressort rigoureusement élastique et donne lieu à des dissipations de chaleur.

On a cherché, pour avoir le plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grand débit possible à atténuer l'effet de l'espace libre.

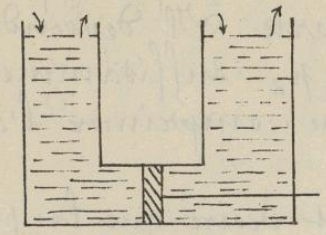


Fig. 151.

Pour effectuer le percement du tunnel du Mont-Cenis on se servait de compresseurs hydrauliques (fig 151) dans lesquels le piston était constitué par une masse d'eau mise en mouvement par un piston métallique. Ce dispositif est mauvais, car on ne peut donner une grande vitesse à la masse liquide, et même avec une vitesse réduite, on a des chocs considérables.

Actuellement on injecte dans le cylindre une petite quantité d'eau qui remplit l'espace libre.

Lorsqu'on veut avoir de l'air sec, on ne peut employer le dispositif précédent: on se sert souvent, notamment pour comprimer le gaz carbonique, d'une pompe dont le cylindre est limité par une face munie d'une soupape bien plane reposant sur son siège: le piston s'y applique fortement sous l'influence d'un ressort.

On peut employer également des pompes étagées qui permettent de faire la compression en 2 ou 3 fois, en diminuant dans chaque compresseur le rapport des pressions extrêmes.

Une autre manière de supprimer l'effet de l'espace libre consiste à le vider à la fin de la course du piston. On établit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour cela une communication entre les deux côtés du cylindre : la pression tombe sur la face avant du piston ; elle devient légèrement supérieure à p_1 sur l'autre face. Cette communication entre les deux parties du corps cylindrique est faite au moyen d'un tiroir mû par un excentrique.

Ce dispositif a l'avantage d'augmenter le débit du compresseur ; mais il fait perdre le travail moteur restitué par la détente de l'air compris dans l'espace libre.

Moyens de diminuer le travail. — Nous avons vu qu'il y avait intérêt à se rapprocher de la compression isotherme, et c'est pour cela qu'on cherche à refroidir l'air pendant sa compression. On se servait autrefois de compresseurs hydrauliques ; mais ils étaient peu efficaces à cause de la faible étendue des surfaces de refroidissement.

Lorsqu'on veut de l'air sec, on se sert de compresseurs à circulation d'eau qui, du reste, ne refroidissent pas beaucoup l'air ; on abaisse plutôt la température des parois de fonte du cylindre, ce qui est important pour la conservation de l'appareil.

Lorsqu'on ne craint pas l'humidité de l'air, on y fait des injections d'eau. L'eau qui pénètre en très fines gouttelettes se dépose dans le cylindre et est entraînée dans le réservoir à chaque coup de piston, sauf le volume constant qui remplit l'espace libre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

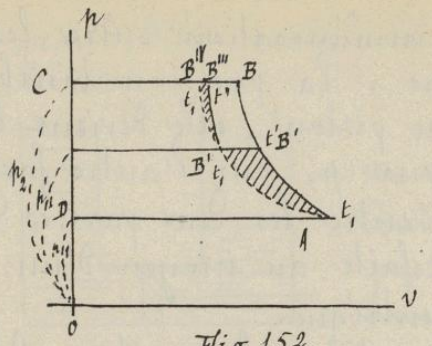


Fig. 152.

On peut enfin employer deux ou plusieurs compressions successives.

On comprime dans un premier cylindre la masse gazeuse, jusqu'à ce que son point figuratif vienne en B' (fig. 152) sa température est t' et sa pression p'_1. Cette masse gazeuse est refroidie dans un réservoir intermédiaire jusqu'à ce qu'elle ait repris sa température initiale t_1. Le point figuratif est alors en B''.

On le comprime à nouveau dans un deuxième cylindre ; sa température devient t'' et sa pression p_2 ; elle est représentée par le point B'''. On le laisse encore refroidir, jusqu'à ce que sa température redevienne égale à t_1.

Si la compression avait été isotherme on aurait été directement de A en B^{IV}, dans le cas actuel le travail est plus grand que dans la compression isotherme, et le surplus est représenté par la somme des aires $AB''B'$ et $B''B'''B^{IV}$.

Mais d'autre part, avec un seul cylindre la compression aurait été représentée par la courbe AB et avec deux cylindres on économise un travail représenté par l'aire $BB'B''B^{IV}$.

Cherchons quelle est la pression intermédiaire à adopter ?

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si nous supposons les compressions adiabatiques, le travail pour faire passer l'air de l'état A à l'état B' est

$$Ec\,(t'-t_1)$$

Dans le deuxième cylindre le travail est :

$$Ec\,(t''-t_1)$$

de sorte que le travail total est

$$Ec\,(t'+t''-2t_1)$$

et pour le rendre minimum, il faut rendre minimum la quantité $t'+t''$.

On a :

$$t' = t_1\left(\frac{p'_1}{p_1}\right)^{0,29}$$

$$t'' = t_1\left(\frac{p_2}{p'_1}\right)^{0,29}$$

d'où :

$$t't'' = t_1^2\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,29} = \text{constante}$$

Donc la somme $t'+t''$ est minimum pour

$$t' = t''$$

ou

$$p_1 = \sqrt{p_1 p_2}$$

On calculera en conséquence les dimensions à donner aux cylindres.

Causes accessoires diminuant le rendement. — Outre l'espace libre et la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

variation de température, il y a des causes multiples qui tendent à diminuer le rendement des compresseurs.

1° L'air pendant le remplissage du cylindre y est à une pression un peu inférieure à p_1, puisque l'air extérieur ouvre les soupapes, de même il faut comprimer cet air à une pression un peu supérieure à p_2 pour qu'il puisse sortir du cylindre et pénétrer dans le réservoir. Le travail à fournir au compresseur est de chef, légèrement augmenté (fig. 153)

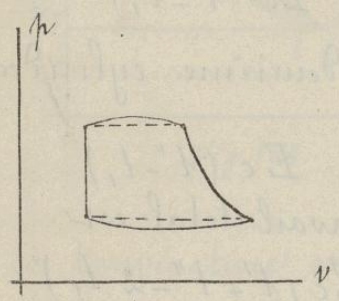


Fig. 153

On peut d'ailleurs facilement calculer les valeurs de cette dépression et de cette surpression : l'air étant à la pression p_1 et passant dans le cylindre à la pression

$$p'_1 < p_1$$

y entre avec une certaine vitesse u_1 qui se déduit de la vitesse du piston : si par exemple, la surface de la soupape d'admission est la dixième partie de celle du piston, la vitesse d'entrée de l'air sera 10 fois celle du piston, en négligeant la variation insignifiante du volume spécifique. On déduit de cette hypothèse la relation :

$$\frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_1 - p'_1}{\varpi}$$

formule qui permettra de calculer p'_1.

Cette même formule s'applique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au refoulement.

2° Il peut y avoir des fuites dans le corps de pompe.

3° Les soupapes ne se ferment pas instantanément : La soupape d'aspiration se ferme souvent lorsque le piston a déjà commencé la période de compression ; de même, la soupape de refoulement peut ne se fermer que lorsque le piston a commencé à aspirer l'air. Cette fermeture lente équivaut à une augmentation de l'espace nuisible.

On a essayé de remédier à la fermeture tardive des soupapes en les commandant mécaniquement ; on est alors amené à des complications d'appareils qui ne se justifient que pour les grosses unités.

Il est à remarquer qu'on ne doit pas faire de commande mécanique d'ouverture des soupapes. Elles s'ouvrent, en effet, quand la différence de pression de part et d'autre atteint une valeur donnée ; le point de la course du piston auquel s'ouvre une soupape ne peut être déterminé a priori et varie suivant les circonstances. C'est pour cette raison que les organes d'obturation, à commande mécanique, analogues aux tiroirs, sont peu à recommander.

4° Les résistances passives, comme dans toutes les machines, diminuent le rendement : il faut distinguer la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puissance effective et la puissance indiquée, la première étant ici supérieure à la seconde. Le rendement global d'un compresseur atteint 60 %.

Lorsqu'on accouple un compresseur à une machine à vapeur on emploie souvent le montage en tandem. Il y a lieu de remarquer que cette disposition n'est pas très favorable dans le cas des compresseurs : en effet, pendant la phase de compression de l'air, la résistance augmente, tandis que la puissance, produite par la détente de la vapeur, diminue.

Il est utile, lorsqu'on adopte ce montage, de munir l'appareil d'un volant destiné à régulariser le mouvement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

V.- Etude des moteurs à gaz.

1.- Théorie.

Principe.— Si on enflamme un volume déterminé d'un mélange de gaz combustible et d'air, il se produit une augmentation considérable de pression et de température. Lorsque le dosage d'air et de gaz est convenablement fait, la pression peut devenir trois ou quatre fois plus grande, et l'on conçoit ainsi qu'on pourra, à l'aide de la détente de ces gaz pousser un piston.

Lorsque le mélange gazeux initial est à la pression atmosphérique, le travail recueilli est faible, car les pressions restent faibles ; or, dans un moteur où les fluides agissent par pression, les basses pressions conduisent à des augmentations de volume des appareils et par suite à des frottements importants.

On a trouvé qu'il y avait intérêt à comprimer le mélange gazeux ; la pression, après inflammation est proportionnelle à la pression initiale. Il devient alors nécessaire d'adjoindre à la machine un compresseur ou un dispositif équivalent. La grande découverte de l'Ingénieur français Beau de Rochas a consisté à comprimer le mélange dans le cylindre moteur lui-même.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le cylindre de la machine sert donc tantôt de cylindre moteur, et tantôt de compresseur, et c'est cette double fonction qui est l'origine du cycle à quatre temps.

Dans ces machines, le cylindre est à simple effet, et le piston, à fond de course, laisse un grand espace libre, environ les 2/5 du volume total du cylindre.

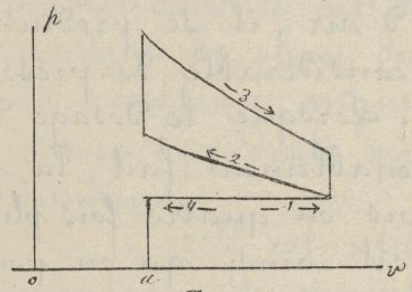


Fig. 154.

Pendant le premier temps (fig. 154) du cycle, le piston aspire le mélange, en se déplaçant de gauche à droite; au deuxième temps, il revient en comprimant ce mélange. Puis l'inflammation se produit; la pression augmente brusquement; au troisième temps le gaz se détend et pousse le piston. Lorsque ce piston est parvenu à fond de course, la soupape d'échappement s'ouvre; la pression devient brusquement égale à la pression atmosphérique, et durant le quatrième temps, les gaz résultant de la combustion sont expulsés.

Lorsque le piston est revenu à sa position initiale, il reste dans l'espace libre une certaine quantité de gaz non expulsée.

Ce gaz inerte qui reste dans le cylindre ne constitue pas un inconvénient. En effet, la proposition d'air et de gaz combustible n'est pas rigoureusement fixée; elle varie entre deux limites: l'une pour laquelle la combustion est complète, l'autre à partir de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

laquelle l'inflammation ne se produit plus.

L'expérience a montré que la proportion moyenne est la meilleure, et que le mélange doit contenir normalement un excès d'air. Cet air en excès se comporte comme un gaz inerte, et il n'y a par suite, aucun inconvénient à le remplacer par des gaz brûlés qui, eux aussi, sont des gaz inertes.

Le travail moteur est représenté par la portion de l'aire du diagramme couverte de hachures.

Ce travail, qui n'est produit que durant un demi-tour de la machine sur deux, est nécessairement très irrégulier; c'est ce qui a amené les constructions à adjoindre aux moteurs à gaz de lourds volants.

Le premier moteur à gaz vraiment pratique et économique a été réalisé par Otto en 1878, sous une forme qui est restée à peu près définitive.

Gaz combustibles.

1° Gaz d'éclairage. — Le gaz d'éclairage seul employé autrefois, est encore très utilisé pour les moteurs de faible puissance. Ce n'est pas un produit chimiquement défini; il renferme des carbures d'hydrogène, un peu d'oxyde de carbone, une petite proportion d'anhydride carbonique et d'azote.

Le pouvoir calorifique se mesure à l'aide de la bombe calorimétrique de Mather: c'est un petit récipient à l'intérieur duquel

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on place le combustible que l'on veut étudier. On y introduit de l'oxygène sous pression, on ferme hermétiquement, et on enflamme le gaz au moyen d'un fil métallique rendu incandescent par un courant électrique. Cet appareil est plongé dans un calorimètre, et on mesure le nombre de calories dégagées, ce qui donne la chaleur de combustion. En mettant en calorimètre un poids d'eau tel que sa température n'augmente pas de plus de quatre à cinq degrés, on évite les pertes par rayonnement et on a des mesures précises donnant le pouvoir calorifique du gaz à volume constant.

Ce calorimètre peut servir aussi bien pour les combustibles solides que pour les gaz. Le calorimètre Junker sert exclusivement pour les gaz; c'est une sorte de bec Bunsen dans lequel on brûle le gaz et qui est disposé de façon à recueillir la chaleur de combustion.

Les gaz brûlés passent à travers des tubes refroidis par une circulation d'eau, et y abandonnent la chaleur qu'ils possèdent. On réalise un régime uniforme dans lequel le débit de l'eau ainsi que son échauffement sont constants.

En mesurant la quantité de gaz brûlé pendant un temps donné, le poids d'eau qui a circulé et son échauffement, on en déduit la chaleur de combustion à pression constante.

La différence entre le pouvoir calorifique d'un gaz à pression constante et à volume

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constant est faible.

Parmi les gaz résultant de la combustion, il y a de la vapeur d'eau qui se condense dans le calorimètre en dégageant de la chaleur, tandis que, dans la pratique, elle s'échappe à l'état gazeux. On peut faire une correction correspondante puisque la chaleur de vaporisation n'est pas utilisée en réalité; Junker recueille l'eau condensée dans le calorimètre, et, d'après son poids, en déduit la chaleur latente de vaporisation.

On a trouvé que le pouvoir calorifique de un mètre cube de gaz sous la pression atmosphérique, à la température de 15° était en moyenne de 5000 calories.

2° Gaz pauvres. — Lorsque les moteurs ont une grande puissance, l'emploi du gaz d'éclairage devient onéreux.

L'industrie emploie depuis très longtemps des gaz destinés à chauffer des fours et fabriqués dans un gazogène. On a eu l'idée de les appliquer également à la marche des moteurs.

Il est nécessaire dans ce cas, que ces gaz combustibles soient exempts de goudrons qui peuvent se déposer dans les moteurs; il faut également que le combustible servant à fabriquer les gaz ne contienne pas de soufre et ne produise pas de cendres; ces dernières, en effet, pourraient être entraînées dans les conduites et dans les machines, et le soufre pourrait se transformer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en anhydride sulfureux ; après l'explosion cet anhydride passerait à l'état d'acide sulfurique et attaquerait les parois métalliques des cylindres.

On peut fabriquer le gaz en faisant passer de l'air sur un excès de charbon : il se forme de l'oxyde de carbone mélangé d'azote et d'un peu d'anhydride carbonique. Ce gaz est très pauvre et a un pouvoir calorifique qui ne dépasse pas 900 calories par mètre cube.

On peut aussi faire passer un courant de vapeur d'eau sur du charbon incandescent ; on obtient ainsi le gaz dit "gaz à l'eau" constitué par un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène, et dont le pouvoir calorifique est de 2500 calories environ, au mètre cube.

Mais la fabrication de ce gaz est assez compliquée car la décomposition de la vapeur d'eau absorbe plus de chaleur que n'en dégage la formation d'oxyde de carbone. La masse se refroidit donc peu à peu et il devient nécessaire d'interrompre par moments le passage de la vapeur d'eau et d'actionner une soufflerie qui active la combustion et réchauffe la masse.

Si l'on veut avoir une production continue de gaz il est indispensable d'avoir au moins deux gazogènes fonctionnant simultanément.

On peut combiner les deux réactions précédentes et envoyer en même temps sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du charbon incandescent de l'air et de la vapeur d'eau ; la chaleur absorbée par la décomposition de la vapeur d'eau est alors compensée par la production d'une grande quantité d'oxyde de carbone. On a un gazogène qui peut fonctionner d'une façon continue et qui fournit un gaz contenant de l'oxyde de carbone, de l'hydrogène et de l'azote. Le pouvoir calorifique de ce gaz est de 1400 calories au mètre cube ; il est spécialement connu sous le nom de "gaz pauvre".

Les appareils servant à sa fabrication sont assez simples à conduire lorsqu'on prend pour combustible le coke ou l'anthracite qui ne donnent pas de goudrons. On leur préfère souvent des combustibles moins coûteux, houilles ou lignites à bas prix. On se rend compte du reste qu'il y a avantage à prendre des houilles qui, par leur propre distillation, dégagent déjà des gaz combustibles. Mais lorsqu'on emploie la houille le fonctionnement des appareils devient difficile.

Cette question des gazogènes est actuellement à l'étude.

3° Gaz des hauts-fourneaux. — Les hauts-fourneaux dégagent des quantités énormes de gaz pauvres, dont le pouvoir calorifique ne dépasse 900 calories au mètre cube. Ces gaz étaient perdus autrefois ; puis on les utilisa soit pour chauffer l'air d'alimentation des hauts-fourneaux, soit en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les brûlant dans des chaudières qui actionnent des machines soufflantes ; enfin, plus récemment, on les a utilisés directement dans les moteurs à gaz. Il en est résulté une véritable révolution dans la construction de ces machines; on passait immédiatement des faibles aux grandes puissances, car on fut obligé de construire pour ces applications des moteurs de 1000 chevaux et plus.

Ces moteurs très puissants, réalisés d'abord pour ces applications métallurgiques, se sont ensuite répandus pour d'autres usages, en particulier dans les stations électriques où ils se sont trouvés en concurrence avec les turbines à vapeur.

La grosse difficulté à laquelle on s'est heurté lorsqu'on a employé les gaz des hauts-fourneaux, est venue de l'impureté de ces gaz : ils contiennent souvent des matières pulvérulentes, cendres et poussières de minerais dont les particules les plus ténues pénètrent dans les moteurs, corrodent les pièces et obstruent les orifices.

Le problème de l'épuration a été résolu :

1° par des changements brusques de direction : le courant gazeux peut passer d'une direction dans la direction perpendiculaire, tandis que les particules solides, par inertie, poursuivent leur trajet en ligne droite;

2° par des pluies d'eau très fines qui recueillent les poussières ;

3° par des lavages dans des barboteurs;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mais les lavages successifs paraissent avoir peu d'influence sur les matières très fines entraînées par les gaz.

4° par des ventilations à force centrifuge : en faisant arriver un petit jet d'eau au centre du ventilateur, cette eau est projetée et se trouve ainsi mélangée et brassée avec les gaz ; on intercale ensuite sur le trajet de ce fluide des bassins de dépôt où les gaz se séparent de l'eau.

C'est cette méthode d'épuration qui donne les meilleurs résultats et qui est la plus employée.

Etude du cycle. — Soit v_1 le volume (fig. 155) du cylindre rempli de gaz : ces gaz sont constitués par un mélange d'air et de gaz combustible ; avec le gaz d'éclairage, on fait un mélange comprenant un volume de gaz combustible et en moyenne huit à dix volumes d'air ; le minimum serait d'environ six volumes d'air, le maximum de douze volumes. En outre, ce même volume v_1 contient des gaz inertes restés dans l'espace libre lors du cycle précédent. La température t_1 de cette masse gazeuse est mal connue ; elle est un peu plus élevée que la température ambiante car le gaz introduit dans le cylindre s'y mélange avec une petite quantité de gaz brûlés, à température élevée et mal déterminée. Du reste, même si l'on connaissait exactement la température de ces gaz

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

inertes provenant de la combustion, on ne pourrait en déduire la température de ce volume v_1 de gaz car le mélange de gaz frais et de gaz inertes est loin d'être homogène; quand le piston se déplace, les gaz inertes restent à peu près en contact avec lui, et c'est à la suite de cette couche gazeuse que s'introduit le gaz combustible; comme la marche est rapide les gaz n'ont pas le temps de se mélanger complètement.

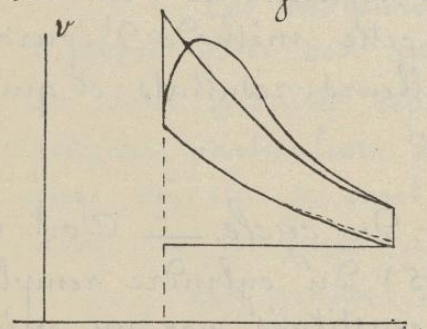


Fig. 155.

Pendant le deuxième temps du cycle le gaz est comprimé; son volume devient v_2, sa pression p_2 et sa température t_2.

On suppose la compression adiabatique ce qui permet, connaissant v_2 de calculer p_2 et t_2.

Puis l'explosion se fait: le volume reste v_2 mais la pression devient p_3 et la température t_3.

Nous substituons à l'explosion une opération fictive consistant à prendre les produits de la combustion comme préexistants et recevant d'une source de chaleur un nombre Q de calories égal à la chaleur de combustion. Le volume restant constant, on peut écrire:

$$Q = C(t_3 - t_2)$$

égalité qui détermine t_3.

Ceci suppose que toute la chaleur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est employée à augmenter la température du gaz ; il y a bien en réalité une petite contraction, mais elle est négligeable.

Connaissant t_3 on en déduit facilement p_3. On est conduit par ce calcul à des valeurs trop élevées de t_3 et de p_3. Cela semble venir de ce qu'on a supposé le coefficient C invariable tandis qu'il croît avec la température.

En donnant à C une valeur C' moyenne entre les valeurs qu'il prend aux températures t_2 et t_3

on a $Q = C'(t_3 - t_2)$.

Cette égalité donne des valeurs de p_3 et de t_3 voisines de celles qui sont réalisées expérimentalement.

Le troisième temps est une détente adiabatique ; mais la courbe de détente n'est pas représentée par l'équation

$$p v^{\gamma} = C^{te}$$

avec $\gamma = 1,4$, car aux hautes températures γ varie. On se sert d'une formule empirique

$$p v^{K'} = C^{te}$$

où $K' < K$ et compris entre 1,2 et 1,3.

On revient ainsi au volume v_2 et on calcule la pression p_4 et la température t_4 correspondante.

Enfin au quatrième temps l'échappement s'ouvre, la pression retombe à p_2 et les gaz sont expulsés.

Rendement. — Si T est le travail

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur fourni par la machine, le nombre de calories transformées en travail est :

$$\mathcal{Q} = AT$$

A étant l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur.

D'autre part, au moment de l'échappement la température baisse et passe de t_4 à t_1; la quantité de chaleur cédée à la source froide est :

$$\mathcal{Q}_2 = C(t_4 - t_1)$$

Ceci posé introduisons le mélange gazeux dans un calorimètre ; faisons-le exploser et ramenons-le à l'état initial en le laissant reprendre sa température primitive t_1 ; le volume v_1 ne change pas, et la pression est devenue un peu inférieure à p_1 à cause de la légère contraction subie par le gaz ; mais il est inutile d'en tenir compte. Soit $\mathcal{Q}$ la quantité de chaleur dégagée pendant la combustion. Cette même quantité de chaleur est dégagée dans le moteur ; mais dans ce cas on a :

$$\mathcal{Q} = \mathcal{Q}_2 + AT$$

et cette égalité est vraie quelle que soit l'évolution du gaz ; pour une autre forme du cycle on aurait encore :

$$\mathcal{Q} = \mathcal{Q}'_2 + AT'$$

Le rendement théorique est donc égal à :

$$\frac{AT}{\mathcal{Q}}$$

Il peut atteindre 40 %.

Ce rendement varie avec la compression

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

initial du mélange gazeux et augmente avec elle. On s'en rend facilement compte par la considération des diagrammes (fig. 156): Soient deux moteurs dans lesquels le volume total v_1 réservé au mélange gazeux à l'admission est le même; mais supposons que dans le second l'espace libre soit plus petit que dans le premier et la course utile du piston plus grande: le cycle du premier est représenté par:

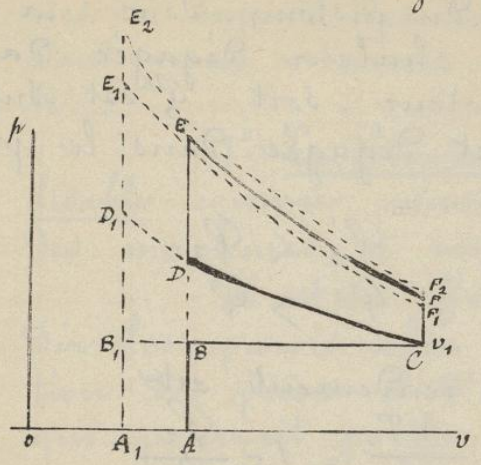


Fig. 156.

$$A\,B\,C\,D\,E\,F;$$

celui du deuxième par:

$$A,\,B,\,C\,D,\,E_2\,F_2\;;$$

car on ne sait pas si la courbe de détente du deuxième est au-dessus ou au-dessous de la courbe de détente du premier.

Quoi qu'il en soit le rendement du deuxième moteur dans lequel le gaz combustible est le plus comprimé est supérieur au rendement du premier. En effet, si la courbe de détente est représentée par $E_1 F_1$, la quantité de chaleur Q'_2 inutilisée dans le deuxième moteur est plus faible que dans le premier; d'autre part ce deuxième moteur consomme plus de gaz que le premier, puisque la quantité de gaz

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

absorbée est à chaque cycle proportionnelle à la course du piston ; donc la quantité totale de chaleur dégagée dans le deuxième moteur, soit Q' est supérieure à celle qui est dégagée dans le premier.

Donc :

$$Q'_2 < Q_2$$
$$Q' > Q$$

et comme le rendement est

$$\frac{AT}{Q} = 1 - \frac{Q_2}{Q}$$

on voit immédiatement que dans ce cas le rendement du deuxième moteur est supérieur à celui du premier.

Si la courbe de détente est représentée par $E_2 F_2$ le travail fourni par le moteur augmente en même temps que la chaleur totale dégagée

$$AT' > AT$$
$$Q' > Q.$$

Mais il est visible sur le diagramme que l'ordonnée FC croît moins vite que l'aire du diagramme, ou si l'on veut que la chaleur inutilisée croît moins vite que la chaleur transformée en travail, ce qui revient à dire que le rendement augmente encore dans ce cas.

La pratique a d'ailleurs confirmé ces conclusions théoriques.

Etude du cycle réel. — Le cycle réel s'écarte du cycle théorique, car il y a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ces moteurs comme dans les machines à vapeur des dissipations de chaleur dont nous n'avons pas encore tenu compte.

1°. La détente adiabatique est irréalisable comme nous l'avons vu à propos des machines à vapeur.

Il est en effet nécessaire de refroidir les parois afin d'assurer la conservation des pièces et d'éviter un échauffement qui pourrait porter les pièces jusqu'au rouge. C'est pourquoi on met autour du cylindre une enveloppe à circulation d'eau; (fig. 157) le piston ayant une de ses faces en contact constant avec l'atmosphère est refroidi par l'air ambiant.

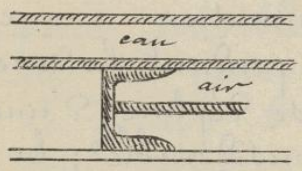


Fig. 157.

On mesure aisément la quantité de chaleur emportée par le courant d'eau : il suffit de mesurer le débit et de noter l'échauffement qui atteint 50°. Cette chaleur emportée est de 30 à 50 % de la chaleur totale de combustion.

Une partie, faible il est vrai, de la chaleur emportée par l'eau peut provenir des gaz d'échappement dont la température est d'environ 600°, et cette quantité de chaleur résiduelle serait perdue même dans un moteur à détente adiabatique ; en outre, pendant la phase de compression il y a des échanges de chaleur dans les deux sens, le mélange étant d'abord plus froid,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puis plus chaud que le paroi.

Au point de vue des échanges de chaleur, les grosses machines sont plus avantageuses que les petites ; la chaleur totale de combustion est en effet proportionnelle à la masse gazeuse introduite dans le cylindre, c'est-à-dire à peu près proportionnelle au cube de la dimension linéaire ; la quantité de chaleur perdue par échange dépend de la surface de contact avec les parois et augmente comme le carré de cette même dimension.

L'importance de cette perte diminue donc à mesure que la puissance du moteur augmente.

2° La combustion n'est pas instantanée et la vitesse d'inflammation a une valeur finie et déterminée ; pendant la durée de la combustion le piston se déplace d'une quantité plus ou moins considérable ; la combustion n'a donc plus lieu à volume constant ; la pression maxima est diminuée ainsi que la température d'explosion. La courbe s'incline (fig. 158) et se termine par un arrondi. L'inclinaison dépend évidemment de la durée de combustion et de la vitesse de marche de la machine. Elle sera plus accentuée pour des moteurs à gaz très pauvre et à grande vitesse.

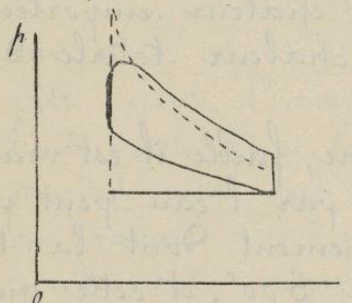


Fig. 158.

3° La combinaison est incomplète et en dosant les gaz d'échappement on peut y trouver

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un peu d'hydrogène et d'oxyde de carbone.

4° Il y a une contrepression à l'échappement, car l'orifice d'échappement est étroit ; la pression s'abaisse assez lentement dans le cylindre pour que le piston ait eu le temps de recommencer sa course en sens inverse.

On réduit d'ailleurs cette perte de travail en établissant l'avance à l'échappement : si la vidange du cylindre se fait en un temps t on ouvre la soupape au $\frac{t}{2}$ avant l'arrivée du piston à fond de course. Comme à cet instant il est très voisin de son point mort, il parcourt pendant ce temps $\frac{t}{2}$ un espace sensiblement moindre que la moitié du parcours qu'il exécuterait pendant le temps t s'il se déplaçait dans un seul sens. Cela résulte immédiatement de la loi sinusoïdale du déplacement du piston.

Une certaine contrepression persiste pendant l'évacuation des gaz : ceux-ci, devant être refoulés dans l'atmosphère, ont forcément une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, et l'aire limitée par le cycle se trouve un peu diminuée de ce chef.

Un effet analogue se produit pendant l'aspiration : la pression dans le cylindre est légèrement inférieure à la pression atmosphérique, et c'est ce qui produit une aire négative dans le diagramme (fig. 159).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour toutes ces raisons, le rendement réel est inférieur au rendement théorique: Soient Q la quantité totale de chaleur mise en jeu, capable de produire $E \times Q$ kilogrammètres, T le travail représenté par l'air du diagramme théorique et T_i le travail représenté par l'aire d'un diagramme réel.

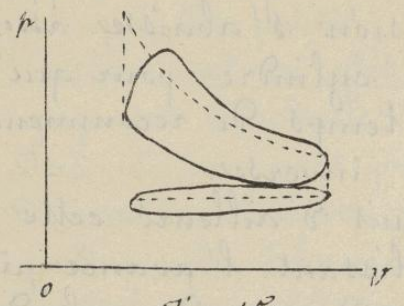


Fig. 159.

$$\frac{AT}{Q}$$

est le rendement de la machine déduit des lois de la thermodynamique;

$$\frac{AT_i}{Q}$$

est le rendement réellement donné par l'indicateur.

On trouve souvent

$$AT_i = 0,2 \text{ à } 0,3\ Q$$

Enfin le travail effectif T_e est une fraction du travail indiqué T_i fraction pour laquelle on peut admettre la valeur moyenne 0,8.

Le rendement final de ces moteurs qui varie ainsi de 0,16 à 0,25 dépasse notablement celui de la machine à vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2. - Construction.

Nous étudierons successivement le moteur Otto, type des moteurs à 4 temps, et les moteurs fonctionnant suivant des cycles différents.

a) Moteur Otto à quatre temps.

1° Dispositions générales. - Le cylindre est le plus souvent horizontal ; il est en général monté en porte à faux sur son bâti et fixé de façon à résister aux efforts horizontaux qui sont prépondérants et surpassent de beaucoup le poids propre de l'appareil. Dans les moteurs de grande puissance le poids du cylindre est considérable et il devient nécessaire de le supporter.

Le corps cylindrique est fondu avec son enveloppe et le fond ou culasse est une pièce rapportée. C'est sur la culasse qu'on dispose les organes de distribution. Il convient que l'enveloppe d'eau entoure le tout, cylindre, culasse et soupapes, qui se trouvent fortement chauffées.

L'étanchéité du piston est plus difficile à assurer que dans une machine à vapeur car les pressions sont élevées et les gaz fuient plus facilement que la vapeur,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

généralement chargée de gouttelettes d'eau. Comme dans les machines à vapeur, on se sert de bagues élastiques, mais on en dispose 4 ou 5 au lieu de 2.

La transmission se fait par bielle et manivelle ; le piston peut être prolongé par une tige et une crosse qui ne servent qu'à assurer le guidage et non l'étanchéité, contrairement aux machines à vapeur, puisque les moteurs à gaz sont à simple effet. D'ailleurs, on préfère souvent augmenter les dimensions du piston qui sert ainsi de guide, et la bielle se fixe directement au piston.

L'arbre est coudé et symétrique par rapport à un plan médian ; on répartit mieux ainsi les efforts horizontaux considérables que doit supporter cet arbre.

D'une façon générale, les pièces, dans ces moteurs, sont plus fortes que dans les machines à vapeur, car la pression maxima dans le cylindre d'un moteur à gaz atteint et dépasse 20 Kg/cm² et cette pression normale d'explosion n'est pas rigoureusement déterminée car le dosage n'est qu'approché et le gaz combustible varie.

Les dispositions que nous venons d'indiquer sont appliquées dans la construction des moteurs de 100 ou 200 chevaux.

On peut les appliquer à des moteurs de grande puissance, mais on préfère souvent dans ce cas les moteurs à plusieurs cylindres : chaque cylindre conserve des dimensions modérées et en même temps on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

régularise les effets moteurs.

On peut employer le moteur à 2 cylindres dans lesquels les pistons sont commandés par deux manivelles parallèles ou plus exactement faisant entre elles un angle égal à 2π.

Les phases de distribution se succèdent ainsi :

1er cylindre	1	2	3	4
2e " de	3	4	1	2

Si l'on remarque que la phase 3 est la seule qui soit motrice, on voit qu'avec cette disposition on a un effort moteur à chaque tour pendant 1/2 tour.

Souvent aussi, on place les deux cylindres en regard l'un de l'autre. On simplifie de cette façon la construction de l'arbre, mais l'effort est moins bien réparti que précédemment puisque la suite des phases de distributions est :

1er cylindre	1	2	3	4
2e cylindre	4	1	2	3

On monte aussi les deux cylindres en tandem du même côté de l'arbre.

Enfin on construit des moteurs à 4 cylindres dans lesquels un effort moteur s'exerce constamment.

2e Distribution. — La distribution se fait au moyen de soupapes qui s'ouvrent à des instants précis. Les dispositifs sont plus simples que ceux en usage dans les machines à vapeur, puisque,

à vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le cas actuel, la détente est rigoureusement déterminée, au moins dans les moteurs simples ; car l'admission variable sous l'action du régulateur est aussi réalisable dans certains moteurs à gaz dont le mécanisme s'approche d'ailleurs de celui de la machine à vapeur.

Les soupapes n'ont pas de parties frottantes et peuvent résister aux températures élevées. La soupape d'admission doit s'ouvrir au commencement du temps 1 et se fermer à la fin ; la soupape d'échappement s'ouvre un peu avant le quatrième temps et se ferme à la fin.

Tous ces mouvements ayant lieu en fin de course du piston, il est superflu de les rendre très rapides et de les commander par des déclics. On se sert simplement de cames montées sur un arbre auxiliaire perpendiculaire à l'arbre de la machine et tournant deux fois moins vite que celui-ci, grâce à des roues d'angle. Les cames sont constituées, comme dans les machines à vapeur à soupapes, par 2 profils circulaires concentriques convenablement raccordés.

Les soupapes ne sont pas à double siège car elles seraient très difficiles à construire à cause des températures élevées mises en jeu et des grandes dilatations qui en résultent ; d'ailleurs l'emploi des soupapes simples ne présente pas d'inconvénient : la soupape d'admission

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne supporte, en effet, aucune pression pendant la période d'ouverture et la soupape d'échappement ne supporte pas une pression bien forte au moment où elle s'ouvre.

3° Dosage. – Le dosage d'air et de gaz combustible est un des points délicats du fonctionnement des moteurs.

On ne peut songer à préparer à l'avance le mélange dans un récipient ; on serait trop exposé aux explosions à cause des retours de flammes possibles du moteur.

Pour effectuer le dosage, on fait arriver l'air et le gaz par des orifices à sections convenablement réglées. L'air introduit dans le cylindre est à la pression atmosphérique p_a ; le gaz est à une pression p'_a très légèrement supérieure et maintenue aussi constante que possible grâce à un petit régulateur. Pendant le premier temps, il règne dans le cylindre une pression p différent un peu de p_a et de p'_a ; les débits sont sensiblement proportionnels aux sections des orifices d'admission.

La section de passage du gaz est munie d'un diaphragme qui permet de la régler convenablement. Le réglage est fait une fois pour toutes avec un gaz donné.

On emploie souvent 2 soupapes conjuguées, se soulevant simultanément et livrant passage, l'une à l'air, l'autre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

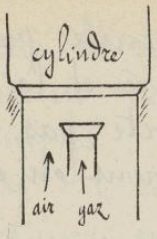
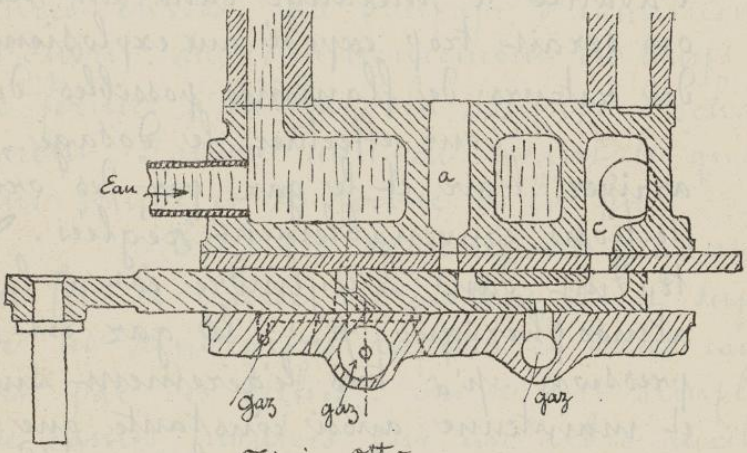


Fig. 160

au gaz (fig. 160). Parfois, pour éviter les retours en arrière pendant l'inflammation, on leur en adjoint une troisième destinée à bien fermer le cylindre.

Dans l'ancien moteur Otto l'introduction des gaz se faisait au moyen d'un tiroir frottant (fig. 161). Ce



Tiroir Otto.
Fig 167

tiroir était conduit par une bielle et une manivelle fixée sur l'arbre auxiliaire, placé sur le côté de la machine. Il glissait entre la culasse et une contre plaque dont le serrage pouvait être réglé par 4 écrous munis de ressorts. Le gaz arrive au tiroir par un conduit traversant la contre plaque; l'air, par un canal traversant la culasse. Le mélange s'échappe par une lumière du cylindre.

On a simplifié les distributions par soupapes, en remarquant que la machine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est pendant 1 tour, compresseur et pendant le suivant, moteur.

On peut dire aussi que l'organe d'admission fait partie de la pompe, et l'organe d'échappement appartient au moteur. C'est pourquoi on peut employer une soupape d'admission automatique comme dans une pompe à air ; c'est ce qui a été réalisé dans de petits moteurs marchant très vite.

La soupape d'échappement continue à être commandée ; on préfère d'ailleurs en général les soupapes d'admission commandées.

On peut même supprimer complètement les soupapes et faire la distribution par l'intermédiaire de lumières découvertes par le piston pendant sa course. Cette disposition est plus spécialement appliquée à l'échappement : les gaz s'échappent par surpression et grâce à une chasse d'air qui parcourt l'appareil. Nous reparlerons dans la suite de ce système.

Enfin on a employé des tiroirs cylindriques capables de résister aux hautes températures et dont l'application aux moteurs donne lieu aux mêmes remarques que pour les machines à vapeur.

4e Allumage. - L'allumage est destiné à produire l'explosion à la fin du deuxième temps. Dans l'ancien moteur Otto, on employait le procédé dit-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

" Du transport de flamme ".

Le tiroir, décrit plus haut, transportait une petite masse gazeuse enflammée prise à l'extérieur et mise au bout d'un temps très court en relation avec le cylindre. A cet effet il présentait une petite capacité contenant un peu de gaz et mise en contact avec un brûleur. Cette petite masse gazeuse s'enflammait et était transportée dans le cylindre grâce au mouvement du tiroir. Pour empêcher l'extinction de cette flamme on mettait le gaz enflammé en équilibre de pression avec les gaz comprimés dans le cylindre en ménageant un conduit de faible section qui faisait communiquer la cavité du tiroir et la lumière du cylindre pendant le transport.

On produit aussi l'allumage en mettant les gaz en contact au moment voulu avec une paroi métallique chauffée au rouge. Cette paroi est constituée par un tube chauffé par un bec Bunsen devant lequel on a placé une soupape.

Lorsque cette soupape est soulevée, les gaz pénètrent dans le tube et l'inflammation se fait. Mais il faut que la commande de la soupape passe dans le cylindre, ce qui exige la construction d'une tige munie d'une garniture étanche.

Cette soupape elle-même est soumise à de fortes variations de température et se dégrade rapidement.

C'est pourquoi on a modifié ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dispositif en allongeant le tube et en le chauffant seulement à son extrémité. A la fin du temps H de chaque cycle, ce tube ne contient que des gaz inertes ; lorsque les gaz combustibles, au temps 1, rentrent dans le cylindre, ce tube reste encore rempli de gaz inertes.

Au deuxième temps, les gaz frais sont comprimés et refoulent devant eux ces gaz inertes en pénétrant jusqu'à une certaine profondeur dans le tube. On chauffe donc le tube jusqu'au point voulu pour que les gaz s'enflamment.

Ce système, bon pour des petits moteurs, est peu précis et devient inapplicable aux grands moteurs.

Aujourd'hui, on se sert plutôt de l'étincelle électrique. L'installation qui peut être embarrassante dans le cas des moteurs mobiles ne présente aucune difficulté lorsqu'il s'agit de moteurs fixes.

On utilise deux classes d'appareils : on peut employer les bobines d'induction dont le circuit secondaire passe à l'intérieur du cylindre. L'étincelle jaillit à l'instant voulu grâce à un contact établi par l'arbre. On a quelquefois des ratés, car il peut se former dans le cylindre des dépôts de matières grasses qui encrassent les pointes entre lesquelles doivent jaillir les étincelles.

C'est ce qui a amené à renoncer à l'emploi de la bobine de Ruhmkorf,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour se servir presque exclusivement des extra courants de rupture.

La source d'énergie électrique est une magnéto dont le courant est rompu au moment voulu à l'intérieur du cylindre. Au lieu de 2 pointes on a dans ce cas 2 pièces en contact sur lesquelles il y a moins de chances de formations de dépôts.

Le courant électrique est produit pendant un temps très court : l'induit entraîné par l'arbre tourne entre les pôles d'aimants fixes, et ne tourne que d'un certain angle ; un instant avant la rupture, un ressort le ramène brusquement en sens inverse. C'est à ce moment qu'il y a production d'un courant intense dont la rupture produit l'étincelle destinée à enflammer le mélange gazeux.

5° Régularisation. — On opère généralement par suppression de l'admission du gaz combustible, et on place à cet effet une soupape d'arrêt sur la conduite d'admission. Ce procédé a pour lui la simplicité, mais il présente l'inconvénient d'augmenter les irrégularités de vitesse angulaire et se mal prêter à la marche en surcharge.

On peut aussi régler la proportion des gaz combustibles aspirés à l'aide, par exemple d'un papillon équilibré. Mais cette deuxième méthode est peu élastique car,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en marche normale, le dosage est faible et si l'on diminue un peu fortement la proportion de gaz dans le mélange, on tombe au-dessous de la limite d'inflammation ; cela revient alors à la méthode précédente, du tout ou rien, avec cette différence cependant, que l'on absorbe une certaine quantité de gaz qui ne sert à rien.

On peut enfin opérer par réduction du volume gazeux admis ; il suffit de fermer la soupape d'admission avant la fin de la course du piston. Théoriquement le dosage devrait rester le même, la différence ne provenant que du poids de combustible. En pratique, la proportion de gaz inertes augmente, puisque le volume de ces gaz est toujours représenté par le volume O_a de l'espace libre lequel reste invariable ; et par suite l'inflammabilité du mélange diminue ; elle diminue d'ailleurs peu, car le mélange gazeux et les gaz inertes ne se mêlent pas complètement et tendent plutôt à rester distincts.

Les appareils produisant la régulation sont les régulateurs à boules ordinaires : le manchon commande une came agissant sur la valve d'arrivée des gaz ou sur une valve supplémentaire. Cette came peut coulisser sur l'arbre de commande, et cesse d'être en prise avec la soupape lorsque la vitesse augmente.

Lorsqu'on opère par variation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'admission, la came a un profil variable qui produit, suivant la vitesse une modification de la section de passage des gaz.

Les régulateurs pendulaires agissent de la façon suivante (fig. 162) une petite masse pesante oscille autour d'un point A tandis que ce point A se déplace d'un mouvement rectiligne et alternatif, dont la durée est celle d'une course du piston. L'oscillation du pendule s'accomplit pendant le même temps.

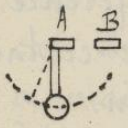


Fig. 162

La pièce coudée A peut actionner la tige B reliée à la soupape d'admission. Ceci posé, en marche normale, lorsque la partie A arrive vers B, le pendule a la position indiquée sur la figure et agit sur la tige B. Mais si la vitesse du moteur augmente, le pendule arrive en retard, la pièce A passe au-dessous de B, et l'ouverture n'a pas lieu.

6° Démarrage. - Pour mettre en marche un moteur à gaz, il est nécessaire d'introduire dans le cylindre et d'enflammer le mélange détonnant.

Dans le cas des petits moteurs, on réalise ces deux conditions en faisant faire quelques tours à la main, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une manivelle; l'inflammation est quelquefois difficile à obtenir si les parois sont froides et si, par l'ouverture des différents robinets, on n'a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas composé le mélange convenable.

Pour les moteurs à compression, l'opération est souvent plus laborieuse. On n'a d'abord qu'une explosion par cylindre tous les 2 tours, et il est nécessaire de comprimer le mélange, ce qui donne un surcroît de travail.

Aussi, dans un certain nombre de moteurs, supprime-t-on la compression au début de la marche. Une came ouvrira, par exemple, la soupape d'évacuation pendant une partie de la course de compression.

On peut amener le piston en un point convenable de sa course ; on charge le cylindre du mélange gazeux, soit grâce à la pression, même faible, qui peut régner dans la canalisation, soit en faisant tourner le moteur à la main ; puis le mélange est enflammé.

Dans les grands moteurs il est indispensable d'avoir des dispositifs mécaniques de mise en marche. On fera par exemple, agir directement sur le piston de l'air comprimé. Dans une station électrique, si le moteur commande une dynamo, on fera le démarrage en se servant de la dynamo pour entraîner le moteur.

7° Graissage. Le graissage des différents organes doit se faire comme dans la machine à vapeur. A l'intérieur du cylindre, il est plus difficile pour un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur à gaz que pour une machine à vapeur, à cause de la température élevée et de la présence des flammes.

Les huiles minérales sont spécialement employées. On l'introduit entre le cylindre et le piston, au moment où celui-ci est à fond de course, grâce à une petite pompe, mue par la machine, ou à l'aide d'un graisseur continu.

En tout cas, le graissage doit être abondant et constitue pour ces machines une source importante de dépenses.

8° Circulation d'eau. - On base le calcul de la circulation d'eau sur la nécessité d'enlever près de la moitié de la chaleur produite, en échauffant l'eau d'environ 50°.

Si on brûle 800 litres de gaz par cheval et par heure, on dégage 5000 calories environ, sur lesquelles 2000 sont emportées par l'eau; si on admet l'élévation de température de 50°, on voit qu'il faut 40 litres d'eau par cheval et par heure.

Quand l'eau est peu abondante, on se sert d'un réservoir de refroidissement de sorte que c'est toujours la même eau qui est utilisée. La circulation est assurée par simple différence de densité.

Dans le cas d'une grande puissance, nécessitant une grande masse d'eau, un refroidissement artificiel est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nécessaire : on projette par exemple l'eau en pluie fine dans un courant d'air.

9° Accessoires. - Pour éviter le bruit fait par l'échappement des gaz, le moteur est généralement muni d'un silencieux : c'est un réservoir avec des parois disposées en chicane, dans lequel la masse gazeuse se détend progressivement. On crée ainsi une petite contre pression à l'échappement.

Du côté de l'aspiration, on intercale une poche élastique entre l'arrivée de gaz et le moteur : cette poche sert de régulateur et empêche les perturbations que pourrait amener le fonctionnement du moteur dans la canalisation de gaz. Ce dispositif n'est réellement utile que dans le cas où le gaz du moteur sert également à assurer l'éclairage.

10° Puissance. - On mesure la puissance indiquée au moyen de diagrammes : l'ordonnée moyenne correspond à une pression de 4 à 6 kilogs par centimètre carré.

En planimétrant le diagramme, on mesure le travail produit par 2 tours de la machine.

On admet pour l'évaluation de la puissance normale 10 ou 15 % de rabais.

Quant à la puissance effective,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

elle est de 80 ou 85 % de la puissance indiquée.

B – Moteurs fonctionnant suivant d'autres cycles.

1° Moteurs à gaz très pauvre.

Lorsque le gaz est très pauvre, il est difficilement explosible, et l'on est conduit à employer de très fortes compressions : l'inflammation est facilitée et par la compression et par l'échauffement qui en résulte et par la faible quantité de gaz inerte qui se trouve mélangée aux gaz frais, à cause de la petitesse de l'espace libre. On atteint des pressions de 10 kilogs par cm².

Mais ces fortes compressions ne doivent pas être appliquées à des gaz riches, car on s'expose à une inflammation prématurée, à moins que l'on ne prenne soin de refroidir la masse gazeuse : ce refroidissement est obtenu en injectant dans le mélange un peu de vapeur d'eau sous pression, produite dans une petite chaudière que l'on chauffe économiquement avec les gaz d'échappement.

Cette influence refroidissante a évidemment tendance à diminuer la température à la fin de l'explosion et par suite à abaisser le rendement de la machine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Notons cependant que la vapeur se détend en même temps que le gaz, ce qui tend à relever un peu la courbe de détente et à augmenter légèrement la surface du cycle.

2° Moteurs à détente allongée. Au lieu d'arrêter la détente en E, on peut chercher à l'arrêter lorsque la pression du gaz est moindre et est représentée par DG en supposant que l'on détende jusqu'à la pression atmosphérique. On intercompt (fig 169) l'admission quand le piston est en b ; ce piston continuant à se déplacer vers la droite il règne une petite dépression dans le cylindre. Le piston se déplace aussi jusqu'en d par exemple. Au deuxième temps compression, puis explosion ; la détente au troisième temps est poussée jusqu'à la pression atmosphérique et enfin au quatrième les gaz sont évacués.

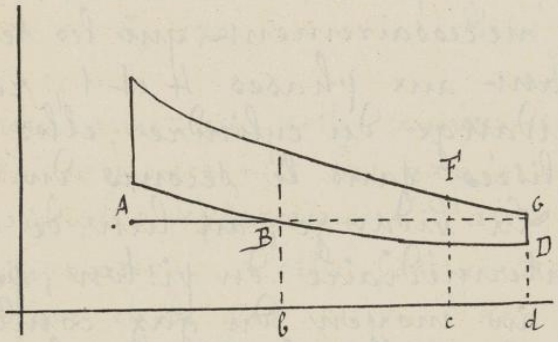


Fig. 169

On voit qu'on obtient ainsi une augmentation de travail ; mais par contre le volume du cylindre est augmenté et en même temps les résistances passives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

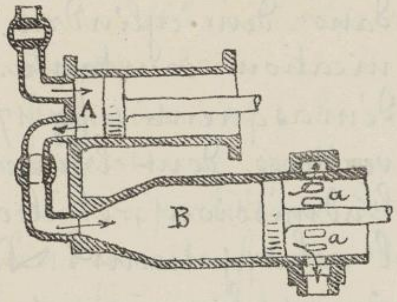
3° Moteurs à 2 temps. — Le moteur à quatre temps présente deux inconvénients : l'effort moteur se produit 1/2 tour tous les 2 tours ce qui oblige à augmenter le volume des machines, et la vitesse angulaire est irrégulière.

On a essayé de doubler les périodes motrices : il suffit pour cela de remarquer que le fonctionnement du moteur n'exige nécessairement que les temps 2 et 3 : quant aux phases 4 et 1, remplissage et vidange du cylindre, elles peuvent être réalisées sans le secours du piston.

La vidange, au lieu de se faire par l'intermédiaire du piston, peut être obtenue au moyen du gaz combustible rentrant dans le cylindre et chassant devant lui les gaz brulés. Mais de la sorte, on risquerait de perdre une petite quantité de ces gaz combustibles ; aussi parfois intercale-t-on de l'air pur entre la charge nouvelle et les gaz brulés : il suffit d'imaginer qu'au lieu d'envoyer immédiatement dans le cylindre, un mélange d'air et de gaz, on envoie d'abord de l'air pur, puis quelques instants après le mélange gazeux. C'est cette masse d'air pur qui entre la première qui est destinée à jouer le rôle de piston et à chasser les gaz brulés. On a ainsi un moteur à deux temps. Cette disposition permet en outre de supprimer la soupape d'échappement ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le piston, arrivant à fond de course, démasque sur la périphérie du cylindre des ouvertures destinées à laisser passage aux gaz brulés.



Moteur à deux temps de D. Clerk.
Fig. 170

Pendant que l'échappement est ouvert, une pompe refoule de l'air (fig. 170) puis le mélange d'air et de gaz dans le cylindre moteur.

Il convient de remarquer que cette pompe n'a pas à effectuer la compression des gaz : elle produit un simple déplacement d'air avec un faible supression. Cette pompe aspire un mélange d'air et de gaz suivi d'air pur, de sorte que, lorsque le piston revient après l'aspiration, c'est l'air pur qui sort le premier et produit la vidange du cylindre moteur, empêchant en même temps les gaz combustibles qui le suivent de sortir par les orifices d'échappement.

On voit que dans ces moteurs la fin de la course du piston dans la phase de détente ne produit pas de travail moteur si bien qu'il ne serait pas tout à fait exact de dire que la puissance motrice du moteur à deux temps est double de celle du moteur à 4 temps.

On a cherché à supprimer les soupapes d'admission comme on a supprimé celles d'échappement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut pour cela, employer deux pistons parallèles qui fonctionnent ensemble dans deux cylindres en communication constante. Ces pistons démasquent (fig. 171) deux ouvertures dont l'une sert à l'admission, et l'autre à l'échappement. La chasse d'air se fait suivant le même principe que précédemment.

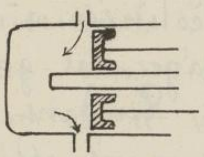


Fig. 171.

On pourrait imaginer que l'un des deux cylindres fût redressé de 180°; on aurait alors un cylindre unique au lieu d'avoir deux cylindres conjugués parallèlement. C'est ce qui est réalisé dans le moteur Von Oechelhauser, spécialement utilisé pour les gaz de hauts-fourneaux. Les deux pistons qui se meuvent dans le même cylindre (fig. 172) ont des mouvements de sens opposé; la machine comporte un seul arbre sur lequel est directement articulé un des pistons; l'autre y est relié par l'intermédiaire d'une traverse, des 2 tiges en retour formant cadre et de 2 bielles. La lumière d'admission se compose de deux parties, l'une donnant de l'air pur, l'autre le mélange combustible. La pompe d'alimentation est à double effet; elle emmagasine

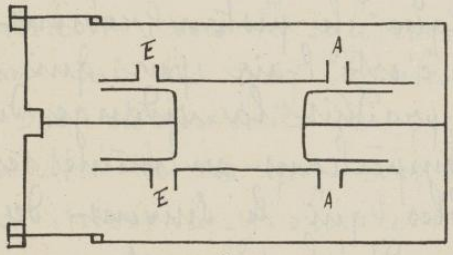


Fig. 172.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un côté de l'air et de l'autre le mélange.

4e Moteurs à double effet. — Ces moteurs sont à 4 ou à 2 temps. Dans le premier cas, les deux temps 3 se succèdent forcément, ce qui ne constitue pas une très bonne répartition de l'effort moteur. Le cylindre est fermé de deux côtés, et la tige du piston en sort par une garniture.

On se heurte à des difficultés provenant de l'échauffement des pièces. On étend la circulation d'eau au piston. La contre tige est munie de deux conduites servant l'une à l'amenée de l'eau et l'autre à son évacuation.

La sortie de l'eau n'est pas difficile à réaliser, mais l'entrée est plus délicate: on peut relier la conduite d'amenée à un réservoir situé au-dessus d'elle par un tube de caoutchouc; on peut aussi se servir de tuyaux articulés, ou bien d'un conduit recevant un mouvement rectiligne et alternatif, percé d'un trou et restant constamment dans un corps de pompe (fig. 173).

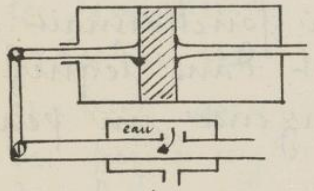


Fig. 173

Pour les garnitures, on se sert de métaux non fusibles à la température de fonctionnement du moteur; certaines garnitures en métal blanc qui peuvent servir pour les machines à vapeur sont à rejeter ici.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

5° *Moteurs anciens.* — Les premiers moteurs à gaz dont le fonctionnement paraît avoir été satisfaisant sont les moteurs Lenoir 1860. Ils étaient à double effet et sans compression.

L'aspiration et l'explosion se produisent pendant la même course du piston. Le diagramme (fig. 174) a une surface faible, surtout si l'on tient compte de ce que l'explosion ne se fait pas à volume constant.

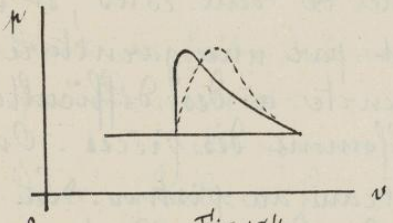


Fig. 174

Ces moteurs consommaient de 3 à 4 mètres cubes de gaz par cheval-heure.

Après le moteur Lenoir vint le moteur Hugon qui fonctionnait également sans compression, et dans lequel on ajoutait à la masse gazeuse un peu de vapeur d'eau.

En 1867 apparut le moteur atmosphérique Otto et Langen, moteur dans lequel la détente est poussée bien au-dessous de la pression atmosphérique, jusqu'à ce que la température des gaz reprenne la valeur initiale t_1.

Le cycle théorique comprend une détente adiabatique de t_1 à t_2, suivie (fig. 175) d'une compression isotherme des gaz brûlés, qui les ramène à la pression atmosphérique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

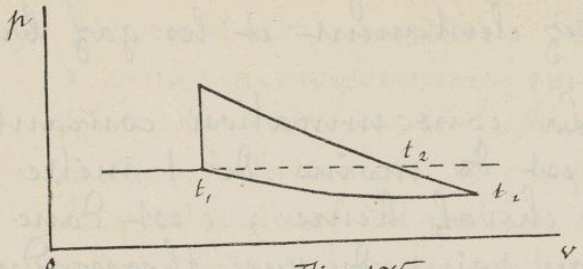


Fig. 175.

Ce moteur exige donc que l'une des phases soit adiabatique et la suivante isotherme.

Or, les échanges de chaleur dépendent de la durée des opérations ; si donc le piston se déplaçait très rapidement dans un sens et très lentement dans l'autre, la première phase serait sensiblement adiabatique et la deuxième sensiblement isotherme. On réalise ces deux opérations par la méthode suivante :

le cylindre est vertical et la tige du piston porte une crémaillère qui actionne l'arbre moteur pendant la descente seulement : on arrive à ce résultat grâce à une roue dentée folle sur l'arbre moteur auquel elle n'est reliée que par de petits cylindres en acier qui se coincent dans leur logement quand le mouvement relatif de la roue et de l'arbre a lieu dans un certain sens, pour se décoincer et laisser la roue libre quand le mouvement se produit en sens inverse.

Ceci posé, au moment de l'explosion, le piston est projeté vers le haut et son mouvement se fait librement, par suite librement. Dans la descente, au contraire, la crémaillère embraye l'arbre et la descente s'effectue

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec la vitesse de régime de la machine, par suite, assez lentement et les gaz brûlés sont expulsés.

La consommation courante de ce moteur est de moins de 1 mètre cube de gaz par cheval heure ; c'est donc un bon moteur au point de vue thermodynamique ; mais les liaisons mécaniques de l'appareil laissent à désirer et il est actuellement abandonné.

3 - Prix de revient de la puissance motrice.

Le prix de revient s'évalue facilement quand le moteur est en marche. Quant au devis on peut facilement l'établir en se servant des prix des très nombreux modèles qui existent actuellement.

Soit par exemple un moteur de 10 chevaux marchant 300 jours par an et 10 heures par jour.

Le travail total effectué dans le courant de l'année est égal à 30.000 chevaux-heures. On peut évaluer à 6000 f le prix d'achat du moteur, la construction des fondations, l'installation de la tuyauterie et tous les travaux que nécessite la pose de ce moteur.

L'amortissement de cette somme est assez difficile à calculer, car on ignore a priori quelle sera la durée de la machine, durée qui dépend d'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

foule de causes très diverses : construction du moteur, inventions et perfectionnements à venir, accroissement éventuel des services, etc... Nous donnerons 700 f comme intérêts et amortissement de la somme, et on peut évaluer à 200 f le prix annuel des petites réparations. Nous supposerons que le moteur consomme 650 litres de gaz d'éclairage par cheval et par heure, de sorte que le prix total de revient du cheval-heure sera :

Intérêt et amortissement, entretien	3 cmes
Gaz d'éclairage	13
Graissage, eau	1
Main d'œuvre	2
par cheval-heure	19 centimes

Soit maintenant un moteur de 100 chevaux avec gazogène ; nous compterons environ 50.000 f pour l'installation du moteur et 10.000 f pour celle des gazogènes, soit au total 60.000 f. L'intérêt et l'amortissement peuvent être évalués à 6000 f par an ; l'entretien sera de 3000 f, soit en tout 9000 f par an. Si le gaz est fabriqué avec de l'anthracite, il en faut 600 gram. par cheval heure, le kilog. coûtant en moyenne 3 centimes.

La dépense par cheval heure peut alors se résumer dans le tableau suivant :

Intérêt et amortissement, entretien	3 cmes
Charbon	1, 8
Graissage, eau	0, 5
Main d'œuvre	1
	6 cmes 3 par ch.h.

et l'on trouve dans ce cas le tiers du prix précédent.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VI. – Moteurs à combustible liquide.

Les liquides employés sont presque toujours des dérivés du pétrole.

Les pétroles bruts sont soumis à la distillation fractionnée, donnent successivement:

1°. des essences très volatiles et très inflammables;

2°. les pétroles lampants qui ne s'enflamment pas à froid;

3°. les huiles lourdes de graissage;

4°. des résidus (mazouts) servant de combustibles sous les chaudières.

Ces corps combustibles peuvent être brûlés à l'intérieur même des cylindres des moteurs; ce sont surtout les essences qui sont employées, parce qu'elles émettent des vapeurs à la température ambiante. Il suffit alors de mettre un certain volume d'air en contact avec le liquide pour obtenir des mélanges gazeux combustibles.

La difficulté pour le bon emploi des essences consiste à réaliser un bon dosage, la proportion d'essence volatilisée pouvant facilement varier.

Carburateurs. — Les appareils destinés à effectuer ce dosage sont appelés des carburateurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a) Carburateurs à barbotage. — Ce furent les premiers carburateurs employés ; ils ont d'ailleurs donné de mauvais résultats car l'essence n'est pas un produit homogène ; c'est au contraire un mélange d'éléments de volatilité très variable, et le courant d'air enlève les parties les plus volatiles, formant un mélange riche tout d'abord, mais qui va en s'appauvrissant peu à peu.

b) Carburateurs à léchage. — L'air passe à la surface même du liquide, entre la surface libre et une plaque de tôle placée au-dessus, à une faible distance.

L'inconvénient est à peu près le même.

c) Carburateurs à giclage. — Une petite quantité de liquide est injectée dans l'air entraîné au cylindre : ce liquide est pulvérisé de façon à se volatiliser complètement.

L'appareil est constitué (fig. 176) par un petit réservoir d'essence dans lequel on maintient un niveau constant grâce à un robinet à flotteur.

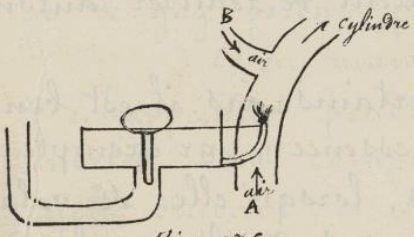


Fig. 176

Cette essence peut s'échapper par un petit orifice de section convenable situé à quelques millimètres au-dessus de la surface libre du liquide, de telle sorte que normalement l'essence ne peut sortir. Mais pendant le temps s, l'air est aspiré par le moteur, il se produit dans les tubes d'aspiration une petite dépression qui fait jaillir l'essence.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une ouverture B réglable donne une admission d'air supplémentaire qui se mélange à l'air carburé.

Ce réglage est empirique et se fait un peu « au sentiment » car rien de précis dans la marche du moteur n'indique que le réglage soit au point. Il arrive souvent qu'on consomme plus d'essence que cela ne serait nécessaire. Lorsque la vitesse du moteur reste constante, le dosage ne varie pas; si la vitesse change, le dosage se modifie également, puisque, le piston marchant plus lentement par exemple, l'air est appelé par une différence de pression moindre, et la quantité de pétrole qui s'échappe par l'orifice tend à diminuer. Il faut alors, pour conserver les proportions de mélange, réduire la section de l'ouverture d'admission supplémentaire.

Divers carburateurs, notamment celui de Krebs, permettent de réaliser automatiquement ce réglage.

Dans certains cas il est bon de chauffer légèrement l'essence, par exemple par les temps très froids, lorsqu'elle se volatilise difficilement. On se sert de l'eau chaude de circulation qui vient des enveloppes du cylindre, ou d'une petite dérivation des gaz d'échappement.

Il est à remarquer qu'en chauffant l'air on diminue le poids de la charge admise dans le cylindre à chaque coup de piston.

Allumage. — Mêmes procédés que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans le cas des moteurs à gaz.

Régularisation. — La régularisation s'effectue au moyen d'un régulateur à force centrifuge qui agit sur les soupapes, par tout ou rien.

On peut régulariser le mouvement :

a) en bloquant la soupape d'admission;

b) en maintenant ouverte pendant le temps 1 la soupape d'échappement : si la soupape d'admission s'ouvre comme la soupape d'une pompe, on voit que dans ce cas elle restera fermée pendant le temps 1, puisqu'il ne pourra évidemment se produire de dépression dans le cylindre moteur. Ce procédé n'est pas recommandable car on n'est pas certain, en fait, que la soupape d'admission restera bien fermée pendant le premier temps et qu'on ne laissera pas entrer dans le cylindre une charge de gaz perdue pour rien;

c) en maintenant fermée la soupape d'échappement pendant le temps 4. Les gaz inertes sont comprimés, et au temps 1 du cycle suivant, ce sont ces gaz qui se détendent, empêchant la rentrée des gaz frais.

Enfin, on fait souvent agir le régulateur sur un papillon qui réduit le poids d'air carburé aspiré.

Vitesse de rotation. — On a été amené à donner à ces moteurs de grandes vitesses de rotation, dépassant quelquefois 1500 tours par minute.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La durée de l'allumage, ou plus exactement de la combustion complète prend alors une grande importance.

A la vitesse de 1800 tours par minute, une course simple du piston ne dépasse pas $\frac{1}{60}$ de seconde.

Il est bon de réaliser une avance à l'allumage : l'étincelle jaillit un peu avant que le piston soit à fond de course, et la pression finale est obtenue très peu de temps après que le piston est reparti en sens inverse.

Moteur Banki. — Ce moteur est remarquable par une très forte compression, qui atteint jusqu'à 9 $\frac{k}{cm^2}$. Pour éviter une explosion prématurée, on refroidit la masse gazeuse en faisant entrer dans le cylindre un poids d'eau cinq fois plus grande que celui de l'essence : l'eau se vaporise et on comprime un mélange d'air et de vapeur d'eau : on a ainsi un moteur mixte à pression moindre et à détente moins rapide. La consommation de ce moteur descend à 250 grammes d'essence par cheval effectif et par heure (une consommation de 500 grammes est fréquente avec les moteurs ordinaires).

Emploi des pétroles et des huiles lourdes. — L'emploi du pétrole lampant et des huiles lourdes serait économique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et offrirait plus de sécurité que celui de l'essence.

On n'est pas cependant parvenu à l'heure présente, à une solution vraiment pratique; si le moteur n'est pas réglé d'une façon irréprochable, il s'y produit des encrassements, des dépôts de charbon, qui en empêchent bientôt le fonctionnement. Le procédé employé pour faire fonctionner ces moteurs et le même que pour les moteurs à essence; mais dans ce cas, les vapeurs dont se charge l'air ne sont plus produites à basse température: le pétrole se vaporise dans un carburateur chauffé et ses vapeurs se mélangent à l'air pur en proportions convenables (moteur Priestmann). Au moment de la mise en marche, le chauffage du liquide est assuré par un brûleur spécial; en marche normale, on utilise à cet effet les gaz d'échappement. Le réglage se fait comme dans les moteurs à essence.

Dans certains moteurs, la carburation se fait à l'intérieur même du cylindre. Ce cylindre est prolongé par une chambre d'explosion, non refroidie; elle est chauffée au moment de la mise en marche et elle reste à une température assez élevée pour que le pétrole s'y vaporise.

Moteur Diesel. — Ce moteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est à quatre temps et rentre dans la catégorie des moteurs à combustion, à pression constante et à volume variable (fig. 177).

Au premier temps le moteur aspire l'air pur. Au second temps, cet air est comprimé jusqu'à près de 40 $\frac{k}{cm^2}$, ce qui exige un espace libre très petit. Cette compression est sensiblement adiabatique ; l'air s'échauffe fortement et la température d'inflammation du combustible est largement dépassée de façon à ce que l'allumage soit spontané. C'est seulement au moment de l'extrémité de la course du piston qu'entre le combustible, qui s'allume à mesure qu'il entre et la combustion se produit durant le déplacement ac du piston ; la pression reste constante tandis que la température s'élève.

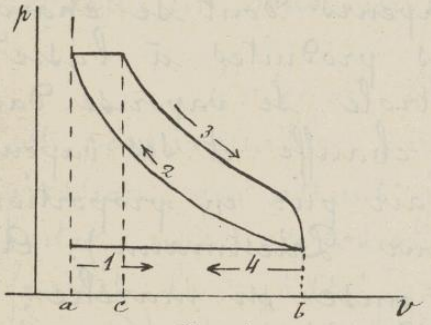


Fig. 177.

Aux temps 3 et 4 les gaz se détendent puis sont expulsés.

La principale difficulté rencontrée dans le fonctionnement de ce moteur vient de l'introduction du pétrole qui doit être très faible ; il serait nécessaire d'employer une très petite pompe et des soupapes très bien réglées sans quoi on serait exposé à des variations considérables

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans le dosage. Le pétrole est refoulé en léger excès dans un petit réservoir, au moyen d'une pompe. Il est repris par un jet d'air comprimé par une deuxième pompe à une pression supérieure à celle qui règne dans le cylindre. C'est ce jet d'air comprimé chargé de pétrole qui est entraîné dans le cylindre.

Le régulateur agit automatiquement sur la longueur ac du diagramme.

La consommation de ce moteur est très faible, 250 grammes par cheval-heure.

Il fonctionne bien avec les pétroles lampants ou les pétroles lourds.

VII.— Automobiles.

1°. Direction. — Les automobiles ont ordinairement quatre roues; deux roues motrices et deux roues directrices, ces dernières à l'avant de la voiture.

Dans le mouvement en courbe, les normales au plan des roues menées sur le sol par les points de contact doivent concourir.

Comme les deux roues motrices sont montées sur le même essieu, cela revient à dire que les normales aux 2 roues de devant concourent sur la normale commune aux deux roues d'arrière. C'est sur ce principe que repose le mécanisme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de Direction.

On peut remarquer que dans les voitures à chevaux cette condition est satisfaite grâce à l'avant-train mobile sur lequel sont montées les deux roues directrices. Mais on ne pouvait songer dans les automobiles à employer ce dispositif ; cet avant-train est maintenu par le cheval qui tire la voiture ; le conducteur de l'automobile serait incapable de lui donner une direction stable.

Pour la direction, chaque roue d'avant pivote séparément autour d'un axe vertical ; il est nécessaire que la roue intérieure à une courbe tourne d'un angle plus grand que la roue extérieure.

On réalise ce mouvement grâce à une disposition convenable d'une bielle et de manivelles.

Le volant de direction est placé sur la partie suspendue de la voiture ; il doit être en relation avec les roues qui ne sont pas suspendues, il faut donc que la liaison permette les oscillations des ressorts. On effectue la transmission par l'intermédiaire d'un arbre assez long dont les 2 extrémités sont articulées à la Cardan.

Il convient que cette transmission ne soit pas réversible et pour cela on emploie la transmission par vis et écrou qui donne un mouvement irréversible à condition que le pas de l'hélice ne soit pas trop allongé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les roues directrices sont déviées de 45° au plus de leur direction normale ; avec des angles de déviation plus grands, la force poussante risquerait de produire le glissement transversal des roues directrices.

Dans le mouvement en courbe, les roues motrices doivent pouvoir prendre des vitesses différentes. C'est ce qu'on obtient grâce au différentiel : les axes des deux roues X et Y sont indépendants l'un de l'autre (fig. 178) et sont reliés par l'intermédiaire de deux roues d'engrenage et de deux pignons satellites π et π'. Ces deux pignons sont fous sur un axe situé entre les deux roues R et R' et perpendiculaire en XY. En marche normale quand les deux roues éprouvent la même résistance le système tourne en bloc autour de l'axe XY et les deux roues ont la même vitesse ; quand elles éprouvent des résistances différentes les pignons tournent autour de leur axe et les deux roues prennent des vitesses différentes.

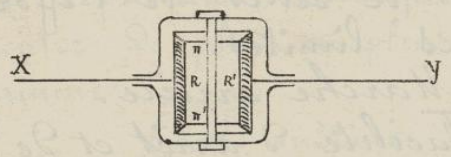


Fig. 178.

Ce mécanisme a, au moins théoriquement l'inconvénient d'exposer à des "embardées" en laissant les deux roues libres de prendre des vitesses inégales par suite des aspérités du sol et des résistances variables qu'offrent à chaque instant les petits obstacles. En pratique il a donné de bons résultats et est universellement employé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Moteur. — I. — Conditions à remplir. — Un moteur d'automobile doit répondre aux conditions suivantes :

a) Effort variable. — La résistance à surmonter varie avec la nature et avec le profil de la route ; elle augmente d'ailleurs avec la vitesse. En outre le moteur doit aussi fournir le travail d'accélération du véhicule.

b) Vitesse variable. — Le véhicule doit pouvoir marcher à vitesse variable ; les variations peuvent d'ailleurs être inverses de celles de l'effort moteur, entre certaines limites.

c) Marche arrière.

d) Facilité d'arrêt et de démarrage.

La machine à vapeur répond à ces conditions.

a) Elle donne des efforts moteurs variables car il suffit de modifier le degré d'admission de vapeur, ou de faire varier la pression de la vapeur admise. Il est à remarquer cependant que la dépense de vapeur par cheval-heure augmente quand on s'écarte du régime normal de marche.

b) La marche à vitesse variable s'obtient fort aisément.

c) De même, la marche arrière.

d) L'arrêt et le démarrage s'obtiennent par simple ouverture ou fermeture de l'admission.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Néanmoins, la machine à vapeur est peu employée car elle exige une chaudière, et une ample provision d'eau et de combustible.

Le moteur à essence remplit moins bien que la machine à vapeur les conditions indiquées précédemment:

a) Le champ de variation du moment moteur est faible, et le diagramme se prête peu aux modifications ; la forme de ce dernier dépend essentiellement de la carburation qui est difficilement réglable. On doit donc renoncer à une commande directe des roues. (On doit cependant remarquer qu'on arrive à augmenter de plus en plus la variation du diagramme.

b) Le moteur à essence se prête à des variations de vitesse ; encore faut-il remarquer que la vitesse réagit sur la carburation. Toutefois certains carburateurs compensent l'effet de la variation de vitesse.

c) Le moteur à essence ne se prête guère au changement de marche.

d) Le démarrage de ces moteurs est difficile.

On peut corriger ces inconvénients à l'aide d'organes mécaniques supplémentaires.

a) Pour modifier l'effort moteur, on a un organe connu sous le nom de "changement de vitesse". C'est un appareil comprenant une série d'engrenages permettant de modifier l'effort de traction en faisant varier le rapport entre la vitesse du moteur et la vitesse des roues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b) Le changement de marche s'obtient en ajoutant une roue dentée supplémentaire à l'appareil précédent, pour renverser le sens du mouvement des roues.

c) On évite les fréquents démarrages en n'arrêtant point le moteur et en le munissant d'un dispositif d'embrayage qui lui permet soit de tourner à vide, soit d'entraîner la voiture.

II.– *Chassis.*— Le moteur est porté par le chassis suspendu de la voiture.

Les chassis anciens étaient en bois ou en fer laminé, ou quelquefois formés de tubes assemblés.

On emploie souvent aujourd'hui la tôle emboutie qui permet de concilier la résistance de chaque partie et la légèreté.

III.– *Cylindre.*— On aurait pu, comme sur les locomotives, adopter l'axe horizontal ; cela a été fait quelquefois, mais on a trouvé plus commode de donner aux moteurs un axe vertical et de leur faire commander un arbre longitudinal.

Le moteur comprend au minimum un cylindre ; c'est le cas des motocyclettes : les irrégularités dans le moment moteur sont atténuées par un volant, par la grande vitesse angulaire et enfin par la présence même du véhicule qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constitue un deuxième volant dont les variations de vitesse sont très faibles.

On a été amené, pour équilibrer les forces d'inertie, à employer plusieurs cylindres (fig. 179).

On a vu dans le cas de moteurs à un cylindre qu'il était facile de déterminer à chaque instant la force d'inertie. Cette force se fait sentir sur l'arbre, sur le chassis et imprime à l'ensemble de la machine de fortes vibrations ; en particulier si le cylindre est vertical, elle donne à une voiture des oscillations pénibles.

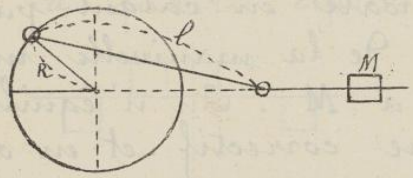


Fig. 179.

Pour avoir la valeur de cette force on sait qu'en première approximation, on néglige l'obliquité de la bielle ; il suffit de considérer la masse M des pièces animées d'un mouvement alternatif, comme étant concentrée à la manivelle et de projeter sur l'axe du cylindre la force centrifuge $M \omega^2 R$. Lorsqu'on pousse le calcul un peu plus loin, on trouve qu'il faut ajouter un terme correctif représentable par la même force mais ayant son point d'application à l'extrémité d'une manivelle fictive supplémentaire qui partirait du point mort plus rapproché du cylindre en même temps que la manivelle principale, dont la longueur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

serait dans le rapport $\frac{R}{l}$

avec celle de la manivelle principal et enfin qui tournerait deux fois plus vite que celle-ci.

On pourrait équilibrer la force d'inertie verticale en calant par exemple à l'opposé de la manivelle motrice une masse égale à M. On n'équilibre pas ainsi le terme correctif et en outre, on crée une force agissant suivant la direction perpendiculaire à l'axe du cylindre, force qui est la même que dans le premier cas. Il est vrai qu'on a substitué, si le cylindre est vertical, à une force verticale périodique une force horizontale à laquelle la voiture résiste mieux, grâce à ses roues et à son châssis et qui ne donne qu'une faible vibration transversale. Il va de soi que les pièces tournantes doivent être équilibrées par elles-mêmes.

Lorsque le moteur a deux cylindres, on a l'habitude, s'il est fixe de caler les manivelles a 2π l'une de l'autre, disposition qui répartit convenablement l'effort moteur, mais qui double les perturbations. C'est ce qui explique pourquoi elle n'a pu être adoptée pour les automobiles, dans lesquelles les manivelles sont calées à 180° l'une de l'autre.

On voit facilement que les termes principaux dans l'expression de la force

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'inertie se détruisent, mais les termes correctifs s'ajoutent et donnent en outre dans une direction perpendiculaire à l'axe des cylindres, un couple qui tend à imprimer au système une oscillation transversale. Ce couple pourrait d'ailleurs être détruit.

On emploie fréquemment les moteurs à quatre cylindres ce qui régularise l'effort moteur; en outre les termes principaux de la force d'inertie sont équilibrés deux par deux, ainsi que les couples, à cause de la symétrie par rapport au plan médian; (fig. 180) mais les termes correctifs continuent à s'ajouter.

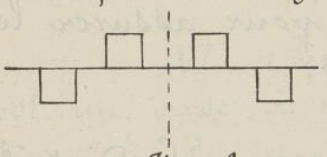


Fig. 180

L'équilibre serait donc parfait si les bielles étaient infinies; les pistons auraient deux à deux exactement le même mouvement en sens inverse, comme on le voit en considérant les projections orthogonales des manivelles M et M' (fig. 181). A cause de l'obliquité des bielles les projections sont circulaires et on voit encore sur la figure qu'il en résulte une petite différence, puisque à l'abscisse du premier piston il faut retrancher m'_1 tandis qu'il faut ajouter m'_1 à celle du deuxième.

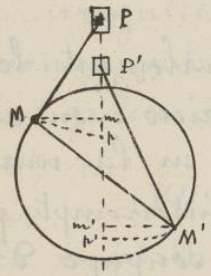


Fig. 181

En outre le bâti de la machine est soumis à une réaction qui tend à faire tourner le véhicule en sens inverse de l'arbre ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui exerce une pression supplémentaire sur les ressorts d'un des côtés du véhicule.

IV. — Arbre. — L'arbre repose sur deux paliers entre lesquels se trouvent les quatre manivelles très voisines l'une de l'autre. Les arbres de forte puissance reposent sur trois paliers, disposition alors difficile à réaliser pour assurer le portage égal en trois points.

V. — Réglage. — La distribution n'offre rien de particulier dans les automobiles ; elle peut être automatique ou commandée.

Le régulateur n'a pas, en marche normale, une très grande importance ; il est plutôt destiné à s'opposer à l'emballement du moteur lorsque celui-ci est débrayé. Il est souvent supprimé.

On opère généralement le réglage de la vitesse par tout ou rien : on agit sur la soupape d'échappement en la maintenant ouverte ou fermée, ou on interrompt par une came l'ouverture de la soupape d'admission. Au lieu d'interrompre l'admission en un certain point de la course, on préfère réduire la charge par étranglement de l'air carburé si bien que le travail moteur se trouve diminué pour deux raisons : d'abord parce que le poids de gaz combustible diminue et ensuite parce que le laminage résultant du passage à travers un orifice étroit abaisse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

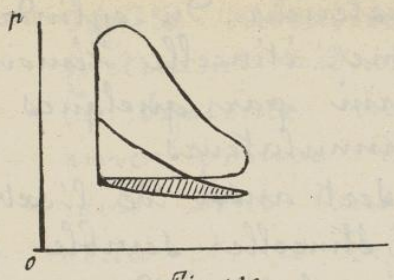


Fig. 182

la pression du gaz à l'intérieur du cylindre et introduit sur le diagramme une aire négative. (fig 182).

Ce réglage est d'ailleurs fort simple et la manœuvre est analogue à celle du papillon des machines à vapeur.

VI.– Carburateur.— Le carburateur est un vase à niveau constant dont le liquide s'écoule par un ajustage au moment de l'aspiration.

L'essence est contenue dans un réservoir solide et étanche d'où elle doit pouvoir se rendre dans le carburateur. Ce réservoir est généralement à l'arrière de la voiture et il peut être dans les rampes très au-dessus ou au-dessous du carburateur et par suite l'alimenter irrégulièrement. On peut remédier à cet inconvénient en faisant régner dans le réservoir grâce à une pompe à main, une pression d'air.

VII.– Allumage.— Cette question très importante a été résolue d'un grand nombre de façons.

On se sert de l'étincelle de la bobine d'induction : l'organe d'allumage ou bougie est constitué par une petite gaîne non conductrice à l'intérieur de laquelle passent deux fils ou plus souvent un seul fil, le retour se faisant par la masse.

On intercale parfois une deuxième coupure

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du circuit à l'extérieur du cylindre, de façon à donner une étincelle témoin. Le courant est fourni par quelques éléments de piles ou accumulateurs.

On se sert aussi de l'extra-courant de rupture : son étincelle semble produire une combustion plus rapide que celle, moins chaude, de la bobine, et la pression finale semble plus élevée. En outre cet appareil donne moins de ratés que le précédent, car les pièces en contact s'encrassent moins que les pièces immobiles ; l'isolement est plus facile car les courants ont une tension bien moindre qu'avec la bobine. Par contre la présence d'une pièce mobile réalisant la séparation constitue une infériorité.

VIII. — Refroidissement. — Dans les très petits moteurs, ceux des motocyclettes par exemple, on se contente de refroidir au moyen d'ailettes. Quand le moteur est plus puissant on a recours à une circulation d'eau.

Le premier procédé de refroidissement par l'eau consiste à la laisser se vaporiser constamment ; mais outre que ce refroidissement n'est pas aussi énergique, il se produit des dépots calcaires qui obturent les enveloppes.

Le deuxième procédé, le plus généralement employé, consiste à faire circuler la même eau d'une façon continue. Les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dépôts calcaires sans être supprimés sont fortement réduits et l'eau se conserve.
Ce système nécessite un réservoir d'eau, une pompe de circulation, car les appareils sont tous à peu près au même niveau et les différences de densité sont trop faibles pour assurer une circulation active, une enveloppe du cylindre moteur dans laquelle l'eau s'échauffe, et enfin un refroidisseur à air.

Ce dernier appareil est constitué par des tubes à ailettes ; celle-ci s'échauffent par conductibilité et présentent une grande surface rayonnante.

Le refroidisseur peut aussi être formé d'un grand nombre de petits tuyaux ou autres conduits très étroits présentant, sous un petit volume, une grande surface métallique.

L'appareil est placé à l'avant de la voiture, ce qui facilite le courant d'air. Comme il arrive que le moteur fonctionne sans faire avancer la voiture, ou comme elle peut marcher lentement, on ajoute un ventilateur qui insuffle de l'air ; il est placé derrière le radiateur et agit par aspiration.

IX. — Echappement. — On évite le bruit produit par l'échappement au moyen d'un "silencieux". La force vive des gaz expulsés et diminuée grâce à une conduite en chicane, et au lieu de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sortir par acoups, ils sont évacués d'une façon à peu près continue.

Cet appareil produit une petite contre-pression dont on peut se débarrasser grâce à une ouverture spéciale, qui met le silencieux hors circuit.

X.– Démarrage. — La mise en marche se fait à la main ; une manivelle permet de faire tourner le moteur; elle est munie d'un cliquet qui l'empêche de tourner quand le moteur marche et qui engrène avec l'arbre quand celui-ci est immobile. Le danger de l'appareil tient d'un allumage anticipé qui donnerait au moteur un mouvement rétrograde, capable d'entraîner la manivelle. On peut supprimer la compression grâce à des robinets placés sur chaque cylindre.

On se préoccupe actuellement de réaliser des mises en marche automatiques par l'envoi d'air carburé dans le cylindre, combiné avec un mode d'allumage permettant de produire la combustion lorsque les pistons sont à fond de course (position ordinaire pendant l'arrêt).

3° Transmission du mouvement.–

I.– Embrayages.— L'embrayage pourrait être supprimé s'il existait des dispositifs commodes de mise en marche. Ils sont encore employés d'une façon générale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les embrayages dits "a griffe" ne conviennent pas car ils produisent des chocs violents.

Les embrayages utilisés sont des embrayages progressifs : ce sont par exemple des embrayages à cônes ; l'un des cônes est creux, l'autre, plein, pénètre dans le premier, on peut le faire glisser par l'intermédiaire d'un manchon creusé d'une gorge en son milieu et manœuvré par une fourche (fig. 183). Les deux surfaces en contact sont garnies de cuir.

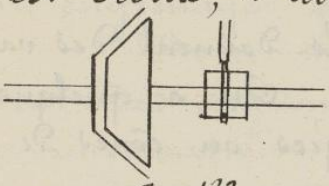


Fig. 183.

On fait aussi l'embrayage avec des surfaces cylindriques (fig. 184) dont l'une est extensible.

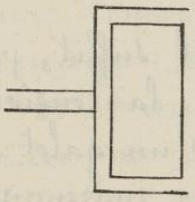


Fig. 184.

Le moteur est embrayé normalement pour la commodité du conducteur ; le débrayage est commandé par une pédale.

II.– Changement de vitesse. —

Il y a un grand nombre de systèmes de changement de vitesse : l'un d'eux consiste à faire la transmission par galet et plateau de friction ; lorsqu'on déplace le galet de la périphérie vers le centre du plateau, le rapport des vitesses diminue et va jusqu'à

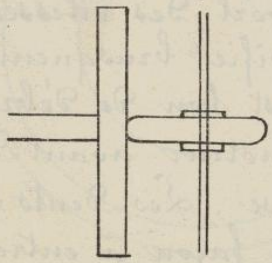


Fig. 185.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'annuler (fig. 185).

Ce système est d'ailleurs peu répandu; on a aussi quelquefois employé une courroie passant sur des poulies extensibles dont les diamètres varient simultanément de façon à ce que la longueur de la courroie reste constante.

Ces appareils donnent des variations continues de vitesse. On a quelquefois appliqué les poulies étagées ou cônes de transmission.

On fait passer les courroies d'une poulie à la suivante au moyen d'une fourchette qui agit sur la partie du brin qui va s'enrouler.

Avec les courroies, il suffit, pour opérer le débrayage de supprimer la tension, ce qui se fait par la manœuvre d'un galet tendeur.

La transmission par engrenage est le plus usité : on prévoit souvent quatre rapports différents de réduction.

Ce changement de vitesse doit être manœuvré avec précaution : on fait glisser l'arbre R' et ses roues viennent en contact avec les roues correspondantes de l'arbre R fixe (fig. 186). Le rapport des vitesses se modifie brusquement, et il est bon de débrayer le moteur avant de faire un changement de vitesse. Les dents des engrenages sont amincies de façon à entrer facilement en prise.

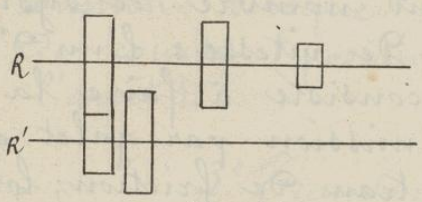


Fig. 186

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au lieu d'agir sur l'ensemble des roues R' on peut agir séparément sur chacune d'elles : elles glissent le long de l'axe, mais tournent avec lui grâce à une clavette.

La marche arrière est donnée par un engrenage supplémentaire.

On a cherché à éviter ce glissement des engrenages toujours nuisible à la conservation des dents, et on a réalisé la mise en contact des pignons par rapprochement des arbres.

Soient O et O' les cercles primitifs d'engrenage ; on intercale un arbre O'' sur lequel sont calées deux roues d'engrenage dont l'une prend contact avec O' et l'autre avec O. On obtient ainsi grâce à l'intermédiaire O'' un certain rapport d'engrenage. A O'' on peut substituer un arbre O''' et modifier ainsi le rapport d'engrenage. Les deux arbres O'' et O''' sont portés par un même plateau tournant autour de l'axe O et on voit sur la figure que l'une des roues dentées se trouve toujours en contact avec

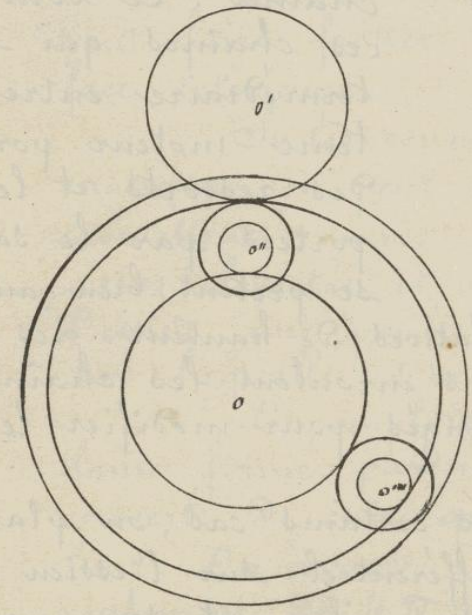


Fig. 187.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

O et que l'autre vient se mettre en prise avec la roue O' (fig. 187).

En disposant ainsi n axes intermédiaires on pourra avoir n vitesses différentes.

Ce dispositif, qui exige moins de longueur que le précédent est plus large, plus haut et plus encombrant.

III.– Transmission aux roues. — Elle se fait par l'intermédiaire du différentiel qui permet de transmettre aux roues des vitesses de rotation différentes.

La transmission se fait par l'intermédiaire d'une roue d'angle et d'un arbre auxiliaire: ce dernier (fig. 188) est relié aux roues par deux chaînes. Ce sont donc ces chaînes qui sont l'intermédiaire entre le système moteur porté par des ressorts et les roues portées par le sol; elles se prêtent bien aux petites variations relatives de hauteur. Les pignons sur lesquels s'enroulent les chaînes peuvent être changés pour modifier le rapport des vitesses.

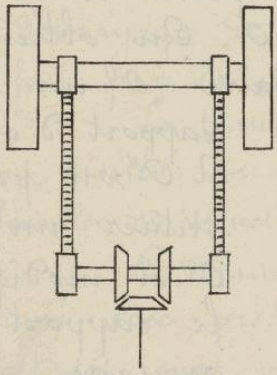


Fig. 188.

Dans certains cas, on place directement le différentiel sur l'essieu composé de deux parties; il reçoit son mouvement d'un arbre moteur articulé à la Cardan

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à ses deux extrémités.

On a souvent conservé dans l'automobile le dispositif "d'écuanteur" des roues, qui vient d'une imitation des voitures à chevaux. Les rayons forment un cône d'angle très obtus ce qui permet d'obtenir un serrage énergique sur le moyeu. Mais il est naturel de faire tourner les raies perpendiculairement au sol et on est amené à donner à l'axe un léger devers par rapport à l'essieu.

Ce dispositif appliqué à l'automobile a l'inconvénient de gaucher les chaînes. Le plus simple paraît être d'y renoncer.

IV.- Freinage. — Le principe du freinage consiste à faire agir une force frottante sur un axe tournant.

Si les bandages sont en fer, on peut faire frotter des sabots sur leur surface extérieure.

Si les roues sont garnies de pneumatiques on peut se servir de sabots en caoutchouc ; mais leur application reste assez limitée et on préfère rapporter sur l'essieu une poulie métallique spéciale sur laquelle s'exerce le frottement.

On emploie souvent un frein à lame formé par une bande d'acier recouverte de cuir qui frotte sur un tambour. On arrive à faire des angles d'enroulement de 4π, et le frottement s'exerce sur deux poulies reliées aux deux roues

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'arrière. Grâce à un balancier on égalise les forces qui s'exercent sur chacune d'elles.

On peut aussi freiner l'arbre de commande ; mais ce freinage n'agit que par l'intermédiaire des engrenages et, en général, plus il y a de pièces interposées, plus il y a de chances de rupture ou d'avarie. Ce système est cependant employé concurremment avec le précédent.

Quand on freine, le moteur est automatiquement débrayé, cependant, pour un freinage modéré, par exemple dans une faible pente, on laisse le moteur embrayé, mais on ne le fait pas travailler. On crée ainsi un petit travail résistant car la pression de l'air est un peu plus faible dans le cylindre que dans l'atmosphère au moment de l'aspiration, et un peu plus forte au moment de l'expulsion ; en outre les courbes de compression et de détente ne coïncident pas exactement, de sorte qu'il y a de ce chef dépense de travail.

Les expériences faites sur les chemins de fer ont permis d'étudier d'une façon précise les lois de freinage ; mais les données ainsi obtenues ne peuvent guère s'appliquer aux automobiles.

Les roues des véhicules de chemin de fer sont freinées par des sabots. Lorsque l'effort appliqué au sabot augmente, la force retardatrice augmente jusqu'au moment où la roue est calée. A partir de cet instant il y a glissement sur le rail et le patinage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui en résulte use inutilement la roue sur laquelle un plat tend à se former ; en outre la force retardatrice diminue car le coefficient de frottement de la roue sur le rail, acier sur acier, est plus faible que celui des sabots sur la roue, fonte sur acier ; il paraît également vraisemblable que le frottement dépend des surfaces en contact, contrairement à une règle souvent admise.

Il y a donc intérêt à se rapprocher autant que possible du freinage limite au-delà duquel la roue cesse de tourner.

Lorsque la roue est motrice, elle exerce par frottement une action horizontale sur le rail, qui a pour limite supérieure $\frac{P}{n}$, P étant le poids supporté par la roue, et n un coefficient qui varie suivant l'état du rail : en temps sec la valeur $\frac{1}{4}$ reste comprise entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{7}$; on peut admettre $\frac{1}{6}$.

Lorsque le rail est humide ou gras cette valeur de $\frac{1}{4}$ baisse et devient très faible ; si le rail est franchement humide la valeur du coefficient remonte jusqu'au voisinage de $\frac{1}{7}$.

Inversement, lorsqu'on freine, les roues continuent à tourner jusqu'à ce que la force retardatrice atteigne la limite $\frac{P}{n}$. C'est donc cette force qu'il est nécessaire de réaliser pour obtenir un freinage énergique. La difficulté vient de ce que cette force est essentiellement variable ; elle dépend en outre de la charge des véhicules

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui peut varier, surtout dans le cas des wagons de marchandises dont le poids augmente du simple au triple suivant qu'ils sont vides ou remplis. Elle dépend aussi de la vitesse, car on a constaté qu'à grande vitesse, on peut réaliser des serrages beaucoup plus énergiques qu'à petite vitesse sans bloquer les roues.

Il faudrait donc que cette force de freinage pût varier. En pratique, on lui donne une valeur moyenne assez élevée, qui bloque parfois les roues, mais non d'une façon permanente.

Dans le cas des automobiles il est vraisemblable bien qu'on ne connaisse pas d'expériences précises à ce sujet, que les lois de freinage sont analogues. Il ne paraît cependant pas probable que le patinage diminue la force retardatrice; mais les bandages pneumatiques ne pourraient le supporter. Le coefficient d'adhérence varie avec le sol: par les temps secs, il atteint la valeur $\frac{1}{3}$. Il en résulte que pour un poids de 1200 kg. la force retardatrice pourrait être de 400 kg, mais le bandage ne paraît guère en état de résister à une telle force.

Quoi qu'il en soit, si nous admettons une force retardatrice horizontale égale à

$$\frac{P}{3},$$

et si la roue d'arrière porte les $\frac{3}{5}$ du poids, la force retardatrice sur le véhicule est $\frac{P}{5}$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'accélération qui en résulte est donc cinq fois plus petite que celle dûe à la pesanteur, et on a :

$$v^2 = 2jl = 2gl'$$

d'où

$$l = 5l'.$$

La longueur sur laquelle s'arrêtera le véhicule est cinq fois plus grande que la hauteur de chute qui donnerait à un mobile la vitesse v du véhicule.

Si on prend

$$v = 20 \frac{m}{sec}$$

on trouve que l'arrêt se ferait sur 100 mètres.

Automobiles à vapeur.

L'emploi des véhicules à vapeur, sur route, est très ancien.

1° Chaudière. — La génération de la vapeur est le problème le plus important pour cette classe d'automobiles.

Si le véhicule a de grandes dimensions, par exemple si c'est un véhicule industriel, on peut employer des systèmes variés de chaudières : on se sert de préference de chaudières à tubes d'eau, chauffées au charbon ou au coke. On les allège en leur donnant une faible surface de chauffe, et on ne vaporise pas plus de 4 à 5 kg. d'eau par kg. de combustible, alors qu'une chaudière fixe vaporise 8 ou 9 kg. d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour diminuer au maximum l'encombrement et faciliter la conduite on a construit des chaudières à vaporisation instantanée, comme les chaudières Serpollet.

Les tubes ont des parois épaisses et un diamètre très réduit ; ils sont chauffés à haute température. L'eau qui y reste envoyée par une petite pompe s'y vaporise rapidement et en sort surchauffée. On est ainsi certain d'avoir de la vapeur sèche, ce qui se rencontre assez rarement dans les petites chaudières ordinaires.

La conduite de la chaudière consiste uniquement à entretenir la combustion et à faire marcher la pompe.

Le chauffage est assuré par des brûleurs à pétrole réglables ; la pompe commandée par une petite machine à action directe peut être aussi réglée.

Les machines demandent de 15-20 kg. de vapeur par cheval-heure. Le poids de la chaudière est de 20 kg. par cheval et dans les chaudières Serpollet il descend même à 15 kg.

Le pétrole n'est pas obligatoire comme combustible ; on peut également se servir, quoique moins commodément, des huiles lourdes et des mazouts qui coûtent moins cher.

2°. *Moteurs.* — C'est le moteur qui constitue la partie la plus avantageuse de l'automobile à vapeur.

La mise en marche et l'arrêt se font à la volonté du conducteur, sans aucune difficulté

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La marche à vitesse variables est facile, le moment moteur varie dans de larges limites et la marche arrière est simple à réaliser.

Les embrayages et changements de vitesse deviennent donc inutiles ; on est cependant obliger de conserver le différentiel car les roues doivent tourner indépendamment l'une de l'autre dans les virages ; en outre il faut des engrenages intermédiaires entre le moteur et les roues, car on cherche avant tout à avoir un moteur léger et par suite tournant vite ; la vitesse moyenne des moteurs à vapeur employée est de 400 à 450 tours par minute, dans ces conditions la commande directe est impossible, et la transmission par engrenage diminue dans un rapport donné et constant la vitesse du moteur.

L'axe est généralement horizontal.

Dans les lourdes voitures, les camions, le mécanisme est analogue à celui de la locomotive : c'est le mécanisme à deux cylindres avec coulisse de Stéphenson. Ces deux cylindres, agissant sur deux manivelles calées à angle droit sont souvent Compound, et au démarrage on peut envoyer directement un peu de vapeur dans le cylindre à basse pression, ce qui permet à la machine de démarrer dans une position quelconque.

Dans les voitures Serpollet, on se sert de vapeur fortement surchauffée, qui exige

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plusieurs précautions : les garnitures des tiges habituellement employées ont tendance à fondre ; aussi emploie-t-on des dispositifs adoptés dans la construction des moteurs à gaz, c'est-à-dire la distribution par soupapes et le simple effet, à l'aide de quatre cylindres avec manivelles calées à angle droit : le tiroir fonctionne mal à haute température, et les huiles sont décomposées ou bien deviennent trop fluides et lubréfient mal.

La commande des soupapes est faite par un arbre à cames qui tourne aussi vite que l'arbre de la machine. Les cames peuvent coulisser sur leur arbre, elles ont un profil variable, de sorte qu'on peut régler la durée d'ouverture des soupapes.

3° *Accessoires.* — L'appareil comporte un aéro-condenseur dont les avantages sont les suivants :

I. Il conserve l'eau et permet d'éviter les nombreux ravitaillements ; il faut, en effet, dans ces voitures une grande provision d'eau, environ six fois supérieure à celle du combustible, et encore faut-il ajouter que le pétrole y est moins bien utilisé que dans un moteur à essence. L'eau se dépense donc très vite et il y a intérêt à ne pas la perdre.

II. Il permet d'éviter les dépôts dans les tubes car l'eau est distillée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. Il supprime l'échappement de la vapeur à l'air libre qui est souvent gênant dans les villes.

Le condenseur, comme le refroidisseur des automobiles à essence, est refroidi par un courant d'air résultant de la marche de la voiture.

Dans les gros véhicules, la condensation n'est que partielle, car il faudrait donner au condenseur une très grande surface; en outre, on doit souvent recourir au tirage forcé, par la vapeur d'échappement.

Voitures électriques.

Le courant électrique est fourni par une batterie d'accumulateurs, d'où résulte un poids mort considérable.

1° Accumulateurs. — On a bien cherché à alléger les batteries et à réduire l'épaisseur des plaques à 2 m/m, mais alors elles se désagrègent après une cinquantaine de charges.

Actuellement on peut dire que le poids des accumulateurs est environ $\frac{1}{3}$ du poids total pour faire 45 ou 50 km. sans recharger.

Pour une vitesse de 18 kilomètres à l'heure, un véhicule électrique, à bandages pneumatiques a une résistance en palier sur bon sol de 20 kg. par tonne, tandis que pour des vitesses de 20 à 100 kilomètres à l'heure, le matériel de chemin

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de fer ne donne que 3 à 4 kilogrammes par tonne.

Si on veut faire plus de 50 kilomètres sans charge le poids augmente dans des proportions considérables.

Les accumulateurs sont souvent chargés en place, pendant la nuit par exemple. Si on veut faire un service intensif, on charge les batteries, ce qui nécessite une installation spéciale pour la manutention.

2°. Moteurs. — Le moteur doit être léger et conséquemment il est rapide: sa vitesse est de 2000 à 2500 tours par minute.

Les moteurs électriques présentent à peu près les mêmes avantages que les moteurs à vapeur: leur vitesse de rotation est variable, et on peut supprimer les changements de vitesse et les embrayages, on ne conserve que l'engrenage intermédiaire entre le moteur et la roue qui donne une réduction de vitesse constante.

On peut même supprimer le différentiel; celui-ci n'est en effet nécessaire que si la voiture a un seul moteur; mais si elle en comporte deux, il suffit d'en appliquer un à chaque roue et dans un virage ils ne tournent pas à la même vitesse. Ils actionnent généralement les roues d'arrière, cependant, ils commandent parfois les roues d'avant.

Le moteur peut n'être pas suspendu; il est alors porté par l'essieu lui-même, et porte un pignon d'engrenage qui agit sur les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rones. Les trépidations sont atténuées grâce aux pneumatiques.

Souvent le moteur est à demi suspendu, c'est-à-dire qu'il est porté par un support fixé, à une extrémité, sur l'essieu, et à l'autre, au châssis, par interposition d'un ressort. C'est le système adopté pour les tramways.

Enfin, le moteur peut être entièrement suspendu ; il est placé sous la caisse de la voiture, et commande les rones par l'intermédiaire de chaînes horizontales suffisamment longues.

Dans l'état actuel de la construction, il semble qu'il y ait à peu près autant d'avantages à employer un ou deux moteurs. Un seul moteur pèse moins que deux moteurs de puissance moitié et son rendement est meilleur ; mais par contre il exige un différentiel.

Pour faire varier la vitesse, on se sert du contrôleur ou combinateur. On peut agir par la variation du couplage des éléments, ceux-ci étant divisés en deux ou plusieurs groupes qu'on peut à volonté mettre en série ou en parallèle. Mais ce mode de réglage fatigue la batterie. Lorsqu'on dispose de deux moteurs, on préfère agir sur leur couplage ; le système universellement employé pour les tramways est connu sous le nom de système série-parallèle.

En série, les tensions aux bornes de chacun des moteurs sont faibles ; pour augmenter le couple moteur, on les met en parallèle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque le moteur est unique, on lui donne un induit double à deux enroulements et deux collecteurs, pouvant fonctionner en série ou en parallèle ; mais on est exposé, si une connexion est mal faite à ce qu'une seule moitié de l'induit travaille, ce qui la met en danger d'être brulée ; ce défaut se révèle immédiatement lorsqu'on utilise deux moteurs, car la direction devient impossible.

Pour faire varier la vitesse dans de plus grandes proportions et d'une façon plus continue, on fait varier l'excitation, car la vitesse varie en raison inverse du flux inducteur, et on arrive à l'accroitre dans le rapport de 1 à 4.

On a quelquefois employé des moteurs à action directe : l'induit est relié directement à la roue, et l'inducteur est porté par l'essieu. Mais il est nécessaire alors d'avoir des moteurs lents, par suite lourds ; le démarrage est pénible et provoque des courants de grande intensité.

3°. Freinage. — Le freinage est fait généralement par frein à bande. On utilise parfois le freinage électrique basé sur la transformation du moteur en générateur. On néglige de récupérer l'énergie produite pendant le freinage, le gain à réaliser étant insignifiant en général.

Voitures mixtes. — Dans ces voitures on actionne au moyen d'un moteur à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pétrole une génératrice qui envoie le courant dans un moteur électrique. Ce système compliqué et lourd a reçu peu d'applications.

Récemment on a construit des voitures renfermant une batterie tampon d'accumulateurs : le moteur à pétrole donne une puissance constante et commande une dynamo tantôt motrice, tantôt génératrice.

Lorsqu'on n'a besoin que d'une faible puissance motrice, l'énergie disponible du moteur charge la batterie ; lorsqu'il est nécessaire de fournir un grand effort moteur, la batterie se décharge dans la dynamo ; celle-ci se transforme en moteur et aide le moteur à pétrole.

Prix de revient. — La traction automobile entraîne souvent à de grandes dépenses, qui à l'heure actuelle sont difficiles à évaluer.

On doit tenir compte dans un devis :

1) de l'acquisition du matériel ;

2) de la consommation de combustible ;

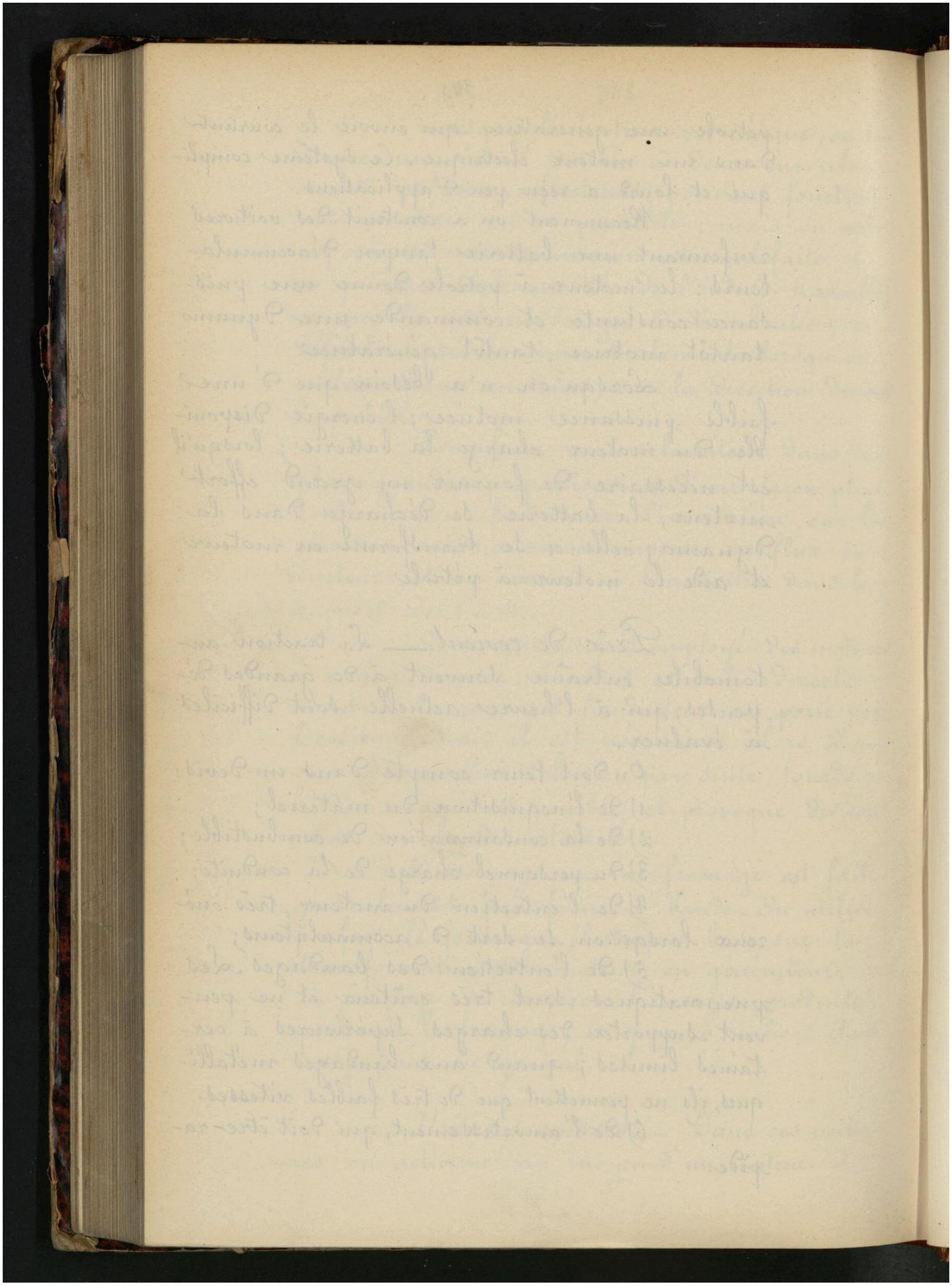
3) du personnel chargé de la conduite ;

4) de l'entretien du moteur, très onéreux lorsqu'on se sert d'accumulateurs ;

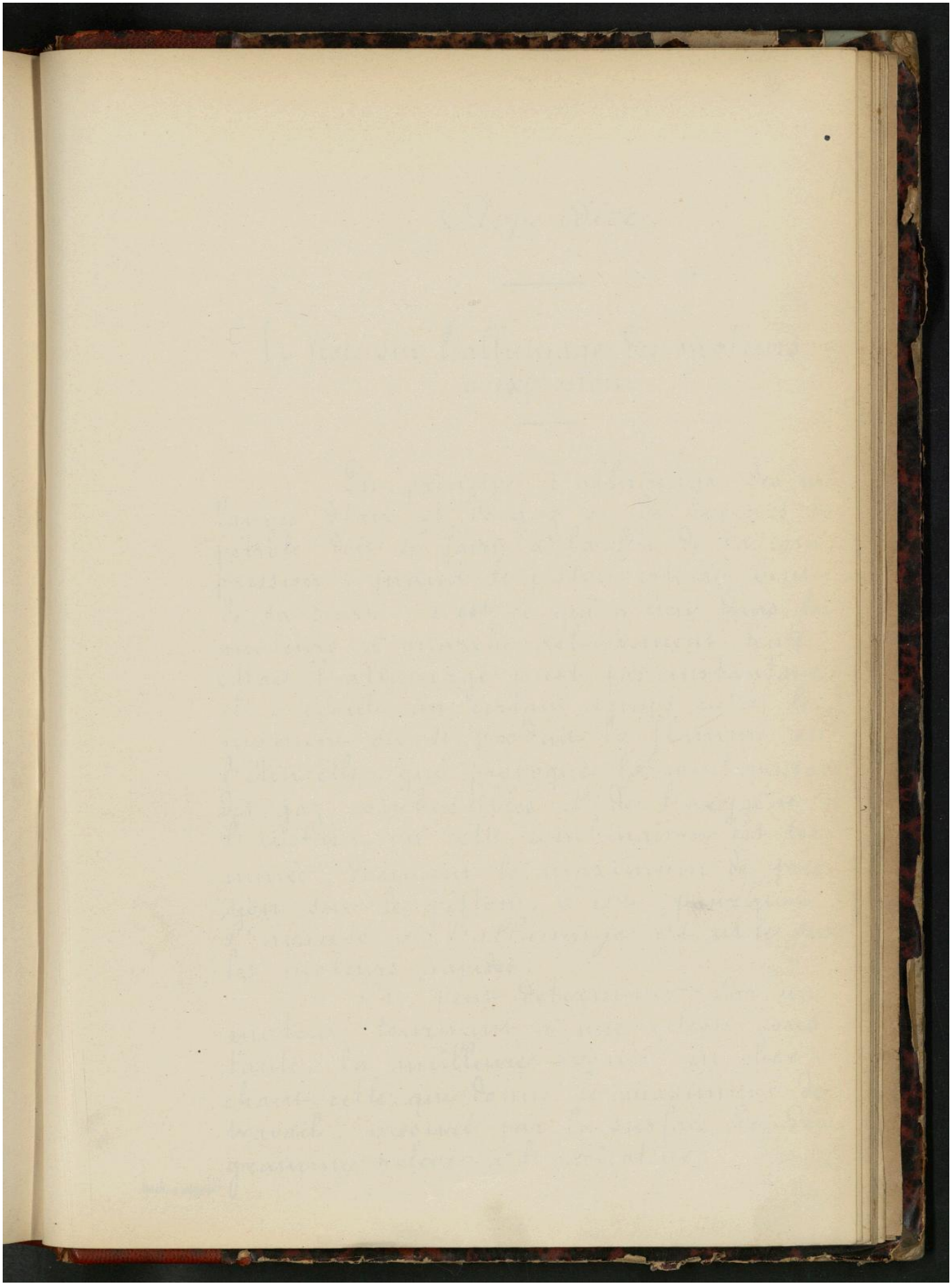
5) de l'entretien des bandages. Les pneumatiques sont très coûteux et ne peuvent supporter des charges supérieures à certaines limites ; quand aux bandages métalliques, ils ne permettent que de très faibles vitesses.

6) de l'amortissement, qui doit être rapide.

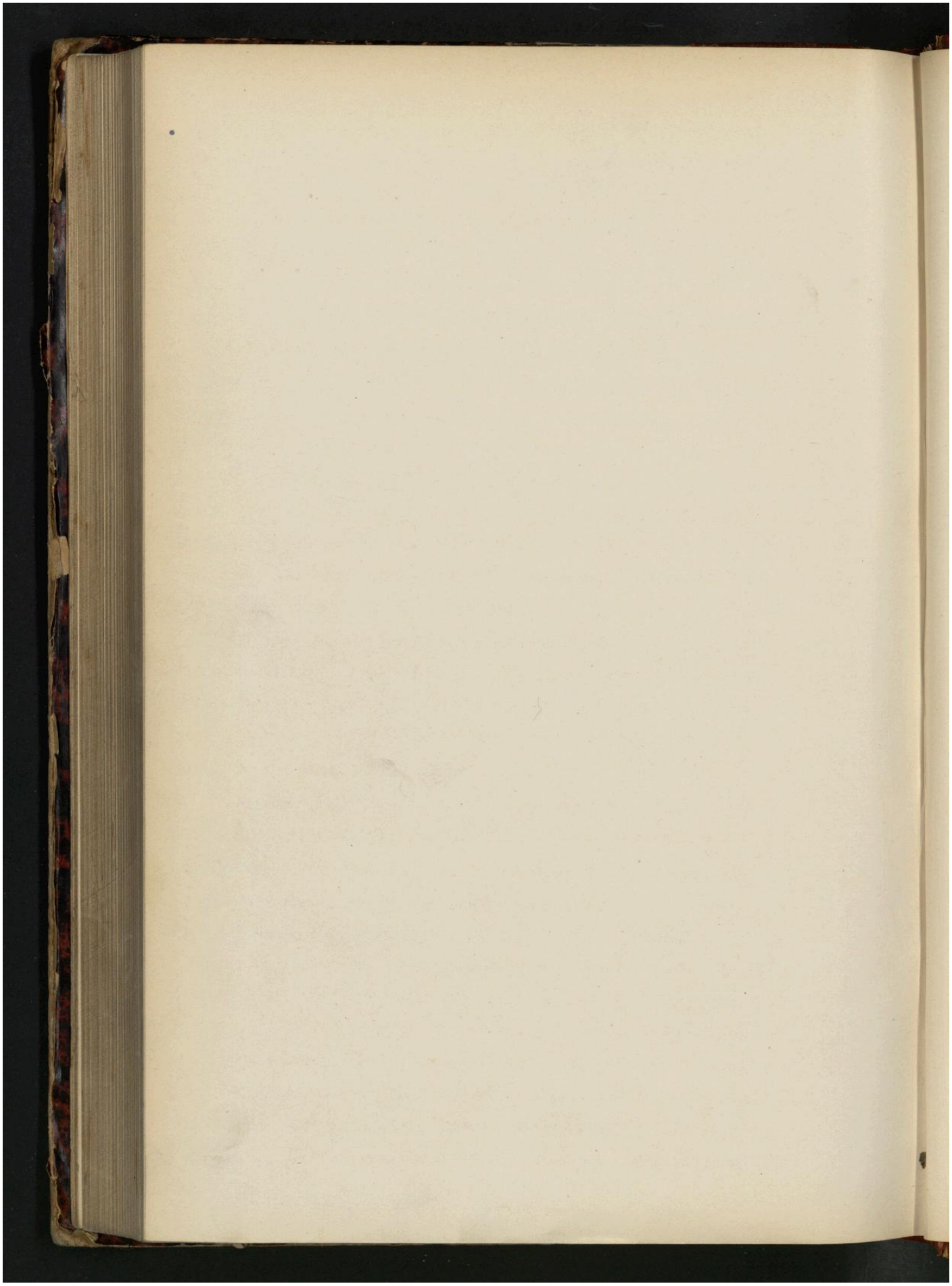
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Appendice.

I - Note sur l'allumage des moteurs à explosion.

En principe, l'allumage des mélanges d'air et de gaz ou de vapeurs de pétrole doit se faire à la fin de la compression, quand le piston est au bout de sa course : c'est ce qui a lieu dans les moteurs à marche relativement lente. Mais l'allumage n'est pas instantané : il s'écoule un certain temps entre le moment où se produit la flamme ou l'étincelle, qui provoque la combinaison des gaz combustibles et de l'oxygène, et l'instant où cette combinaison est terminée, donnant le maximum de pression sur le piston. C'est pourquoi l'avance à l'allumage est utile sur les moteurs rapides.

On peut déterminer, sur un moteur tournant à une vitesse constante, la meilleure avance, en cherchant celle qui donne le maximum de travail, mesuré par la surface du diagramme relevé à l'indicateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si, au lieu d'avance, il y a du retard à l'allumage, ne se produisant que lorsque le piston a déjà recommencé sa course, le travail produit par cette course se trouve réduit : on se sert parfois de la variation des avances et du retard pour modifier le travail moteur suivant les besoins ; mais c'est au détriment de la bonne utilisation du combustible.

Dans les anciens moteurs Otto, l'allumage se fait par transport de flamme.

L'allumage par tube incandescent est employé pour des moteurs fixes, et a été aussi appliqué aux moteurs d'automobile : le mélange combustible est refoulé dans le tube par la compression et s'enflamme quand il atteint la partie rouge. On obtient l'avance en chauffant le tube plus près de son embouchure dans le cylindre, mais ce moyen manque de précision.

L'allumage électrique est fort employé, surtout pour les moteurs d'automobiles. On utilise, soit l'étincelle que produisent les courants à haute tension quand ils circulent dans un conducteur présentant une interruption de faible longueur, l'étincelle franchissant la partie interrompue ; soit l'extra courant de rupture, qui donne naissance à un petit arc électrique, quand on rompt brusquement un circuit parcouru par un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant à basse tension.

On voit immédiatement que, dans le premier cas, l'interruption du conducteur sera facilement disposée à l'intérieur du cylindre moteur ; dans le second, il faudra des pièces mobiles à l'intérieur de ce cylindre, pour y produire la rupture.

On se rend compte que l'emploi de l'étincelle électrique, sous une forme ou sous l'autre, se prête facilement, en principe, à la variation des avances.

Pour produire le courant de haute tension, donnant des étincelles, on fait usage de la bobine d'induction, recevant le courant à basse tension produit par des piles ou des accumulateurs. La bobine se compose essentiellement de deux fils enroulés autour d'un noyau en fer, un gros fil qui reçoit le courant primaire à basse tension de la pile, et un fil fin où se développe le courant secondaire à haute tension, au moment où on interrompt brusquement le courant primaire.

L'établissement et l'interruption de ce courant sont produits plusieurs fois en succession par un trembleur magnétique, formé d'une lame métallique qui oscille entre une vis de butée et le noyau en fer de la bobine : quand cette lame est en contact avec la vis, le courant passe dans l'enroulement primaire : le noyau est alors aimanté par le passage de ce courant, la lame est attirée, et le courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est interrompu ; alors l'élasticité de la lame la ramène à sa position primitive, ce qui rétablit le passage du courant et ainsi de suite. A chaque interruption du courant primaire, le courant secondaire se produit et donne lieu à l'étincelle.

Pour les automobiles, on emploie les piles sèches (à matières spongieuses imbibées des liquides nécessaires) ou les accumulateurs, piles secondaires qu'on régénère après usage, par le passage du courant électrique. Un distributeur ou allumeur, mis en marche par le moteur, envoie le courant primaire dans la bobine à trembleur au moment où doit se produire l'allumage. Comme ce moment dépend du contact d'une pièce métallique mobile tournante et d'une pièce fixe, on obtient facilement l'avance ou le retard par le déplacement de la pièce fixe.

Quand le moteur a plusieurs cylindres, on emploie autant de bobines à trembleurs que de cylindres ; l'allumeur envoie le courant primaire successivement aux différentes bobines. On peut aussi n'avoir qu'une seule bobine, en interposant, sur le circuit secondaire à haute tension, un distributeur de courant, qui l'envoie successivement aux divers cylindres. Le déplacement des contacts nécessaires à cet effet se fait entre les moments où se produit le courant secondaire ; néanmoins, il faut certaines précautions

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour éviter les courts circuits ou dérivations du courant, comme du reste pour l'isolement de toute la canalisation à haute tension.

La pièce qui conduit le courant à haute tension dans le cylindre est la bougie d'allumage ; elle porte les conducteurs traversant une gaine isolante ; cette bougie est vissée dans la paroi du cylindre.

Le montage des divers circuits électriques primaires et secondaires est simplifié par la mise à la masse des extrémités d'un fil unique. Normalement un circuit exige un fil continu, c'est-à-dire un conducteur d'aller et un de retour ; mais l'un de ces conducteurs peut n'avoir aucune tension électrique et, par conséquent être remplacé par des masses métalliques quelconques non isolées ; par exemple, la masse des moteurs et du chassis de la voiture. De même dans les télégraphes la mise à la terre aux deux bouts de la ligne permet l'emploi d'un fil unique. Par exemple, dans le circuit secondaire l'une des extrémités du fil fin enroulé dans la bobine est relié à la masse ; l'autre extrémité aboutit à la bougie d'allumage, dont l'isolant est traversé par ce fil unique, qui se termine par une pointe auprès de la douille métallique extérieure de la bougie, vissée dans le cylindre, et mise ainsi à la masse : c'est entre cette pointe et la douille que jaillit l'étincelle.

Le trembleur ordinaire faisant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

environ 80 oscillations par seconde, est trop lent pour les moteurs rapides. A 1200 tours par minute, en effet, une course simple du piston dure 1/40e de seconde, et c'est quand le piston est en un point déterminé vers la fin de sa course, que doit commencer l'allumage.

On a construit des trembleurs à lames plus rapides dits vibreurs : la lame est formée de deux parties dont l'une prolonge un peu le contact qui établit le passage du courant : il faut, en effet, ne pas réduire par trop la durée de ce passage, ce qui arrive quand on veut augmenter le nombre d'oscillations du trembleur ordinaire.

Le trembleur magnétique n'est d'ailleurs pas nécessaire : l'allumeur, qui envoie le courant primaire à la bobine, peut aussi l'interrompre et cette interruption donne naissance au courant secondaire. Il faut qu'elle soit brusque, même lorsque la marche du moteur est lente. On n'obtient ainsi qu'une seule étincelle d'allumage (ou deux ou trois par rebondissements des pièces qui coupent le courant primaire), mais cela suffit.

Outre la coupure qui donne naissance à l'étincelle dans le cylindre, on en ménage quelquefois une seconde, à l'extérieur, sur le même circuit : l'expérience montre que les deux étincelles se produisent simultanément aux deux coupures. L'étincelle extérieure, étant visible

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

montre si l'allumage se produit régulièrement ; en outre, elle paraît favoriser la production de l'étincelle utile, même en cas d'encrassement de la bougie. Toutefois, cette étincelle extérieure crée un danger d'inflammation, en cas de fuite d'essence : parfois on l'abrite sous un verre. On appelle disrupteur la petite pièce donnant cette étincelle extérieure.

Dans le second mode d'allumage, par extra courant de rupture, ce courant électrique est produit, avec une tension modérée et une intensité (quantité) suffisante, par une petite machine magnéto électrique, comprenant des aimants fixes inducteurs, et un induit tournant, dans lequel se produit le courant. Cet induit se compose essentiellement d'un fil bobiné sur une pièce de fer. Sous sa forme la plus simple, la magnéto ne donne pas un courant continu, mais un courant variable, dit alternatif, qui n'atteint sa valeur maxima que deux fois par tour de l'induit. Mais cela n'a aucun inconvénient en l'espèce puisque le courant n'est utilisé que par instants, quand on le rompt pour produire l'allumage : il suffit que ces instants coïncident, à peu près, avec ceux où la magnéto donne son intensité maxima. Dans les moteurs à 4 cylindres, on doit faire 2 allumages par tour, de sorte que la magnéto doit tourner à la vitesse de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'arbre principal du moteur.

La pièce qui produit mécaniquement la coupure du conducteur dans le cylindre, s'appelle le tampon : c'est un axe oscillant qui traverse le fond du cylindre, à travers une garniture étanche. Il porte, à l'intérieur, un doigt qui peut appuyer sur une petite tige reliée à un fil isolé qui amène le courant de la dynamo (le retour se faisant par la masse). Un petit levier extérieur manœuvre cet axe. Le mécanisme est disposé pour établir le contact un peu avant le moment de l'allumage, puis un déclic permet à un ressort de ramener brusquement l'axe en arrière, produisant une séparation rapide des pièces, entre lesquelles se produit l'arc électrique, qui résulte de l'extra courant. On peut déplacer, à volonté, la came qui produit le déclenchement, de manière à obtenir une avance variable.

Quand il y a 4 cylindres, chaque contact s'établit successivement aux instants voulus, les 3 autres n'ayant pas lieu, de sorte qu'il suffit de rattacher, à un fil unique venant de la magnéto, les 4 bornes en relation avec les tiges isolées dans les cylindres, sans aucune disposition spéciale de distribution.

L'étincelle de rupture est plus nourrie que l'étincelle des courants de haute tension et paraît de meilleure qualité

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour l'allumage des gaz. Toutefois l'installation du système sur les cylindres des moteurs est un peu moins simple, puisqu'elle exige un petit mécanisme à pièces mobiles, au lieu des simples bougies. D'autre part, le courant de haute tension exige un excellent isolement des fils.

Comme variantes des magnétos employées pour l'allumage par rupture, on peut signaler l'emploi de l'induit oscillant au lieu de l'induit tournant d'une manière continue. Cette oscillation suffit, puisqu'on n'a pas besoin de courant que pendant un temps très court : elle peut d'ailleurs être produite à l'aide d'un ressort de rappel, qui rend très rapide, une des oscillations simples. Cela est bon sur les machines à marche lente. Mais avec les moteurs rapides, la rotation continue est préférable.

On a aussi trouvé le moyen de rendre l'induit immobile comme l'inducteur, ce qui est évidemment plus commode pour les liaisons à faire entre le fil bobiné dans cet induit et le fil extérieur allant aux cylindres : les variations de flux magnétiques nécessaires pour la production du courant électrique sont produites par un volet ou lame de fer tournant entre les pôles des aimants inducteurs et l'induit (Magnéto Simms-Bosh à volet tournant).

Dans le système Caron la manœuvre nécessaire pour ouvrir le circuit à l'intérieur du cylindre et produire par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

suite l'étincelle de rupture est effectuée d'une manière ingénieuse, par un petit électro-aimant qui, lorsqu'il est parcouru par le courant électrique, attire une pièce de fer. Le mouvement de cette pièce de fer, parcourue par le courant, produit justement l'effet voulu, en la séparant d'une autre sur laquelle elle reposait. Lorsque le courant cesse, cette pièce reprend sa position primitive. Le tout est logé dans une douille vissée sur le fond du cylindre, comme une bougie d'allumage.

Sauf au moment de l'allumage le circuit est établi en permanence ; il faut donc adjoindre à la magnéto qui produit le courant un distributeur qui l'envoie successivement aux divers cylindres.

Un troisième genre d'appareils d'allumage électrique consiste en la combinaison de la magnéto et de la bobine d'induction. On peut, en effet, substituer à la pile ou à l'accumulateur, qui exigent des remplacements ou rechargements fréquents et qui risquent d'être épuisés en route, une magnéto qui produit le courant primaire nécessaire.

Par exemple, les bornes de la magnéto Ensemann sont reliées et par un fil court dans lequel passe normalement le courant et par le fil primaire relativement long d'une bobine ; au moment de l'allumage, le passage direct par le fil court se trouve automatiquement coupé et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la bobine produit un courant de haute tension. Cette manœuvre coïncide, bien entendu, à peu près avec le courant maximum produit par la magnéto. Il n'y a qu'une seule bobine d'induction munie, par conséquent, d'une distribution du courant à haute tension aux divers cylindres.

La variation du point d'allumage est produite par une manœuvre de la commande de l'arbre de l'induit, décalé d'un certain angle, variable à volonté, par rapport à l'arbre qui l'entraine ; la manœuvre des distributeurs qui sont sous la dépendance de l'arbre de l'induit, est également modifiée. Il en résulte que la coupure du courant primaire coïncide toujours avec l'instant où il a son intensité maxima.

Dans une disposition plus récente de la magnéto Eisemann, les aimants inducteurs peuvent osciller autour de l'axe de l'induit, de sorte qu'on les oriente comme on le désire ; la même manœuvre déplace convenablement la commande des distributeurs.

La magnéto Nilmélior (dont l'induit présente une disposition spéciale de double enroulement) envoie aux moments voulus le courant primaire à une bobine, par le jeu d'un interrupteur ; cette magnéto porte un distributeur qui envoie successivement aux diverses bougies le courant à haute tension donné par la bobine.

Au lieu d'adjoindre à la magnéto

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une bobine d'induction séparée, on peut disposer les deux enroulements, l'enroulement primaire en gros fil et l'enroulement secondaire en fil fin, sur l'induit même de la magnéto, et la coupure brusque du courant primaire produira un courant secondaire à haute tension, comme dans une bobine fixe. Au point de vue de la construction, on voit que le courant à haute tension doit passer de l'induit tournant aux fils fixes qui le conduisent au moteur, d'où résultent quelques difficultés de bon contact et d'isolement.

Dans la magnéto Lacoste, l'induit à double enroulement, tourne à la vitesse du moteur. Dans le vide qui existe entre les branches des aimants au-dessus de l'induit, tourne un arbre parallèle à celui de l'induit, avec une vitesse réduite de moitié, égale, par conséquent, à celle de l'arbre de distribution du moteur. Cet arbre porte un disque à quatre petites cames qui, en soulevant une lame flexible interrompt 4 fois par tour le courant primaire (pour un moteur à 4 cylindres), au moment où il atteint sa valeur maxima (ce qui a lieu deux fois par tour de l'induit). Le courant secondaire produit est envoyé successivement aux 4 bougies d'allumage par un distributeur tournant que porte également cet arbre auxiliaire.

La variation du point d'allumage est produite par une disposition mécanique spéciale qui permet de décaler,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jusqu'à un certain angle, l'arbre de l'induit, par rapport à l'arbre qui le conduit, lequel est en relation invariable avec le moteur. Comme l'arbre distributeur de la magnéto est conduit, à l'aide d'engrenages, par celui de l'induit, il se trouve en même temps décalé. Cette disposition permet à la coupure du courant primaire de se produire toujours exactement au moment de son maximum.

Il y a lieu d'ajouter que la magnéto Lacoste, ainsi que les bobines d'induction, contient aussi un condensateur formé de lames métalliques séparées par des lames isolantes et relié au gros fil de l'induit. Ce condensateur renforce l'action de l'appareil.

Enfin, on double parfois le système d'allumage par bougies, en adjoignant une magnéto aux piles ou accumulateurs ; la simple manœuvre d'un commutateur permet d'employer l'une ou l'autre source de courant primaire.

La bobine est alors commune à la magnéto et aux piles, de même que les distributeurs du courant primaire à basse tension et de courant secondaire à haute tension.

La magnéto Lacoste est aussi disposée pour fonctionner avec un allumage pour piles ; mais il faut une bobine à vibreur spéciale, qui reçoit le courant des piles.

La magnéto porte un distributeur du courant primaire des piles. Le distributeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de courant secondaire est commun aux deux appareils d'allumage.

Pour compléter l'énumération des procédés usuels d'allumages, il convient de rappeler l'allumage automatique du moteur Diesel : la compression est assez forte pour chauffer l'air fortement et le combustible liquide qu'on y injecte s'y enflamme immédiatement. Toutefois il s'agit d'un moteur à combustion graduée et non plus à explosion ou combustion sous volume constant.

Nota. - Outre les appareils ci-dessus mentionnés à titre d'exemple, il en existe encore beaucoup d'autre.

Consulter sur l'allumage :

Vaudrey de Saunier, l'allumage dans les moteurs à explosion.

2e Congrès international d'automobilisme tenu en 1903, compte rendu, tome I.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II - Indications bibliographiques.

Liste de quelques ouvrages et mémoires à consulter.

1 - Principaux périodiques.

Revue de mécanique (paraît depuis 1897)
Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale.
Le Génie civil.
La Revue technique.
Engineering.
The Engineer.
Proceedings of the institution of mechanical engineers (Mémoires en général assez développés, bien illustrés).
Zeitschrift des Vereines deutscher Ingénieure.

2 - Ouvrages généraux sur la Machine à vapeur.

Thurston, - traduit par Hirsch - Histoire de la machine à vapeur.
Alheilig et Roche - Traité des machines à vapeur 1895 - 2 vol.
Demoulin - Traité pratique de la construction des machines à vapeur fixes et marines, 1895. 1 vol.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sauvage - La machine à vapeur 1896 - 2 vol.
Thurston - traduction par Demoulin - Traité de la machine à vapeur 1893 - 2 vol.
Clark - The steam engine (1892) - (Machines et chaudières, beaucoup de Dessins).

3. - Production de la vapeur.

Walher - Etude des combustibles solides, liquides et gazeux - Mesure de leur pouvoir calorifique.
Hirsch et Debize - Leçons sur les machines à vapeur 1885 - 1891 ; 2 vol. et 2 atlas. (Ouvrage non terminé, traité des propriétés générales des vapeurs et des chaudières).
Bellens - Traité des chaudières à vapeur - Paris 1895. (Etudes critiques sur la circulation de l'eau).
Hirsch - Rapport du concours de la Ville de Paris pour la suppression des fumées produites par les foyers des chaudières à vapeur - Revue de mécanique, Avril, Juin, Septembre, Décembre 1898.
Dudebout et Croneau - Appareils accessoires des chaudières à vapeur (Encyclopédie des aide - mémoire Leauté).
Delhotel - Traité de l'épuration des eaux naturelles et industrielles - Paris 1893.
Walckenaer - Revue périodique des accidents d'appareils à vapeur - Annales des Mines - 10e Série, tome III p. 117 et tome VI p. 559 (à suivre).
Walckenaer - Les explosions de locomotives

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en France, en Belgique et en Angleterre. Annales des Mines 8e Série t. XII p. 361.

Sinigaglia - Accidents de chaudières (Encyclopédie des aide mémoire Léauté).

Comptes rendus annuels des Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de propriétaires d'Appareils à vapeur.

Congrès international de surveillance et de sécurité en matière d'appareils à vapeur, tenu à Paris en 1900.

Colomer et Lordier - Combustibles industriels - Paris (1903)

Caveau - Epuration des eaux d'alimentation de chaudières et désincrustants. (Encyclopédie des aide-mémoire Léauté).

Meilson - La surchauffe et ses applications (Extrait de l'Engineering Magazine, Mars et Avril 1905) Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale, Mai 1905.

Sinigaglia - La surchauffe appliquée à la machine à vapeur d'eau - Congrès de Liège 1905.

4 - Théorie de la Machine à vapeur.

Madamet - La thermodynamique et ses applications (avec une table détaillée des propriétés physiques de la vapeur d'eau).

5 - Distribution de la vapeur.

Madamet - Tiroirs et distributeurs de vapeur.
" Détente variable de la vapeur.
" Distribution de la vapeur: épures

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de régulation (Encyclopédie des aide-mémoire Léauté).

Coste et Maniquet.- Traité théorique et pratique des machines à vapeur au point de vue de la distribution 1886. 1 vol. et 1 atlas (beaucoup de détails pratiques sur le tracé complet des mécanismes de distribution).

Leist.- Die Steuerungen der Dampfmaschinen 1900, avec nombreux croquis et détails, notamment sur les distributions à soupapes.

Zeuner.- (Traduit de l'allemand par Debize et Mérijot) Traité des distributions par tiroirs dans les machines à vapeur fixes et locomotives (Etude des coulisses Stephenson, Gooch, Allan, etc..)

6 - Essais des Machines.

Buchetti - Guide pour l'essai des moteurs.

Dudebout - Appareils d'essai à froid et à chaud des moteurs à vapeur - (Encyclopédie scientifique des aide mémoire Léauté)

Thurston - (Traduction de Roussel) Essais de machines et chaudières à vapeur.

Von Lichler - (Traduction de Séguela) - L'indicateur du travail et du fonctionnement des machines à piston, à vapeur, à eau, à gaz, etc... et son diagramme.

7 - Machines rotatives.

Reuleaux - Cinématique (traduit de l'allemand par Debize) : étude très complète

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et très méthodique sur les mécanismes des machines rotatives.

8 - Turbines à vapeur.

Sosnowski - Roues et Turbines à vapeur - Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale année 1896 et tirage à part.

Rateau. - Théorie élémentaire des turbines à vapeur - Revue de Mécanique, Septembre 1903 p. 213.

Rateau - Ventilateurs et pompes centrifuges pour hautes pressions, mus par turbines à vapeur ou par moteurs électriques - Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale - Décembre 1901. p. 728.

Hart. - Les turbines à vapeur et spécialement les turbines Parsons : leur application à la propulsion des navires. Paris Gauthier-Villars (1903).

Rateau - Les turbines à vapeur à bord des navires - Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale. Avril 1904. p. 900.

Geutsch - Dampfturbinen (traduit en anglais par Liddell 1906).

Merves - Dampfturbinen - Berlin 1904.

Ces deux derniers ouvrages donnent des descriptions d'un grand nombre de types, dont la plupart n'ont aucune valeur industrielle ; ils sont intéressants surtout au point de vue documentaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8 - Moteurs à gaz et à pétrole. Automobiles.

Périodiques. - La locomotion automobile (principalement consacrée à la partie sportive).
Le Chauffeur (principalement consacré à la partie sportive).
La Revue technique (L'Industrie automobile).

Witz. - Traité théorique et pratique des moteurs à gaz et à pétrole. 2 vol. 1904.

Schoettler. - Die Gasmaschine - 2e Edition - Etude très claire des détails.

Bz. Donkin. - A text book on gaz, oil and air engines - 3e Edition 1900.

Marchis. - Les moteurs à essence. Cours professé à la Faculté des Sciences de Bordeaux (ouvrage recommandé).

Mathot. - Manuel pratique des moteurs à gaz et gazogènes.

Deschamps. - Les Gazogènes (1902).

Hugo Güldner. - Calcul et construction des moteurs à combustion (traduit de l'allemand par Desmarest) 1905 Traité très complet avec nombreux détails de construction - Ouvrage recommandé.

Baudry de Saunier. - L'automobile théorique et pratique. Traité élémentaire de locomotion à moteur mécanique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

9 - Air comprimé.

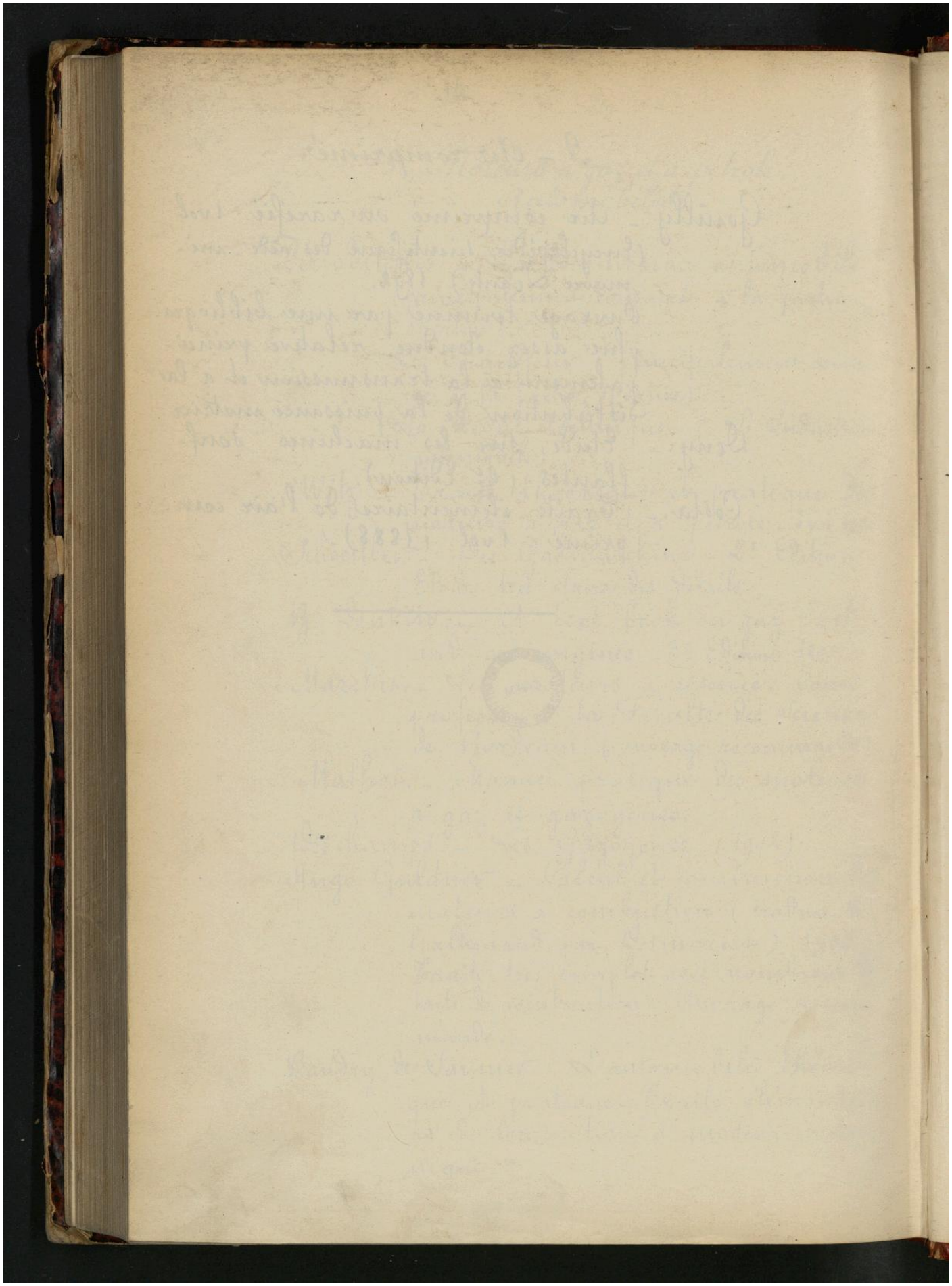
Gouilly.- Air comprimé ou raréfié 1 vol (Encyclopédie scientifique des aide-mémoire Léauté) 1892.
Ouvrage terminé par une bibliographie assez étendue, relative principalement à la transmission et à la distribution de la puissance motrice.

Deny.- Etude sur les machines soufflantes (2e Edition).

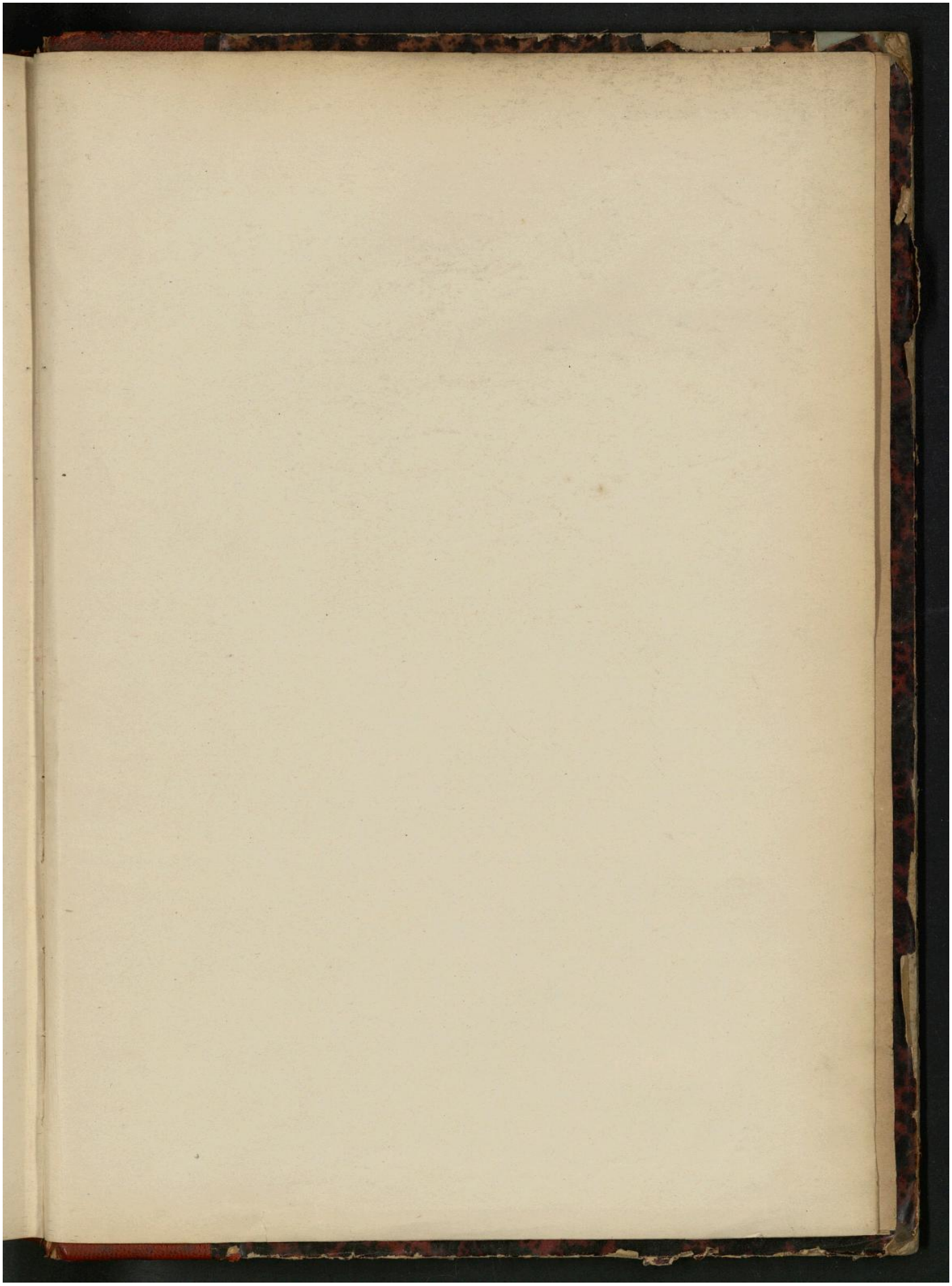
Costa.- Traité élémentaire de l'air comprimé. 1 vol. (1888).



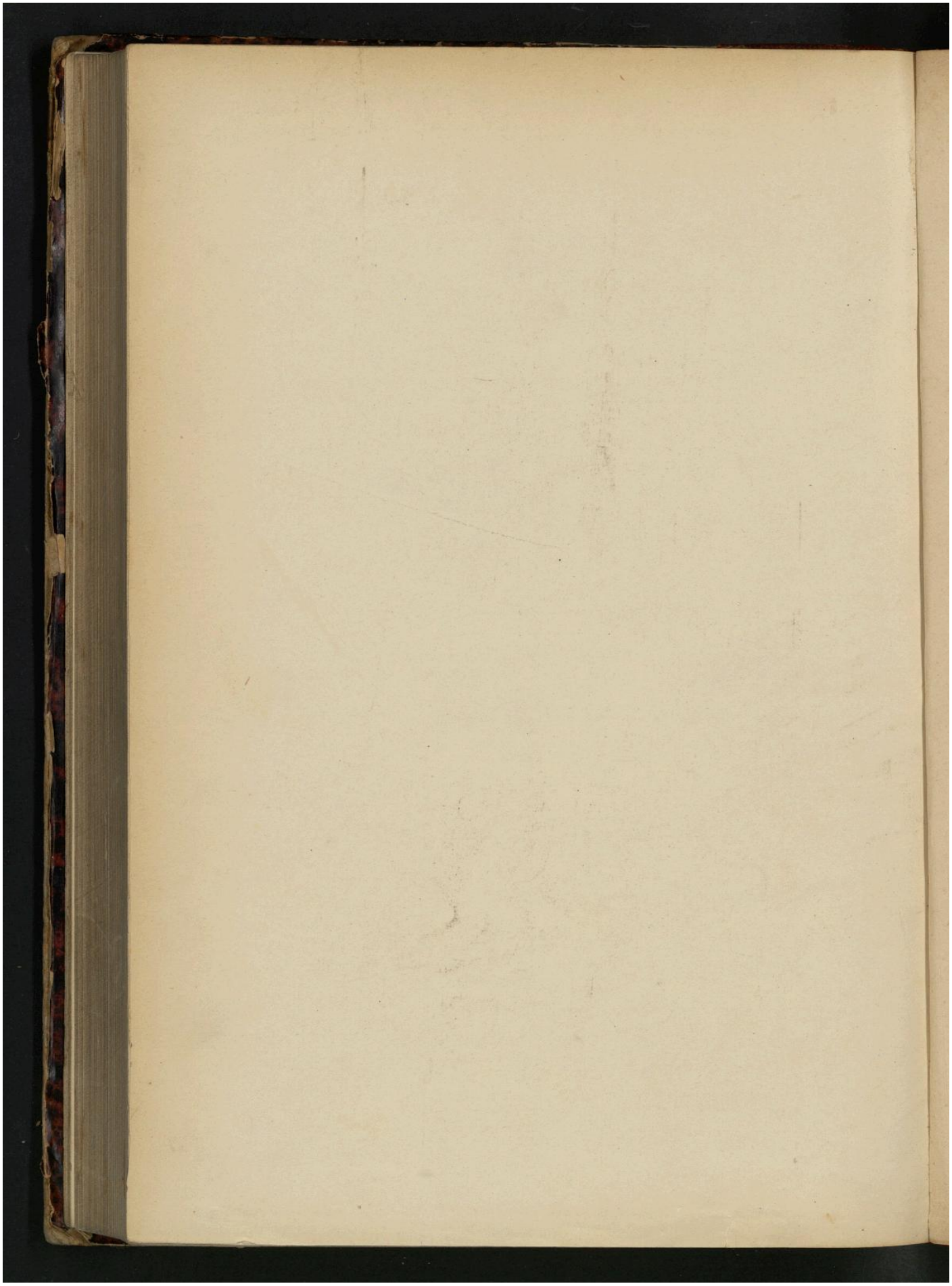
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



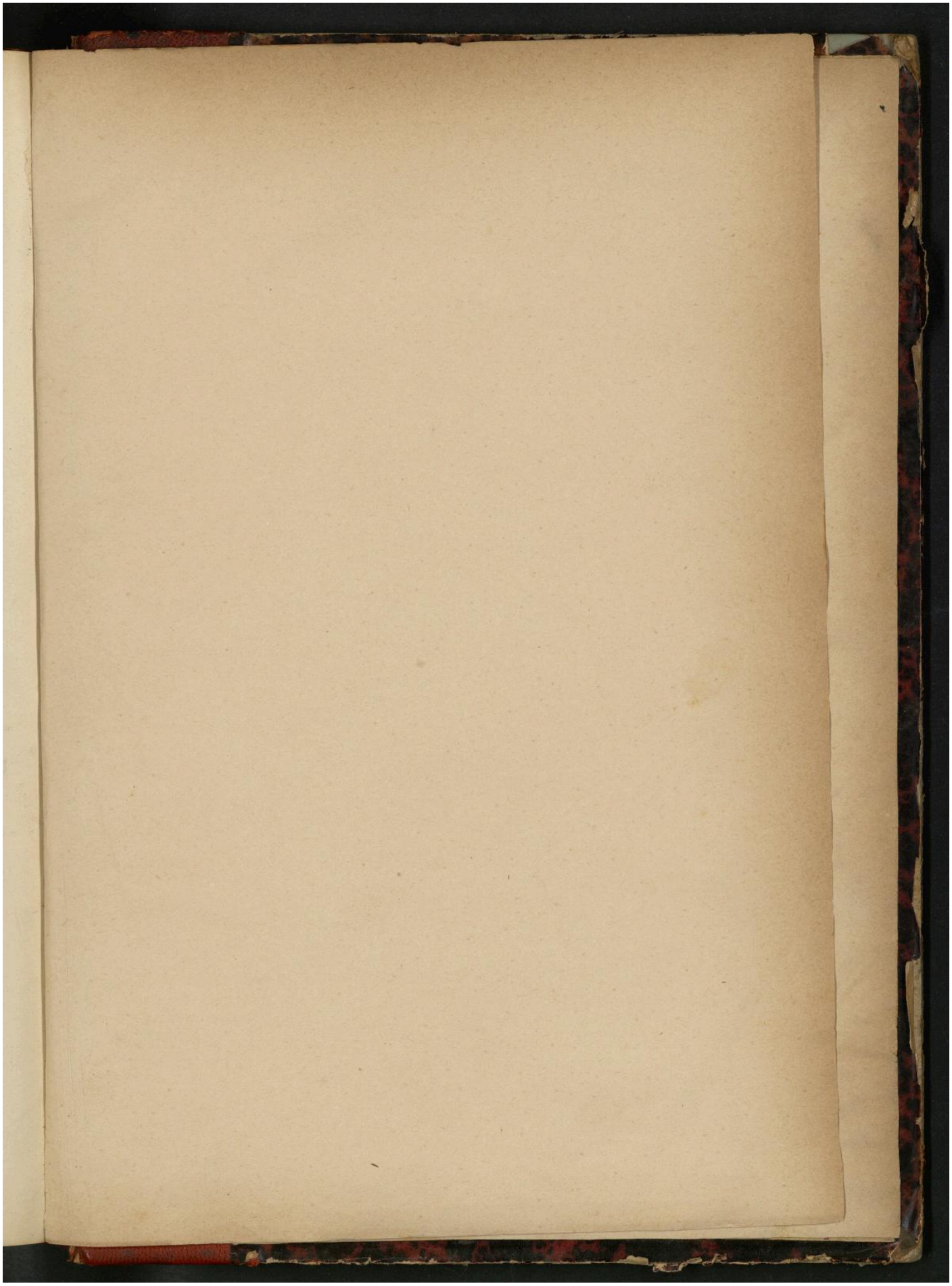
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



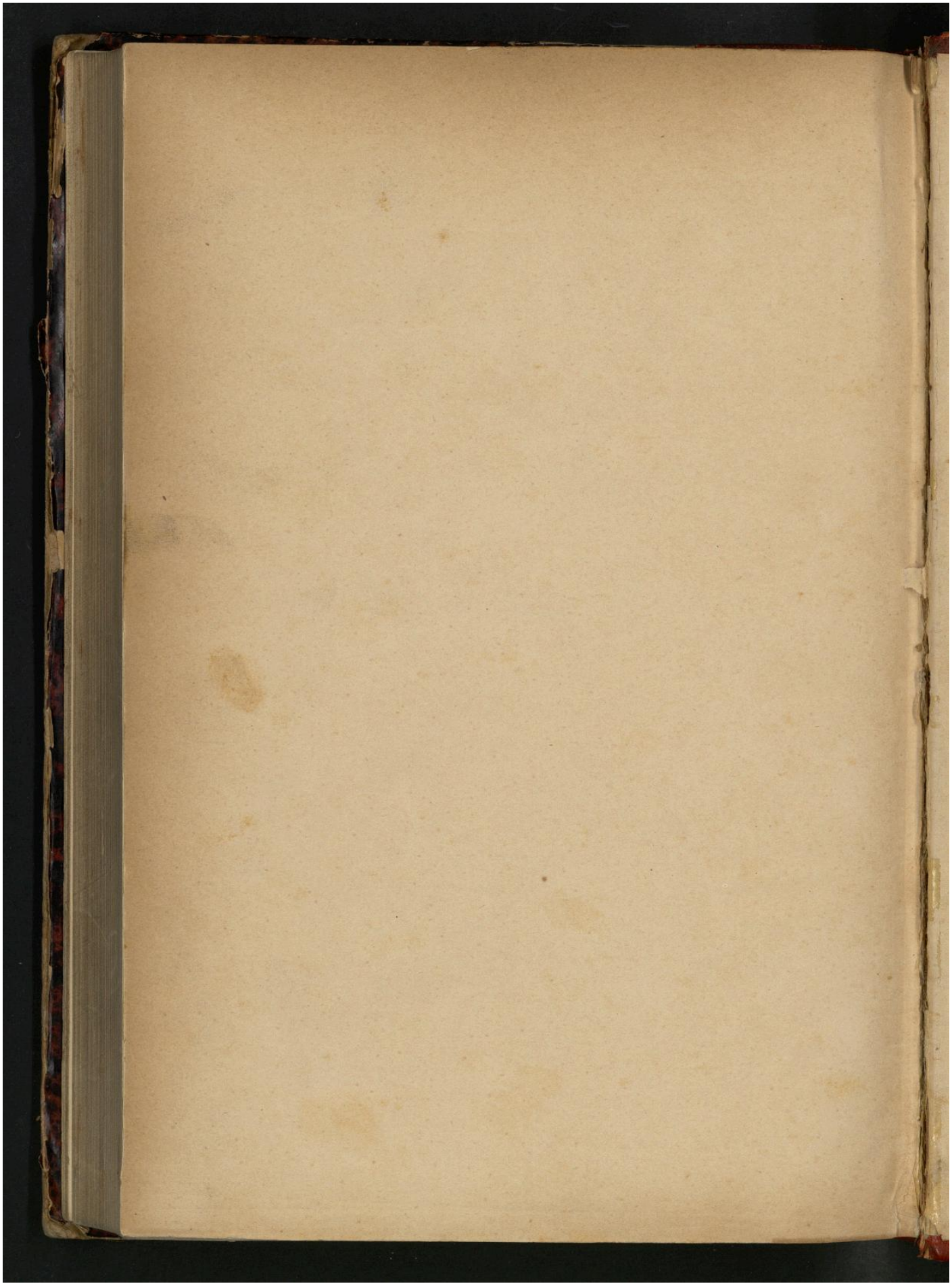
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



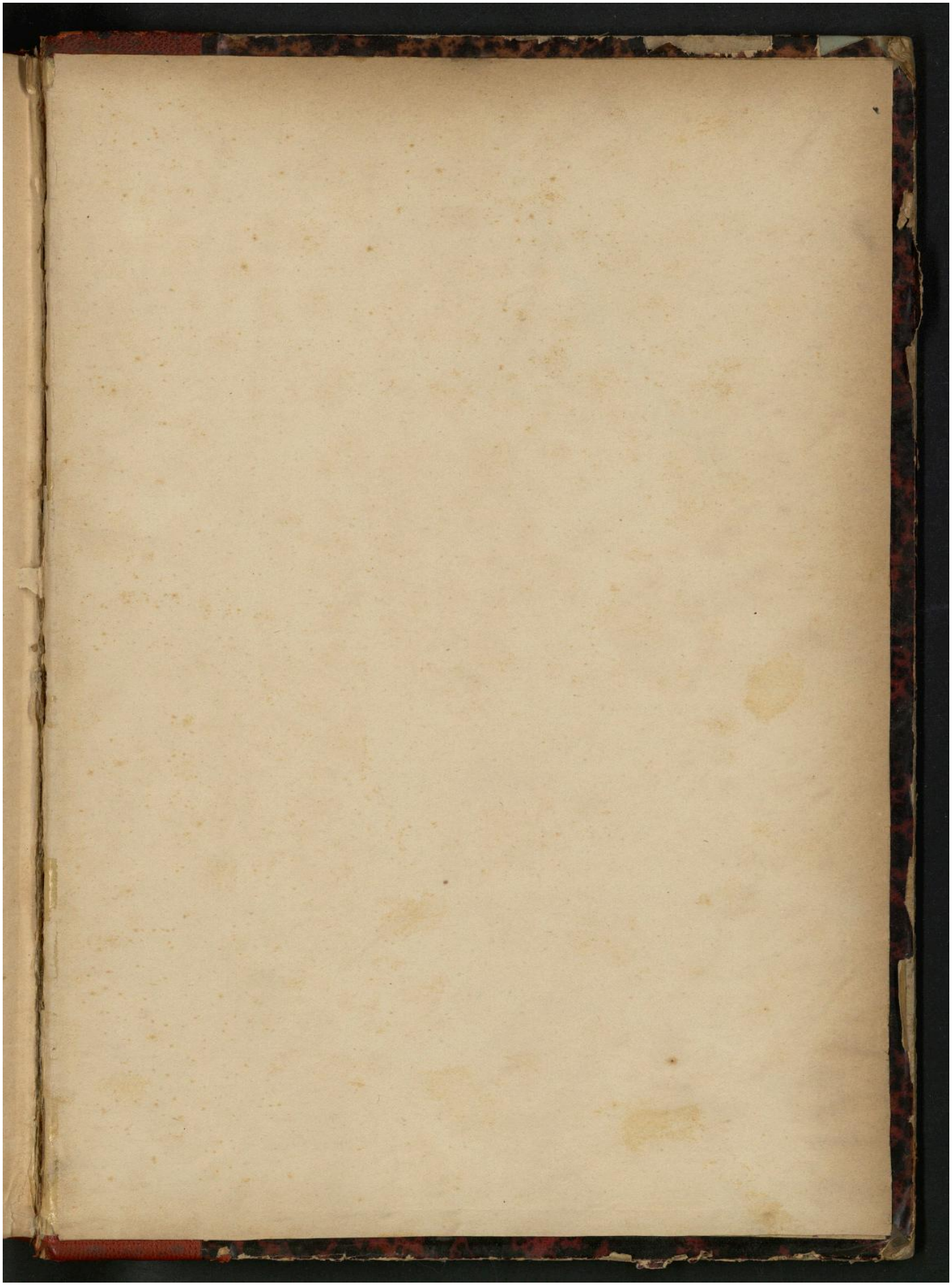
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires