

ÉCOLE DE GÉNIE CIVIL DE MÉCANICIENS ET DE NAVIGATION

152, Avenue de Wagram, PARIS (XVII^e)

DIRECTEUR : **M. J. GALOPIN** , INGÉNIEUR CIVIL, EX-OFFICIER MÉCANICIEN

COURS SUR PLACE ET PAR CORRESPONDANCE



COURS DE CHAUDIÈRES

(PREMIÈRE PARTIE)

14^e ÉDITION

PROFESSEUR : **M. J. GALOPIN**



ÉDITION ET PROPRIÉTÉ
DE L'ÉCOLE DE GÉNIE CIVIL, DE NAVIGATION ET DE MÉCANICIENS

TOUS DROITS RÉSERVÉS



ÉCOLE DE GÉNIE CIVIL, DE MÉCANICIENS ET DE NAVIGATION

Enseignement Oral et par Correspondance

Cours de Chaudières

PREMIÈRE LEÇON

Rappel de quelques Notions de Physique et de Mécanique

Les chaudières sont des appareils dans lesquels on transforme l'eau sous l'action de la chaleur en un fluide nommé *vapeur*.

Cette vapeur acquiert une certaine *force élastique* susceptible de produire du *travail*.

Des expériences ont été faites pour mesurer la quantité de chaleur dégagée par un travail donné et, inversement, la quantité de chaleur qu'il faut dépenser pour obtenir un certain travail.

On mesurait pour cela l'échauffement d'une masse de plomb sous le choc d'un poids tombant d'une certaine hauteur ; on mesurait aussi, dans une machine à vapeur, la température de la vapeur avant son admission au cylindre et avant son arrivée au condenseur, et, d'autre part, l'indicateur de Watt donnait le travail exécuté ; on a trouvé un rapport constant et le même dans les deux cas :

1 calorie équivaut à un travail de 425 kilogrammètres.

On verra plus tard que, dans la pratique, pour des causes diverses, il faut dépenser une quantité de chaleur bien plus considérable.

GAZ ET VAPEUR

GAZ. — Corps fluide aériforme restant tel sous la température ordinaire.

Les gaz permanents sont ceux que l'on n'a pu encore liquéfier.

Les gaz n'ont pas de cohésion apparente ; mais ils sont d'une très grande compressibilité.

La force vive totale des particules d'une masse gazeuse varie avec la température et non avec la pression.

VAPEUR. — Corps qui prend naissance par changement d'état.

Le phénomène physique en vertu duquel un liquide passe à l'état de vapeur prend le nom d'évaporation ou de vaporisation, suivant que le changement d'état se produit à l'air libre ou en vase clos.

L'évaporation a lieu sous l'influence de causes atmosphériques.

La vaporisation est provoquée par une augmentation de température ou par une diminution de pression.



LOI DE MARIOTTE. — Les volumes occupés par une même masse de gaz, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte

$$(1) \quad VH = V'H' = V''H'' \dots \text{etc.}$$

(V, V', V''... volumes et H, H', H''... pressions correspondantes ; ce qui s'écrit aussi

$$pv = \text{constante} \quad \text{ou} \quad pv = C^{\text{te}}.$$

Cette loi de Mariotte n'est qu'approchée, mais nous pourrions dans la pratique l'admettre comme exacte.

LOI DE GAY-LUSSAC. — Les volumes occupés par une même masse de gaz à pression constante sont proportionnels aux binômes de dilatation correspondant aux diverses températures auxquelles peut être portée cette masse de gaz

$$(2) \quad \frac{V}{1 + \alpha t} = \frac{V'}{1 + \alpha t'} = \frac{V''}{1 + \alpha t''} \dots, \text{etc.}$$

COMBINAISON DES DEUX LOIS PRÉCÉDENTES. — Les produits des volumes qu'occupent une même masse de gaz par les pressions correspondantes, sont proportionnels aux binômes de dilatation correspondant aux températures auxquelles est portée cette masse de gaz :

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = \frac{V'H'}{1 + \alpha t'} = \frac{V''H''}{1 + \alpha t''} \dots \text{etc.}$$

N. B. — Nous admettrons pour valeur de α , $\frac{1}{273}$ ou 0,00367.

Dans le cas particulier où H_0 et V_0 sont la pression ou la volume de la masse donnée à 0 degré centigrade, on a alors :

$$(3) \quad \frac{VH}{1 + \alpha t} = \frac{V_0 H_0}{1 + \alpha 0} = V_0 H_0 = \text{constante.}$$

$$\text{ou} \quad VH = V_0 H_0 (1 + \alpha t) = V_0 H_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) = \frac{V_0 H_0 (273 + t)}{273}$$

ou en posant $\frac{V_0 H_0}{273} = R$ et $T = t + 273$ (température absolue), on a :

$$(4) \quad VH = RT \quad \text{ou} \quad pv = RT$$

(On sait en effet que le 0° absolu en thermodynamique correspond à — 273° et $V_0 H_0$ est constant pour une masse donnée de chaque gaz).

En faisant dans la formule (3) $t = 0$ et $H_0 = 76$ centimètres de mercure, on déduit facilement

(1) $R = 29,27$ pour l'air en supposant la pression en kilogrammes par mètre carré et à 0°, degré de la glace fondante.



la formule donnant la masse d'un gaz connaissant son volume V , sa pression H , la température t et sa densité relative d à 0 degré et sous 76 centimètres.

On a

$$(5) \quad M = \frac{V}{1 + \alpha t} \times \frac{H}{76} \times d \times 0,001293.$$

FORCE ÉLASTIQUE. — La pression des gaz et vapeurs porte le nom de *force élastique*. Les forces élastiques des vapeurs se calculent en faisant le vide au-dessus des liquides générateurs, jusqu'à ce qu'il y ait excès de liquide. On emploie un manomètre à mercure et la différence de niveau donne la valeur de la force élastique de la vapeur. Suivant le liquide employé, la force élastique est variable.

Cette dernière est, en outre, fonction de la température comme l'indiquent les lois précédentes.

QUANTITÉ DE CHALEUR. — Un corps soumis à l'action de la chaleur s'échauffe et on mesure son élévation de température par le thermomètre. Prenons un thermomètre à graduation centigrade ; le 0 a été obtenu en plaçant le thermomètre dans la glace fondante ; le 100, en le plongeant dans la vapeur d'eau bouillante, sous la pression 760^{mm} (voir plus loin, vapeurs saturées). L'intervalle a été divisé en 100 parties égales, chacune constituant le *degré centigrade*.

Soit une masse d'eau de 1 kilogramme ; l'*unité* de quantité de chaleur est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de cette masse de 1 degré centigrade. On remarque, en effet, qu'il faut très sensiblement la même quantité de chaleur pour porter la température de ce kilogramme d'eau de 1° à 2° et pour la faire passer de 90° à 91°, par exemple ; la quantité de chaleur faisant varier de 1° la température d'une masse d'eau est sensiblement la même, quel que soit l'état de température initial.

Cette unité s'appelle *calorie*.

Exemple : pour élever de 10° à 16° la température de 5 litres (ou 5 kilos) d'eau, il faudra un nombre de calories égal à : $5 \times (16 - 10) = 5 \times 6 = 30$ calories.

FORCE. — Un corps ne peut modifier son état de repos ou son état de mouvement sans l'intervention d'une cause étrangère. C'est cette cause étrangère qu'on nomme force. Par exemple, la pesanteur est une force qui tend à faire tomber tous les corps.

Pour mesurer une force, on la compare à la pesanteur et on définit l'unité de force, ou *kilogramme*, par le poids d'un décimètre cube d'eau distillée à 4 degrés centigrades.

TRAVAIL. — On définit, en mécanique, la direction, le sens et le point d'application d'une force ; quand une force déplace son point d'application, cette force accomplit un certain travail.

Soit (fig. 1) une force F évaluée en kilogrammes, A son point d'application, AB le déplacement de ce point sous l'action de la force F , θ l'angle de la force et du déplacement du point d'application ; on définit le travail exécuté par le produit :

$$AB \times F \times \cos. \theta.$$

En particulier, si le point d'application se déplace dans la direction de la force, le travail est égal au *produit de la force par le chemin parcouru*.

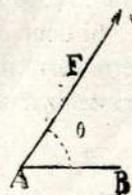


Fig. 1.



L'unité de force étant le kilogramme, l'unité de longueur, le mètre, on définira l'unité de travail par le *kilogrammètre*, qui est le travail d'une force égale à un kilogramme dont le point d'application se déplace de un mètre dans la direction de la force.

PUISSANCE. — Un travail peut être exécuté en un temps plus ou moins long ; par exemple, le transport à 10 mètres de hauteur d'un ensemble de poids dont le total égale 100 kilogrammes ne pourra pas être effectué par un homme en une seconde, alors que des machines appropriées pourraient l'exécuter. On dit que dans ce cas, ces machines sont plus puissantes que l'homme. La puissance définit le travail que pourra effectuer une machine en un temps déterminé.

L'unité usuelle de puissance est le cheval-vapeur qui correspond au travail de 75 kilogrammètres effectué en 1 seconde.

Une machine de 30 chevaux pourra donc élever 75×30 kilos à 1 mètre de hauteur en une seconde.

VAPEUR. — Dans l'étude de la vapeur, intermédiaire dans la transformation de la chaleur en travail, nous serons amenés à parler de la pression de la vapeur ; aussi faut-il définir d'abord ce qu'on entend par pression d'un gaz ou d'une vapeur.

PRESSION ABSOLUE. — Soit (fig. 2) un récipient A contenant un gaz ou une vapeur ; en haut est un orifice de surface S. Ce récipient est placé dans un autre plus grand, B, de façon qu'ayant fait le vide dans B, A soit soustrait à l'action de l'air extérieur.

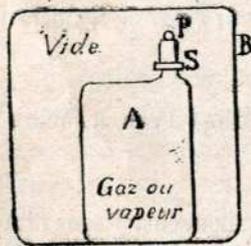


Fig. 2.

Pour empêcher le gaz contenu dans A de sortir et de se répandre dans l'espace vide, il faut mettre une soupape sur S et l'appuyer avec un poids P ; on appelle pression absolue du gaz contenu dans A le rapport $\frac{P}{S}$.

(On suppose que le poids de la soupape est négligeable).

On exprime P en kilogrammes, S en centimètres carrés de sorte que la pression absolue est l'effort exercé par le gaz ou la vapeur sur une surface de 1 centimètre carré.

PRESSION ATMOSPHERIQUE. PRESSION RELATIVE. — L'air est pesant (un litre d'air pèse 1 gr. 293) et, par suite, il exerce une pression sur tous les corps. Sur le vase B, il exerce une pression vers l'intérieur ; cette pression, évaluée par le baromètre (Physique), est, au niveau de la mer, en moyenne, 1 kil. 0336, correspondant à 760^{mm} de mercure dans la colonne barométrique ; cette pression varie avec la latitude et l'altitude et aussi en raison des perturbations atmosphériques.

Si donc nous laissons l'air entrer dans B, il va s'établir une pression de 1 kil. 0336 par centimètre carré sur S ; cette pression tendra à appuyer la soupape sur son siège, et il suffira pour la maintenir d'un poids égal à la différence des forces agissant sur les deux faces, soit :

$$p = P - S \times 1 \text{ k. } 0336.$$

La pression $\frac{p}{S}$ est appelée pression relative ou simplement pression du gaz contenu en A, On voit



que, si la pression absolue en A est inférieure à 1 kil. 0336 par centimètre carré, il n'y a pas besoin de mettre un poids pour appuyer la soupape.

ATMOSPHERE. — Il existe des appareils servant à mesurer les pressions ; ce sont les manomètres. On prend parfois pour unité de mesure la pression de 1 kil. 0336 par centimètre carré, que l'on nomme atmosphère. Actuellement, la généralité des manomètres est graduée en kilogrammes par centimètre carré et non en atmosphères.

Dans la pratique, on ne mesure pas la pression absolue, pression par rapport au vide ; on compte la pression relative, différence des pressions entre l'air extérieur et le gaz contenu. C'est en effet la seule qui ait une importance pratique et la seule qui soit utilisable.

Donc, si nous disons que dans une chaudière la pression est de 12 kilos, en réalité la pression absolue de la vapeur est $12 + 1,0336$; mais, la pression de 12 kilos, différence des pressions entre l'intérieur et l'extérieur de la chaudière, est seule utilisable. Il faudrait faire le vide autour de la chaudière pour qu'alors la pression réellement exercée sur son enveloppe fût 13 kil. 0336.

VAPEUR SATURANTE, SÈCHE OU SURCHAUFFÉE. — A une même température, la force élastique d'une vapeur suit des lois différentes, suivant son degré d'humidité, quand elle se trouve en contact avec le liquide générateur ; et, plus encore, lorsqu'elle n'est plus en présence du liquide générateur.

La vapeur est *saturante* ou *saturée*, lorsque, dans le vase qui la contient, elle se trouve en présence de son liquide générateur.

La vapeur est dite *sèche*, ou *surchauffée*, lorsqu'elle est séparée de son liquide générateur ; et, dans ce cas, sa force élastique suit sensiblement la loi de Mariotte ($pv = C^te$) et la loi de variation avec la température, celle de Gay-Lussac : $\frac{VH}{1 + \alpha t} = C^te$.

Dans le cas de dissolutions solides ou acides, la tension maximum des vapeurs est inférieure à la force élastique maximum de la vapeur du *liquide* pur, et d'autant moindre que la dissolution se trouve plus concentrée.

Dans le cas de vapeurs saturantes, les cinq formules précédentes peuvent être utilisées avec une exactitude suffisante.

VAPEUR SATURANTE. — Etudions les propriétés de la vapeur dite saturée. Soit un récipient B muni d'une soupape sur laquelle nous pourrions exercer un certain effort (fig. 3).

Ce vase est muni de deux thermomètres t_1 et t_2 plongés, l'un dans le liquide, l'autre dans la vapeur ; un foyer F permet de chauffer l'ensemble.

Chauffons le vase ; le liquide émet de la vapeur et la pression monte ; chargeons le levier de la soupape, de façon à équilibrer la pression qui tend à la soulever. Supposons que la pression intérieure soit p au sommet où l'équilibre existe ; à ce moment, les températures marquées par t_1 et t_2 sont les mêmes : t . Si nous continuons à chauffer, la soupape se soulève, la vapeur sort, mais la pression intérieure reste p et la température reste constante

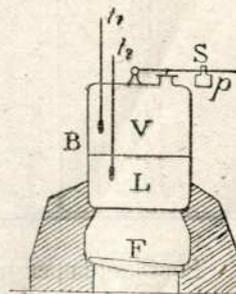


Fig. 3.



et la même aux thermomètres t et t_2 . En continuant à chauffer, la vapeur continue à sortir, le liquide diminue dans le vase par suite de sa transformation en vapeur ; mais tant qu'il restera du liquide, la pression intérieure p et la température t seront invariables.

Si nous mettions un poids correspondant à une autre pression p' , nous aurions une température t' .

Nous voyons donc que les propriétés fondamentales de la vapeur saturée sont les suivantes :

1° A chaque température t correspond une pression p .

2° Pour transformer l'eau en vapeur saturée à la même température, il faut dépenser une certaine quantité de chaleur ; c'est ce qu'on appelle la *chaleur latente de vaporisation*.

VAPPEUR D'EAU. — On a vu, dans la définition de l'échelle thermométrique centigrade, que la vapeur d'eau, sous la pression de 760^{mm} de mercure, était à 100°.

Donc, à 100 degrés centigrades, la pression absolue de la vapeur d'eau sera 1 atmosphère, et il n'y aura pas de différence de pression entre l'intérieur du vase et l'air extérieur.

Pour des températures plus élevées, les pressions absolues sont indiquées par le tableau suivant :

Tableau des pressions de la vapeur d'eau

en kilogrammes par centimètre carré correspondant aux températures en degrés centigrades.

Températures	Pressions		Températures	Pressions	
	effective	absolue		effective	absolue
100	0 ou (pression atmosph.)	1	183	10	11
111	0,5	1,5	185	10,5	11,5
120	1	2	187	11	12
127	1,5	2,5	189	11,5	12,5
133	2	3	191	12	13
138	2,5	3,5	193	12,5	13,5
143	3	4	194	13	14
147	3,5	4,5	196	13,5	14,5
151	4	5	197	14	15
155	4,5	5,5	199	14,5	15,5
158	5	6	200	15	16
161	5,5	6,5	202	15,5	16,5
164	6	7	203	16	17
167	6,5	7,5	205	16,5	17,5
170	7	8	206	17	18
173	7,5	8,5	208	17,5	18,5
175	8	9	209	18	19
177	8,5	9,5	210	18,5	19,5
179	9	10	211	19	20
181	9,5	10,5	213	19,5	20,5
			214	20	21

Pour les températures inférieures à 100°, si l'eau est contenue dans un vase purgé d'air, la pression absolue de la vapeur sera inférieure à la pression atmosphérique ; l'air aura tendance à rentrer dans



le vase. Nous donnons ci-dessous les pressions absolues de la vapeur d'eau de 0° à 100° en millimètres de mercure (au lieu de pression on dit dans ce cas tension) :

Température	Tension	Température	Tension	Température	Tension
0	4,6	40	54,9	80	354,6
10	9,2	50	92	90	525,4
20	17,4	60	148,8	100	760 ^{mm} ou
30	31,5	70	223,1		1 atmosphère

VAPORISATION. — La vaporisation est le phénomène en vertu duquel un liquide se transforme en vapeur. Cette vaporisation se fait par *évaporation* ou par *ébullition*.

1° Dans la vaporisation par évaporation, le liquide reste au repos, en communication avec l'air libre, les vapeurs se forment peu à peu sans troubler l'état d'équilibre du liquide. Le phénomène n'est visible que par la diminution de ce liquide.

2° Par ébullition, les vapeurs se forment au sein de la masse du liquide qui est agitée de mouvements tumultueux. Les vapeurs viennent sous forme de bulle crever à la surface du liquide.

EBULLITION. — Nous venons de définir l'ébullition. Elle est soumise à plusieurs lois.

1° Sous les mêmes conditions de pression, un liquide bout toujours à la même température.

2° La température reste constante pendant toute la durée de l'ébullition si la pression reste la même.

3° Lorsqu'un liquide bout, pendant toute la durée de l'ébullition, la tension de la vapeur produite est égale à la pression qui agit sur le liquide.

DENSITÉ DES VAPEURS. — Les densités des vapeurs, comme celles des gaz, sont rapportées à celle de l'air. La densité d'une vapeur est donc le rapport entre la masse d'un certain volume de cette vapeur et celle d'un égal volume d'eau froide à la même température et sous la même pression.

On trouvera la même formule déjà donnée en (5), d'où l'on tire

$$d = \frac{M \cdot 76 \cdot (1 + \alpha t)}{0,001293 \text{ VH}} \quad \text{ou en remplaçant } 1 + \alpha t \text{ par } 1 + \frac{t}{273}$$

$$d = \frac{76 M (273 + t)}{0,001293 \times 273 \text{ VH}} \quad \text{ou mieux en exprimant V en litres} \quad d = \frac{76 M (273 + t)}{1^{\text{er}}, 293 \times 273 \text{ VH}}$$

dans laquelle M reste exprimé en grammes.

VAPEUR SÈCHE. — Nous avons dit plus haut ce qu'on entend par *vapeur sèche*.

Si on avait continué à chauffer notre vase de démonstration jusqu'à expulser tout le liquide, il serait resté de la vapeur sèche dont les propriétés sont différentes de celles de la vapeur saturée. Pour celle-ci, le volume du récipient qui la contient avec son liquide générateur n'a pas d'influence sur sa pression ; au contraire, si nous avons un poids déterminé de vapeur sèche, sa pression variera avec le volume où elle est contenue.



La variation de la pression de la vapeur sèche en fonction du volume est donnée par la loi de Mariotte $pv = C^{te}$ (le produit de la pression d'une masse de gaz par le volume qu'il occupe est constant), dans le cas où la température reste constante.

Et la loi de variation avec la température est celle de Gay-Lussac : $\frac{VH}{1 + \alpha t} = \text{constante}$. (Voir plus haut).

FORMULE PRATIQUE. — Dans la pratique on peut trouver rapidement la pression absolue qui correspond à une température déterminée en faisant usage de la formule $H = T^4$ dans laquelle H est la pression absolue en kilogrammes et T la température en centièmes de degré.

Exemple : A 200 degrés on aura d'après la formule, $H = 2^4 = 16$ kg., soit une pression effective de 15 kg.

C'est bien ce que nous donne la table.

CHALEUR SPÉCIFIQUE DES GAZ. — On appelle chaleur spécifique d'un gaz, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température d'un kilog. de gaz.

Tout gaz a deux chaleurs spécifiques différentes : l'une c est la chaleur spécifique à *volume constant* ; l'autre C, la chaleur spécifique à *pression constante*.

Le rapport $\frac{C}{c}$ est constant pour tous les gaz et égal à $\frac{4}{3}$ environ.

DILATATION ET CONTRACTION DES CORPS. — La chaleur a pour effet de faire augmenter les corps en longueur, surface et volume. En se refroidissant, ils se contractent,

COEFFICIENTS DE DILATATION. — On appelle coefficient de dilatation linéaire, superficiel ou cubique d'un corps l'accroissement que prend l'unité de longueur, de surface ou de volume de ce corps quand la température de ce dernier augmente de 1°.

La formule connue est $L = L_0 (1 + \alpha t)$.

Le coefficient superficiel est le double et le coefficient cubique le triple du coefficient linéaire.

Le coefficient de dilatation du fer de 0,000012, celui de cuivre 0,000017. Le tableau des coefficients des corps sont donnés dans tous les formulaires et traités de physique.

CHALEURS DE VAPORISATION. — On appelle chaleur totale de vaporisation de l'eau à une température déterminée t , la quantité de chaleur nécessaire pour transformer un kilog. d'eau prise à 0 degré en vapeur saturante à la température considérée. Elle est donnée par la formule de Regnault :

$$(6) \quad Q = 606,5 + 0,305 t.$$

Lorsque l'eau est déjà à une température t' la formule devient :

$$(7) \quad Q' = 606,5 + 0,305 t - t'$$

pour une masse M on aurait :

$$(8) \quad Q'' = M (606,5 + 0,305 t - t').$$



On appelle **chaleur de vaporisation à une température déterminée**, la quantité de chaleur nécessaire pour transformer en vapeur saturante 1 kilog. d'eau prise à la température considérée.

On voit d'après la formule (6) que la chaleur totale de vaporisation de l'eau à 100 degrés est de :

$$606,5 + 30,5 = 637 \text{ calories}$$

et d'après la formule (7) que la chaleur de vaporisation est de :

$$637 - 100 = 537 \text{ calories.}$$

Ce chiffre doit être corrigé si l'on tient compte de la chaleur spécifique de l'eau plus ou moins chargée de sel ; pour l'eau de mer $c = 0,84$.

N. B. — (La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température d'un kilogramme d'eau).

VITESSE D'ÉCOULEMENT ET DE FORMATION DE LA VAPEUR. — Le problème posé consiste à déterminer la vitesse avec laquelle un fluide renfermé dans un réservoir indéfini où règne la pression p et la température t_1 s'écoule dans un milieu également indéfini où règne la pression p et la température t .

Soit W la vitesse d'écoulement à l'orifice mesurée au point où elle est uniforme et où les filets fluides sont animés de vitesses égales ou parallèles.

Dans la partie stagnante du premier réservoir, l'unité de poids du fluide occupe un volume v_1 . Ce volume est devenu v et parallèlement la formule interne u_1 est devenue u . Cette unité de poids a gagné en tout $u - u_1 + A \frac{W^2}{2g}$ calories ($A = \frac{1}{425}$) qui doivent représenter la chaleur fournie directement par kilog. de fluide pendant l'opération pour la chaleur équivalente du travail des forces intérieures sur ce même kilog.,

Soit $Q + A(p_1 v_1 - p v)$ ce qui donne

$$Q + A(p_1 v_1 - p v) = u - u_1 + A \frac{W^2}{2g}$$

En étudiant diverses valeurs de cette formule, on arrive à la formule empirique de Weisbach qui suppose v constant

$$W = 2g \sqrt{v_1 \cdot (p_1 p)}$$

Pour les vapeurs humides, on fait $v_1 = \frac{1}{8}$ ce qui donne

$$W = \sqrt{2g \times 16.600 \left(1 - \frac{p}{p_1}\right)}$$

Ces formules, d'ailleurs, ne sont qu'approchées d'assez loin des résultats donnés par la thermodynamique.



AVANTAGES DES HAUTES PRESSIONS. — Examinons le tableau suivant :

Pression	Chaleurs de vaporisation	
1 ^k 033	637	40° 18
2 07	643,3	41 88
4 13	650,4	43 63
6 20	655,1	44 66
10 33	661,5	45 97
16 50	667,1	47 01
20 66	671,5	47 77

Travail de pleine pression. — On voit que les chaleurs de vaporisation croissent extrêmement lentement relativement à la pression, et industriellement on peut dire que le coût du kgr. de vapeur demeure le même, quelle que soit la pression dans lequel il s'est produit.

Le travail de pleine pression croît plus rapidement, mais bien lentement quand même.

On finit donc par n'avoir qu'un léger bénéfice, au point de vue de la pleine pression, à rechercher des températures de plus en plus élevées. Aussi, c'est surtout la possibilité d'employer des machines de plus en plus petites qui constitue le véritable avantage de l'emploi des pressions de plus en plus hautes.

PRODUCTION DE LA VAPEUR D'EAU. — Industriellement, la vapeur d'eau est produite au moyen de chaudières comme nous l'étudierons plus loin.

NOTIONS SUR L'ÉQUIVALENCE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

PRINCIPE I. — Le frottement de deux corps l'un sur l'autre produit de la chaleur. C'est ce qui se passe par exemple dans les machines lorsqu'on n'a pas laissé suffisamment de jeu à deux articulations.

Au bout d'un certain temps de marche, les pièces s'échauffent, peuvent rougir et même fondre lorsqu'il s'agit de bronze ou d'antifriction.

Davy a fait à ce sujet une expérience fort intéressante. En frottant l'un contre l'autre deux morceaux de glace, il a pu les fondre dans une atmosphère inférieure à zéro degré.

PRINCIPE II. — Le choc de deux corps l'un contre l'autre produit de la chaleur. Ce fait se remarque encore dans les machines avec des articulations insuffisamment serrées.

Les pièces dans ces conditions s'échauffent, quoique moins rapidement que dans le cas précédent. Dans les exercices de tir sur des plaques de blindage, les obus rougissent au moment du choc.

PRINCIPE III. — La chaleur mise en jeu équivaut à une quantité de travail bien déterminée. Une grande calorie équivaut à 425 kilogrammètres.

Ce nombre n'est pas tout à fait exact en raison de l'imperfection des méthodes employées, mais quoiqu'on ait fait varier ces dernières, c'est toujours un nombre compris entre 425 et 426 qui a été retrouvé.

Inversement, 1 kilogrammètre équivaut à $\frac{1}{425}$ de grande calorie.

ÉQUIVALENT MÉCANIQUE C. G. S. — Une petite calorie équivaut à 0 kgr. 425, soit à $9,81 \times 0,425 = 4$ joules 17.

Inversement, un joule équivaut à $\frac{1}{4,17} = 0$ cal. 24.



EXPÉRIENCE DE JOULE. — Joule est le premier qui ait déterminé expérimentalement l'équivalent mécanique de la calorie.

L'expérience de Joule peut se refaire facilement de la façon suivante (fig. 4) :

Dans un calorimètre C, fixons un agitateur à ailettes A, fixé sur un arbre vertical tournant sur le pivot *p*.

Sur cet arbre est claveté un tambour T, solidaire d'une roue d'angle *a* et sur lequel s'enroulent deux brins FF' portant à leurs extrémités les poids égaux PP', et passant sur les poulies de renvoi OO'.

L'enroulement des brins se fait de telle sorte que leurs poids fassent toujours tourner dans le même sens le tambour T. La roue d'angle *a* peut à volonté s'engrener avec une roue *a'* mobile sur l'arbre à manivelle M.

Au début de l'expérience, les brins sont enroulés ; T est claveté sur l'arbre et *a'* n'est pas engrenée.

Les poids en tombant font tourner les palettes.

Après la chute, on engrène *a* et *a'*, on rend fou le tambour T et au moyen de la manivelle M on remonte les poids. Puis on remet les choses comme précédemment, la chute recommence et l'on continue l'expérience jusqu'à ce que l'eau soit suffisamment échauffée.

Supposons *n* chutes.

La masse mise en jeu est alors $2Pn$. Si *b* est la hauteur de chute, le travail développé est $2Pnb$ kilogrammètres.

Le thermomètre *t* indique l'élévation de température ($\theta - \theta'$).

Si M est la masse en eau du calorimètre et de l'eau on a une quantité de chaleur $M(\theta - \theta')$,

donc
$$1 \text{ calorie} = \frac{2Pnb}{M(\theta - \theta')}$$

Le calcul donne environ 425 kgm.

Remarque. — Il y a évidemment dans l'expérience précédente plusieurs sources d'erreur dues non seulement à l'imperfection des appareils, mais aussi à ce qu'une certaine quantité du travail produit se transforme probablement en électricité.

MÉTHODES DE HIRN. — *Première méthode.* — Hirn a calculé la quantité de chaleur contenue dans un poids déterminé de vapeur. Cette vapeur alimentait une machine à vapeur et était récupérée dans un condenseur.

On calculait le travail produit au moyen de courbes d'indicateur.

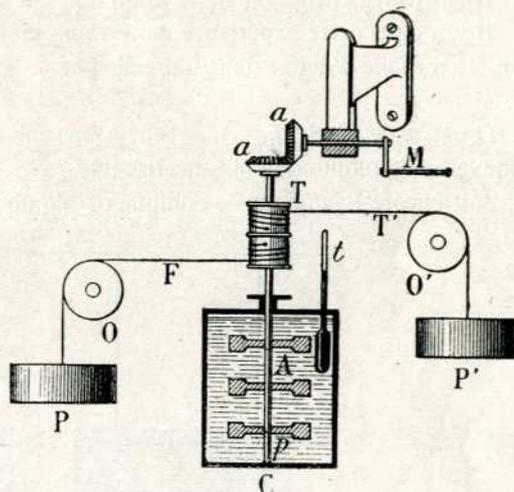


Fig. 4.



La chaleur mise en jeu était égale à la quantité de chaleur de la vapeur diminuée de celle de l'eau de condensation.

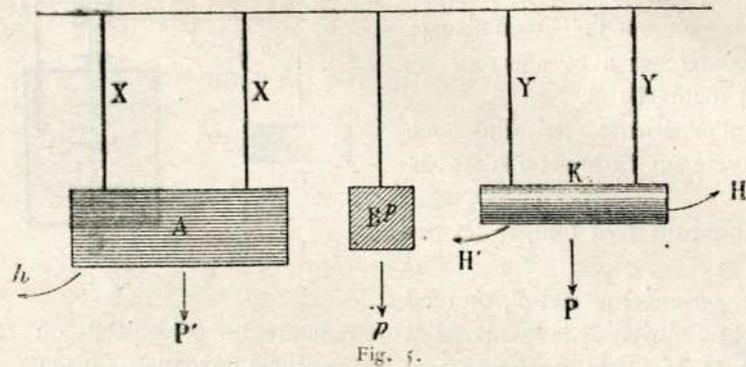
Cette dernière était évidemment calculée en tenant compte de la chaleur emportée par l'eau réfrigérante.

Hirn trouva encore dans ce cas qu'une calorie équivalait à peu près à 425 kilogrammètres.

Il y a dans cette expérience des erreurs inévitables dues à la perte de chaleur par rayonnement, qu'il est difficile d'éviter dans une machine.

Deuxième méthode (fig. 5). — Soit A une enclume en pierre de poids P' . Cette enclume est garnie d'une lame de plomb de poids négligeable.

Soit encore B, une masse cubique de plomb de poids p , et K un arbre cylindrique de poids P.



L'enclume et l'arbre, grâce aux tiges égales X et Y, ne peuvent que s'élever horizontalement. On soulève l'arbre de la hauteur H et on le laisse retomber. Il soulève l'enclume A et le poids p à la hauteur h .

Le bloc K rebondit à la hauteur H' et le travail communiqué est $P(H - H')$.

Le bloc A étant monté à la hauteur h ainsi que le plomb, on fait un travail $(P' + p)h$ + travail de l'échauffement du plomb (soit C calories).

$$\text{Donc :} \quad P(H - H') = (P' + p)h + C.$$

$$\text{d'où} \quad C = P(H - H') - (P' + p)h.$$

Pour n chocs on aurait $nC = nP(H - H') + n(P' + p)h$. nC s'obtient facilement en plongeant le bloc dans l'eau d'un calorimètre.

MÉTHODE DU FREIN. — Imaginons un moteur à vapeur pouvant développer sur l'arbre un travail T mesuré au frein de Prony.

On a donc par seconde un travail égal à 75 T kilogrammètres.

Imaginons en outre que le frein lui-même transforme la puissance absorbée en chaleur, pouvant être mesurée. Soit Q le nombre de calories trouvées.

Le rapport $\frac{75T}{Q}$ donnera l'équivalent mécanique de la calorie.



MÉTHODE ÉLECTRIQUE. — Plongeons dans un calorimètre un fil conducteur de l'électricité et très résistant. Faisons traverser le fil par un courant électrique. La chaleur développée dans le fil échauffera l'eau.

On peut donc mesurer la quantité de chaleur Q produite par seconde dans ces conditions.

Le travail est égal, d'après la loi de Joule, à

DI joules ou $0,102 DI$ kilogrammètres.

Les quantités D et I se mesurent facilement avec un voltmètre et un ampèremètre ; on a donc encore ici

$\frac{0,102DI}{Q}$ pour équivalent mécanique de la chaleur.

On trouve encore 425.

APPLICATION. — Dans son mémoire sur l'équivalent mécanique de la chaleur, le physicien Joule a pris comme unité de travail le travail accompli par un poids d'une livre tombant d'une hauteur d'un pied à Manchester. Comme quantité de chaleur il a pris la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Fahrenheit une livre d'eau.

Sachant que la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur dans le système CGS est $4,17 \times 10^7$, on demande quel est le nombre trouvé par Joule.

Le pied vaut 30,5 centimètres. L'intensité de la pesanteur à Manchester est égale à 9 m. 8117.

Le degré Fahrenheit vaut $\frac{5}{9}$ de degré centigrade.

Solution

Ramenons toutes les unités choisies au système CGS.

1 livre vaut 500 grammes ou

$$500 \times 981,17 \text{ dynes.}$$

et le travail mis par cette masse pour parcourir un pied ou 30,5 centimètres est égal à

$$500 \times 981,17 \times 30,5 \text{ ergs.} \quad (1)$$

L'unité de chaleur, trouvée par Joule, exprimée en calories, est égale à $500 \times \frac{5}{9}$ et par suite à

$$500 \times \frac{5}{9} \times 4,17 \times 10^7 \text{ ergs.} \quad (2)$$

L'équation (2) représente la valeur d'une calorie et l'équation (1) celle de l'unité de travail.

Autant de fois cette dernière sera contenue dans l'expression (2) autant la calorie vaudra d'unités de travail, soit

$$\frac{500 \times 5 \times 4,17 \times 10^7}{500 \times 9 \times 981,17 \times 30,5} = 774 \text{ par défaut.}$$



NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE

La thermodynamique est la science qui traite des relations qui existent entre la chaleur et le travail dans les machines thermiques.

Elle est basée sur deux principes fondamentaux qui sont le principe de Mayer et le principe de Carnot.

ÉNERGIE. — On dit qu'un corps possède de l'énergie lorsqu'il est capable de produire du travail.

EXEMPLE. — La houille, qui est susceptible après quelques transformations de faire tourner une machine, renferme de l'énergie ; un cours d'eau qui fait tourner une turbine renferme de l'énergie ; le zinc qui se décompose en donnant lieu à la formation d'un courant électrique renferme de l'énergie, etc., etc.

D'une façon générale, sous quelque forme qu'elle apparaisse, l'énergie est susceptible de se transformer en une autre sorte d'énergie.

Dans tous les cas, l'énergie *se conserve intégralement dans ses transformations.*

Autrement dit il existe dans l'univers une somme d'énergie qui est immuable, et pas plus que pour la matière il est impossible d'en détruire ni d'en créer. En général on ne peut observer que des variations d'énergie.

ÉNERGIE MÉCANIQUE, CINÉTIQUE OU POTENTIELLE. — Un corps peut posséder de l'énergie mécanique, c'est-à-dire la faculté de produire un certain travail, soit par suite de sa vitesse, soit à cause de la position qu'il occupe dans l'espace.

Energie potentielle. — On appelle ainsi l'énergie emmagasinée en quelque sorte dans un corps.

Un poids de 2 kilogrammes élevé à 10 mètres de hauteur a donné lieu à un travail de 20 kilogrammètres.

Ce poids a augmenté son énergie primitive d'une quantité équivalente à 10 kilogrammètres. C'est un exemple d'énergie potentielle.

Energie cinétique. — Lorsqu'un corps ou un système de molécules est animé d'une certaine vitesse, il possède aussi une certaine énergie qu'on appelle *énergie cinétique.*

Une pierre qui tombe, un boulet lancé dans l'espace possèdent de l'énergie cinétique.

Energie totale. — Laissons tomber un corps. Au fur et à mesure qu'il se rapproche du sol son énergie potentielle diminue, tandis que son énergie cinétique augmente.

Si l'on prend le corps en un point quelconque de sa course on dit qu'il possède *une énergie totale* composée de son énergie cinétique et de son énergie potentielle.

La somme de ces deux énergies est d'ailleurs toujours constante et égale à l'énergie potentielle.

On voit donc qu'en résumé l'énergie potentielle peut se transformer en travail et en énergie cinétique.



FORCE VIVE. — On appelle *force vive* d'un point matériel en mouvement le produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

$$F = mv^2.$$

PUISSANCE VIVE. — On donne le nom de puissance vive à la moitié de la quantité précédente

$$P = \frac{1}{2}mv^2$$

THÉORÈME. — *Le travail d'une force constante agissant seule sur un point matériel est égal à la variation de puissance vive du corps.*

Désignons par F une force constante agissant *dans la direction du chemin e* parcouru pendant le temps t . Nous savons que cette force imprime au corps un mouvement uniformément accéléré d'accélération γ . Désignons par V_0 la vitesse initiale du corps.

Le travail est égal à $F \times e$.

Mais on a : $F = m\gamma$.

et $e = V_0 t + \frac{1}{2} \gamma t^2$

d'où Travail = $m\gamma(V_0 t + \frac{1}{2} \gamma t^2)$

soit $T = \frac{m\gamma t}{2}(2V_0 + \gamma t)$ (1)

Or, on a : $V = V_0 + \gamma t$.

d'où $V - V_0 = \gamma t$.

Remplaçons dans l'équation (1) γt par sa valeur il viendra :

$$T = \frac{m}{2}(V - V_0)(2V_0 + V - V_0) = \frac{m}{2}(V - V_0)(V_0 + V)$$

soit $T = \frac{m}{2}(V^2 - V_0^2) = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{1}{2}mV_0^2$.

Remarque. — Lorsque la force n'est pas dans le sens du chemin parcouru le résultat est le même. En effet cette force peut être décomposée en deux autres, l'une *dans le sens du chemin parcouru* et l'autre normale à ce chemin ; cette dernière ne produit aucun travail et n'influence que la direction de la vitesse et non sa grandeur. On est donc ainsi ramené au cas d'une force agissant dans le sens du chemin parcouru.

TRAVAIL MOTEUR. — On appelle travail moteur ou positif le travail de forces qui font avec la direction du chemin parcouru un angle aigu.



TRAVAIL RÉSISTANT. — On donne le nom de travail résistant ou négatif au travail produit par les forces faisant un angle obtus avec la direction du chemin parcouru.

FORCÈS AGISSANT SUR UNE MACHINE. — Parmi les diverses forces susceptibles d'agir sur une machine ou sur un système de points matériels on distingue : 1^o les forces extérieures ; 2^o les forces intérieures. On doit rattacher aux forces intérieures les forces dites : forces de liaison.

FORCÈS EXTÉRIEURES OU FORCÈS DIRECTEMENT APPLIQUÉES. — Les forces extérieures sont des forces émanant de points étrangers au système.

FORCÈS INTÉRIEURES. — Les forces intérieures sont les actions mutuelles que les différents points du système exercent les uns sur les autres. Ces actions sont toujours deux à deux égales et directement opposées.

FORCÈS DE LIAISON. — Un point matériel peut être gêné dans son mouvement par un certain nombre d'obstacles matériels ou liaisons. Etant des causes modificatrices de mouvement, les liaisons agissent donc comme des forces, dites pour cette raison forces de liaison.

Ces forces de liaison sont en quelque sorte les réactions de l'obstacle.

Ainsi une bille qui repose ou qui roule librement sur un plan horizontal reçoit constamment de la part de ce plan une réaction verticale égale et directement opposée au poids du corps.

Dans tous les cas cette réaction ou force de liaison empêche le corps de prendre un mouvement vertical de haut en bas, quelles que soient les forces qui agissent sur lui.

Dans la pratique cependant les conditions de liaison ne sont jamais absolument satisfaites.

En effet tous les corps sont plus ou moins élastiques ou déformables, ce qui fait que la fixité n'est produite que d'une façon imparfaite. On suppose cependant, en général, que le travail des forces de liaison est nul et négligeable ; autrement dit on suppose pour simplifier la question les conditions de liaison parfaitement satisfaites, ce qui implique l'absence de tout frottement.

De sorte qu'en posant l'équation des forces vives et du travail on n'aura à tenir compte que des autres forces agissant sur le mobile.

RÉSISTANCES PASSIVES. — On trouve dans les machines une autre catégorie de forces portant le nom de résistances passives.

Ces forces dues aux divers frottements des corps les uns sur les autres, aux résistances des milieux, aux vibrations des diverses pièces fixes ou mobiles de la machine, etc.

Ces résistances passives doivent être considérées comme des forces extérieures.

On démontre en mécanique que, si l'on considère un système quelconque de points libres ou assujettis à des liaisons se mouvant sous l'action d'un nombre quelconque de forces tant intérieures qu'extérieures, on a pour chaque point du système un travail qui se déduit du théorème des forces vives.

On aura donc pour tous les points du système

$$T = \frac{1}{2} (\Sigma m V^2 - \Sigma m V_0^2).$$



Dans le cas d'un mouvement de translation uniforme, par exemple, la vitesse étant constante, le travail de ces diverses forces serait donc théoriquement nul et par suite le travail produit serait égal au travail dépensé. Le travail des résistances passives, quand elles existent, doit entrer dans cette équation.

PRINCIPE DE MAYER. — *Lorsqu'un corps ou un système de corps subit des transformations le ramenant au même état, si le système a reçu des corps extérieurs du travail il a cédé de la chaleur et la quantité de chaleur cédée est rigoureusement proportionnelle au travail accompli.*

La réciproque est vraie.

ÉQUATION GÉNÉRALE DE L'ÉQUIVALENCE. — Lorsqu'on communique à un corps une certaine quantité de chaleur il peut se produire des phénomènes très variés. Nous supposons pour simplifier la question qu'il ne se produit aucun phénomène chimique, électrique ou magnétique. Dans ce cas les phénomènes suivants peuvent se produire :

- 1° Augmentation de la température du corps.
- 2° Dilatation du corps. (Travail moléculaire interne.)
- 3° Production d'un travail externe consécutif à la dilatation du corps et dû aux résistances extérieures vaincues.

Désignons par Q la quantité de chaleur fournie au corps. Cette quantité sera exprimée en kilogrammètres par $425 Q$. Soit q_1 la portion de chaleur employée à produire l'élévation de température du corps ou $245 q_1$ kilogrammètres. Soit T le travail externe dû aux résistances extérieures vaincues.

$\frac{1}{2} (\Sigma mV^2 - \Sigma mV_0^2)$ la variation de puissance vive du corps.

Le principe de la conservation de l'énergie et celui de Mayer nous permettront d'écrire.

$$425 Q = 425 q_1 + T + \frac{1}{2} (\Sigma mV^2 - \Sigma mV_0^2).$$

La quantité q_1 est impossible à mesurer dans la pratique.

D'ailleurs le corps étant revenu à son état initial il a fallu dans toutes les transformations qu'il a subies lui fournir et lui enlever successivement des quantités égales de chaleur ; en outre si le corps a subi successivement des dilatations et contractions égales au total, la somme algébrique des travaux fournis dans ce cas est nulle.

Donc $q_1 = 0$. L'équation trouvée s'écrit alors :

$$425 Q = T + \frac{1}{2} (\Sigma mV^2 - \Sigma mV_0^2)$$

en sorte que la quantité de chaleur primitive s'est distribuée en travail et en puissance vive.

RELATIONS ENTRE LA PRESSION, LE VOLUME ET LA TEMPÉRATURE D'UN GAZ. — Dans les calculs de thermodynamique, les pressions s'expriment en atmosphères par mètre carré, et les températures partent du zéro absolu, c'est-à-dire -273° (c'est le degré qui correspond à la pression 0).



En désignant par P la pression d'un gaz, par V le volume d'un kilogramme de ce gaz, t sa température, R un coefficient variable avec les différents gaz, on a la relation constante :

$$PV = Rt$$

Les divers états d'un gaz se représentent graphiquement en considérant 2 axes rectangulaires ox et oy (fig. 6). Sur l'abscisse ox , on portera à une certaine échelle les volumes du gaz et sur l'ordonnée oy , les pressions correspondantes. On obtiendra ainsi une courbe telle que AC qui est la ligne représentative des divers états du gaz.

La pression au point E est représentée par Ee et son volume par Ed , sa température est alors $t = \frac{Ee \cdot Ed}{R}$. La pression en E' est représentée par $E'e'$, son volume par $E'd'$ et sa température est

$$t' = \frac{E'e' \cdot E'd'}{R}$$

En passant de E à E' , le volume de la masse de gaz considérée a subi une variation représentée par le déplacement ee' . En supposant très voisins les deux points EE' , la pression $Ee = p$ pourra

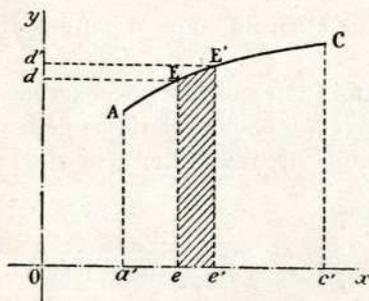


Fig. 6.

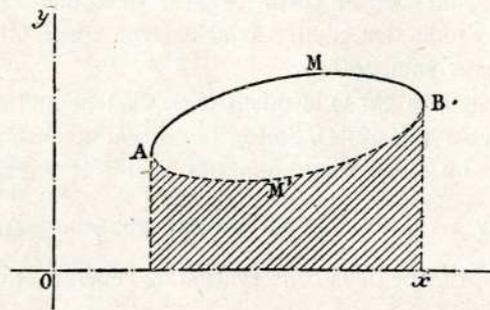


Fig. 7.

être considérée comme constante. La surface du rectangle $EE'e'e$ est donc égale à pee' ; c'est un travail ; c'est le travail de la masse de gaz, de pression p , sous l'influence de l'augmentation de volume ee' . Donc en allant de A en C , cette même masse de gaz aura donné lieu à un travail représenté par l'aire de la surface $ACa'e'$.

Il est évident que si, partant de C pour revenir en A , on enlève à notre masse de gaz la quantité de chaleur qui l'a fait passer de A en C et dans les mêmes conditions, on obtiendrait un travail négatif rigoureusement égal au précédent.

Dans la pratique, lorsqu'une évolution AMB revient à son état primitif, c'est généralement suivant une courbe différente $BM'A$ (fig. 7). On dit que la masse gazeuse a parcouru un cycle fermé. Le travail effectif est visiblement représenté par la surface intérieure de la courbe d'après ce que nous avons vu plus haut.

On sait que pour qu'un travail utile soit produit il faut qu'il y ait des variations de pression correspondant à un même volume à l'aller et au retour. Suivant les conditions de l'évolution on distingue plusieurs formes de courbes.

L'évolution se faisant à température constante le gaz suit la loi de Mariotte. La courbe est une



hyperbole équilatère ou *isotherme*. Dans ce cas la masse de gaz emprunte de la chaleur au milieu ambiant.

On a alors pour un gaz parfait $PV = \text{constante}$.

Lorsque l'évolution se fait sans aucun apport ni cession de chaleur (ce qui force évidemment la température à varier) la courbe est dite *adiabatique*.

Pour un gaz parfait l'équation est alors $PV^{1,49} = \text{constante}$ (1).

Les transformations à pression constante se font suivant une *horizontale*.

Celles à volume constant suivant une *verticale*.

Principe. — D'une façon générale on peut se rendre compte que dans la pratique un corps ne peut emprunter de la chaleur qu'à un ou plusieurs corps qu'on désigne sous le nom de *source chaude* et dont la température est plus élevée que la sienne ; inversement il n'en peut céder qu'à une *source froide*, c'est-à-dire à des corps dont la température est inférieure à la sienne. Dans la pratique la source chaude et la source froide sont considérées comme formées d'un seul corps.

Leur masse d'autre part est supposée assez grande pour que les quantités de chaleur (emprunt ou apport) fournies par le corps qui se transforme soient négligeables et ne modifient pas leur température.

RÉVERSIBILITÉ. — Un cycle est dit *réversible* lorsqu'un corps ayant parcouru le cycle dans un sens sous l'influence d'un certain nombre de sources de chaleur, il peut, les sources restant les mêmes, parcourir le cycle en sens inverse.

Il est d'ailleurs évident que si dans la première évolution il y a eu du travail produit par le corps, il faudra dans la seconde fournir à ce corps la même quantité de travail.

Principe 1. — Avec un nombre limité de sources de chaleur un cycle réversible ne peut être composé que d'isothermes et d'adiabatiques.

Principe 2. — Le cycle réversible le plus simple et le seul d'ailleurs que l'on puisse rendre réversible quand on ne dispose que de deux sources, est composé de 2 isothermes et de 2 adiabatiques C'est celui qui est connu sous le nom de *Cycle de Carnot*.

CYCLE DE CARNOT. — Le cycle de Carnot est ainsi formé :

Soit M une masse fluide à son état initial de volume V_0 et de température T (fig 8). Chauffons-la de façon que sa température reste constante. Elle décrit l'isotherme MM_1 , et emprunte à la source chaude une quantité de chaleur Q.

Laissons-la détendre sans lui fournir ni enlever de chaleur. Elle décrit l'adiabatique M_1M_2 , et diminue de température en produisant du travail jusqu'en M_2 où sa température est t , avec $t < T$.

Comprimons-la à température constante suivant l'isotherme M_2M_3 ; le corps cède alors à la source froide une quantité de chaleur Q_0 , fermons enfin le cycle par une compression adiabatique faisant

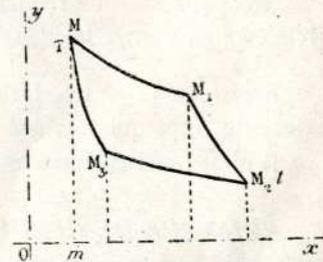


Fig. 8.

(1) 1,49 est le rapport $\frac{C}{c}$ des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant.



remonter la température à T et ramenant le volume à V_0 , on aura produit un travail représenté par la surface du quadrilatère curviligne $MM, M_2 M_3$ et exprimé par la formule $(Q - Q_0)$ 425.

Le cycle de Carnot est un cycle purement théorique dont il faut, dans la pratique, chercher à se rapprocher autant qu'on le peut. Il est d'ailleurs, on peut dire, *uniquement utilisé* dans les machines à vapeur où il est d'une importance considérable.

D'après les principes précédents le *cycle de Carnot est réversible*. On conçoit en effet que le corps puisse passer de M en M_3 suivant l'adiabatique M, M_3 sans qu'il y ait apport ou cession de chaleur, la température diminuant de T à t .

Le long de l'isotherme $M_3 M_2$ (température constante t) le corps emprunte de la chaleur à la source froide qui est à la même température que lui.

Soit Q_0 la quantité de chaleur empruntée.

De M_2 à M_1 il y a compression adiabatique de la température t à T .

Enfin de M_1 à M le cycle se termine suivant l'isotherme $M M_1$ à température constante T . Il faut pour cela céder à la source une quantité de chaleur Q plus grande que Q_0 .

Donc *il a fallu créer une certaine quantité de chaleur pour la transporter sur la source chaude, ce qui ne peut se faire qu'en dépensant du travail d'après le principe de Mayer.*

PRINCIPE DE CARNOT. — Lorsqu'un corps évolue entre deux températures T et t (température des deux sources chaudes $t < T$) le rapport du travail accompli à la quantité de chaleur fournie, ou rendement du cycle, est indépendant de la nature du corps qui évolue. Il est uniquement fonction des températures T et t , et égal à $r = \frac{T-t}{T}$.

Le cycle de Carnot est réversible.

Remarque 1. — Le rendement du cycle s'écrit aussi :

$$r = \frac{T-t}{T} = \frac{Q-Q_0}{Q}$$

Remarque 2. — Le rendement exprimé par le cycle de Carnot est plus grand que dans tout autre cycle évoluant entre les deux mêmes températures.

Remarque 3. — Les formules précédentes expriment que le rendement est indépendant de la nature du corps qui a évolué.

Il n'est fonction que des températures limites entre lesquelles se fait l'évolution.

PRINCIPE DE CLAUSIUS. — *Il est impossible de transporter directement de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud sans dépense de travail.*

Ce principe peut encore s'énoncer ainsi qu'il suit :

Il est impossible de faire fonctionner une machine thermique avec une seule source de chaleur.

PROPRIÉTÉS DES ISOTHERMES ET DES ADIABATIQUES. — Du principe de Clausius découlent un certain nombre de propriétés,



1° Une isotherme et une adiabatique ne peuvent se couper qu'en un seul point.

Si en effet elles se coupaient en deux points, la surface comprise entre ces deux courbes constituerait un cycle fermé correspondant à un travail produit en empruntant de la chaleur seulement à une source.

De cette propriété on déduit encore :

2° Une adiabatique et une isotherme ne peuvent être tangentes.

3° Deux adiabatiques ne peuvent se couper. (La démonstration est la même que dans le premier cas.)

4° Suivant une adiabatique la température varie toujours dans le même sens.

Dans tout autre cas en effet, on pourrait, partant d'une isotherme de température donnée, rencontrer un second point appartenant à la même isotherme.

5° Suivant une isotherme la quantité de chaleur fournie au corps et correspondant à un élément, a toujours le même signe. Si en effet cette quantité de chaleur pouvait changer de signe, il y aurait forcément un élément pour lequel sa valeur serait $Q = 0$.

En ce point l'isotherme et l'adiabatique seraient tangentes, ce qui est contraire à la seconde propriété découlant du principe de Clausius.

Remarque. — De ces différents principes et propriétés on déduit que le cycle de Carnot doit être un quadrilatère curviligne.

PROBLÈME

a) Dans une machine thermique parfaite (de rendement maximum), la source chaude est à la température θ centigrades, la source froide à 27° centigrades. La machine emprunte par seconde 63.000 calories à la source chaude. On demande de calculer, en fonction de θ :

1° La quantité de chaleur cédée, par seconde, à la source froide ;

2° La quantité de chaleur convertie en travail mécanique ;

3° La puissance P_0 de la machine (équivalent mécanique de la calorie : 4 joules, 187).

Applications numériques :

1° $\theta = 77^\circ$ centigrades ; 2° $\theta = 177^\circ$ centigrades.

b) Entre les deux mêmes sources, dans le cas où $\theta = 177^\circ$, fonctionne une machine thermique dont la puissance est $0,797 P_0$. Cette machine puise de l'eau dans un grand bassin et la projette avec une vitesse de 10 mètres par seconde. L'orifice de sortie d'où jaillit l'eau est au niveau du bassin. On demande quelle est la masse d'eau projetée par seconde par la machine, en négligeant les frottements. Si l'eau est lancée verticalement, quelle hauteur maxima le jet peut-il atteindre ?

Nota. — On rappelle que, dans une machine thermique parfaite, le rapport de la quantité de chaleur prise à la source chaude (température centigrade t_1) à la quantité de chaleur cédée à la source froide (température centigrade t_2) est égal à $\frac{273 + t_1}{273 + t_2}$.



SOLUTIONS

a) 1° Le rapport de la quantité de chaleur prise à la source chaude à t_1° à la quantité de chaleur ϕ cédée à la source froide à t_2° étant $\frac{273 + t_1}{273 + t_2}$, on a

$$\frac{63.000}{x} = \frac{273 + \theta}{273 + 27}, \text{ d'où } x = \frac{63.000 \times 300}{273 + \theta}$$

$$\text{Si } \theta = 77^\circ, \quad x = \frac{189 \times 10^3}{273 + 77} = 54.000 \text{ calories ;}$$

$$\text{Si } \theta = 177^\circ, \quad x = \frac{189 \times 10^3}{273 + 177} = 42.000 \text{ calories.}$$

2° La quantité de chaleur convertie en travail mécanique est donc
à 77° $63.000 - 54.000 = 9.000$ calories,
à 177° $63.000 - 42.000 = 21.000$ calories

3° La puissance P_0 de la machine est :

Dans le premier cas, $4,187 \times 9.000 = 37.683$ watts.

Dans le second cas, $4,187 \times 21.000 = 87.927$ watts.

b) La puissance de la machine qui projette l'eau est :

$$(87.927 \times 0,797) \text{ watts,}$$

ou $(87.927 \times 0,797) \times 10^7$ ergs-seconde.

Elle fait acquérir à la masse d'eau m projetée par seconde à la vitesse v une force vive, $\frac{1}{2}mv^2$, telle que

$$\frac{1}{2}m \times 10^6 = 87.927 \times 0,797 \times 10^7 ;$$

on en déduit en kilogrammes

$$m = \frac{2 \times 87.927 \times 0,797 \times 10}{1000} = 1401 \text{ kg. 556.}$$

La hauteur e à laquelle s'élève un projectile lancé verticalement avec une vitesse v est donnée par la relation $v = \sqrt{2eg}$. Elle est donc $e = \frac{v^2}{2g}$. En prenant pour g la valeur 9,8, on voit que la hauteur maximum que peut atteindre le jet d'eau est

$$e = \frac{10 \times 10}{2 \times 9,8} = 5 \text{ m. 10.}$$



DEUXIÈME LEÇON

Métaux

NOTIONS SOMMAIRES SUR LES PRINCIPAUX MÉTAUX EMPLOYÉS DANS LA CONSTRUCTION DES CHAUDIÈRES & DES MACHINES

FONTE. — La fonte est le produit obtenu directement au haut-fourneau par le traitement du minerai de fer.

Le minerai (auquel on a ajouté un fondant destiné à transformer sa gangue en un silicate fusible, subit les réactions suivantes : 1° dessiccation ; 2° réduction par l'oxyde de carbone emprunté à du charbon ou du coke incandescent, ce qui donne lieu à formation de fonte et de laitier ; 3° fusion de la fonte et du laitier. Le laitier, plus léger que la fonte, surnage, ce qui permet de l'extraire par une sorte d'écumage.

On recueille la fonte dans des canaux en sable creusés dans le sol, où elle se solidifie sous forme de « gueuses » ; celles-ci sont fondues une seconde fois pour donner les pièces moulées.

La fonte renferme de 2,5 % à 4,5 % de carbone ; sa charge de rupture varie de 12 à 18 kilog. par millimètre carré.

Au point de vue industriel, on distingue : la *fonte d'affinage*, la *fonte de moulage*.

Les fontes sont des composés de fer et de carbone. Elles se divisent en deux catégories :

1° *Fonte grise.* — Cette fonte se produit lorsque la température du haut-fourneau a été très élevée. Elle fond vers 1.200 degrés, est très fluide et très propre au moulage ; elle se laisse bien travailler. Sa densité est de 7 environ.

2° *Fonte blanche* (appelée aussi fonte froide). — Contrairement à la précédente, celle-ci se produit lorsque la température n'a pas été très élevée dans le haut-fourneau.

Elle est dure, cassante et difficile à travailler. Elle fond vers 1.100 degrés mais en restant pâteuse, ce qui la rend impropre au moulage.

FONTE TRUITÉE. — On appelle ainsi un mélange de fonte grise et de fonte blanche. Cette fonte est excellente pour le moulage, mais difficile à travailler.

FONTES MANGANÉSIFÈRES. — Ces fontes contiennent de 1 à 5 % de carbone et des proportions variables de manganèse. Ce genre de fonte est très recherché pour la fabrication de l'acier.

FONTE MALLÉABLE. — C'est une fonte qui ressemble beaucoup au fer. Elle se lime et se polit bien, se forge à basse température, mais ne peut se souder.

Propriétés de la fonte. — D'une façon générale, la fonte ne peut se souder ni à elle-même, ni au fer. Elle est très difficile à tarauder, les filets s'arrachant ou se formant mal. Elle est peu résistante, sauf aux efforts de compression, ce qui la fait rechercher pour les bâtis de machines.



En raison de la curieuse propriété dont elle jouit d'augmenter de volume en se solidifiant, on l'emploie surtout pour les pièces de forme complexe, telles que cylindres, plateaux, tiroirs, etc. Par sa solidification, en effet, elle épouse exactement toutes les formes du moule.

A noter cependant qu'en se refroidissant après solidification elle diminue de volume. C'est ce qu'on appelle le retrait de la fonte. Elle est d'environ 1 centimètre par mètre, ce qui fait que les modèles ont généralement des mètres faisant 101 centimètres.

Affinage de la fonte. Fer proprement dit. — L'affinage de la fonte a pour but d'enlever à la fonte le carbone qu'elle contient, de façon à obtenir du fer. L'opération consiste en principe à oxyder ce carbone, soit par un courant d'air, soit par des battitures.

L'opération qui consiste à brasser la fonte liquide avec des battitures se nomme « puddlage » ou méthode anglaise. C'est la méthode la plus employée.

La fonte se brise en éclats quand on lui fait subir l'épreuve de la trempe.

FER. — Poids atomique : 56. Le fer est le métal à peu près pur, obtenu en enlevant à la fonte le carbone, le silicium et le manganèse.

Le fer s'obtient par oxydation et forgeage de lingots de fonte qui ont préalablement subi un traitement les débarrassant de ces corps étrangers ; il ne prend pas la trempe, mais il se soude bien.

Le fer pur ne garde pas l'aimantation.

La charge de rupture du fer varie de 25 kilog. à 35 kilog.

Il est attiré par les aimants, s'aimante à leur contact, mais perd cette propriété dès que le contact cesse.

Propriétés chimiques. — Inaltérable à l'air sec, le fer est au contraire rapidement attaqué au contact de l'air humide. Il se recouvre alors d'une couche d'oxyde appelé rouille.

Tôles. — Le fer réduit en feuilles au laminoir, donne les tôles de fer variant, comme épaisseur, de 1/2 à 6 millimètres.

Qualités du fer. — On reconnaît pratiquement la qualité d'un fer à la cassure ou par le travail à la forge. Si la cassure est fine et régulière, le fer est bon. Si elle est granuleuse, il est mauvais.

En le forgeant, le fer de mauvaise qualité devient pailleux ; on peut en outre reconnaître la qualité d'un fer de la manière suivante : on en prend un barreau de faibles dimensions que l'on entaille à la tranche suivant une section transversale. On place ce barreau en porte à faux contre un tas ou une enclume et on frappe dessus un coup sec avec un marteau à devant. Le fer de bonne qualité se plie, mais le mauvais fer se rompt immédiatement. La résistance du fer à la rupture est d'environ 35 kilog. par millimètre carré.

ACIER. — L'acier est du fer carburé à 10 ou 15 pour 1000.

On l'obtient soit en carburant le fer, soit en décarburant partiellement la fonte, soit en décarburant totalement la fonte par l'insufflation d'un violent courant d'air, pour recarburer partiellement le fer obtenu par des fontes manganésifères dont on connaît la composition. Ce dernier procédé porte le nom de procédé Bessemer, C'est actuellement le plus employé,



ACIER MOULÉ. — Cet acier remplace la fonte pour certaines pièces de machines. Son retrait est de deux centimètres par mètre.

ACIER FONDU. — L'acier fondu est très homogène. Il est susceptible d'une très bonne trempe et sert surtout à la fabrication des outils.

L'acier fondu qui ne prend pas la trempe est dit acier doux ou extra-doux.

ACIER CÉMENTÉ. — On le prépare en faisant agir du carbone sur le fer, à température élevée et à l'abri de l'air. L'acier obtenu est peu homogène, la surface des barres étant plus aciérée que le centre. De nombreuses pièces de machines, en particulier les gros écrous, sont cémentés à la surface de façon à ne pas se déformer sous les chocs pendant les démontages.

Tôles d'acier. — Ces tôles s'obtiennent comme les tôles de fer. Elles peuvent être planes, ou ondulées, ou nervées.

Propriétés générales des aciers. — Ils sont d'un gris clair ; leur grain est régulier. Moins ductiles que le fer, ils sont en revanche beaucoup plus malléables. Ils fondent vers 1.400° , peuvent se tremper et s'aimer à demeure.

La résistance de l'acier à la rupture par traction varie de 40 kilog. à plus de 100 kilog.

Conditions de recette des aciers. — La Compagnie Générale Transatlantique exige, pour les aciers doux qu'on lui fournit, une résistance de 42 à 47 kilog. et un allongement minimum de 22 p. 100 mesuré sur 200 millimètres, barrettes tournées au diamètre de 20 millimètres. Ployage à bloc après trempe sur barreaux de 15×30 .

CUIVRE (Cu). — Poids atomique : 65.

Se trouve le plus fréquemment dans la nature à l'état de sulfures qu'on nomme minerais de cuivre ou pyrites de cuivre.

Les pyrites sont grillées dans des fours spéciaux de façon à éliminer le soufre qu'elles renferment, et on obtient des oxydes que l'on fait chauffer additionnés d'un fondant. On obtient alors un minerai nouveau que l'on appelle « matte » et auquel on doit faire subir encore plusieurs opérations de grillage avant d'obtenir le « cuivre brut ». Ce dernier est enfin affiné soit dans un convertisseur genre Bessemer soit par un procédé électrolytique.

Propriétés physiques. — Sa densité est 8,9 ; il est de couleur rouge-rose, excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité, ductile et malléable. Il fond vers 1.100° ; s'écrouit au laminage et se ramollit à la trempe.

Propriétés chimiques. — Inaltérable à l'air sec, à l'air humide il se recouvre de vert-de-gris. Il jouit de la propriété d'être peu attaqué par l'acide chlorhydrique, même à chaud.

Usages. — Le cuivre a servi longtemps à la confection des tubes de chaudières, mais il est aujourd'hui remplacé par l'acier étiré et sans soudure, sauf sur les locomotives. Actuellement, il sert surtout



à la confection des tuyautages, au doublage des navires et rentre dans la composition d'un grand nombre d'alliages.

ZINC (Zn). — Poids atomique : 65.

Il se rencontre dans la nature sous forme de minerais appelés *blende* ou *calamine*, desquels on l'extrait par les deux opérations successives du grillage et de réduction de l'oxyde par le charbon.

Propriétés physiques. — D'une couleur blanc-bleuâtre ; cassant à la température ordinaire. Sa densité est de 7 environ. Il fond vers 410° et se lime très difficilement étant trop mou.

Propriétés chimiques. Usages. — Il ne s'oxyde pas dans l'air sec. Dans l'air humide, il se recouvre d'une couche d'oxyde qui lui sert ensuite d'enduit protecteur.

Il est très attaquable par le courant électrique, ce qui le fait rechercher pour la confection des piles, et pour empêcher, dans les chaudières et les condenseurs, l'action des acides sur le métal de ces appareils.

Il s'emploie également dans plusieurs alliages et sert à la confection d'un mastic appelé blanc de zinc utilisé en peinture et pour la confection de divers joints.

PLOMB (Pb). — Poids atomique : 207.

Le plomb se trouve dans la nature à l'état de minerai ou galène. Dans ce cas encore, le minerai est grillé, puis du corps obtenu on extrait le plomb, soit par réaction, soit par réduction, soit par précipitation ; le plomb obtenu dans chaque cas doit d'ailleurs être affiné.

Propriétés physiques. — Il est d'une couleur gris-bleuâtre. Sa cassure, lorsqu'elle est fraîche, est très brillante. Il est mou, ductile et malléable. Sa densité est de 11,35. Il fond vers 330°.

Propriétés chimiques. — Le plomb s'oxyde très rapidement à l'air. L'eau pure et privée d'air n'exerce aucune action sur le plomb, mais si elle est aérée, le métal se recouvre d'un sel de plomb très toxique. Il n'est presque pas attaqué par les acides.

Usages. — Il sert à confectionner des joints, des fils, pour reprendre le serrage des articulations, des tuyaux, des fusibles pour circuits électriques, rentre dans la composition de certains mastics, des accumulateurs, de certaines soudures.

ÉTAÏN (Sn). — Poids atomique : 118.

Comme les métaux précédents, l'étain se trouve dans la nature sous forme de minerai, qu'on nomme « cassitérite ».

Le minerai, après avoir été trié, broyé et lavé, est encore soumis à un grillage, puis réduit par le charbon.

Propriétés physiques. — De couleur blanche, assez brillant, l'étain est un métal mou, peu ductile, mais malléable. Sa densité est de 7,3 ; il fond vers 340°. Il fond donc à une température très basse ; en opérant avec précaution, on peut même le fondre si on le chauffe sur une feuille de papier. Lorsqu'on plie une barre d'étain, on entend un bruit particulier dû à la rupture des cristaux, et qu'on appelle cri de l'étain.



Propriétés chimiques. — L'étain s'oxyde *très peu* à la température ordinaire ; mais, par contre, à chaud il s'oxyde *très rapidement*.

Usages. — Il est employé dans l'opération qu'on appelle « étamage » et qui a pour but de recouvrir les métaux oxydables d'une faible couche d'étain pour les préserver de l'oxydation. Il s'emploie également dans un grand nombre d'alliage et de soudures.

FER-BLANC. — C'est de la tôle de faible épaisseur que l'on a étamée. On l'obtient en plongeant la tôle bien découpée dans un bain d'étain fondu recouvert de graisse.

NICKEL (Ni). — Poids atomique : 51.

Le nickel se rencontre à l'état de minerai. C'est un métal blanc, très dur, de densité 8,5.

Il est inaltérable à l'air à la température ordinaire.

Il est surtout employé pour recouvrir et préserver de l'oxydation, tout en leur donnant cette belle couleur argentée que l'on connaît, une foule d'appareils de précision fabriqués avec des métaux oxydables.

ALUMINIUM (Al). — Poids atomique : 27.

Ce métal se trouve dans la nature à l'état de combinaison avec un oxyde ou alumine et avec certaines qualités d'argiles. On extrait aujourd'hui l'aluminium de ces corps par des procédés électriques.

Propriétés physiques. — Métal blanc, de densité 3,5. Il fond vers 600°. A résistance égale il pèse trois fois moins que l'acier.

Propriétés chimiques. — Il ne s'oxyde pas à l'air, mais est désagrégé par l'eau de mer. Son prix de revient est d'ailleurs très élevé. Aussi n'est-il guère employé dans la marine que dans certains alliages de bronze.

ALLIAGES DIVERS

BRONZES. — Les bronzes sont des alliages de cuivre et d'étain dans des proportions variables, suivant leur usage. Le bronze ordinaire contient environ 80 parties de cuivre pour 20 d'étain. Sa densité est 8,5. Il est susceptible d'un beau poli et possède une grande douceur de frottement. Aussi est-il employé pour les coussinets d'un grand nombre d'articulations.

Le bronze ordinaire acquiert cependant des propriétés nouvelles lorsqu'on l'additionne d'environ 0,7 p. 100 de phosphore. Il est alors moins attaqué par les acides et les agents atmosphériques. Il prend alors le nom de bronze phosphoreux. Il est surtout employé dans la confection des hélices.

Un autre bronze spécial est le bronze d'aluminium employé dans la confection des appareils de précision. Il renferme 90 p. 100 de cuivre pour 10 d'aluminium.

LAITON (appelé aussi cuivre jaune). — C'est un alliage de cuivre et de zinc en proportions variables. D'une couleur jaune, susceptible d'un beau poli, il a servi autrefois à la confection des tubes



de chaudières à cause de sa haute conductibilité. Il sert encore aujourd'hui à la confection des tubes de condenseur, de la robinetterie, des masques et enveloppes pour cylindres et tuyautage. Il se travaille à froid et sans être recuit. A chaud, il se ramollit et devient cassant.

Quand on doit le travailler au tour, on lui ajoute un peu de plomb et d'étain, pour qu'il ne graisse pas les outils.

LAITON FORGEABLE. — C'est un alliage de cuivre et de zinc spécialement réservé pour la fabrication des axes, des charnières, des garde-corps ; il a une résistance à la rupture de 40 kilog. sous un allongement de 20 à 25 p. 100.

MÉTAL ANTIFRICTION. — C'est un alliage renfermant 89 parties d'étain, 7 d'antimoine et 4 de cuivre. (L'antimoine est un métalloïde, à l'aspect métallique, fondant vers 425°). L'alliage ainsi obtenu a un frottement très doux.

Cette propriété l'a fait employer pour garnir les coussinets. Il a aussi sur le bronze l'avantage d'être assez mou pour se laisser pénétrer par les corps durs ; en outre, lors d'un échauffement il fond, permettant à la machine de continuer à tourner, tandis que les coussinets en bronze se referment et peuvent bloquer la machine. On s'en sert également pour garnir les patins de glissières, les bagues de pistons, etc.

MAILLECHORT. — Alliage formé de 50 parties de cuivre, 30 de zinc et 20 de nickel. Il est blanc, très dur, peu altérable. Sert à la fabrication de nombreux appareils de précision, à la confection des résistances électriques, etc.

SOUDES. — Les principales soudures employées pour réunir deux métaux sont (en mettant à part les soudures homogènes et autogènes) :

1^o *Soudure des ferblantiers.* — Elle se compose de deux parties d'étain et une partie de plomb. Elle sert à souder le fer blanc, le zinc et le cuivre.

Sa résistance à la rupture est d'environ 3 kilogrammes par millimètre carré. Aussi ne doit-on l'employer que pour de très faibles efforts. Son point de fusion très bas l'a fait d'ailleurs rejeter pour tout ce qui concerne la réparation des conduits de vapeur.

2^o *Soudure des plombiers.* — Elle se compose de deux parties de plomb et une de zinc. Employée dans la soudure des tuyaux de plomb, sa résistance à la rupture n'est que de 2 kilogrammes par millimètre carré.

BRASURES. — Les brasures sont des alliages à base de cuivre. Elles servent, comme les soudures, à réunir les métaux entre eux.

En particulier, le fer se brase avec du cuivre pur.

1^o *Brasure forte.* — Sert à braser le cuivre rouge. Renferme 50 p. 100 de cuivre et 50 p. 100 de zinc. Sa résistance à la rupture atteint 12 kilogrammes.



2° *Brasure tendre.* — Sert à braser le laiton. Contient 25 p. 100 de cuivre et 75 p. 100 de zinc. Résistance 8 kilogrammes par millimètre carré.

Les charges de sécurité sont environ 1/5^e des chiffres précédents.

ALLIAGE DE L'ALUMINIUM. — On obtient un excellent alliage en fondant ensemble, dans des proportions convenables, les six métaux suivants : aluminium, antimoine, cuivre, étain, plomb et zinc. Non seulement un tel alliage diminue le frottement, mais son grain est tel qu'il est beaucoup plus résistant que les bronzes ordinairement employés.

Pour obtenir cet alliage, on fait d'abord fondre le cuivre et l'on y ajoute successivement les autres métaux. A chaque addition d'un nouveau métal, on brasse énergiquement le mélange au moyen d'une barre de fer et on laisse peu à peu tomber le feu. Vers la fin de l'opération, on brasse non plus avec une barre de fer, mais avec une tige en saule ou en sureau qui, par les gaz qu'elle dégage, réduit les oxydes qui se sont formés.

Les proportions donnant le meilleur alliage sont les suivantes : cuivre 1,20 p. 100, étain 12 p. 100, plomb, 0,80 p. 100, antimoine 14 p. 100, aluminium 35 p. 100, zinc 37 p. 100. On peut modifier ces quantités selon l'emploi auquel l'alliage est destiné. Les limites extrêmes du mélange sont : cuivre 0,40 à 1,25 p. 100, étain 10 à 15 p. 100, plomb 0,60 à 0,85 p. 100, antimoine 6 à 20 p. 100, aluminium 15 à 35 p. 100, zinc 30 à 55 p. 100.

TROISIÈME LEÇON

Généralités sur les Chaudières

Les chaudières actuelles appartiennent aux deux grands systèmes existants :

- 1° Système dans lequel la flamme est intérieure aux tubes ou *système tubulaire* ;
- 2° Système dans lequel la flamme est extérieure aux tubes ou *système aquatubulaire*.

Dans le premier système, nous étudierons les chaudières à flamme en retour et les chaudières à flamme directe, ainsi que leurs dérivées.

Dans le second, les chaudières Niclausse, Belleville, Babcock et Wilcox, Lagrafel et d'Allest, Yarrow, Thornycroft, Du Temple, Guyot, Normand et quelques autres types.

Quelle que soit la chaudière à laquelle on puisse avoir affaire, toutes ont des détails communs, que nous allons examiner avant d'entreprendre l'étude spéciale à chaque type. Chacune des chaudières précédentes comprend essentiellement une enveloppe, un foyer, un faisceau tubulaire, une cheminée, une chambre à eau, une chambre à vapeur, des appareils accessoires.

ENVELOPPE. — Toutes les enveloppes des chaudières sont en acier extra-doux, provenant des fours Siemens-Martin. Cet acier donne des tôles de qualité supérieure et qui ont l'immense avantage de ne pas prendre la trempe.

FOUR SIEMENS-MARTIN. — Le four Siemens-Martin a pour but de convertir la fonte en



acier dur ou doux. Ce dernier cas est celui qui concerne les tôles de chaudières. Le four est chauffé au gaz pauvre (l'oxyde de carbone produit par un gazogène), avec mélange d'air.

Il se compose (fig. 9) de deux chambres à gaz identiques A et A' et deux chambres à air également identiques B et B', toutes ces chambres étant intérieurement revêtues de briques réfractaires.

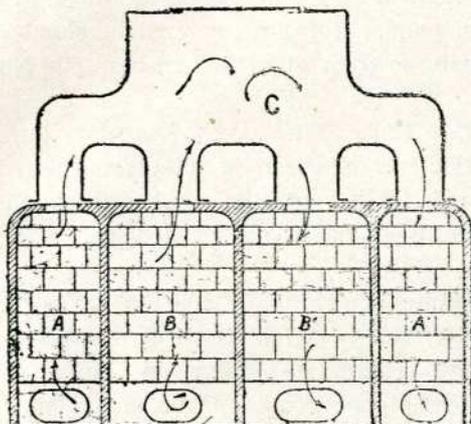


Fig. 9.

Ces chambres peuvent être mises deux à deux (air et gaz), alternativement en communication avec les arrivées et avec les évacuations de la cheminée.

Ainsi par exemple, dans une première opération, on fera arriver le gaz en A et l'air en B. Le mélange enflammé chauffera le four proprement dit C puis les chambres A' et B' et de là, les gaz de la combustion iront à la cheminée.

Imaginons alors un système qui puisse mettre maintenant les chambres A' et B' en communication avec les arrivées, et A et B en communication avec la cheminée.

On pourra alors chauffer de la même manière que précédemment, A et B.

Mais, tandis que A' et B' sont chaudes (température d'environ 1 000°), on introduit dans le four des gueuses de fonte chauffées au rouge.

La chaleur du gaz en porte rapidement la température à 1.500°, point de fusion de la fonte.

On introduit alors des morceaux de fer très oxydés dans la masse en fusion, morceaux de fer que l'on a préalablement chauffés au rouge, pour ne pas trop diminuer la température du bain.

Puis on brasse le mélange. L'oxyde de fer décarbure la fonte. On s'arrête quand on a un acier contenant deux pour mille environ de carbone.

On se rend d'ailleurs compte du degré de l'affinage en prélevant de temps en temps quelques échantillons qui sont soumis à des essais. Le plus souvent même on pousse l'opération jusqu'à complète oxydation de toutes les impuretés, et la masse liquide est ensuite raffinée par l'addition de ferromanganèse qui réduit l'oxyde de fer et recarbure le métal. On coule ensuite l'acier dans des moules spéciaux ou lingotières dans lesquels on le laisse refroidir jusque vers 300°. Puis on le démoule et on le conserve chaud jusqu'à l'opération du laminage.

Dans cette opération pour laquelle plusieurs trains de laminoirs sont nécessaires, on est obligé de chauffer constamment l'acier.

INVERSION DU COURANT. — Divers systèmes d'inverseurs du courant des gaz existent. La figure 10 représente schématiquement un moyen d'arriver à ce résultat :

a est l'arrivée du gaz ; b la communication avec la cheminée. Dans deux cylindres c et c' se meuvent solidairement deux pistons p et p' qu'on peut à volonté placer dans la position 1 ou dans la position 2 (indiquée par un pointillé).

Dans la position 1 on voit très clairement que le courant se fait suivant aACA' et b.



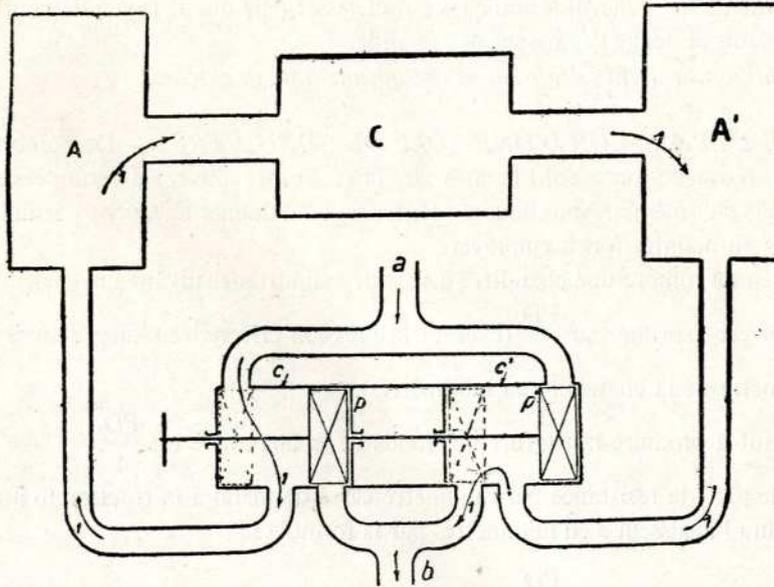


Fig. 10.

Dans la position 2 au contraire le courant suit le chemin $aA'CAb$, c'est-à-dire qu'en passant de la position 1 à la position 2, on a bien inversé le courant.

Un même dispositif peut exister simultanément pour l'air.

TOLES. — Les tôles employées sont de dimensions et d'épaisseur variables, suivant l'usage auquel elles sont destinées.

1^o *Tôles fines.* — S'emploient surtout dans les parties de formes sinueuses ou lorsqu'on a besoin d'une forte résistance ou d'une grande ductilité.

2^o *Tôles ordinaires.* — S'emploient dans les parties planes (par exemple dans les cloisonnements) n'ayant pas de pression à supporter.

3^o *Tôles supérieures.* — S'emploient dans toutes les parties soumises à la pression de la vapeur.

Ces dernières tôles, en acier doux, doivent pouvoir supporter une résistance minima de 35 kilogrammes par millimètre carré, cette résistance ne devant pas, d'ailleurs, dépasser 48 kilogrammes.

L'allongement sur une barrette de 200 millimètres de long de 30 p. 100 (35 kilogrammes) à 20 p. 100 (48 kilogrammes).

La qualité de l'acier est déterminée par un essai de traction sur la barrette précédente et par des essais de trempe.

On prend pour cela une bande de tôle de 40 à 50 millimètres de largeur dont on aura bien dressé les diverses arêtes.

Cette bande est chauffée au rouge sombre et plongée dans de l'eau à 28° centigrades ; puis elle



sera repliée en forme de fer à cheval à branches parallèles et telle que le rayon de courbure intérieure soit inférieur à une fois et demie l'épaisseur de la bande.

Après ce travail, on ne devra relever sur la tôle aucune trace de gerçure.

CALCUL DE L'ÉPAISSEUR D'UNE TOLE DE CHAUDIÈRE. — De nombreuses formules sont actuellement en usage ; toutes sont bonnes car elles sont fort souvent déterminées empiriquement par les constructeurs eux-mêmes. Nous nous contenterons d'en donner une, prise parmi les plus simples et que nous avons eu maintes fois à employer.

L'effort qui tend à rompre une chaudière à vapeur cylindrique suivant une génératrice par millimètre de longueur est exprimé par $\frac{PD}{2}$ (P étant la pression effective en kilogrammes par millimètre carré et D le diamètre de la chaudière en millimètres).

L'effort tendant à produire la rupture des fonds de la chaudière est $\frac{PD}{4}$.

Si l'on désigne par f la résistance par millimètre carré de métal à la traction (6 à 8 kilogrammes en moyenne) on aura l'épaisseur e en millimètres par la formule :

$$e = \frac{PD}{2f} \text{ pour les tôles du contour.}$$

et
$$e = \frac{PD}{4f} \text{ pour épaisseur des tôles de fond.}$$

ASSEMBLAGE DES TOLES. — Les tôles sont assemblées au moyen de rivets en acier extra-doux.

Les trous doivent être percés au foret et non au poinçon, puis alésés en cône et de façon à juxtaposer les petites bases.

Les rivets sont en fer ou en acier extra-doux ; les types les plus employés ont la forme des

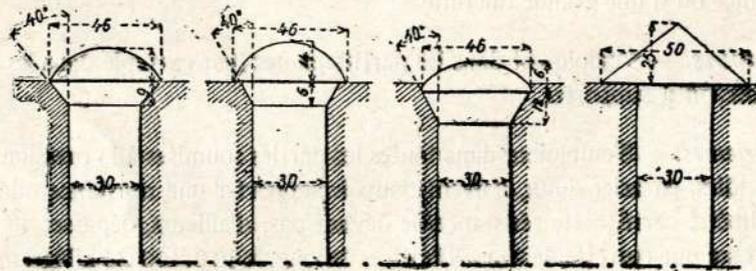


Fig. 11.

Fig. 12.

Fig. 13.

Fig. 14.

figures 11, 12, 13 et 14: (fig. 11) tête à demi-fraisée ; (fig. 12) tête normale ; (fig. 13) tête entièrement fraisée ; (fig. 14) tête conique.

L'étude de la résistance des matériaux apprend à calculer les différentes dimensions des rivets. En pratique, il nous suffira de savoir que le diamètre du rivet doit être pris égal à l'épaisseur des

deux tôles à réunir pour des tôles moyennes ; il est plus faible que l'épaisseur pour de fortes tôles et plus fort pour des tôles plus faibles (fig. 15).

Le Board of Trade donne les règles suivantes : (d , diamètre du rivet et e , épaisseur d'une tôle) pour les chaudières :

Rivure à 1 rang de rivets	$d = 1,8 e.$
— 2 —	$d = 1,7 e.$
— 3 —	$d = 1,3 e.$

Le rivetage des tôles peut se faire à froid ou à chaud ; ce dernier est préférable parce que plus rapide ; en outre le rivet en se refroidissant diminue de longueur, ce qui assure un rapprochement énergique des tôles. Au-dessus d'un diamètre, égal à 24^{mm}, le rivetage ne doit plus être fait à la main.

NOTA. — Les figures 11, 12, 13 et 14 donnent les dimensions générales d'un rivet de 30^{mm} de diamètre.

La hauteur de la fraisure doit être inférieure de 1 ou 2^{mm} à l'épaisseur de la tôle pour que le rivetage fasse accorder les tôles.

Pour effectuer la rivure, le corps du rivet doit déborder la tôle de une fois et demie son diamètre.

DIFFÉRENTES FAÇONS D'ASSEMBLER LES TOILES DE CHAUDIÈRES. — 1^o Assemblage à clin. — Les deux tôles à réunir viennent recouvrir l'une sur l'autre, et on les jonctionne au moyen d'une ou plusieurs rangées de rivets.

La figure 16 indique une rivure à un rang, la figure 17 une rivure à plusieurs rangs en quinconce

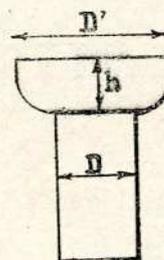


Fig. 15.
Rivet employé pour l'assemblage des tôles de carène.
 $h = 0,4 D$
 $D' = 1,5 D$

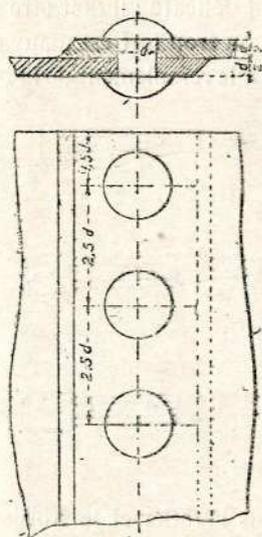


Fig. 16.

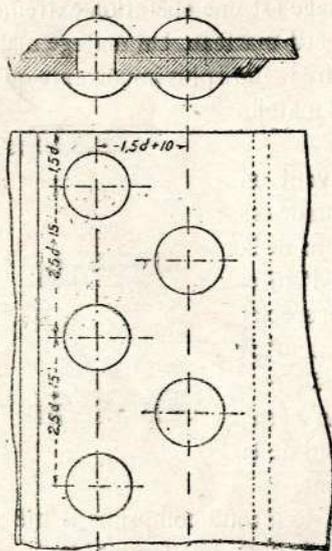


Fig. 17.

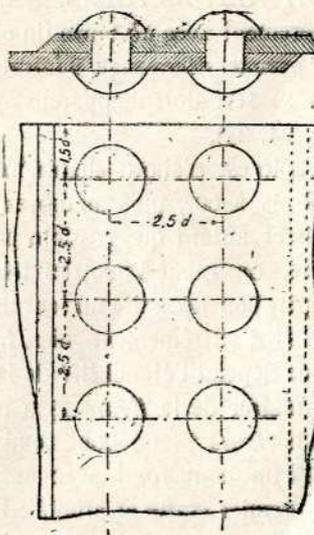


Fig. 18.

et la figure 18 une rivure à plusieurs rangées rectangulaires. Sur ces figures, sont également portées toutes les cotes concernant l'espacement des trous et leurs distances respectives au bord de la tôle.



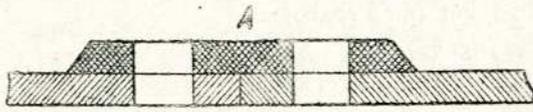


Fig. 19.

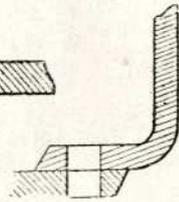


Fig. 20.

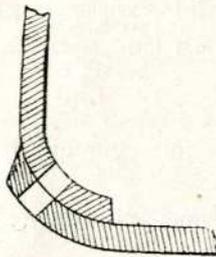


Fig. 21.

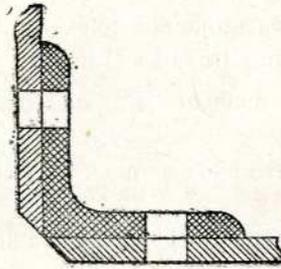


Fig. 22.

2° *Assemblage à franc-bord.* — Dans ce genre d'assemblage (fig. 19) les deux bords de la tôle sont rapprochés jusqu'à l'effleurement et le jonctionnement se fait grâce à une bande de tôle A ou couvre-joint rivée sur les deux parties de tôle à assembler.

Assemblage rectangulaire. — Dans certains cas, les tôles doivent être jonctionnées à 90°.

On peut alors opérer comme l'indique la figure 20. C'est-à-dire couder l'une des tôles à 90° et la river sur l'autre. Le procédé de la figure 21 est préférable parce qu'il permet de ne couder que partiellement chaque tôle.

Le métal de cette façon a moins de tendance à s'aigrir ou à se gercer pendant le travail de coudage. Enfin dans la figure 22, aucune des tôles n'est coudee. La jonction est tout simplement faite au moyen d'une cornière à 90°.

MATAGE DES TOLES. — Le matage est une opération extrêmement délicate ; il doit être fait très légèrement avec un burin fin et un petit marteau. Un matage mal fait ou trop fort est mauvais ; après le premier décrassage, il fait reparaître la fuite plus importante qu'avant le refoulement de la tôle.

On se sert alors d'appareils appelés matoirs (fig. 23, 24, 25).

La tôle est d'abord chanfreinée suivant un angle de 45 à 60°, puis au moyen de l'un de ces appareils et autant que possible en dedans de la chaudière, on rabat l'une des tôles sur l'autre. Cette opération nécessite un tour de main spécial et doit être extrêmement bien faite, car c'est d'elle que dépend l'étanchéité de la chaudière.

Le matoir de la figure 23 a un bout carré, celui de la figure 24 un bout rond et celui de la figure 25 un bout rond avec épaulement.

Le premier érafle et affaiblit la tôle, le second comprime le métal sans l'érafler et le troisième également, mais donne de bien meilleurs résultats que le précédent.

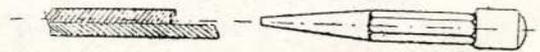


Fig. 23.

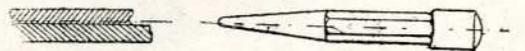


Fig. 24.

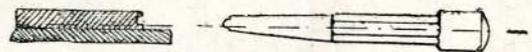


Fig. 25.

FOYER. — Le foyer est la partie de la chaudière dans laquelle se fait la combustion. Il est terminé par une partie qu'on appelle chambre à feu où se rassemblent les gaz avant leur passage à travers les

faisceaux tubulaires. Le foyer proprement dit comprend deux parties : une partie supérieure où se place le combustible et une partie où tombent les scories et résidus divers de la combustion.

Ces deux parties sont séparées par un plan de grille et un autel.

PLAN DE GRILLE. — Cette partie se compose d'un certain nombre de barreaux en fer forgé représentés en élévation, profil, plan et perspective dans les *figures 26, 27, 28.*

Il y a très souvent plusieurs rangées de barreaux. La première rangée repose à l'avant de la chau-

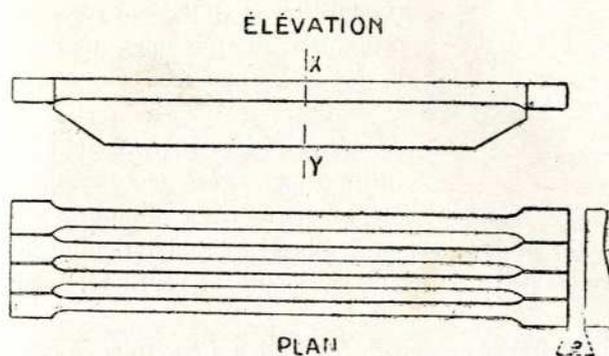


Fig. 26.

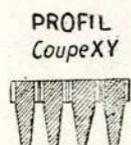


Fig. 27.

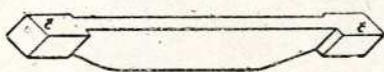


Fig. 28.

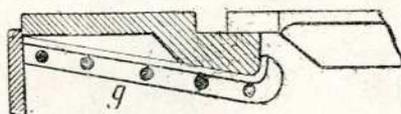


Fig. 29.

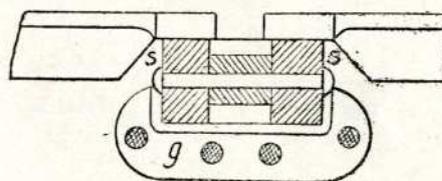


Fig. 30.

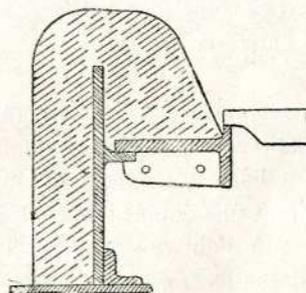


Fig. 31.

dière sur une partie en fonte appelée *sole* (fig. 29). L'arrière de cette rangée ou l'avant de la suivante repose sur des poutres en fer *s* appelées *sommiers* (fig. 30), et la partie arrière de la dernière rangée s'appuie sur une savate métallique appartenant à l'autel (fig. 31). Les barreaux sont percés de trous pour augmenter la surface refroidissante due à l'air frais.

La sole ou les sommiers sont tenus par des supports *g* ou galoches, rivés sur les parois de la chaudière et les sommiers sont réunis par des boulons avec interposition de blocs métalliques pour maintenir l'écartement.

Les intervalles qui existent entre les barreaux d'après leur construction même (fig. 26), permettent à l'air d'arriver au centre de la masse combustible, et aussi aux cendres de tomber dans le cendrier.

Le vide est égal aux $4/10^e$ de la surface totale de la grille ; le plan de grille est incliné à 10^o .



Les gros barreaux en fer (*fig. 26*) ont des têtes forgées qui en déterminent l'écartement. Les barreaux minces en fer sont rivés par groupes de deux ou plusieurs lames séparées par des cales. La fonte forme également des groupes de plusieurs barreaux (*fig. 32*).

Une partie mobile ou jette-feu (*fig. 33*), placée à l'avant de la grille, facilite le nettoyage sur certaines chaudières.

Les barreaux ne garnissent pas toujours complètement les angles ou les côtés de la grille ; les vides qu'ils laissent ont une influence fâcheuse, en permettant la chute du combustible et en laissant passer des courants d'air frais qui refroidissent la tôle de la chaudière.

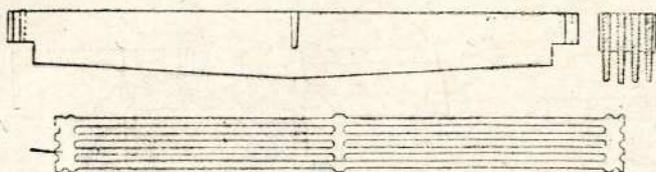


Fig. 32.

JEU DES BARREAUX. —

Entre deux rangées de barreaux, on doit laisser un jeu *a* variant de 1 à 2

centimètres suivant les dimensions des barreaux, afin de laisser toute liberté à la dilatation longitudinale, sous peine de voir se produire la déformation des barreaux, leur chute, et peut-être, la destruction totale du plan de grille.

De même entre chaque barreau d'une rangée, il doit exister un certain jeu. Ce dernier se détermine pratiquement de la façon suivante : on met en place sur le plan de grille autant de barreaux qu'il est possible d'en mettre, puis on en enlève un. Le jeu résultant est alors réparti entre tous les autres barreaux (*fig. 26*).

Remarque. — Il convient que la grille distribue l'air uniformément à travers toute la masse du combustible, dont la nature commande la grosseur et dicte l'écartement des barreaux.

Les barreaux minces accouplés présentant une double surface refroidissante à l'air qui traverse leurs interstices ; ils conservent toute leur rigidité parce qu'ils ne rougissent pas. Une épaisseur de 8 à 10 mm, avec un vide égal, paraît convenable pour les combustibles, souvent menus, employés en France.

Pour éviter que les mâchefers n'empâtent les barreaux, on construit des grilles dont les barreaux sont mobiles (grilles à secousses, grilles oscillantes) ; ces appareils ne sont guère employés en France. On peut en citer l'emploi sur les locomotives *Pacific*, de l'Orléans.

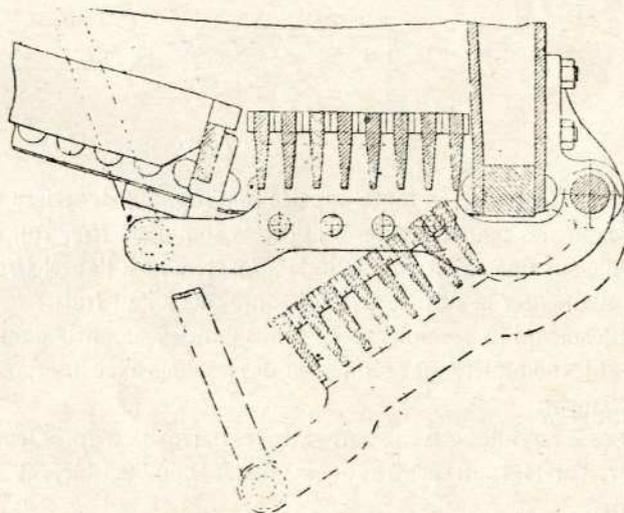


Fig. 33.

AUTEL (fig. 31). — L'autel forme en quelque sorte le fond du cendrier et du foyer. Il est formé de briques réfractaires tenues au moyen d'armatures en fonte ou en acier moulé. Son but est de retenir le charbon et de guider les gaz et les flammes. Il soustrait les emmanchements des tubes au rayonnement direct de la flamme.

Il est le plus souvent percé de trous coniques appelés trous Williams, destinés à livrer passage à une certaine quantité d'air venant du cendrier, air qui se mélangeant avec les gaz du fourneau provoque l'in-

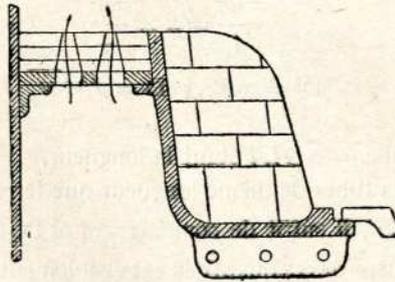


Fig. 34.

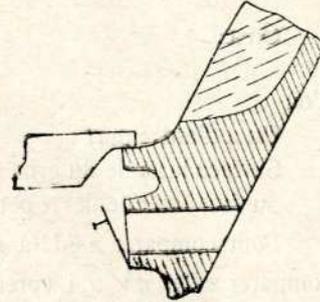


Fig. 35.

flammation de ces gaz dans le corps du faisceau tubulaire (fig. 34). Quelquefois (fig. 35) l'air peut-être renvoyé dans le fourneau au moyen d'une porte manœuvrable du cendrier.

PORTES DE FOURNEAU. — Formées de deux ou trois tôles entretoisées montées sur un cadre (fig. 36) et supportées par deux tourillons horizontaux. La tôle extérieure est percée de trous qui permettent une circulation d'air, et évitent le rougissement de la porte intérieure. Elles s'ouvrent du dehors en dedans et se ferment automatiquement.

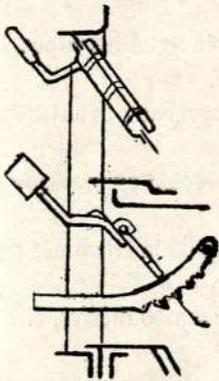


Fig. 36.

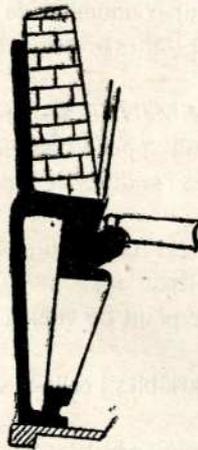


Fig. 37.

PORTES DE CENDRIER (fig. 37). — Sont constituées par une tôle de 5 à 6^{mm} montée sur un axe horizontal placé au-dessus de leur centre de gravité. En cas d'avarie, elles doivent se fermer automatiquement sous l'action de la poussée de la vapeur qui s'écoule de l'avarie.

FAISCEAU TUBULAIRE. — Les anciennes chaudières, qu'on nommait chaudières à bouilleurs, comprenaient un seul gros cylindre que traversaient les gaz de la combustion et à travers lequel leur chaleur se transmettait à l'eau de la chaudière.

On a aujourd'hui abandonné presque totalement ce système dit à bouilleur pour le remplacer par un très grand nombre de petits tubes dont l'ensemble porte le nom de faisceau tubulaire.

Pourquoi donc cette transformation qui naturellement augmente la difficulté du travail et les soins de conduite et d'entretien ?

C'est que, à égalité d'encombrement, la surface de chauffe, représentée par la surface latérale de plusieurs petits tubes, est supérieure à celle d'un seul.

En effet :

Soit D , le diamètre d'un gros tube et d , celui d'un petit. Soit x , le nombre de petits tubes qu'il faudrait pour que leur section totale égalât celle du tube de diamètre D .

On a :

$$\frac{\pi D^2}{4} = x \times \frac{\pi d^2}{4}$$

d'où $D^2 = xd^2$ et $D = d\sqrt{x}$ (1)

On a d'autre part :

Surface latérale du gros tube = $\pi D l$, l étant la longueur.

Surface latérale des x petits tubes de même longueur que le précédent = $x \pi d l$.

Pour comparer $x \pi d l$ à $\pi D l$, il suffit de comparer xd et D . Or, puisque (1) $D = d\sqrt{x}$ on peut comparer xd et $d\sqrt{x}$. La première de ces quantités est visiblement la plus grande, ce qui revient à dire que la surface de chauffe des x petits tubes est supérieure à celle du tube bouilleur de même section.

NATURE DU MÉTAL DES TUBES. — Les tubes ne se font aujourd'hui que de deux façons :

1° Pour la plus grande partie, ils sont en acier extra-doux étirés et sans soudure. Ils peuvent ainsi résister à toutes les pressions, ne prennent pas la trempe et sont d'un prix de revient modéré.

2° En laiton, pour des pressions non supérieures à 6 kilogrammes. Encore est-on souvent obligé de les rabouter en cuivre rouge du côté de la boîte à feu, le laiton se ramollissant et perdant une notable partie de sa résistance aux températures élevées.

L'avantage du laiton sur l'acier est qu'il est meilleur conducteur de la chaleur, mais son prix de revient élevé et l'impossibilité qu'il y a de l'employer pour toutes pressions le font abandonner peu à peu.

CARNEAUX, CONDUITS DE FUMÉE ET CHEMINÉE. — Après avoir léché les tubes, les flammes pénètrent dans une partie de la chaudière qu'on appelle boîte à fumée.

Les produits de la combustion traversent parfois des conduits de fumée ou carneaux avant d'être évacués par la cheminée.

La cheminée, dans la Marine et les Chemins de fer, est un tuyau en tôle à section cylindrique ou elliptique placé verticalement sur la calotte de la chaudière.

La cheminée détermine l'appel de l'air. A ce double point de vue, la hauteur de la cheminée présente une grande importance.

La section et la hauteur de la cheminée sont très variables ; celle-ci varie de 8 à 10 mètres, elle se compte à partir du plan de grille.

Pour les paquebots, elle augmente considérablement. Ainsi la *France*, un des paquebots de la Compagnie Transatlantique les plus récemment construits, a 4 cheminées ayant chacune 34 mètres de haut et 5 m,30 de diamètre.

Son cloisonnement intérieur divise la section droite de la cheminée en autant de conduits indépendants qu'il y a de groupes de chaudières. Les trous de rivetage des cloisons doivent être ovalisés pour permettre une libre dilatation des tôles sans amener leur gondolement.

TIRAGE. — C'est l'action plus ou moins énergique en vertu de laquelle l'air est attiré dans les cendriers, s'élève à travers la couche de combustible, franchit le faisceau tubulaire pour être évacué



dans l'atmosphère en passant dans la cheminée. Toutes choses égales d'ailleurs, le tirage est d'autant plus considérable que la cheminée S est plus haute, sa section plus grande, la température des gaz de la combustion plus élevée et celle de l'air extérieur plus basse. Soit (fig. 38) une cheminée de section s et de hauteur b . Appelons H la hauteur de la couche d'air atmosphérique de densité d au-dessus du plan de grille et soit d' la densité des gaz chauds.

Le tirage est visiblement la résultante de deux forces F et F' agissant en sens contraire suivant l'axe de la cheminée et sur la base de cette dernière (plan des grilles).

La force F représente le poids d'une colonne d'air ayant pour hauteur l'atmosphère et pour base la section de la cheminée.

$$F = SHd$$

La force F' est égale à la somme d'une colonne d'air s'exerçant à la partie supérieure de la cheminée, donc la hauteur $H - b$ augmentée du poids d'une colonne de gaz chaud représentée par le volume de la cheminée : soit Sbd' .

$$F' = S(H - b)d + Sbd'$$

On aura donc

$$\text{Tirage} = SHd - [S(H - b)d + Sbd']$$

$$T = SHd - [SHd - Sbd + Sbd']$$

$$T = SHd - SHd + Sbd - Sbd'$$

$$T = Sbd - Sbd' = Sb(d - d')$$

formule qui montre que le tirage est proportionnel à S et à b , ainsi qu'à $(d - d')$.

Or $d - d'$ est d'autant plus grand que d est plus grand et d' plus petit et d'autre part la densité d est d'autant plus grande que l'air est plus froid et la densité d' d'autant plus petite que l'air est plus chaud.

Cependant on est limité par tous ces facteurs. Ainsi une cheminée trop haute serait difficilement utilisable à cause de la prise qu'elle donnerait aux vents et d'ailleurs les refroidissements des gaz augmentant avec sa longueur, le tirage finirait par diminuer.

Il y a également lieu de tenir compte de la vitesse d'écoulement, proportionnelle à la racine carrée de b et inversement à celle de d' .

$$V = \sqrt{\frac{2gb}{d'}}$$

Cette vitesse, en effet, pouvant diminuer par une obstruction des grilles (couche de charbon trop épaisse), ferait augmenter la température il est vrai, mais diminuerait la vitesse dans les plus grandes proportions.

Remarque. — D'après certains auteurs, les formules ne sauraient donner avec précision les dimensions d'une cheminée, parce que les coefficients importants de frottement des gaz et de rayonnement y sont loin d'être exactement exprimés.

Ces dimensions paraissent dépendre de quatre causes :

1° De la quantité d'air qui traverse le foyer.

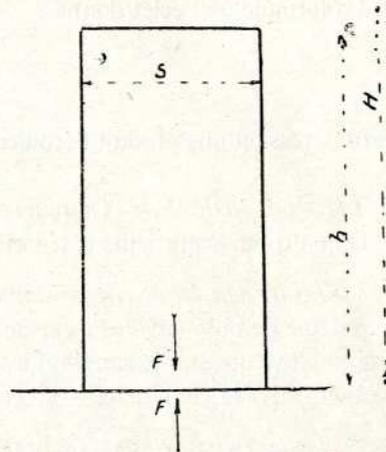


Fig. 38.



- 2° De la température à laquelle l'air pénètre à la base de la cheminée.
- 3° De la quantité de chaleur perdue par rayonnement.
- 4° De la hauteur de la cheminée.

Cette dernière dimension paraît résulter expérimentalement du rapport $\frac{\text{hauteur}}{\text{diamètre}} = 7$ pour lequel le tirage est maximum.

Un bon tirage ne saurait être obtenu qu'autant que les produits de la combustion conservent une température de 300 à 350°.

La formule de Pecllet donne

$$\text{Vitesse} = V = \sqrt{\frac{2gPD}{10}}$$

P est la pression que produit l'écoulement, D est la racine carrée de la section.

TIRAGE FORCÉ. — On nomme ainsi le tirage produit par des moyens mécaniques. On en connaît plusieurs catégories :

1° *Tirage par jet de vapeur dans la cheminée.* — Ce système est très efficace mais très coûteux. Un système de buse envoie la vapeur dans la cheminée, ce qui fait succion et active le tirage. Il n'est guère employé que sur les canots et locomotives. Ce tirage a permis de diminuer la hauteur des cheminées et d'augmenter la chaudière. — Chemins de fer du Nord (Pecllet).

2° *Tirage en vase clos.* — Ce tirage est surtout employé dans la Marine de l'Etat sur les torpilleurs. Mettons la chaudière dans un compartiment fermé d'où sort seule la cheminée H. Un ventilateur V refoule de l'air par un conduit D dans la chambre de chauffe où se tiennent les chauffeurs ; on obtient ainsi dans ce vase clos une pression plus élevée que la pression extérieure ; l'air refoulé s'échappe par C, à travers la grille et le foyer, et de là dans la cheminée.

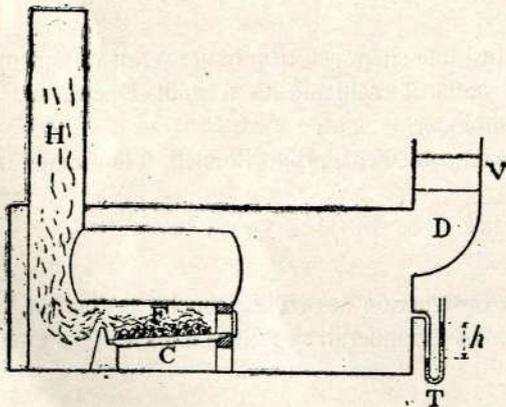


Fig. 39.

On peut arriver ainsi à envoyer la quantité d'air que l'on veut et brûler jusqu'à 500 kilog. par mètre carré de grille et par heure (torpilleurs).

Avec le tirage forcé, il n'est pas nécessaire d'avoir de hautes cheminées.

On mesure la pression d'air dans la chaufferie au moyen d'un manomètre à air libre ou *anémomètre*, contenant de l'eau, T ; une branche communique avec l'intérieur, l'autre avec l'air libre ; l'eau remonte dans la branche extérieure et on évalue la pression par la différence des niveaux *h* (fig. 39).

On ne dépasse pas une pression de 120^{mm} d'eau sur les torpilleurs, où la chauffe est extrêmement intense.

L'inconvénient de ce procédé est de produire une pression sur toutes les parois du compartiment,

en particulier sur les portes ; il en résulte la nécessité d'employer des sas, pour pénétrer dans la chaufferie.

3° *Tirage en cendrier clos, dit tirage Howden.* — Très en faveur dans la Marine du Commerce ; le dispositif général représenté schématiquement (fig. 40), donne l'ensemble d'une installation.

Dans la chambre C, un faisceau de tubes R en laiton de 1^{mm} d'épaisseur autour desquels circule l'air refoulé par un ventilateur V. Les tubes T, placés dans la boîte à fumée, sont traversés par les gaz de la combustion.

L'air chaud passe du réchauffeur dans le cendrier par un conduit adossé à la façade de la chaudière. Sa pression est donnée par le manomètre à air libre m.

Deux registres à papillon permettent d'intercepter la communication du conduit d'air chaud avec le cendrier et le fourneau.

Le rendement calorifique total est, dit-on, augmenté de 7 %. L'air arrive dans le cendrier avec une température de 80 à 100°.

Le rendement thermique peut être évalué, théoriquement, de la façon suivante. — Sans réchauffeur :

$$\rho = \frac{T_1 - T_0}{T_1}$$

$T_1 = 1770$, température absolue du foyer : $T_0 = 570$, température absolue des gaz à leur sortie à la base de la cheminée.

$$\rho = \frac{1770 - 570}{1770} = 0,67$$

Avec réchauffeur :

$$\rho = \frac{1770 - 470}{1770} = 0,73$$

Cet appareil n'est pas sans inconvénients :

La conduite de la chauffe est plus délicate.

Il faut spécialement veiller à la régularité de la couche de combustible.

Il augmente la température de la chambre de chauffe.

Les conduits en tôle s'usent assez rapidement.

4° *Tirage par aspiration dans la cheminée.* — Ce genre de tirage a donné lieu autrefois à quelques mécomptes, mais semble très digne d'intérêt. Il consiste à aspirer au moyen d'un ventilateur-aspirateur les gaz de la cheminée.

Le rendement est comparable à celui du foyer Howden. Les ventilateurs sont plus sujets à avaries et à l'encrassement. Une nouvelle disposition prévoit l'emploi de deux ventilateurs, l'un aspire les gaz chauds à la base de la cheminée, 37^{mm} d'eau ; l'autre refoule l'air pur dans le réchauffeur, 25^{mm} d'eau. Cette complication règle mieux le tirage, évite la tendance aux retours de flamme.

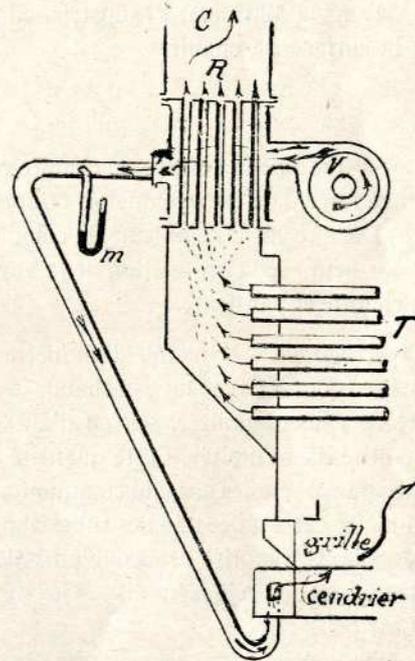


Fig. 40.

POIDS DE COMBUSTIBLE BRULÉ PAR MÈTRE CARRÉ DE GRILLE ET PAR HEURE

1^o *Surface de grille.* — C'est la surface généralement évaluée en mètres carrés de toute la partie de la grille sur laquelle se trouve étalé le combustible.

La surface de grille se détermine de la façon suivante :

A bord des paquebots ayant de hautes cheminées et dont la chauffe est bien conduite, on peut brûler au tirage naturel jusqu'à 90 kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de grille. Pour les navires plus petits, il ne faut pas compter sur plus de 60 à 70 kilogrammes.

La surface de grille varie environ de 0^m2,01 à 0^m2,0140 par cheval.

2^o *Surface de chauffe.* — On appelle ainsi toute surface métallique d'une chaudière, qui se trouve en même temps en contact par une de ses faces avec l'eau ou la vapeur et par l'autre face avec la flamme ou les gaz chauds.

Dans la Marine et l'Industrie, on prend ordinairement comme rapport entre la surface de grille et la surface de chauffe

$$\frac{S_g}{S_c} = \frac{1}{27}$$

c'est-à-dire que la surface de chauffe est environ 27 fois plus grande que la surface de grille. Avec le tirage forcé, elle est quelquefois 60 fois plus grande et même 75 fois dans les locomotives.

Dans ce cas-là, d'ailleurs, la combustion peut s'élever à 600 kilogrammes par mètre carré de grille et par heure et la production de la vapeur peut atteindre 50 kilogrammes par mètre carré de surface de chauffe et par heure.

Remarque. — Une tôle d'un mètre carré, baignée d'un côté par l'eau de la chaudière, et de l'autre côté, en contact avec les gaz chauds de la combustion, laisse passer pendant chaque minute une quantité de chaleur limitée, ou, en d'autres termes, ne peut vaporiser pendant chaque minute qu'une quantité d'eau limitée. Cette quantité dépend des températures de l'eau et des gaz : elle est d'autant plus grande que les gaz qui communiquent la chaleur sont plus chauds. Ainsi un mètre carré du foyer, un mètre carré à l'entrée des tubes auprès du foyer, étant en contact avec la flamme même ou les gaz très chauds, vaporise beaucoup plus d'eau qu'un mètre carré pris plus loin dans les tubes, sur lesquels passent des gaz déjà refroidis ; si les tubes sont très longs, la dernière partie, auprès de la boîte à fumée, en est peu active.

On appelle surface de chauffe directe celle du foyer, exposée à la chaleur rayonnante du combustible, ainsi qu'au contact des gaz très chauds produits par la combustion. La surface de chauffe indirecte est celle des tubes, soumise seulement à l'action des gaz, de moins en moins chauds, à mesure qu'ils s'avancent du foyer vers la boîte à fumée.

On compte comme surface de chauffe, tantôt la surface intérieure des tubes, celle qui touche les gaz chauds, tantôt la surface extérieure, en contact avec l'eau : la différence entre les deux nombres est assez forte, à cause du petit diamètre des tubes et de leur épaisseur relativement grande. Le mieux est de choisir la surface en contact avec les gaz, puisque c'est celle qui reçoit la chaleur. Avec les tubes à ailettes on ne peut guère compter autrement.



Des expériences ont déterminé le poids de vapeur que peut fournir, en une minute, d'une part le foyer, et, d'autre part, le faisceau tubulaire, supposé partagé en plusieurs tronçons successifs par des plaques intermédiaires : la *fig. 41* (chaudière de locomotive) représente approximativement les poids vaporisés en une minute, quand la combustion est active ; elle montre au-dessus de la surface de l'eau la quantité qui se vaporise dans chaque tranche de la chaudière. Les proportions de vapeur ainsi produites par les diverses parties d'une chaudière varient avec ses dimensions et, dans un même appareil, avec l'activité de la combustion.

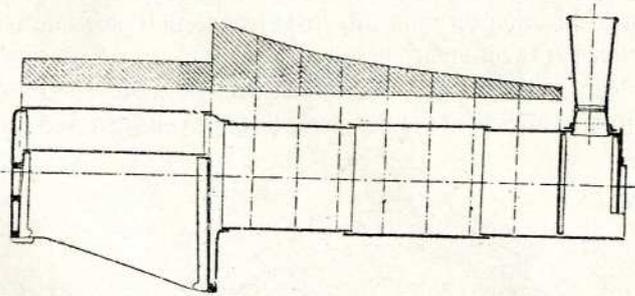


Fig. 41.

On voit sur le diagramme que c'est au-dessus de l'embouchure des tubes que la production est la plus vive. Par mètre carré, le foyer produit davantage, mais les tubes présentent une surface de chauffe bien plus grande que le foyer.

La quantité de chaleur cédée par la surface de chauffe sert à échauffer l'eau d'alimentation, puis à la vaporiser ; seulement le chauffage de l'eau est en partie indirect : dans l'injecteur, la vapeur commence à la porter à une température voisine de 100°, puis elle se mélange à l'eau chaude qui remplit la chaudière.

Une surface de chauffe trop petite laisse perdre beaucoup de chaleur ; trop grande, elle alourdit peu utilement l'appareil. En outre, des tubes trop longs nuisent à l'activité de la combustion.

ORGANES ACCESSOIRES COMMUNS A TOUTES LES CHAUDIÈRES

MANOMÈTRES. — Les manomètres sont des instruments destinés à indiquer d'une façon précise et en tout temps la pression qui existe à l'intérieur d'un récipient clos. Toutes les chaudières doivent en être munies.

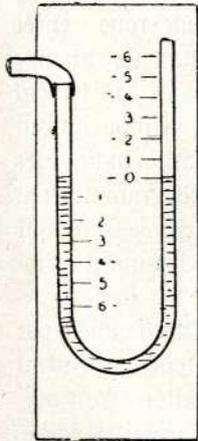


Fig. 42.

On distingue trois sortes de manomètres : les manomètres à air libre, à air comprimé, métalliques.

Les deux premiers genres sont étudiés dans les cours de physique. Nous dirons cependant quelques mots du premier qui, sous le nom d'anémomètre, est souvent employé. Le troisième est exclusivement réservé pour toutes les pressions de vapeur.

MANOMÈTRE A AIR LIBRE OU ANÉMOMÈTRE. — Employé pour indiquer la pression d'air dans les chambres de chauffe, dans les cendriers des chaudières marchant au tirage forcé et dans les scrubbers des installations de gazogènes.

C'est un tube en verre recourbé en U (*fig. 42*). L'une des branches communique avec le récipient dont on veut connaître la pression, l'autre avec l'atmosphère ; le tube est fixé sur une planchette.



Dans le tube on verse de l'eau colorée avec du vin ou du permanganate, par exemple, de façon que le niveau des deux branches corresponde avec les zéros de deux graduations en sens inverse marquées sur la planchette. Cette graduation est faite en millimètres ou centimètres d'eau.

Quand la pression agit, le liquide descend dans la branche A et monte dans la branche B. Pour avoir la pression du moment, il faut donc faire la somme des deux graduations, la pression étant mesurée par la différence des deux niveaux.

Dans le tirage par aspiration, et dans les scrubbers des gazogènes, c'est le phénomène inverse qui se produit. Mais dans les deux cas, il faut avoir bien soin de mesurer la pression *par la différence des deux niveaux*.

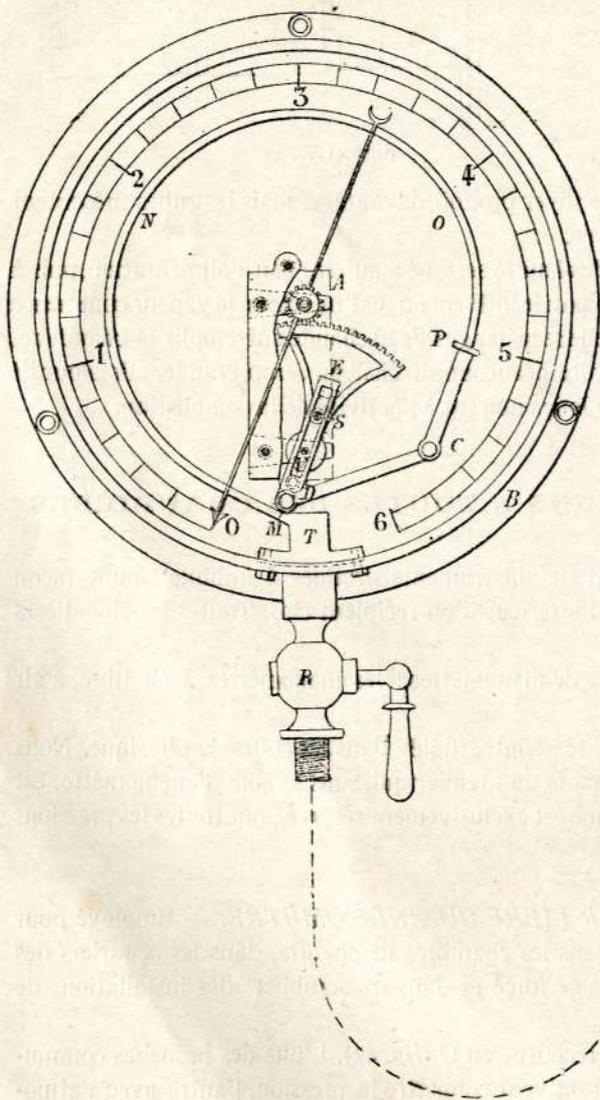


Fig. 43.

MANOMÈTRE BOURDON. —

Le manomètre métallique Bourdon (fig. 43) se compose d'une boîte métallique B contenant tout le mécanisme. Une tubulure T, fixée sur cette boîte et communiquant avec la chaudière par un tuyau fixé sur un robinet R, porte un tube MNOP à section aplatie fermé à l'extrémité P. Cette extrémité est reliée au moyen d'une petite bielle CD à une pièce DE percée d'une mortaise rectangulaire. Dans cette mortaise passe librement l'axe S supportant un secteur denté.

Une vis V, se vissant dans le secteur, le réunit à la pièce DE.

Ce dispositif permet de faire varier la distance DS pour régler l'appareil. Le secteur engrène avec une roue dentée montée sur un axe A portant une aiguille simplement emmanchée à frottement dur. Cette aiguille peut se mouvoir sur un cadran dont la graduation indique les pressions exercées en kilogrammes par centimètres carrés. L'instrument marque les pressions effectives lorsque la graduation part de zéro.

La vapeur arrive de la chaudière par le tuyau t, pour former poche d'eau et aboutit dans le tube de laiton T contourné et tourné en spirale; ce tube de section elliptique est libre de se mouvoir dans sa

boîte par son extrémité fermée ; l'extrémité ouverte est reliée d'une façon étanche au tuyau *t*. Le tuyau *T* est lui-même coudé, pour qu'une certaine quantité d'eau s'y condense et que ce soit elle qui transmette les pressions à l'appareil. La vapeur en effet étant à haute température finirait par aigrir le métal du petit tube *t* et détruirait son élasticité. En outre l'appareil est généralement gradué à froid, à la pression hydraulique. Si donc la vapeur agissait directement sur ce tube, l'instrument prendrait avec les diverses pressions des températures différentes. Les pièces du mécanisme se dilateraient avec les augmentations de pression et toutes les indications seraient faussées.

L'eau condensée dans le tube conserve une température uniforme et assez basse, ce qui remédie aux inconvénients ; cependant s'il est bon que de l'eau se trouve dans le manomètre, il faut avoir soin qu'elle n'y séjourne pas trop longtemps, afin d'éviter qu'il se produise des dépôts dans les tubes, ce qui les altérerait et pour cela il faut le purger environ une fois par jour.

Fonctionnement de l'appareil. — Quand la pression agit dans le manomètre, le tube de laiton se déroule entraînant avec lui le secteur ; l'aiguille se déplace sur le cadran qui a été gradué par comparaison avec un manomètre-étalon, indiquant par suite la pression exacte du moment.

Mais pourquoi le tube se déroule-t-il ?

Ce tube en laiton a une section elliptique (fig. 44) dont le grand axe varie peu et dont le petit décroît depuis l'orifice d'introduction du fluide, jusqu'à l'extrémité libre. Or la pression, dans ce tube, agit avec plus de force sur les parties aplaties que sur les parties bombées, la surface des premières étant plus grande que celle des secondes, la section tend à prendre une section circulaire.



Fig. 44.

Dans ce mouvement, le rayon moyen R_1 du tube augmente et par suite le tube se déroule. En effet, soit (fig. 45), le tube *mn*, R et r les rayons extérieur et intérieur du tube et $2d$ le petit diamètre.

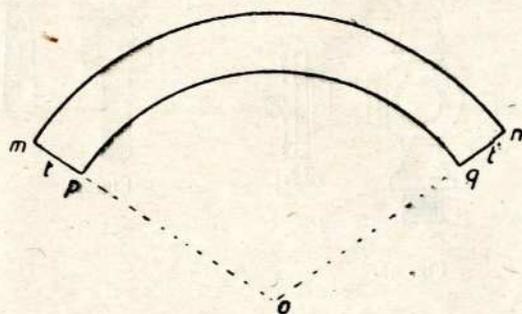


Fig. 45.

D'après un théorème connu de géométrie, on a :

$$\frac{\text{Arc } mn}{\text{Arc } pq} = \frac{R}{r}$$

qu'on peut écrire :

$$\frac{\text{Arc } mn + \text{Arc } pq}{\text{Arc } mn - \text{Arc } pq} = \frac{R + r}{R - r} = \frac{2R_1}{2d} = \frac{R_1}{d}$$

or :

$\frac{\text{arc } mn + \text{arc } pq}{\text{arc } mn - \text{arc } pq}$ est une quantité rigoureusement constante. Par suite $\frac{R_1}{d}$ doit l'être et comme d augmente ainsi que nous l'avons vu plus haut, R_1 aussi doit augmenter.

Le rayon moyen augmentant il s'ensuit bien que le tube se déroule.

Voici une autre méthode plus rigoureuse :

Considérons une portion *omn* de ce tube vue en plan et l'aiguille fixée au point *o*. Supposons, pour le moment, le point *o* invariable. Introduisons la pression dans le tube ; l'axe horizontal *mm* de la section elliptique deviendra *m'n'*, l'arc *om* se sera allongé $om' > om$, l'arc *on* se sera raccourci



suite, à des oscillations et à des soubresauts continuels de l'aiguille du manomètre.

Remarque 3. — Pour les pressions élevées, on emploie généralement un appareil du genre de la *fig. 51.*

ENREGISTREURS DE PRESSION. — Nous ne terminerons pas ce que nous avons à dire sur les manomètres, sans parler des enregistreurs de pression qui ont pour but de représenter graphiquement la marche des pressions de vapeur dans les chaudières, *chose très utile en cas d'accidents pour savoir qu'elle était la tension au moment où la catastrophe s'est produite.*

Il existe plusieurs appareils qui répondent à cet objet ; le manomètre enregistreur Bourdon nous semble un exemple bien choisi, car sa simplicité qui n'exclut aucunement l'exactitude, le rend facilement compréhensible.

Cet appareil se compose des différentes pièces (tube, aiguille, cadran divisé) d'un manomètre ordinaire, dans la boîte duquel se trouve placé un mouvement d'horlogerie entraînant dans sa rotation un cadran horaire, sur lequel une pointe traçante vient décrire une courbe. Celle-ci permet de contrôler les différentes pressions indiquées par le manomètre et de connaître les instants où les variations se sont produites.

La *figure 52* nous montre :

1° Que le cadran se trouve d'une part divisé en circonférences concentriques représentant les pressions de 0 à 7 kilogrammes correspondantes à celles du manomètre, et d'autre part, en arcs de cercle perpendiculaires aux circonférences dont nous venons de parler et qui figurent les différentes heures du jour et de la nuit avec leurs subdivisions.

2° Que l'aiguille indicatrice du manomètre et la pointe traçante du cadran étant fixées sur un même axe, tous leurs mouvements sont solidaires et, par suite, les pressions indiquées sur l'arc gradué sont exactement transcrites sur le cadre horaire.

La *figure 53*, qui représente la courbe de pression d'une journée de vingt-quatre heures, fait bien voir le travail du générateur pendant ce temps : le cadran ayant été mis en place à 3 heures, A est le point de départ ; il indique que la pression était alors de 4 kilogrammes $\frac{3}{4}$; B correspond à l'arrêt de la machine 6 heures $\frac{1}{2}$ et à ce moment la pression est au plus bas 2 kilogrammes $\frac{1}{4}$, on voit qu'en raison de la chaleur accumulée dans le fourneau de B en C (période de nuit) la pression s'est élevée

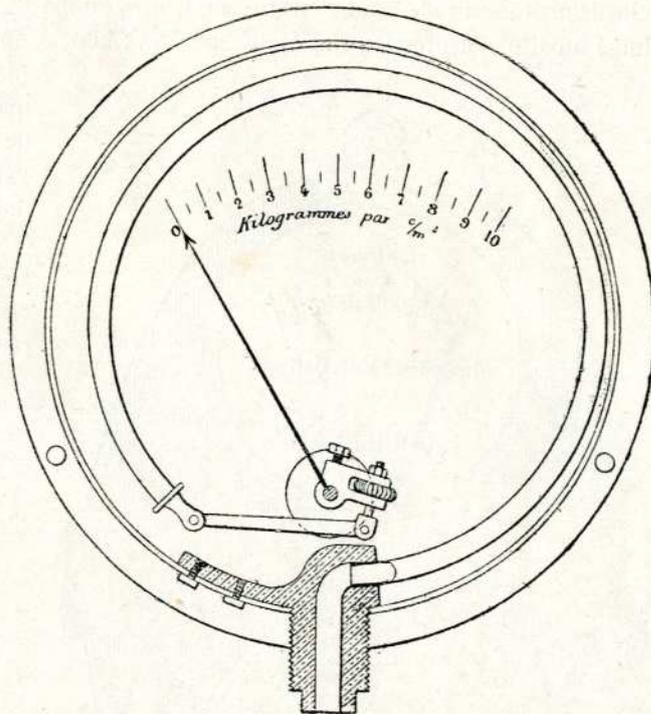


Fig. 51.

graduellement pour redescendre ensuite à 6 heures du matin, c'est-à-dire au point C. Le feu ayant été rallumé aussitôt, la pression qui était alors de 2 kilogrammes $\frac{1}{2}$, a augmenté jusqu'à 6 heures $\frac{1}{2}$ (4 kilogrammes $\frac{3}{4}$), heure de la mise en marche de la machine de C en D (période de travail), la courbe montre toutes les variations qu'a subies la tension de la vapeur dans la chaudière.

Le cadran horaire, dont les courbes sont visibles à travers un verre est fermé à clef, de manière à ce que personne ne puisse fausser les indications du contrôleur.

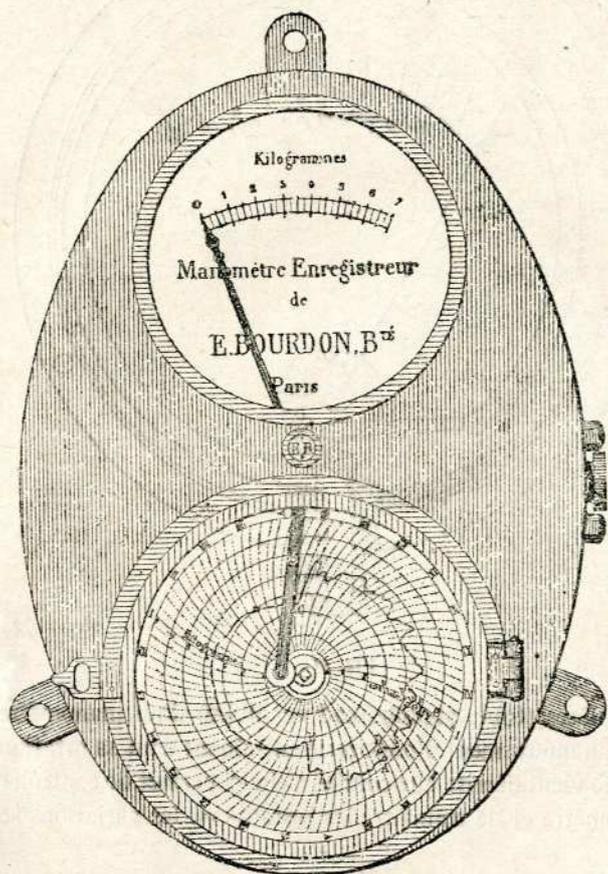


Fig. 52.

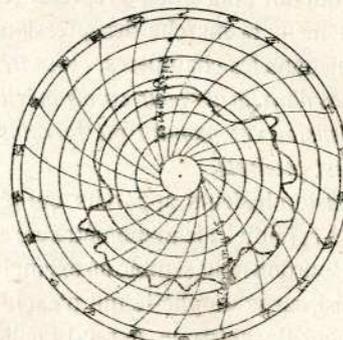


Fig. 53.

PYROMÈTRES. — Il est souvent utile de connaître la température des gaz, soit dans les carneaux et particulièrement dans les carneaux réchauffeurs, soit à la base de la cheminée. On se sert pour cela d'appareils connus sous le nom de pyromètres et qui ont pour but de mesurer les hautes tem-

pératures, pour lesquelles le thermomètre ordinaire ne serait pas suffisant. Les figures 54, 55, 56, 57 représentent un pyromètre Ducomet.

Cet appareil se compose d'un tube A en métal ou en terre réfractaire, dans lequel se trouve une tige pleine en métal B, qui se termine dans le boîtier M, par une crémaillère L qui actionne un pignon calé sur l'axe d'une aiguille se mouvant sur un cadran indicateur.

Un ressort E, placé dans le tube A, sollicite constamment la tige B vers le haut.

Cette tige B porte à sa partie inférieure des disques GK, KG, etc., qui sont fusibles à des températures déterminées ; et quand on fait descendre celle-ci vers le bas, à l'aide de la manivelle H, on bande le ressort qui emprisonne et comprime les disques.

On maintient le ressort dans sa nouvelle position, par une goupille F ; on retire la manivelle ; et

on place le pyromètre, au moyen d'un plateau à coulisse, dans l'endroit dont on veut mesurer la température.

Voici comment fonctionne l'appareil :

Dès que le point de fusion d'un disque arrive, il se disperse et la tige B sollicitée par le ressort, monte à la hauteur de ce disque, et comme elle est solidaire avec la crémaillère et le pignon et par suite avec l'aiguille, cette dernière parcourt la première division du cadran.

Lorsque le degré de fusion du deuxième disque est atteint, l'aiguille parcourt la deuxième division, et ainsi de suite pour un nombre quelconque de disques.

Quand on veut faire une nouvelle opération, on fait descendre la tige B au moyen de la manivelle H, jusqu'à ce que son pied soit bien dégagé et on lui remet une nouvelle série de disques fusibles séparés chacun par un disque mince en fer ou en acier.

INDICATEUR DU VIDE. — C'est un appareil destiné à indiquer les pressions plus faibles que la pression atmosphérique. Il est semblable au manomètre, mais le tube elliptique est enroulé en sens inverse. Les indications sont généralement données en centimètres de mercure de 0 à 76 ou 80.

INDICATEURS DE NIVEAU D'EAU. — Chaque chaudière doit être munie de deux appareils indicateurs de niveau indépendants l'un de l'autre, et suffisamment espacés, et placés de façon à rester constamment visibles pour l'agent chargé de l'alimentation.

L'un au moins de ces appareils est un tube en verre ou est muni d'une lame de verre, la lame et le tube étant disposés de façon à pouvoir être nettoyés ou changés facilement.

Des précautions doivent être prises contre le danger provenant des éclats de verre en cas de bris des tubes au moyen de dispositifs qui ne fassent pas obstacle à la visibilité du niveau. Ce genre d'indicateur doit en outre être éclairé de tout temps.

L'autre appareil indicateur de niveau peut être un système de trois robinets étagés, ou de deux seulement pour les petites chaudières.

Sur les chaudières fonctionnant à une pression supérieure à 8 kilogrammes, ces robinets dits robinets de jauge sont munis d'un dispositif permettant de les fermer à distance,

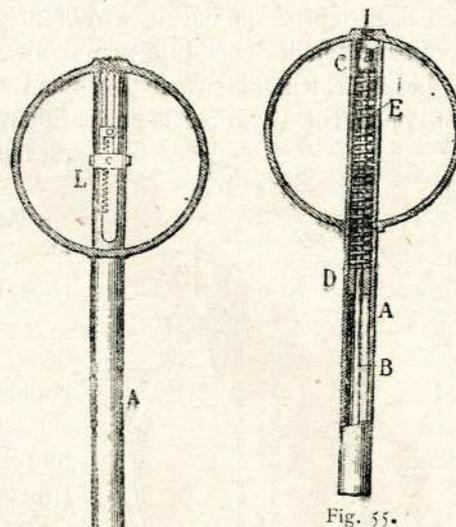


Fig. 55.

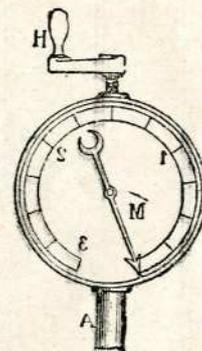


Fig. 56.

Rondelle fusible

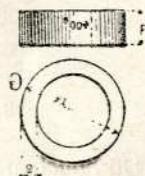


Fig. 57.



Fig. 54.

Les chaudières qui ont des foyers sur plusieurs façades sont pourvues, pour chacune de celles-ci, des appareils indicateurs du niveau de l'eau.

Les indicateurs de niveau sont munis de robinets permettant de remplacer le verre sans danger pour l'opérateur. Ces robinets doivent pouvoir être manœuvrés à distance, sauf le cas où l'indicateur est muni d'un dispositif de fermeture automatique.

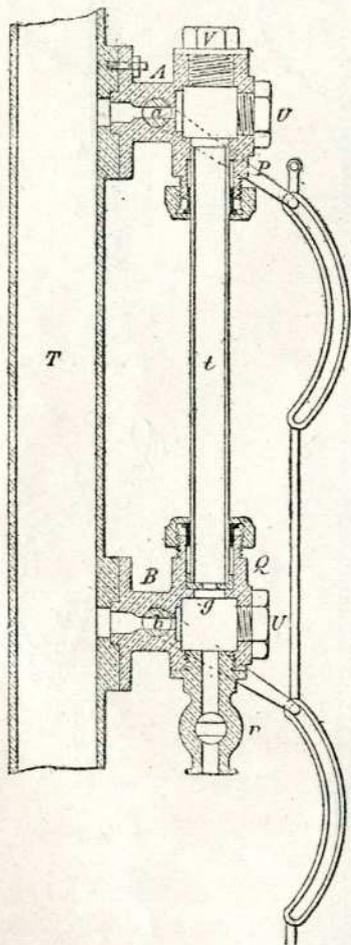


Fig. 58.

Un bouchon à vis V permet d'introduire le tube et un robinet de purge sert à le débarrasser des matières graisseuses et à s'assurer que les montures ne sont pas obstruées. Deux bouchons UU permettent, dans le cas où elles le seraient, de les dégager.

Remarque. — En vertu du principe des vases communicants, on aura ainsi théoriquement dans

(1) Le verre se dissout dans l'eau à la température de 400° et le cristal (silicate double de potasse et de plomb) étant attaqué par l'eau bouillante contenant des alcalis, il devenait opaque à cause du plomb.



le tube en verre le même niveau que dans la chaudière. Nous disons théoriquement, car pratiquement l'eau du tube du niveau est de l'eau distillée. L'eau de la chaudière, au contraire, a toujours une densité un peu plus élevée à cause des sels qui y sont dissous. Aussi le niveau dans le tube indique-t-il toujours un niveau un peu supérieur à celui qui existe dans la chaudière.

Cette inexactitude est cependant corrigée grâce aux différences de température de l'eau dans le tube et de celle dans la chaudière ; l'eau du tube étant en effet plus froide augmente de densité.

En réalité, on peut se fier sans crainte aux indications du tube de niveau, d'autant qu'on doit toujours faire en sorte qu'il y ait constamment de l'eau jusqu'à mi-tube, ce qui correspond à un niveau très normal dans les chaudières.

DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ

SYSTÈME KLINGER. — Autour du tube, pour protéger les chauffeurs en cas de rupture, on place un masque ou grillage en fil de laiton.

Mais ce système de protection a pour effet de rendre le niveau très incertain. Le système Klinger est préférable (fig. 59).

L'apparence du niveau est donnée dans ce cas par une glace striée verticalement g formant le devant d'un récipient dont la partie arrière est formée d'une plaque métallique à section arrondie p et dont la face intérieure est complètement noire (fig. 60).

L'angle des stries est de 90° et le degré de visibilité est rendu très puissant par suite d'un phénomène d'optique qui se produit. Ce phénomène est le suivant : Dans la vapeur ou dans l'air un rayon lumineux est réfléchi, tandis que dans l'eau il est réfracté. L'angle étant de 90° , la réflexion est totale (voir à l'appendice la démonstration théorique).

C'est pourquoi le rayon lumineux l considéré par exemple vers la surface du niveau revient réfléchi (sens des flèches) du côté de l'observateur, tandis que le rayon p' rentre dans l'eau et va se perdre dans le fond noir de la plaque p . Il s'ensuit donc que tous les rayons au-dessus du niveau font apparaître très claire cette partie tandis que tous ceux qui sont au-dessous nous la montrent absolument noire. Par suite de cette transition de couleurs, le niveau sera toujours d'une apparence très vive.

En outre, les chances de rupture sont beaucoup plus faibles que dans le cas d'un tube, en raison de l'épaisseur de la glace.

Cependant ces accidents ne sont pas impossibles.

Aussi le plus haut degré de sécurité est-il atteint grâce aux appareils munis d'un système de fermeture automatique. Nous en décrivons deux, le système à boules et le système à piston.

MONTURE LOUPPE. — Dans la monture Loupe (fig. 61), le tube en verre t est enfermé dans

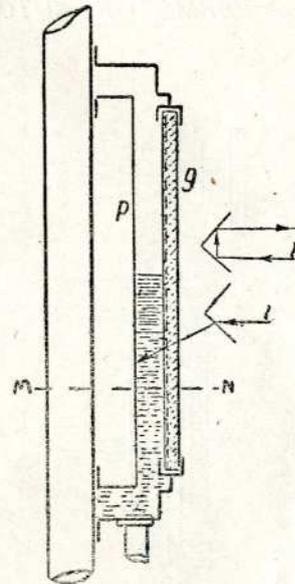


Fig. 59.

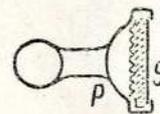


Fig. 60.

une gaine en bronze G portant une place *g* de 12 millimètres d'épaisseur, faisant joint sur la gaine et à travers laquelle on peut voir le niveau.

Le tube passe dans deux presse-étoupes *pp* dont les grains sont prolongés par des tubes en bronze *bb* s'emmanchant eux-mêmes dans les montures A et B semblables à celles décrites plus haut. Si le tube se brise, l'eau, la vapeur et les éclats de verre restent à l'intérieur de la gaine G et l'on peut fermer sans danger les robinets des montures.

FERMETURE AUTOMATIQUE A BOULES. — Ce système a le grand avantage de pouvoir être adapté à toutes les montures existantes (fig. 62).

Aucune modification n'a été apportée à la monture ordinaire décrite fig. 58. Un cylindre O en bronze, évidé en *e* a été rapporté.

Dans son évidement est enfermée une sphère en bronze S qu'une goupille empêche de s'introduire dans la tubulure *b*. La pièce D est munie d'un presse-étoupes *p* dans lequel passe une tige *f*. L'évidement *e* communique, en fonctionnement normal, avec l'intérieur du tube *t* par l'orifice *o*. Le tige *f* sert à décoller la sphère lors de la mise en communication du tube.

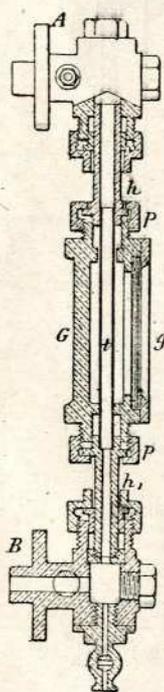


Fig. 61.

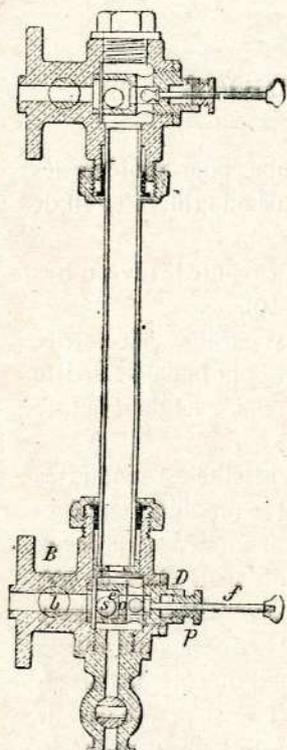


Fig. 62.

Fonctionnement. — En temps ordinaire, la pression de la vapeur agissant de part et d'autre de la boule, celle-ci se trouve en équilibre dans la vapeur, et son poids l'empêche par suite de remonter le plan incliné formé par la surface conique de l'orifice.

Supposons que le tube vienne à casser. La pression alors n'agit plus que derrière la boule.

Celle-ci se trouve chassée violemment et vient fermer l'orifice E.

Par suite la vapeur ne peut aller dans la chaufferie. On peut d'ailleurs, sans crainte de se brûler, fermer les robinets.

SYSTÈME A PISTON. — Ce système est représenté schématiquement par la fig. 63.

Il se compose de deux pistons PP' reliés par une même tige et reliés aux deux robinets de fermeture RR'.

Chaque piston est en communication par ses deux faces avec la chaudière grâce aux conduits C, D, C', D', etc., en communication également avec le tube de niveau T. Cette disposition permet aux



pistons d'être en équilibre dans la vapeur, c'est-à-dire compensés, et, à condition que dans la position d'ouverture, ils se trouvent placés en bas comme dans la figure, ils ne bougeront pas de place.

Leur manœuvre s'effectue à mains par les poignées M.

Fonctionnement. — On voit qu'actuellement la communication est bien établie.

Supposons que le tube vienne à casser. La pression n'agissant plus que du côté *c* et *c'* les pistons sont poussés vers la partie supérieure opérant la fermeture des robinets R et R'.

ROBINETS-JAUGES (fig. 64). — Les robinets-jauges sont destinés à contrôler les indications du tube de niveau, en cas de mauvais fonctionnement ou de la rupture de celui-ci. Ils sont au nombre de trois, fixés sur la tôle de la chaudière au moyen d'écrous intérieurs E. Une vis permet de déboucher le conduit lorsqu'il est obstrué. Les becs des trois robinets sont réunis par un tuyau T qui débouche au-dessus du parquet de la chaufferie.

Le robinet M est à la hauteur du niveau normal, celui supérieur L à 10 centimètres au-dessus, et celui inférieur N à 10 centimètres au-dessous.

Les robinets sont le plus souvent du modèle de la fig. 65.

Dans le premier cas en effet l'agent qui veut se rendre compte du niveau en utilisant ce robinet peut se brûler en purgeant, tandis que dans le second cas un pointeau ouvre l'orifice de communication avec la chaudière, et la vapeur s'écoule par un petit orifice percé par côté.

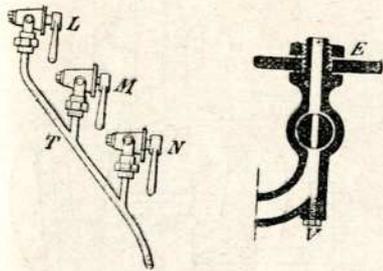


Fig. 64.

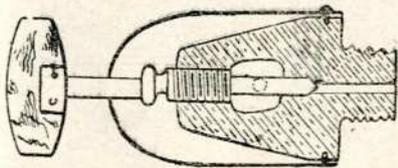


Fig. 65.

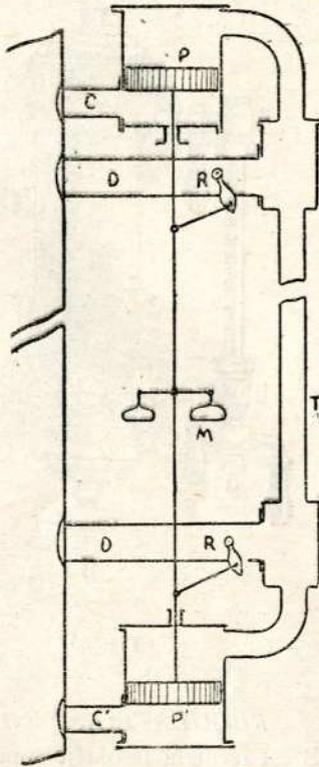


Fig. 63.

Remarque. — Très souvent (fig. 66) une même clarinette porte les robinets de jauge et le tube de niveau.

RÉGULATEURS ALIMENTAIRES. — Le niveau dans les chaudières devant rester pendant la marche à une hauteur sensiblement constante, et les pompes ne pouvant pas distribuer exactement la quantité d'eau voulue à chaque chaudière d'un groupe ou même à une seule chaudière, on a été amené à disposer sur chacune d'elles un organe spécial (appelé régulateur alimentaire) par appareil d'alimentation.

La plupart des règlements administratifs spécifient d'ailleurs que chaque appareil d'alimentation doit être muni d'un régulateur, soupape ou clapet fonctionnant automatiquement et placé au point d'insertion du tuyau d'alimentation qui lui

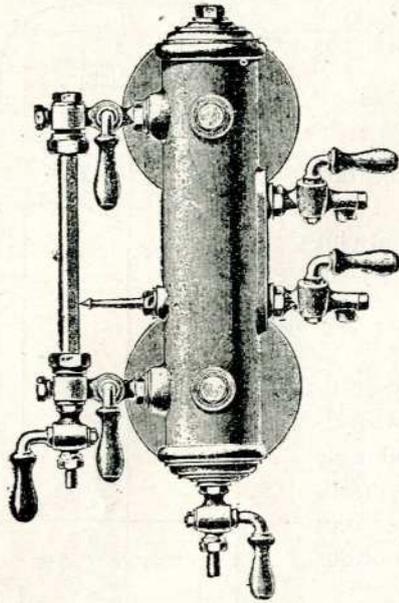


Fig. 66.

est propre. Ces régulateurs doivent porter un robinet intermédiaire permettant de les visiter pendant la marche.

En outre, lorsque plusieurs corps de chaudières sont en communication, le régulateur d'alimentation est obligatoire pour chacun d'eux.

Le tuyau d'alimentation débouche aujourd'hui dans le coffre à vapeur. Cette disposition avait donné lieu à quelques critiques parce qu'elle produisait des chocs qui détruisaient rapidement les tuyaux et les joints. Or on a pu remédier à cet inconvénient par un meilleur tracé du tuyautage et par une plus grande régularité dans le fonctionnement des pompes.

Ces chocs étaient attribués à une certaine condensation de la vapeur au contact de l'eau froide d'alimentation.

L'emploi du robinet est peu pratique vu la difficulté qu'il y a à régler le débit dans des proportions souvent très faibles. Aussi emploie-t-on fréquemment le régulateur avec clapet de retenue, surtout dans l'industrie et les chemins de fer. Le régulateur d'Indret est très employé dans la marine de guerre et le régulateur à robinet dans la marine de commerce.

RÉGULATEUR D'INDRET (fig. 67). — Ce régulateur se compose d'un robinet dont le boisseau B est fermé à la partie supérieure par un plateau P semblable à celui du régulateur ordinaire. Ce boisseau porte deux tubulures A et R placées à angle droit et à des hauteurs différentes.

La noix est creuse, ouverte à la partie supérieure et percée de deux orifices pouvant correspondre avec les tubulures A et R du boisseau. Ces orifices sont séparés par une cloison au centre de laquelle on a ménagé un siège sur lequel vient reposer un clapet C. La levée de ce clapet est limitée, comme dans le régulateur ordinaire, par une tige filetée T manœuvrée par un croisillon.

La noix est maintenue par un écrou E vissé sur la queue V. Un deuxième écrou F vissé

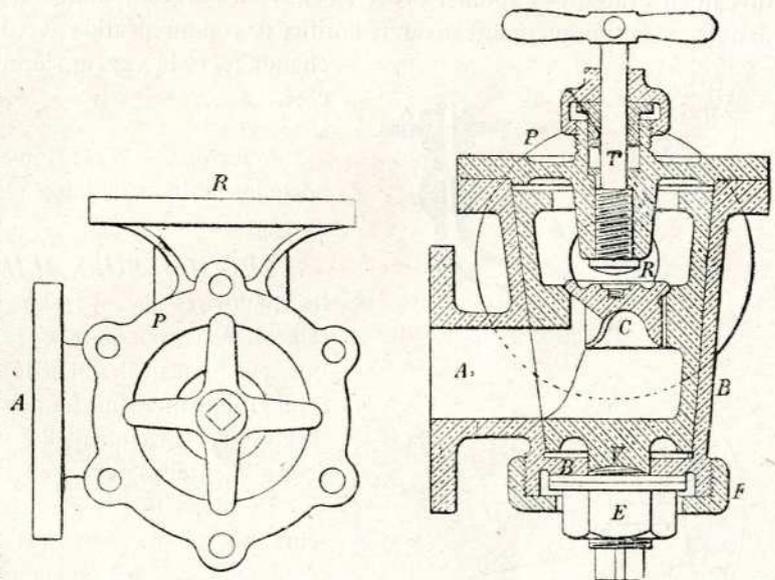


Fig. 67.

sur le boisseau sert d'appui au premier lorsqu'on veut décoincer la noix. Enfin, pour faire tourner celle-ci, on a ménagé une partie carrée à l'extrémité de la queue V.

Manœuvres à effectuer pour visiter le clapet. — Il faut d'abord fermer le robinet. Pour cela, il faut desserrer la tige T, serrer l'écrou F, desserrer l'écrou E jusqu'à ce que la noix soit décoincée ; on peut alors la faire tourner au moyen d'une clef fixée sur la tige V. On lui fait faire un quart de tour, puis on serre l'écrou E. On peut ensuite démonter le plateau et retirer le clapet à l'aide d'un tire-fond. Lorsque l'appareil aura été remis en état, le remonter et faire les mêmes opérations pour amener la noix dans la position d'ouverture.

RÉGULATEUR A ROBINET (fig. 68). — Très employé dans la marine de commerce, cet appareil se compose d'un régulateur proprement dit, muni d'un clapet et réglable en levée par la tige *b*. Il est accolé du côté de la pompe à un robinet ordinaire *c* fixé sur la chaudière.

En marche, le robinet *c* est ouvert ; pour visiter le clapet du régulateur, il faut fermer *c*. Seulement le plus grand soin doit être pris du robinet *c*, de façon à assurer son étanchéité parfaite.

CLAPETS DE RETENUE D'ALIMENTATION. — Ces appareils complémentaires, comme nous l'avons dit des appareils d'alimentation, sont destinés à parer aux dangers que peut produire la rupture d'un conduit d'amenée de l'eau, en empêchant les chaudières de se vider ; ils doivent fonctionner automatiquement et être placés aux points d'insertion des tuyaux d'alimentation dans les générateurs.

Il existe plusieurs types de clapets de retenue : celui que la figure 69 représente est de la maison

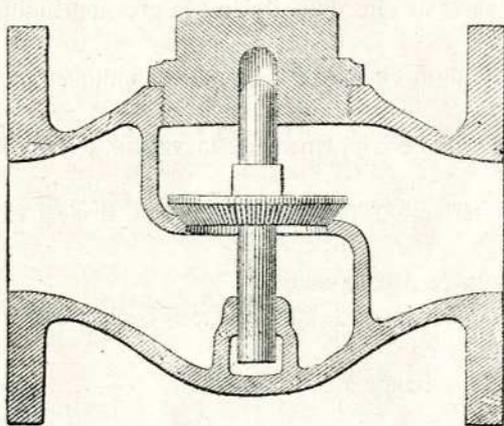


Fig. 69.

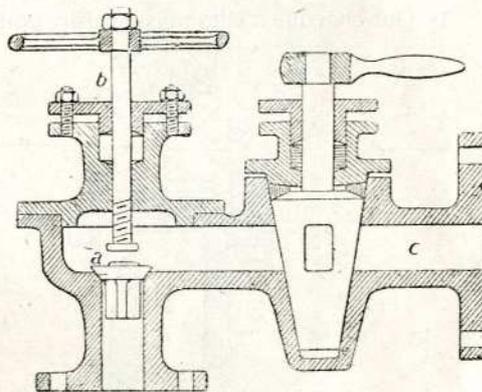


Fig. 68.

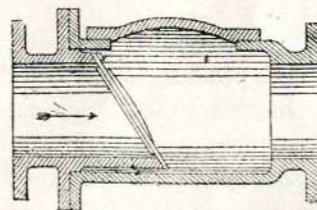


Fig. 70.

Lethuillier et Pinel, celui de la figure 70 est de la maison Herdevin.

Le premier se compose simplement d'une boîte, dans laquelle se trouve une soupape, guidée en haut et en bas par une tige cylindrique : l'eau d'alimentation arrive par la droite, soulève la soupape, et passe à gauche, pour s'introduire dans le générateur. Sitôt l'alimentation terminée, le clapet retombe sur son siège, et il devient impossible à l'eau de la chaudière de revenir en arrière.

Dans le second type, le disque, à sa position de repos, est vertical ou plutôt fortement incliné ; il prend la position horizontale, lors du passage de l'eau, pour retomber ensuite sur son siège.

SOUPAPES DE SURETÉ. — Ce sont des appareils destinés à se soulager automatiquement en cas d'excès de pression dans la chaudière pour en laisser échapper la vapeur dans l'atmosphère. Elles doivent ensuite pouvoir retomber d'elles-mêmes et doucement sur leur siège.

Elles sont absolument réglementaires. Chaque chaudière doit être munie d'au moins deux soupapes de sûreté, convenablement installées, calculées et chargées de manière :

1° Que chacune d'elles puisse suffire pour évacuer à elle seule toute la vapeur produite, quelle que

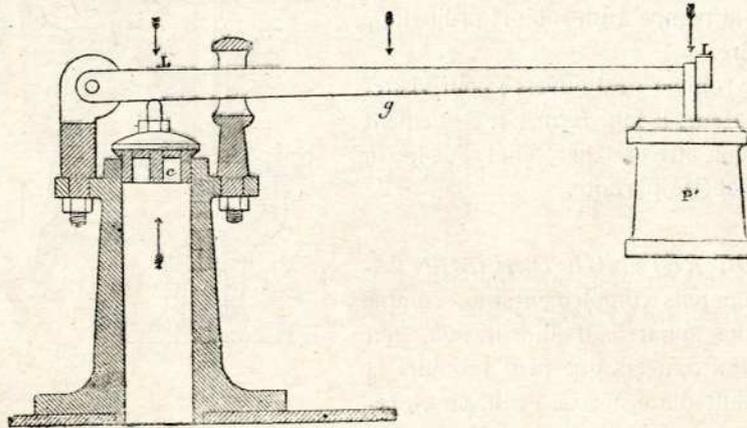


Fig. 71.

soit l'activité du feu, sans que la pression effective dépasse de plus d'un dixième la pression indiquée par le timbre ;

2° Qu'elle se soulève avant que la pression excède d'un vingtième celle qui est indiquée par le timbre.

Les mesures nécessaires doivent être prises pour que l'échappement de la vapeur ou de l'eau chaude ne puisse pas occasionner d'accident.

Sur les chaudières dont la surface de grille est inférieure à 45 décimètres carrés, il n'est exigé qu'une seule soupape.

Seule la soupape de sûreté à ressorts doit être employée dans la marine.

Dans l'industrie et les chemins de fer, on emploie des soupapes de sûreté à ressorts dites balances, mais le type à contrepoids tend de plus en plus à disparaître.

Nous donnons simplement (*fig. 71*) le schéma d'une soupape à contrepoids.

SOUPAPE A RESSORTS BALANCE. — Cet appareil est désigné par le nom de balance. Des



ressorts agissent à l'extrémité du levier (*fig. 72*). En desserrant l'écrou à molette qui appuie sur le levier on diminue la tension du ressort, et par suite, la charge de la soupape. Un fourreau gradué en laiton indique, en kilog. par centimètre carré, les pressions qui soulèvent la soupape pour les diverses tensions données au ressort. Une bague d'arrêt, de hauteur déterminée, placée sous l'extrémité du levier, limite la tension qu'on peut donner avec l'écrou à molette.

On préfère aujourd'hui la charge directe par ressort à la charge par levier : le montage de la soupape est plus simple, et il est moins facile d'en modifier le réglage qui doit être fait à l'atelier seulement.

SOUPAPE A RESSORTS. — Le système utilisé se compose (*fig. 73*), d'une boîte en acier portant

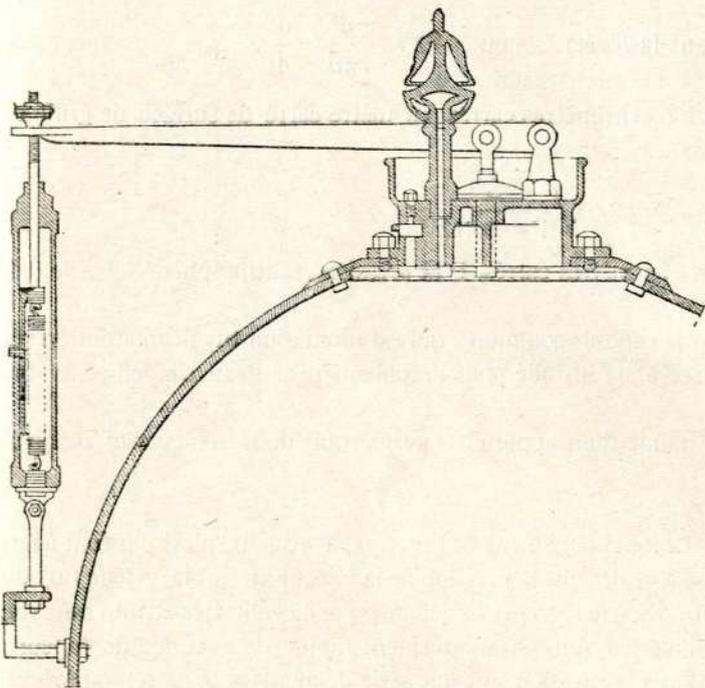


Fig. 72.

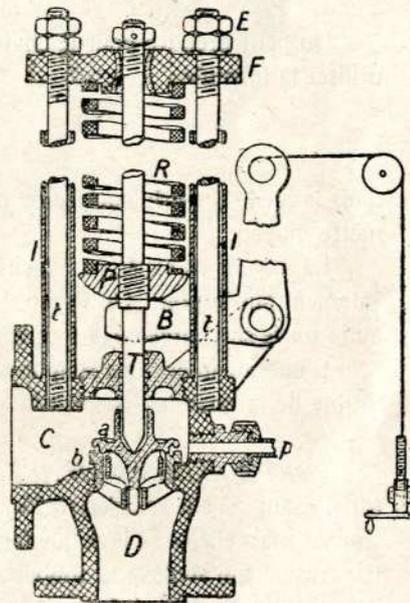


Fig. 73.

deux tubulures semblables à D et qui se fixent sur la chaudière, autant que possible directement. Quand il existe un tuyau de raccordement, celui-ci doit être aussi court que possible.

Au-dessus des tubulures D se trouvent des sièges rapportés en bronze *b*, à ailettes, sur lesquelles viennent appuyer des clapets *a* en bronze à portage plan et extrêmement réduit (plus petit que 2 millimètres). La pratique a en effet appris que plus le portage d'un clapet est petit, mieux se fait le rodage et meilleure est l'étanchéité.

Comme la soupape de sûreté doit être parfaitement étanche, on est donc conduit à diminuer autant que possible le portage du clapet. Ce dernier a d'ailleurs un autre diamètre plus grand. Ceci a pour but de lui permettre de rester soulagé, jusqu'à ce que la pression soit notablement diminuée. On évite ainsi des battements du clapet sur son siège qui, autrement, seraient inévitables. (Voir portage des soupapes).

Chaque clapet est appuyé sur son siège grâce à un ressort R que l'on bande à volonté au moyen des écrous E et du plateau F.

Lorsque le ressort a été calculé exactement, on interpose sur les tiges t des tubes l qui empêchent toute main maladroite ou mal intentionnée de caler la soupape. Aucune soupape de sûreté placée sur les chaudières n'a un diamètre inférieur à 32 millimètres et la levée ne doit pas être limitée à moins du quart du diamètre pour les soupapes à simple siège.

En effet, si nous appelons b la levée de la soupape, dont la section est égale à $\frac{\pi d^2}{4}$, il faudrait pour que la section annulaire de sortie de vapeur soit égale à l'introduction circulaire que l'on ait :

$$\pi d b \frac{\pi d^2}{4} (b \text{ étant la levée}) \quad \text{ou} \quad b = \frac{\pi d^2}{4 \pi d} = \frac{d}{4}$$

On peut prendre pour le clapet 5 à 6 centimètres carrés par mètre carré de surface de grille ou utiliser la formule :

$$d^{\text{cm}} = 2,6 \sqrt{\frac{S}{P - 0,412}}$$

dans laquelle S est la surface de chauffe en mètres carrés, P la pression en atmosphères et d le diamètre moyen.

La vapeur en excès est évacuée par le conduit commun c qui est muni d'un tuyau montant verticalement sur le pont. Un tuyau de purge p est installé pour l'écoulement de l'eau condensée, ce qui évite toute surcharge de la soupape.

L'une au moins des soupapes est munie d'un appareil B permettant de la soulever et manœuvrable de la chambre de chauffe.

PORTAGE DES SOUPAPES. — Le fonctionnement de la soupape ordinaire n'est pas tout à fait satisfaisant : si elle est bien réglée, elle se lève dès que la pression de la vapeur atteint la valeur 1,05 du timbre, mais elle ne se lève que fort peu ; dès que la vapeur s'échappe par la zone très étroite ouverte, la pression qui soulève la soupape diminue par suite du mouvement rapide de la nappe de vapeur : il en résulte que l'ouverture est insuffisante, la pression suit une série de montées et de retombées qui tiennent la soupape en trépidation constante, lui donnant des battements qui déterminent le matage du siège et donnent lieu à des défauts d'étanchéité et parfois à la rupture du clapet. Il faut alors soulever la soupape à la main ou desserrer l'écrou sur lequel s'attache le ressort des appareils à levier.

Pour éviter ces défauts, on a imaginé les soupapes à profil concave en dehors du portage.

Si l'on suppose qu'un filet de vapeur s'écoule en tangentant la gorge de rayon moyen égal à 0,10, avec une vitesse de 300 mètres et que le poids de vapeur contenu dans la gorge soit 5 grammes, on a :

$$m = \frac{0,005}{10}$$

$$\text{Effet centrifuge} = \frac{m v^2}{\rho} = \frac{0,0005}{0,10} \times 90.000 = \frac{45}{0,10} = 450 \text{ kg.}$$

dont il faudrait chercher la composante verticale.



On peut donc régler le profil de manière à réaliser un effort vertical de bas en haut capable d'équilibrer l'augmentation croissante de l'effort de compression et de diminuer la pression statique.

C'est le principe de la soupape Adams.

SOUPAPE WILSON (fig. 74). — L'effet dynamique de l'écoulement n'a pas d'influence sur l'équilibre statique.

Cette soupape a la forme d'une cloche ; elle peut glisser à frottement doux dans une pièce fixe ; la vapeur qui agit sous la soupape

exerce sa pression dans la paroi de la cloche ; mais les composantes horizontales se détruisent, les composantes verticales agissent seules ; si la soupape se soulève, la vapeur s'écoule latéralement, la pression de la cloche varie peu ; les conditions de l'équilibre statique ne sont pas changées. Le portage de la soupape n'est pas supérieur à 2^{mm}.

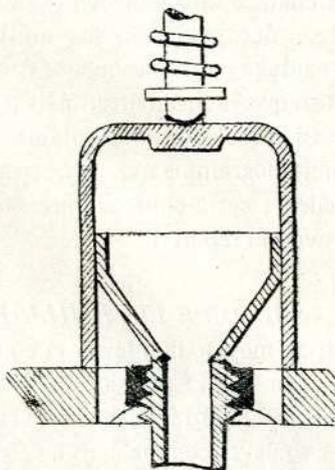


Fig. 74.

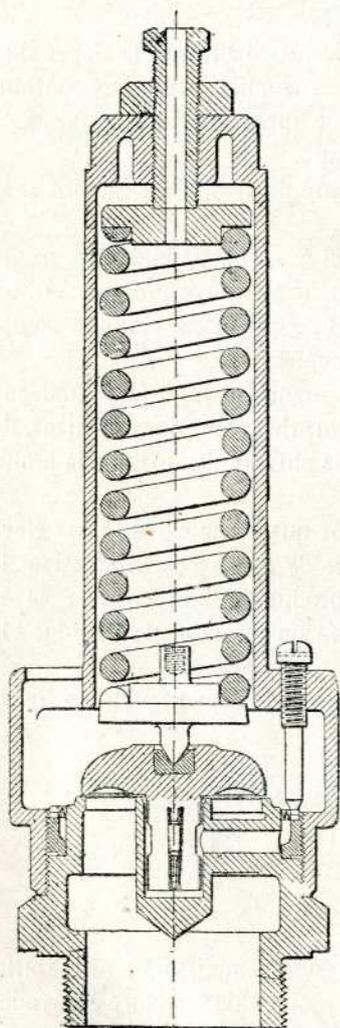


Fig. 75.

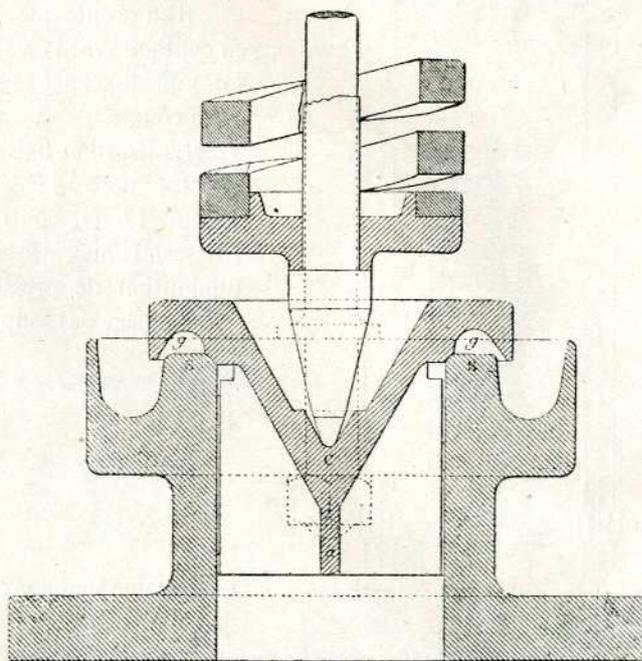


Fig. 76.

SOUPAPE ADAMS. — La soupape Adams (fig. 75 et 76)

est chargée directement par un ressort à boudin. Une petite gorge entoure la partie reposant sur le siège : dès que la soupape quitte son siège, la vapeur agit sur un plus grand diamètre et la soulève davantage ; aussi la soupape Adams débite-t-elle beaucoup de vapeur, avec un diamètre plus petit que les soupapes ordinaires. Mais souvent elle en laisse échapper trop, et ne se referme que lorsque la pression est descendue notablement au-dessous du timbre. Dès que le manomètre baisse de plus d'un demi-kilogramme avant la fermeture d'une soupape Adams, il convient de la faire rectifier dans les ateliers ; cette chute de pression ne doit pas dépasser un quart de kilogramme pour les soupapes neuves ou réparées.

SOUPAPE LETHUILLIER ET PINEL (fig. 77). — Cette soupape de sûreté peut se charger, soit au moyen d'un levier et contre-poids ou bien encore par des ressorts.

Lorsque la pression est sur le point d'atteindre sa limite maxima réglementaire, le clapet B se soulève d'abord faiblement, et suivant l'expression consacrée, la soupape « souffle », ce clapet continue à se soulever comme dans les soupapes ordinaires et la vapeur s'échappe librement dans l'atmosphère par l'espace annulaire *c* existant entre le cylindre A et le disque supérieur *b*.

La quantité de vapeur augmentant à mesure que le clapet se soulève, le cylindre se remplit et le phénomène suivant se produit.

Le cylindre A étant rétréci à sa partie inférieure par le rebord *a'*, une partie de la vapeur se trouve projetée sous le disque supérieur *b* du clapet B ce qui force celui-ci à continuer son mouvement ascensionnel.

Il en résulte que si le débit augmente, la surface du disque en contact avec la vapeur augmente proportionnellement, de sorte que le clapet se soulève de plus en plus jusqu'à la limite de sa course.

La pression baisse aussitôt que le clapet est assez élevé pour permettre le dégagement de l'excès de production de vapeur. L'effet contraire se produit de sorte que le clapet redescend doucement et d'une façon absolument identique à la diminution de pression.

Le siège des soupapes n'est pas forcément plan. La fig. 78

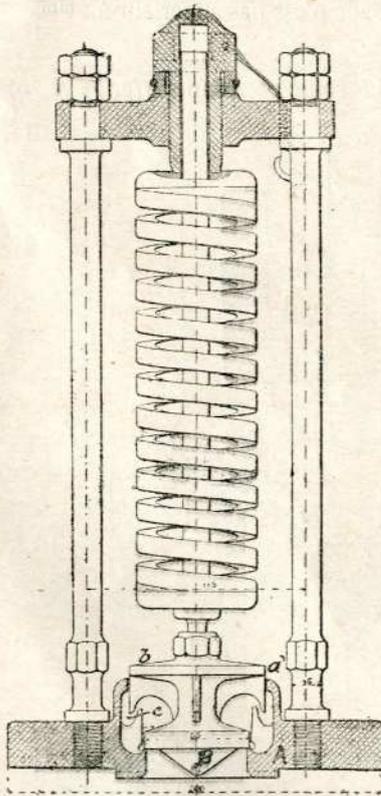


Fig. 77.



Fig. 78.

montre une soupape conique à gorge remplissant le même office que la précédente, mais le siège a plus de tendance à se voiler.

La fig. 79 montre l'état d'une soupape conique avec une levée *l*.

On déduit de cette figure les équations suivantes, donnant la section d'écoulement s de la vapeur pour un diamètre D et une levée l .

$$AB = l \sin 45^\circ = 0,707 l.$$

$$d = D + \left(2 \frac{a}{2}\right) = D + \frac{l}{2}$$

$$S = AB \pi \left(D + \frac{l}{2}\right) = 0,707 l \pi \left(D + \frac{l}{2}\right)$$

ou $S = 0,707 \pi D l + 0,707 \frac{\pi l^2}{2} = 2,22 D l + 1,11 l^2$

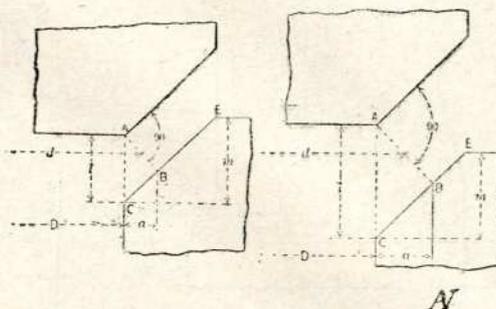


Fig. 79.

SOUPAPE DES NAVIRES DE COMMERCE. — La fig. 80 nous montre une soupape de sûreté du système de celle que nous avons étudiée et très employée sur les bateaux de commerce. Elle diffère de la précédente en ce qu'au lieu des tubes de garantie l , on a ici une bague en acier a dite bague de sûreté. Le bouchon b , qui forme serrage, appuie à bloc sur la bague calibrée à l'épaisseur voulue et poinçonnée sur ses deux faces. Parfois même un cadenas empêche le dévissage du bouchon b , comme le représente la fig. 81.

SOUPAPE AULD (fig. 82). — Dans cette soupape, la pression de la vapeur soulage d'abord la

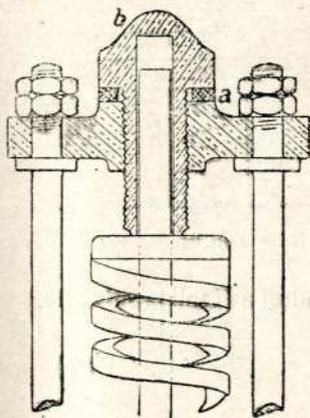


Fig. 80.

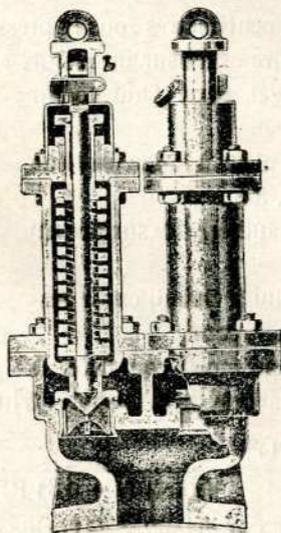


Fig. 81.

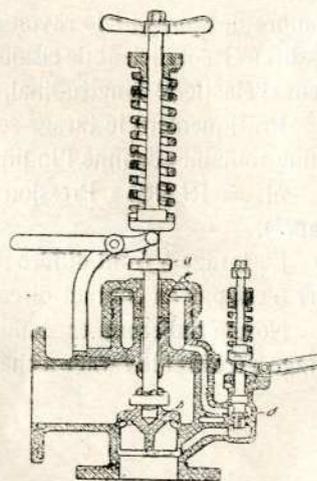


Fig. 82.

soupape b , si elle continue à augmenter, la soupape d envoie la vapeur dans le piston e . Celui-ci se soulève jusqu'à buter sur le collet o , ce qui permet une plus grande ouverture de la soupape b .



SOUPAPE DULAC (fig. 83).— Cette soupape se compose des organes de la soupape ordinaire et

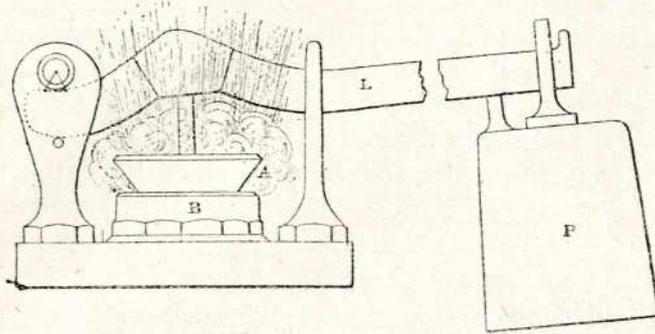


Fig. 83.

d'un compensateur formé d'un tronçon de cône A, dont la petite base forme la soupape et dont la grande émerge au-dessus d'un ajustage conique divergent B.

Quand la pression atteint dans le générateur la limite voisine de celle indiquée par le timbre, la soupape se soulève légèrement, puis, si cette pression augmente, le soulèvement s'accroît progressivement jusqu'à provoquer une ouverture suffisante

pour limiter la pression. Si rien ne modifie le régime du générateur, la soupape reste soulevée de la quantité nécessaire pour évacuer le volume de vapeur en excès.

Si la consommation augmente et si la production diminue, la soupape se ferme graduellement et la pression reste à la limite qui a précédé le soulèvement.

Il existe aussi des soupapes Dulac à échappement progressif qui sont recouvertes et dont le dégagement de vapeur a lieu latéralement par une tubulure que porte le couvercle.

TARAGE DES RESSORTS. — On emploie à l'atelier la formule empirique : $b = \frac{Pnr^3}{d^4G}$ dans laquelle b est la réduction de hauteur en centimètres sous la pression P kg. exercée sur le ressort ; n le nombre de spires ; r le rayon du cylindre extérieur du ressort en centimètres ; d le côté du carré du ressort ; G coefficient de cisaillement égal aux $\frac{2}{3}$ du coefficient d'élasticité longitudinal.

Pratiquement le tarage se fait sur place à l'aide du fléau d'une romaine, comme l'indique la fig. 84.

$\phi L = Rl$ ($R =$ Pression de la chaudière \times surface du clapet).

Le tarage à froid diffère peu de celui à chaud, car le ressort n'est pas en contact direct avec la vapeur.

Nous étudierons en conduite, d'une façon complète, le tarage à froid et le tarage à chaud. En partant de la formule d'Hugoniot, Indret a établi la suivante :

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{S}{0,0093 (1 + 0,83 P)} \quad (1)$$

$S =$ surface de grille en mètres carrés ; $D =$ diamètre de l'orifice en centimètres carrés ; $P =$ pression effective en kilog. par centimètre carré.

Cette formule donne : $\phi = \pi (25,5 + 144,5n)$. ϕ est le poids de vapeur en kilog. débité par seconde ; π est la section en mètres carrés de la soupape ; n la tension absolue en atmosphères.

Elle tient compte de la vitesse du fluide à l'état considéré.

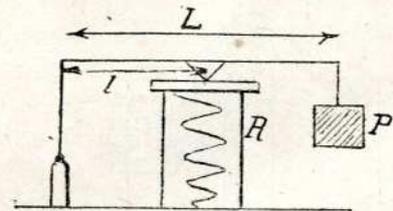


Fig. 84.



En posant : S = surface de grille en mètres carrés ; C = consommation en kilog. par mètre carré et par heure et en admettant une vaporisation de 8 kilog. d'eau par kilog. de charbon, on a :

$$\frac{8SC}{3600} = \frac{\pi D^2 b}{4 \times 10.000} (25,5 + 144,5 n)$$

Ce qui donne la formule (1) lorsque la hauteur *b* de la levée est le 1/40^e de D.

BOUCHONS FUSIBLES. — On a parfois besoin d'être averti d'un manque d'eau dans la chaudière. Dans ce cas, on peut se servir de bouchons fusibles faits d'alliages de plomb, antimoine et bismuth, placés dans les parties de la façade de la chaudière au-dessous desquelles l'eau ne doit pas descendre ; ces bouchons, quand la tôle chauffe trop, fondent, la vapeur sort, siffle et avertit le mécanicien. Enfin, en cas d'accidents, ils peuvent faire connaître si l'eau est descendue au-dessous des surfaces de chauffe. Ils ont la forme de petits troncs de cône allongés.

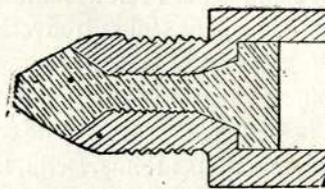


Fig. 85.

Parfois aussi on en place dans le ciel de foyer. Dans ce cas, si le bouchon fond, la vapeur éteint le feu et tout accident est évité. Ils ont, dans ce cas, la forme de la fig. 85.

SOUAPES D'ARRÊT ET DE COMMUNICATION (fig. 86 et 87). — Le tuyau qui amène la vapeur des chaudières communique avec chacune d'elles par une caisse à soupape. — Celle-ci est destinée à permettre d'interrompre à volonté l'écoulement et on la nomme *soupape d'arrêt*. — En outre, il arrive quelquefois que les diverses chaudières communiquent entre elles par un tuyautage que l'on peut aussi ouvrir ou fermer à l'aide de *souapes de communication*. — Ces diverses soupapes, sont en général construites sur le modèle de la fig. 87. — Une boîte en fonte ou en acier moulé A est fixée, par une bride BC, sur un orifice pratiqué sur la chaudière et dont le bord est doublé par une rondelle en tôle rivée *a*. — Une soupape conique en bronze S, s'applique sur un siège de même métal portant une douille qui sert de guide à la contre-tige E, et qui est incrusté dans la fonte de la boîte. — Une tige FG, filetée sur une partie de sa longueur, traverse le couvercle HK. — Dans les modèles anciens, le taraudage était fait sur la partie intérieure de la douille et était souvent mangé par la vapeur condensée. Dans le modèle nouveau, l'écrou est à l'extérieur rapporté dans un support de la tige. — Un presse-étoupes *b* fait l'étanchéité autour de FG ; la douille du couvercle est assez longue pour servir de guide, et pour que, dans

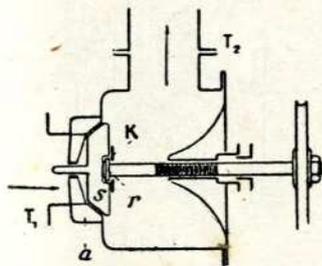


Fig. 86.

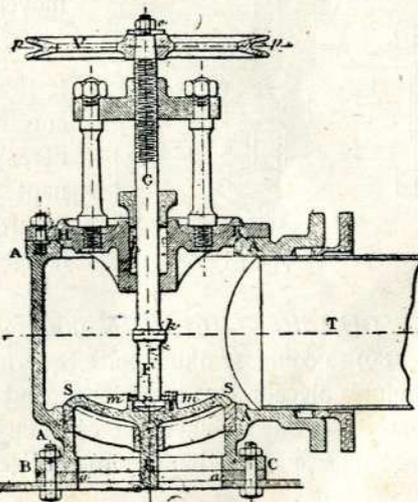


Fig. 87.



le modèle ancien, les filets de la vis ne rentrent pas dans le presse-étoupes. — La tige ne fait pas corps avec la soupape par rapport à laquelle elle peut tourner dans son logement ; elle est simplement maintenue en contact par deux demi-rondelles *m*, mises par-dessus un *champignon n* venu de forge avec elle. — La soupape n'est donc pas entraînée dans le mouvement de rotation et peut s'appliquer exactement sur son siège.

Elle est actionnée par un volant *V*, dans la gorge *p* duquel passe une chaîne sans fin qui l'entraîne par frottement en se coinçant dans cette gorge, et qu'on manœuvre du *parquet*. — Le mouvement est limité par le collet *k*. — Le volant n'est pas claveté sur la tige, mais simplement serré dans un logement conique par l'écrou *e*, afin que si la soupape est trop dure à décoller, on ne risque pas de briser la tige ; le volant seul se trouverait entraîné. — Enfin la vapeur s'échappe par le tuyau *T*, qui aboutit généralement à la boîte par un presse-étoupes, afin de permettre une libre dilatation. Il faut décoller la soupape d'arrêt avant qu'il ne se produise de vapeur, afin qu'elle ne se coince pas par la dilatation.

Les soupapes d'arrêt et de communication sont actuellement confectionnées en acier moulé ou en bronzes spéciaux : Roma, Delta, Hone, Diamant, etc., dont la résistance élastique $Re =$ de 12 à 15 kilog. par millimètre carré ; résistance à la rupture $R_1 =$ 25 à 35 kilog. ; allongement % = 18 à 20 %.

ROBINETS-VANNES. — On emploie différents modèles de robinets-vannes. Celui représenté (fig. 88) se compose d'une boîte en bronze portant deux tubulures *TT* situées dans le prolongement l'une de l'autre. Ces tubulures se terminent, à l'intérieur, par des surfaces dressées inclinées sur leur axe. Sur ces surfaces *SS* peuvent appuyer deux disques *D* en bronze manœuvrés par une tige filetée portant un écrou sphérique *E*. Celui-ci est muni de deux tourillons qui s'emmanchent dans des oreilles venues de fonte avec les disques.

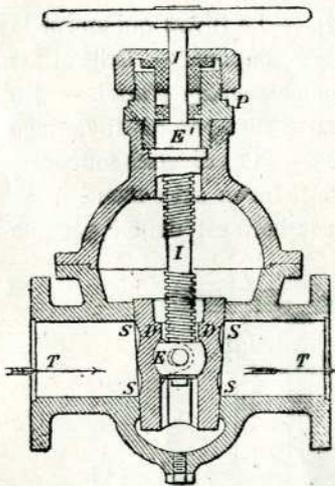


Fig. 88.

La tige passe dans un écrou en bronze *E'* fixé dans un évidement de la boîte par le presse-étoupes *P*. Elle se manœuvre au moyen d'un volant (1).

Manœuvre. — Supposons le robinet fermé ; si nous tournons la tige en sens inverse des aiguilles d'une montre, celle-ci s'élèvera entraînant avec elle l'écrou *E*. Mais ce dernier ne pouvant pas tourner, s'élèvera sur la tige *I* en entraînant avec lui les flasques *DD* qui monteront, par suite, plus vite que la tige *I*.

SOUPAPE THÉVENIN (dite robinet-boule). — Cette soupape (fig. 89) se compose d'une boîte *B* de forme sphérique munie de deux tubulures placées dans le prolongement l'une de l'autre. Celles-ci sont séparées par une cloison *ab* percée d'un trou que vient fermer une soupape *S* reliée, par une rondelle *o*, à une tige filetée.

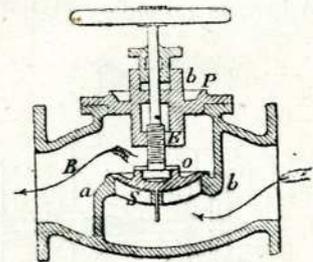


Fig. 89.

(1) Voir en fig. 96 une coupe avec vue en plan de cet appareil.

Cette tige se visse dans un écrou E, puis passe dans un presse-étoupes B ménagé au centre du plateau P fixé sur la boîte. On emploie parfois les modèles (fig. 90-91).

Vue du joint à émerillon qui relie la tige au clapet (fig. 92).

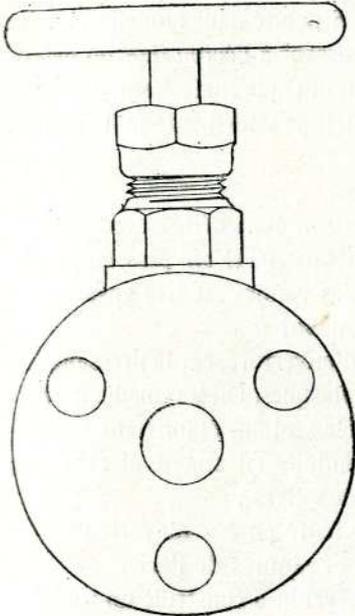


Fig. 90.

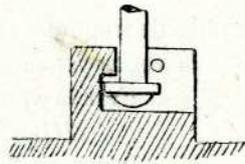


Fig. 92.

N. B. La vapeur doit tendre à soulever le clapet. Une goupille placée sur le côté (fig. 92) empêche la tige de sortir de son trou.

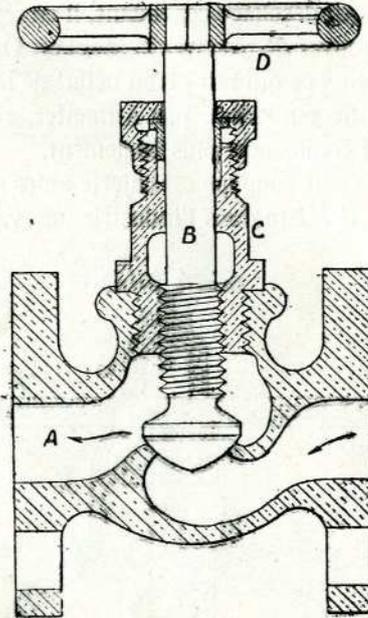


Fig. 91.

ROBINET-VANNE CIRON (dit peet-valve). — Cet appareil (fig. 93 et 94) sert également de soupape d'arrêt ou de communication. Il se compose d'une boîte en bronze portant deux tubulures TT dans le prolongement l'une de l'autre. L'interception est assurée au moyen de deux flasques circulaires ou elliptiques *aa'*, venant s'appliquer sur des parties bien dressées de la boîte.

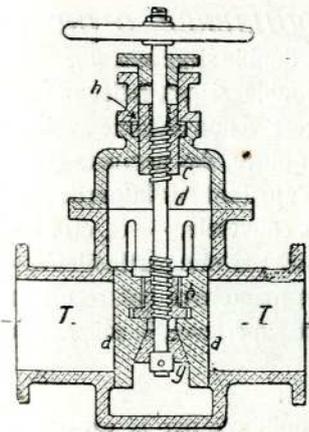


Fig. 93.

L'entraînement des flasques est assuré au moyen d'un écrou mobile *b*, et le mouvement est dû simultanément aux deux écrous *b* et *c* (l'écrou *c* étant fixe), et à la tige *d*. Celle-ci porte deux filetages égaux et de pas contraire, ce qui fait que, tandis que pour un tour de volant, les flasques, grâce à l'écrou *c*, ont monté d'une quantité égale au pas, l'écrou *b* ayant lui-même pendant ce temps monté de la même quantité, les flasques sont montées d'une quantité égale au double du pas. Le mouvement est ainsi considérablement accéléré, tant à la descente qu'à la montée.

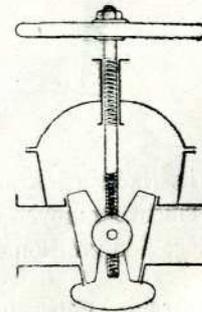


Fig. 94.

Sur la tige est claveté un coin *g* dont l'effet est d'appuyer énergiquement les flasques sur leur portage, lorsque à la fermeture on fait sur le volant un certain effort. On conçoit en effet qu'à ce moment les flasques descendant toujours plus rapidement que la tige (et par suite que le coin) viennent se bloquer sur ce dernier.

Au décollage cependant, il en résulte un inconvénient sérieux : la difficulté dans laquelle on peut se trouver de resserrer la soupape. On remédie à cet inconvénient en laissant à l'écrou fixe un peu de jeu en *b* ce qui fait qu'au début de la manœuvre cet écrou se trouve en quelque sorte immobilisé. La tige ne tend donc pas à monter, et le mouvement des flasques, fonction seulement de l'écrou *b*, peut commencer plus facilement.

Cette soupape est sujette à des ruptures lors de trop forts serrages.

Il existe dans l'industrie une vanne très en vogue par sa solidité, son étanchéité et sa sécurité, c'est la vanne Hopkinson. (*Voir plus loin*).

L'étanchéité des vannes est très grande ; on leur reproche cependant :

1° Difficulté d'ouverture, car la pression agit d'un seul côté des flasques. On y remédie à l'aide d'un tuyau de faible section, établissant la communication des conduits en amont et en aval ;

2° Grippage des tiges ;

3° Fermeture lente en cas d'avarie ;

4° Corrosions et piqûres de l'acier.

La maison Thévenin a construit un robinet-vanne dans lequel la rotation de l'écrou d'entraînement au commencement de l'ouverture découvre un orifice qui permet l'écoulement de la vapeur d'une face à l'autre des flasques. (*Voir plus loin*).

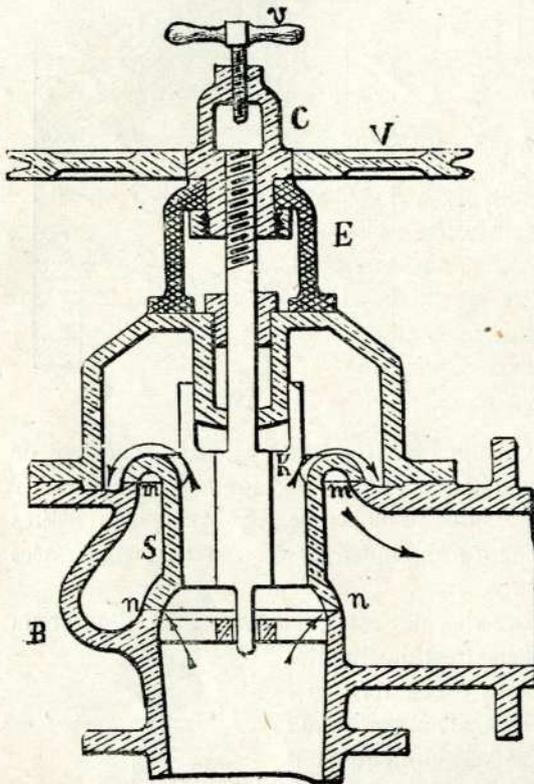


Fig. 95.

SOUPAPE ÉQUILIBRÉE D'INDRET (fig. 95). — B, boîte à double siège *mm, nn*.

S, soupape à double sièges, reliée par des nervures K et une tige T venue de fonte avec elle. La soupape porte, en outre, des nervures qui lui servent de guide en s'ajustant sur la partie polygonale extérieure du couvercle. — C, croisillon guidant la tige terminée par une partie fileté.

E, étrier fixé sur le couvercle par une bride boulonnée. — V, volant de manœuvre qui reçoit son mouvement au moyen d'une chaîne. — *v*, vis-frein appuyant, par la partie supérieure, la soupape sur son siège à la position de fermeture.

NOTA. — Cette soupape a l'avantage d'être facile à ouvrir, étant équilibrée par la vapeur qui l'appuie sur son siège d'une part et agit, d'autre part, en sens contraire.

ROBINET-VANNE MULLER

(Coupe longitudinale et coupe en plan).

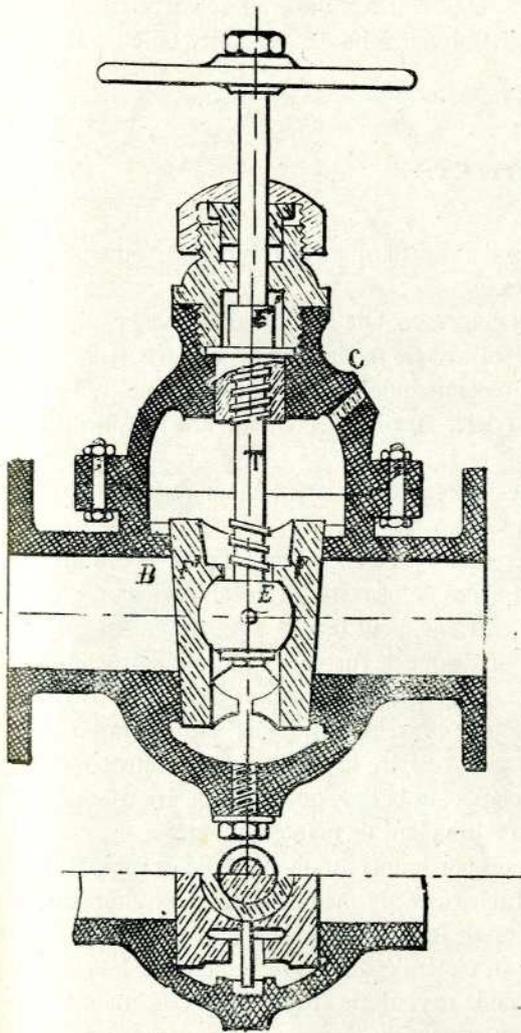


Fig. 96.

ROBINET-VANNE THÉVENIN

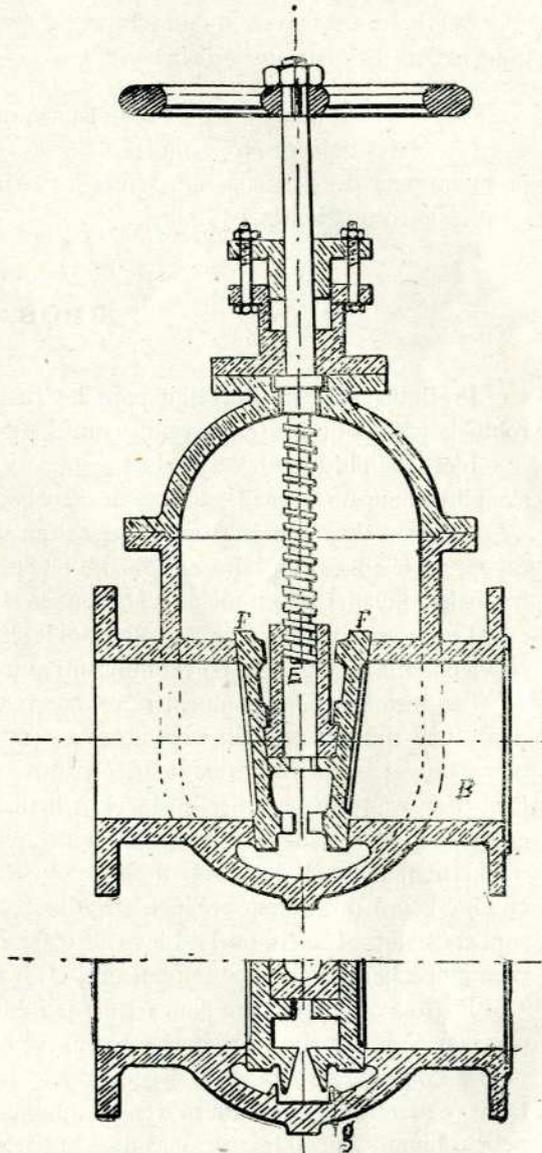


Fig. 97.

ROBINET-VANNE THÉVENIN (fig. 97). — Ce robinet présente beaucoup d'analogie avec les vannes Muller et Ciron.

La vis ne possède qu'un seul filet et la tige porte une embase emprisonnée entre le couvercle et la boîte à étoupes.

La vis ne peut avoir qu'un moment de rotation. — L'écrou E entraîne les deux flasques FF, guidées dans des nervures *g* de la boîte B.

NOTA. — Un index placé à l'extérieur indique les positions *fermé* ou *ouvert*.

Les boîtes doivent être renforcées par des nervures extérieures. Elles sont construites en bronze ordinaire pour des pressions inférieures à 15 kilog., et en bronze à haute résistance ou en acier pour les pressions supérieures à 15 kilog.

GROS ROBINETS

Pratiquement, on n'utilisait pour les tuyauteries de vapeur que les robinets à soupape et les robinets-vannes du genre des vannes plus haut décrites.

L'organe obturateur du robinet à soupape est un clapet, mobile à l'aide d'une vis, et qui vient s'appliquer sur un siège : les formes de clapets varient suivant les modèles et les constructeurs.

Le corps du robinet est en fonte, ce qui est peu recommandable, ou, mieux, en acier. Le siège est rapporté : il est en bronze ordinaire ou spécial, en acier au nickel, etc., suivant l'application du robinet. Le clapet est en même métal que le siège.

Le manque d'étanchéité se produira si le siège ou le clapet se gauchissent à leur surface de contact, ou viennent à ne plus bien porter l'un sur l'autre, par places.

Ces inconvénients prennent naissance pour différentes causes. D'abord, il peut se produire des dilatations qui font travailler les sièges anormalement et les déforment. Ensuite, la vapeur, par elle-même ou par les particules de tartre ou autres qu'elle entraîne, peut user le siège radialement. Puis, la vapeur peut faire tourner le clapet, à la manière d'un disque de turbine, s'il est mal attaché ou mal guidé : enfin, on peut, pour fermer le robinet, exercer des efforts trop importants (volant de trop grand diamètre, manœuvre de ce volant par secousses ou avec une barre faisant levier, etc.). Il faudra donc, en choisissant un type de robinet, regarder comment peut se faire la dilatation, comment les sièges sont construits et sertis, quel est le mode d'attache du clapet sur la tige, quelles dispositions sont prises pour empêcher le clapet de tourner, quel est le diamètre du volant de manœuvre, etc.

L'effort qu'il faut faire pour fermer le robinet est proportionnel au diamètre de ce robinet et à la pression de la vapeur. Cet effort est souvent considérable. C'est le même effort qu'on doit produire pour décoller un clapet de son siège au cas où la pression de la vapeur s'exerce au-dessus de ce clapet. Dans ce second cas, on a un moyen de diminuer l'effort, c'est d'égaliser préalablement, à l'aide d'un petit robinet by-pass, les pressions dans la partie aval de la tuyauterie et dans la partie amont.

Le montage du robinet avec arrivée de vapeur en dessus du clapet n'est pas recommandé en général, parce qu'il est défavorable au point de vue de l'étanchéité. Pourtant, les robinets de barrage, si nombreux dans les tuyauteries, peuvent recevoir la vapeur tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. Il n'est pas rare qu'on ait de grands ennuis et même des accidents pour cette cause.



Comme on ne saurait songer à mettre deux robinets en série, tête bêche, il faut recommander d'apporter les plus grands soins au choix des types de robinets.

ROBINET SCHAEFFER ET BUDENBERG (fig. 98). — C'est un robinet, genre robinet à soupape, pouvant recevoir, sans inconvénient, la vapeur de l'un ou l'autre côté, l'obturateur étant presque équilibré. Comme, d'autre part, la vapeur passe par deux orifices de section réduite et en parallèle, l'effort de décollage est sensiblement la moitié de ce qu'il serait pour un robinet à soupape ordinaire de même diamètre.

Pour ouvrir un robinet à soupape, il suffit de lever le clapet d'une quantité égale au quart du diamètre et, pour les robinets-vannes, il faut lever l'obturateur *de une fois le diamètre*, la manœuvre de ces derniers est donc plus longue. La pression sur les obturateurs est, à égalité de diamètres, à peu près la même dans les deux cas, mais, dans le cas de la vanne, le décollage est moins dur, puisqu'il ne faut vaincre que l'effort de frottement.

Dans les robinets-vannes, l'espace entre les deux sièges parallèles est, lorsque le robinet est en service, dans les conditions nécessaires pour recueillir toutes les boues de la canalisation, lesquelles vont gêner la fermeture du robinet. Les remous de la vapeur dans cet espace abîment aussi beaucoup les sièges, ce sont là d'assez graves défauts.

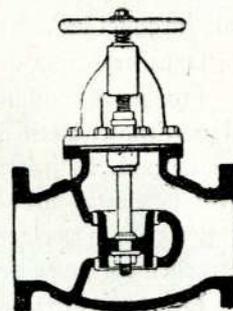


Fig. 98.

ROBINET FERRANTI-HOPKINSON. — Le robinet Ferranti-Hopkinson (fig. 99) mérite une mention toute spéciale, parce qu'il est étudié pour atténuer un certain nombre de ces inconvénients.

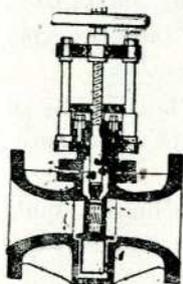


Fig. 99.

C'est un robinet à sièges parallèles dont l'obturateur est placé au milieu de deux cônes convergent et divergent. Cet obturateur a un diamètre moitié de celui de la canalisation. En dessous, se trouve une bague, qui monte avec l'obturateur et vient, lorsque le robinet est ouvert, boucher la solution de continuité qui existe entre les deux sièges. L'effort pour ouvrir le robinet est le quart de ce qu'il serait avec un robinet ordinaire, et la présence d'un cône divergent suivant un cône convergent, d'angles convenables, assure un débit de vapeur équivalent à celui qui correspondrait à un robinet ordinaire.

En dehors des robinets proprement dits, qui ont besoin d'être manœuvrés pour ouvrir ou fermer le passage de la vapeur, il existe toute une série d'appareils automatiques, dont l'emploi est très recommandable, et qu'on nomme *clapets d'arrêt de vapeur*.

APPAREILS D'ARRÊT AUTOMATIQUE DE VAPEUR

Il est réglementaire, lorsque deux ou plusieurs appareils distincts sont munis de tuyautages communs, avec prises de plus de 30 centimètres de diamètre intérieur, de munir ces appareils de soupapes devant se fermer automatiquement en cas d'avarie d'un appareil, pour éviter que la vapeur de l'autre appareil ne puisse s'échapper à la suite de cette avarie.

