

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

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

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

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

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

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

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

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

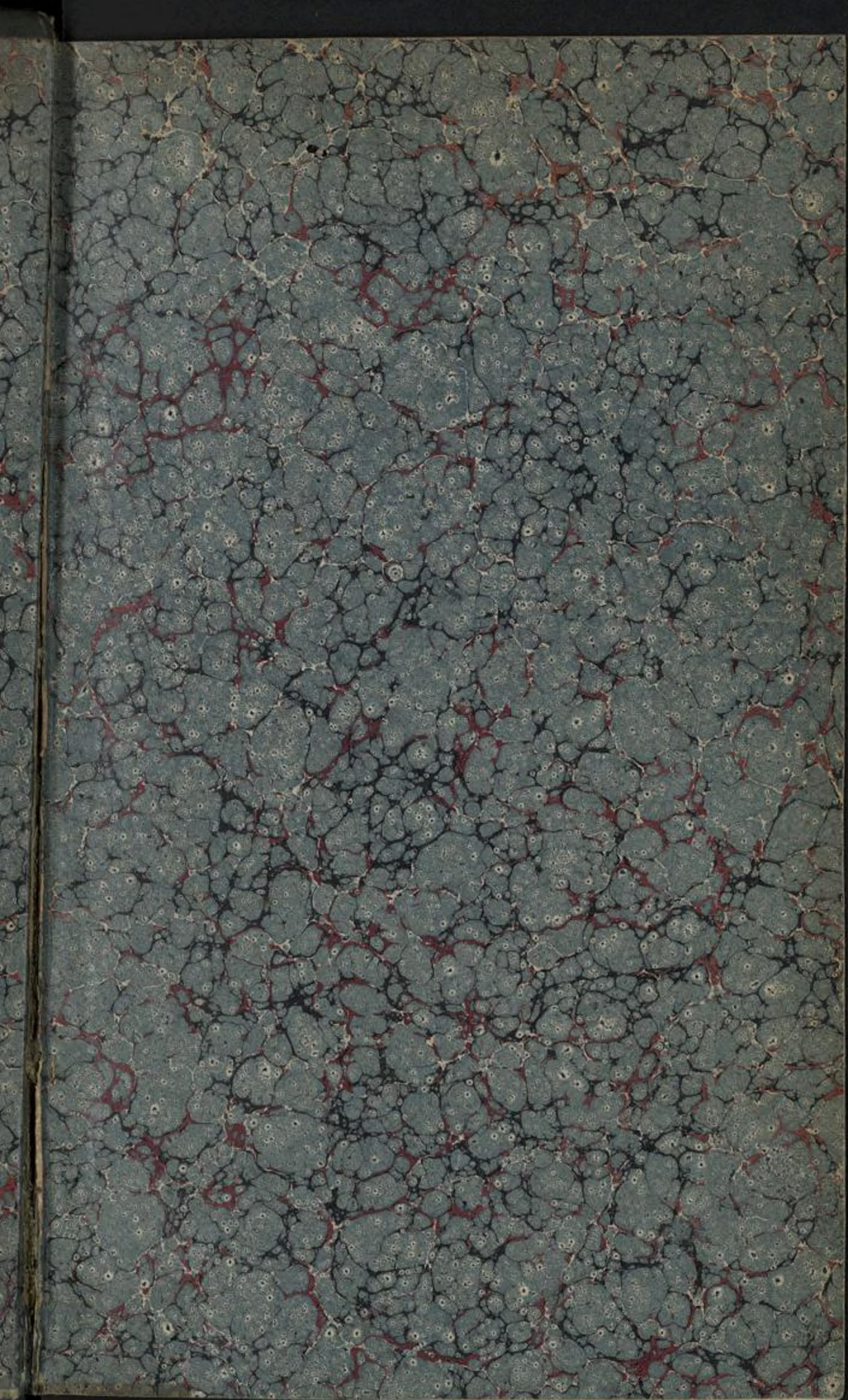
5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

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

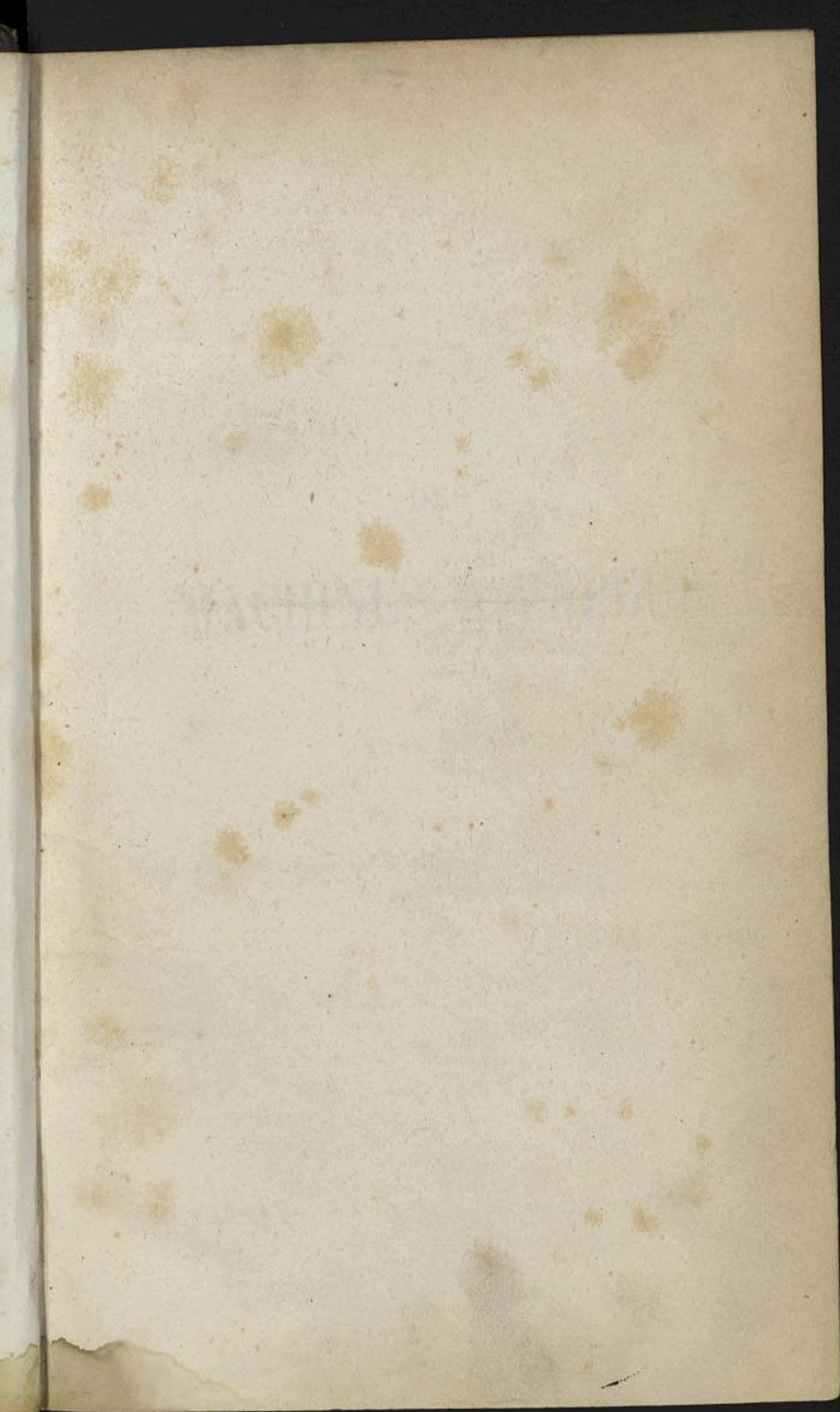
NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

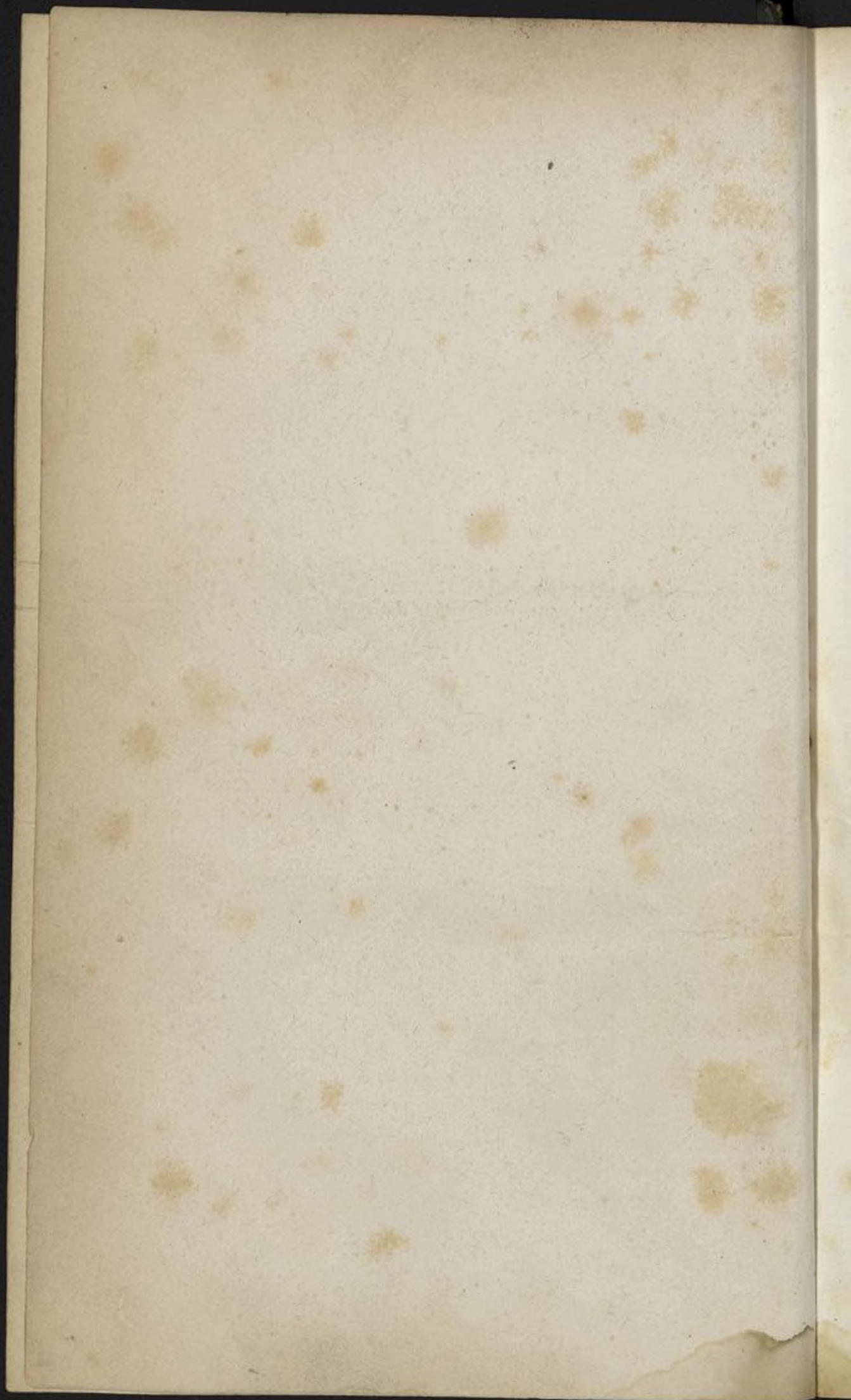
Auteur(s)	Morin, Arthur (1795-1880)
Titre	Des machines à vapeur. Tome premier, Production de la vapeur
Adresse	Paris : Librairie de L. Hachette et Cie, 1863
Collation	1 vol. (V-546 p.-6 f. de pl. depl.) : ill. ; 22 cm
Nombre de vues	574
Cote	CNAM-BIB 8 Dy 12 (10)
Sujet(s)	Machines à vapeur Vapeur, Technique de la
Thématique(s)	Histoire du Cnam Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Note	La planche 2 est manquante.
Langue	Français
Date de mise en ligne	20/05/2021
Date de génération du PDF	06/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/04648163X
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8DY12.10





2y 12





DES
MACHINES A VAPEUR

TOME PREMIER

PARIS. — IMPRIMERIE DE CH. LAHURE
Rue de Fleurus, 9

*Le T. a n'a pas
été publié*

8^o Dy 12(10)

MÉCANIQUE PRATIQUE

DES

MACHINES A VAPEUR

PAR

ARTHUR MORIN

Membre de l'Institut
Directeur du Conservatoire impérial des Arts et Métiers

ET

H. TRESCA

Sous-Directeur et Professeur de mécanique appliquée
au Conservatoire impérial des Arts et Métiers

TOME PREMIER

PRODUCTION DE LA VAPEUR

PARIS

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^{ie}

BOULEVARD SAINT-GERMAIN, N^o 77

1863

82 Df 15

MÉCANIQUE PRATIQUE

DES

MACHINES A VAPEUR

ARTHUR MORIN

Professeur de Mécanique à l'École Polytechnique
 Directeur de l'École de Mécanique à l'École de Mécanique

H. TRESCA

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées
 au Corps des Ingénieurs des Arts et Métiers

TOME PREMIER

PRODUCTION DE LA VAPEUR

PARIS

LIBRAIRIE DE L'INCHETTE ET C.

1863



PRÉFACE.

Depuis l'année 1842, où je publiai les *Leçons de mécanique pratique sur les machines à vapeur*, que j'avais professées au Conservatoire des arts et métiers, des circonstances diverses et les devoirs de mon service militaire m'ont continuellement empêché de me livrer aux études et aux recherches nombreuses qui eussent été nécessaires pour tenir cette partie de l'enseignement de la mécanique appliquée au niveau des progrès de la science et de l'industrie. Aussi, quoique l'édition de cet ouvrage fût épuisée depuis plusieurs années, je n'aurais, de longtemps, été à même d'en publier une seconde digne d'être offerte aux ingénieurs, si je n'avais trouvé, dans mon successeur à la chaire de mécanique appliquée, M. H. Tresca, sous-directeur du Conservatoire des arts et métiers, le collègue le plus dévoué et le plus capable de mener à bonne fin ce travail considérable et difficile.

Cédant à ma prière, que des motifs d'une délicatesse exagérée l'avaient d'abord porté à rejeter, il a consenti à se charger de la rédaction complète de l'édition que nous publions aujourd'hui en commun.

Ses nombreuses recherches, les renseignements qu'il a su recueillir et discuter, les expériences variées qu'il a exécutées, ont fait de cette édition un travail presque entièrement neuf, dans lequel ma part personnelle se trouve réduite au cadre général de l'ouvrage et à quelques parties spéciales qui auront même reçu, de sa main, d'importants développements.

Si donc mon nom figure avec le sien en tête de cette édition, c'est pour moi un devoir, en même temps qu'une satisfaction de cœur, de déclarer qu'elle est, pour la plus grande partie, l'œuvre de mon savant collaborateur et ami, M. Tresca. Les ingénieurs y reconnaîtront, sans peine, les traces de son esprit d'investigation infatigable et de critique éclairée, ainsi que celles de la méthode qu'il sait apporter à tous ses travaux.

Général A. MORIN.

INTRODUCTION.

La machine à vapeur est devenue, depuis le commencement de ce siècle, d'un usage si général, sa construction alimente aujourd'hui de si nombreux ateliers, qu'elle a été l'objet d'un grand nombre de modifications; chacun de ses organes a reçu des changements importants; beaucoup de moyens nouveaux ont été proposés, soit dans l'ensemble, soit dans les détails; et c'est à peine si l'on peut, au milieu de toutes ces indications, distinguer ce qui constitue un progrès réel de ce qui n'est souvent que la reproduction d'idées déjà émises et depuis longtemps abandonnées.

Nous nous sommes proposé, dans l'ouvrage dont nous publions aujourd'hui le premier volume, d'examiner, dans un ordre méthodique, et surtout en nous appuyant sur les faits les mieux constatés, l'influence que peut exercer, sur l'effet général, chacune des parties dont se compose l'ensemble d'une machine à vapeur.

Le travail développé dans les machines à vapeur a sa source dans les phénomènes mécaniques que la chaleur manifeste principalement par le changement d'état moléculaire de l'eau contenue dans la chaudière; et c'est peut-être dans les moyens de produire la vaporisation qu'il convient de chercher les améliorations les plus importantes, introduites ou à introduire dans l'établissement des chaudières à vapeur. C'est pour cette raison que nous avons dû entrer dans de grands détails sur les dispositions diverses qu'on peut adopter pour ces chaudières.

Dans le premier volume de ces études, nous considérons surtout les chaudières à vapeur dans leur mode général de

fonctionnement et dans les lois physiques qui y président, nous proposant de revenir, sur les détails de construction et d'utilisation, dans des chapitres spéciaux dont voici la désignation :

VII. *Construction et entretien des chaudières à vapeur.*

VIII. *Appareils de sûreté.*

IX. *Appareils d'alimentation.*

X. *Séchage et surchauffage de la vapeur.*

XI. *Incrustation des chaudières à vapeur.*

XII. *Explosion des chaudières à vapeur.*

XIII. *Construction, entretien et conduite des fourneaux.*

XIV. *Cheminées et autres moyens de produire le tirage.*

XV. *Suppression de la fumée.*

Après avoir ainsi passé en revue les questions les plus importantes relativement à la production de la vapeur, nous nous occuperons de la machine proprement dite, en nous attachant, de la même manière, à étudier les faits en eux-mêmes avant d'examiner séparément les différentes parties qui constituent la machine complète.

Il ne suffit pas de produire la vapeur dans les meilleures conditions, il faut aussi savoir en tirer le parti le plus utile. A ce point de vue, la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur nous fournira de précieux enseignements, et nous pourrons comparer, sous ce rapport, l'emploi de la vapeur à celui des autres fluides élastiques, soit qu'on les chauffe directement comme dans les machines à air chaud, soit qu'on détermine leur expansion par des réactions chimiques, par la combustion directe, ou seulement par le mélange des gaz brûlés.

Nous comparerons entre eux les différents systèmes de machines à gaz, et nous reconnaitrons qu'aucune d'elles ne

permet d'utiliser, dans l'état actuel des choses, qu'une minime portion de la chaleur dépensée, la plus grande partie de cette chaleur étant conservée, sans utilité réelle, pour l'effet mécanique, par les fluides auxquels on l'a communiquée.

Les matériaux de ce long travail sont tous préparés et nous avons lieu de croire que les différentes parties, dont il se compose, pourront être publiées sans interruption.

INTRODUCTION

Le premier d'entre eux, dans l'art de choisir, de faire un
bonne portion de la chaleur du soleil, le plus grand de
de cette chaleur étant conservée, sans être perdue, pour l'usage
selon le besoin, par les fluides auxquels on a communiqué
Les matériaux de ce long travail sont tous pures et
nous avons bien de croire que les divers articles dont il
se compose, pourront être publiés sans interruption.

Le second d'entre eux, dans l'art de choisir, de faire un
bonne portion de la chaleur du soleil, le plus grand de
de cette chaleur étant conservée, sans être perdue, pour l'usage
selon le besoin, par les fluides auxquels on a communiqué
Les matériaux de ce long travail sont tous pures et
nous avons bien de croire que les divers articles dont il
se compose, pourront être publiés sans interruption.

Le troisième d'entre eux, dans l'art de choisir, de faire un
bonne portion de la chaleur du soleil, le plus grand de
de cette chaleur étant conservée, sans être perdue, pour l'usage
selon le besoin, par les fluides auxquels on a communiqué
Les matériaux de ce long travail sont tous pures et
nous avons bien de croire que les divers articles dont il
se compose, pourront être publiés sans interruption.

Le quatrième d'entre eux, dans l'art de choisir, de faire un
bonne portion de la chaleur du soleil, le plus grand de
de cette chaleur étant conservée, sans être perdue, pour l'usage
selon le besoin, par les fluides auxquels on a communiqué
Les matériaux de ce long travail sont tous pures et
nous avons bien de croire que les divers articles dont il
se compose, pourront être publiés sans interruption.

MACHINES

A VAPEUR.

CHAPITRE PREMIER.

GAZ ET VAPEURS.

I. Propriétés des vapeurs.

1. *Les corps se présentent sous trois états différents.* — On a vu, dans la première partie des *Leçons de mécanique*, que la matière affecte différents états que l'on désigne sous les noms d'état solide, d'état liquide et d'état gazeux.

Un corps est solide lorsqu'il conserve habituellement une forme déterminée, qu'il reprend lorsqu'il a été momentanément déformé, sous l'influence d'une action mécanique extérieure.

Il est liquide, toutes les fois qu'il se moule sur la forme du fond et des parois latérales des vases dans lesquels il est contenu, et que sa surface supérieure prend, sous l'action de la pesanteur, une forme plane ou à peu près plane.

Il est gazeux enfin, lorsqu'il tend à remplir en totalité le vase qui le renferme et contre les parois duquel il exerce, dans tous les sens, une pression plus ou moins grande.

On rend compte de ces propriétés en disant que les corps peuvent exister sous des états moléculaires différents.

Dans les corps solides, les molécules semblent retenues les unes par les autres, et c'est le résultat de cette attraction mutuelle qui détermine la cohésion.

Dans les liquides, cette cohésion n'existe pas ou ne se manifeste qu'à un très-faible degré.

On dit, dans ce dernier cas, que le liquide est plus ou moins visqueux, et la viscosité peut être alors considérée comme la limite de la cohésion.

Dans les gaz, cette action mutuelle des molécules est répulsive au lieu d'être attractive, puisqu'elles tendent constamment à s'éloigner les unes des autres et qu'elles obéissent en effet à cette tendance, toutes les fois qu'une cause extérieure ne s'oppose pas à cet écartement.

On voit, par ces seules indications, que la limite est bien tranchée entre les gaz et les autres corps, mais qu'il n'en est pas de même entre les solides et les liquides, puisque, sous le nom de cohésion ou de viscosité, on trouve, chez les uns et chez les autres, bien qu'à des degrés très-différents, la propriété attractive, qui est surtout manifeste chez les solides. On rencontre en effet certains corps qui ne sont précisément ni solides, ni liquides, en ce qu'ils s'affaissent sous leur propre poids, sans se mouler autrement que sur le fond des vases qui les renferment.

Les graisses et d'autres substances analogues sont dans ce cas, et l'on ne saurait dire, sans incertitude, si l'on doit les considérer comme des liquides d'une viscosité très-grande, ou comme des solides doués d'une très-faible cohésion.

Les matières pulvérulentes se conduisent à peu près comme les liquides, en ce qu'elles se moulent suivant les formes des vases qui les renferment; mais les grains dont elles se composent éprouvent aussi quelques difficultés à se déplacer les uns par rapport aux autres, et on ne les amène à présenter une surface plane, à la partie supérieure, qu'en les agitant fortement, ou mieux encore en les mélangeant avec un liquide, qui, par son interposition entre les grains, en facilite beaucoup les déplacements relatifs.

2. *Caractères des gaz.* — Au point de vue de l'action mécanique fournie par la vapeur, ce sont surtout les propriétés des gaz qui nous intéressent, et l'on peut les résumer d'une manière suffisamment caractéristique, en disant qu'ils sont éminemment compressibles et extensibles. Ils se compriment en effet jusqu'à pouvoir occuper des volumes qui ne sont qu'une fraction très-petite de leur volume primitif, et à l'inverse, l'on ne connaît pas de limite au delà de laquelle le volume d'une petite quantité de gaz ne puisse être porté.

Les solides et les liquides sont certainement compressibles, mais à un degré beaucoup moindre, et les augmentations de volume qu'ils peuvent prendre, dans diverses circonstances, particulièrement sous l'action de la chaleur, sont toujours très-faibles.

La compressibilité des gaz n'est pas indéfinie comme paraît l'être leur faculté d'expansion. Plusieurs de ceux que l'on était habitué à considérer comme des gaz permanents ont été liquéfiés sous l'action de pressions considérables, mais ils reprennent, à la température ordinaire, la forme gazeuse, aussitôt que cette pression cesse d'agir.

3. *Distinction entre les gaz et les vapeurs.* — Certains liquides peuvent, sous l'influence de circonstances déterminées, prendre l'état gazeux, et, sous cette nouvelle forme, on les désigne plus particulièrement sous le nom de vapeurs.

Les vapeurs sont donc des gaz qui se forment pour ainsi dire sous nos yeux, par un simple changement de l'état moléculaire des liquides aux dépens desquels elles se développent. Elles reprennent facilement l'état liquide sous l'influence de circonstances inverses de celles qui déterminent la vaporisation.

On conserve plus particulièrement le nom de gaz aux fluides aériformes qui n'éprouvent pas, dans les circonstances ordinaires, ces modifications dans leur état moléculaire.

La vaporisation des liquides se produit plus spécialement à une température particulière pour chacun d'eux, et,

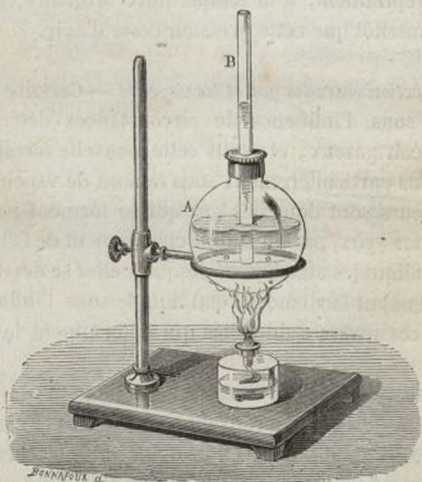
dans le voisinage des conditions sous l'action desquelles elle a lieu, les vapeurs formées présentent en général de grandes anomalies par rapport aux lois générales que nous étudierons bientôt.

Dans toutes les autres conditions les vapeurs se comportent comme des gaz, et c'est pour ce motif que nous nous occuperons en premier lieu de ceux-ci, quant à l'étude de leurs propriétés.

Ces gaz *permanents* peuvent être amenés pour la plupart à l'état liquide, dans certaines conditions particulières; sans qu'il soit nécessaire de les faire changer d'état, ils produisent d'ailleurs des actions mécaniques en tout comparables à celles des vapeurs. Leur étude est donc pour nous importante, et elle nous offrira cet avantage qu'elle se trouve dégagée de certaines complications particulières à l'étude des propriétés des vapeurs.

4. Principales propriétés qui intéressent l'étude des machines à

Fig. 1.

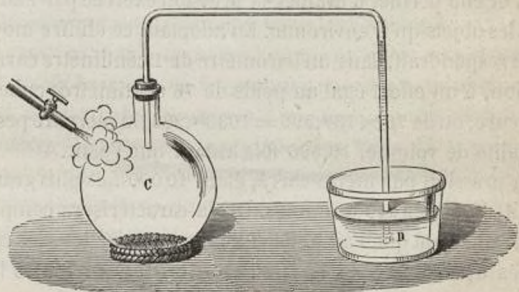


vapeur. — Si l'on chauffe de l'eau dans un vase fermé A, et muni

d'un tube B, plongeant dans le liquide que ce vase renferme (fig. 1), on verra que la vapeur expulse une certaine quantité d'eau, qu'elle élève dans ce tube. Il y a donc, dans ces circonstances, développement d'une certaine quantité de travail par la transformation du liquide en vapeur.

Si, lorsqu'un vase C (fig. 2) est rempli de vapeur, on vient à le refroidir, tout en le mettant en communication, par un tube

Fig. 2.



D, avec de l'eau, cette eau se précipitera dans le vase, bien qu'elle puisse être placée à un niveau moins élevé; il y a donc encore développement d'une certaine quantité de travail par le retour d'une certaine quantité de vapeur à l'état liquide.

Dans l'un et l'autre cas, ce travail dépend de l'augmentation ou de la diminution du volume de la vapeur, et de la hauteur à laquelle le liquide a été élevé.

Cette hauteur varie avec ce que l'on appelle la tension de la vapeur, qui elle-même change avec la température.

Il faut donc apprendre à connaître, dans toutes les circonstances, la tension et le volume d'une quantité donnée de vapeur; il n'est pas moins important de savoir déterminer la quantité de combustible nécessaire pour obtenir ce résultat.

C'est sous ces divers points de vue que nous étudierons les propriétés des gaz et des vapeurs, de manière à mettre toujours en présence la tension du gaz, son volume, et la quan-

tité de combustible nécessaire à ces variations de tension et de volume. C'est même dans cet ordre que nous poursuivrons l'étude des propriétés des gaz.

5. *De la pression atmosphérique et de sa mesure.* — Dans le baromètre, l'action de l'atmosphère maintient le niveau du mercure dans le tube à une certaine hauteur au-dessus du niveau du mercure dans la cuvette.

Cette hauteur est en général peu différente de 76 centimètres, et elle permet d'évaluer la pression exercée par l'air sur tous les objets qu'il environne. En adoptant ce chiffre moyen il correspondrait, dans un baromètre de 1 centimètre carré de section, à un effort égal au poids de 76 centimètres cubes de mercure, ou de $76 \times 13^{\text{er}}, 596 = 1033^{\text{er}}, 296$, le mercure pesant, à égalité de volume, 13,596 fois autant que l'eau.

La pression par mètre carré, étant 10 000 fois plus grande, serait de 10 332 960 grammes. On la caractérisera complètement en disant que l'air agit habituellement sur tous les corps placés à la surface de la terre en exerçant sur toutes leurs faces une pression de

	10 333 kilogrammes par mètre carré,
ou de	103 ^k ,33 par décimètre carré,
ou de	1 ^k ,033 par centimètre carré.

Cette dernière valeur est extrêmement commode, en ce que, dans les évaluations approchées, on peut simplement dire que la pression de l'atmosphère équivaut à un effort de 1 kilogramme par centimètre carré.

Il doit être bien compris d'ailleurs que cette pression est tantôt plus grande, tantôt plus petite, sans toutefois que les variations puissent avoir, au niveau de la mer, une influence bien sensible, dans les applications que l'on pourra faire de cette valeur moyenne.

En Angleterre, on estime les pressions en livres par ponce carré.

La livre anglaise vaut 0^k,453.

Le ponce carré vaut 0^m,000645.

Pour établir la concordance entre les deux modes d'évaluation, il suffit de faire observer que 1 livre par pouce carré équivaut à $0^k,453$ par $0^{m},000645$ ou à

$$\frac{0,453}{0,000645} = 702^k,82 \text{ par mètre carré.}$$

La pression de 1 livre par pouce carré équivalant à $702^k,82$ par mètre carré, on voit que l'unité anglaise est plus petite que notre *atmosphère* dans le rapport de $702,82$ à 10330 , et qu'elle ne représente par conséquent que $0^{st},068$.

La pression d'une *atmosphère* équivaut à $14^{liv},70$ par pouce carré; mais il est bon de faire remarquer dès à présent qu'en ce qui concerne les machines à vapeur, on ne compte en Angleterre les pressions que déduction faite de la pression atmosphérique. En France, on estime quelquefois les pressions en centimètres de mercure, auquel cas il faut diviser le nombre de centimètres par 76 pour évaluer la pression en atmosphères ou fractions d'atmosphère.

1^{re} TABLE DE CONCORDANCE ENTRE LES DIFFÉRENTES ÉVALUATIONS
D'UNE MÊME PRESSION.

Pressions en atmosphères.	Pressions en centimètres de mercure.	Pressions en livres anglaises par pouce carré.
0,10	7,6	1,469793
0,20	15,2	2,939586
0,30	22,8	4,409379
0,40	30,4	5,879172
0,50	38,0	7,348965
0,60	45,6	8,818758
0,70	53,2	10,288551
0,80	60,8	11,758344
0,90	68,4	13,228138
1,00	76,0	14,697931
1,50	114,0	21,046896
2,00	152,0	29,395862
2,50	190,0	36,744827
3,00	228,0	44,093793
3,50	266,0	51,442758
4,00	304,0	58,791724
4,50	342,0	66,140689
5,00	380,0	73,489655
6,00	456,0	88,187586
7,00	532,0	102,885517
8,00	608,0	117,583448
9,00	684,0	132,281379
10,00	760,0	146,979311

2° TABLE DE CONCORDANCE ENTRE LES DIFFÉRENTES ÉVALUATIONS
D'UNE MÊME PRESSION.

Pressions en centimètres de mercure.	Pressions en atmosphères.	Pressions en livres anglaises par pouce carré.
1	0,01316	0,193393
2	0,02631	0,386786
3	0,03947	0,580179
4	0,05263	0,773572
5	0,06579	0,966965
6	0,07894	1,160358
7	0,09210	1,353751
8	0,10526	1,547144
9	0,11842	1,740537
10	0,13158	1,933934
20	0,26316	3,867868
30	0,39474	5,801802
40	0,52631	7,735736
50	0,65789	9,669670
60	0,78948	11,603604
70	0,92105	13,537538
76	1,00000	14,697931
80	1,05263	15,471472
90	1,18421	17,405406
100	1,31579	19,339342
200	2,63158	38,678684
300	3,94737	58,018026
400	5,26316	77,357368
500	6,57894	96,696710

3° TABLE DE CONCORDANCE ENTRE LES DIFFÉRENTES ÉVALUATIONS
D'UNE MÊME PRESSION.

Pressions en livres anglaises par pouce carré.	Pressions en centimètres de mercure.	Pressions en atmosphères.
1	5,2	0,068
2	10,3	0,136
3	15,5	0,204
4	20,6	0,272
5	25,8	0,340
6	31,0	0,408
7	36,2	0,476
8	41,4	0,544
9	46,5	0,612
10	51,7	0,680
11	56,9	0,748
12	62,0	0,816
13	67,2	0,884
14	72,4	0,953
15	77,8	1,021
16	82,9	1,089
17	88,1	1,157
18	93,3	1,225
19	98,4	1,293
20	103,4	1,361
30	155,1	2,041
40	206,8	2,721
50	258,5	3,401
60	310,2	4,082
70	361,9	4,762
80	413,7	5,443
90	465,4	6,123
100	517,1	6,804

6. *Loi de Mariotte sur la compressibilité des gaz.* — Lorsqu'on soumet un gaz permanent à des pressions croissantes, ses molécules se rapprochent nécessairement, et son volume diminue. Il en est de même pour les solides et pour les liquides, mais le phénomène est alors beaucoup moins marqué, et la même augmentation de pression ne détermine, dans ces derniers corps, qu'une variation de volume beaucoup plus faible que dans les gaz.

Boyle et Mariotte (1740) sont les premiers physiciens qui aient reconnu la loi suivant laquelle un gaz se comprime, sous l'action d'une pression croissante.

La loi de Boyle ou de Mariotte s'énonce ainsi : Les volumes qu'une même masse de gaz occupe, à une température constante, sont inversement proportionnels aux pressions que le gaz supporte. Si l'on désigne par E le volume d'une certaine quantité de gaz sous la pression P , par E' son volume sous la pression P' , cet énoncé revient à la formule $\frac{E}{E'} = \frac{P'}{P}$, d'où

l'on tire $PE = P'E'$. On peut donc encore dire que le produit de la pression par le volume reste constant, pourvu cependant que la température du gaz ne varie pas.

Les expériences de Mariotte, insérées dans ses Œuvres à la Haye (1740, t. I, *De la nature de l'air*), ne donnent de résultats précis que jusqu'à 4 atmosphères environ.

Depuis lors Muschenbroeck, Sulzer, Robison, OErsted et Swendren ont poussé plus loin cette vérification; ces derniers jusqu'à 68 atmosphères environ, à peu près à l'époque à laquelle Arago et Dulong terminaient leurs belles recherches sur le même sujet.

7. *Expériences de Dulong et Arago.* — Ces expériences, qui comprennent toutes les pressions de 1 à 27 atmosphères, ont démontré que les différences entre le calcul et l'observation ne s'élevaient nulle part à un centième et qu'elles n'augmentaient pas sensiblement avec la pression. Elles datent de l'année 1828 et ont été faites au moyen d'un tube vertical

de 25 mètres de hauteur, composé de 13 tubes de verre assemblés les uns à la suite des autres, et communiquant par la partie inférieure avec une cuvette de mercure, dans laquelle plongeait également l'extrémité d'un autre tube dans lequel un certain volume d'air avait été préalablement emprisonné. En exerçant une pression sur la cuvette le mercure montait à la fois dans les deux tubes, et la différence des deux niveaux indiquait la pression à laquelle l'air était soumis.

M. Pouillet fut conduit, pour les autres gaz, à des résultats peu différents, avec un appareil à l'aide duquel il déterminait simultanément l'élévation d'une colonne de mercure dans un tube ouvert à son extrémité supérieure, et dans un autre tube fermé, dans lequel il avait préalablement renfermé une certaine quantité du gaz en expérience.

Il était réservé à M. Regnault de pousser plus loin encore l'exactitude des procédés d'expérimentation et la vérification de cette loi fondamentale.

3. *Expériences de M. Regnault.* — La relation $\frac{E}{E'} = \frac{P'}{P}$

donne $\frac{EP}{E'P'} = 1$, et les expériences de M. Regnault ont eu pour but de reconnaître les variations du premier membre de cette relation lorsqu'on fait varier E' suivant une certaine loi.

En expérimentant depuis 0,972 atmosphère jusqu'à 27,822 atmosphères, M. Regnault a trouvé que la valeur moyenne du rapport exprimé par le premier membre est 1,004511; sa valeur la plus grande s'est élevée à 1,008930.

En représentant l'ensemble de ses résultats par une courbe, M. Regnault a pu dresser ensuite une table des pressions auxquelles un volume d'air serait amené lorsqu'on réduirait successivement son volume jusqu'au vingtième de son volume primitif.

Cette table étant calculée pour un volume primitif égal à 1 m. c. et pour une pression initiale égale à 1 atmosphère, les chiffres de la dernière colonne expriment le produit $E'P'$, qui constitue le dénominateur de notre fraction.

TABLEAU DES RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES DE M. REGNAULT
SUR LA COMPRESSION DE L'AIR.

Volumes.	Rapport des volumes.	Pressions en mètres de mercure.	Pressions en atmosphères.	Produits des pressions par les volumes.
1,000	1	1,000000	1,317	1,000000
0,500	2	1,997828	2,629	0,998964
0,333	3	2,993601	3,939	0,997867
0,250	4	3,987432	5,247	0,996854
0,200	5	4,979440	6,552	0,995988
0,167	6	5,969748	7,855	0,994925
0,143	7	6,958455	9,156	0,994065
0,125	8	7,945696	10,455	0,992962
0,111	9	8,931573	11,752	0,992397
0,100	10	9,916220	13,047	0,991622
0,091	11	10,899724	14,342	0,990880
0,083	12	11,882232	15,634	0,990186
0,077	13	12,863838	16,926	0,989526
0,071	14	13,844670	18,217	0,988905
0,067	15	14,824845	19,506	0,988323
0,063	16	15,804480	20,795	0,987780
0,059	17	16,783675	22,083	0,987270
0,056	18	17,762562	23,372	0,986809
0,053	19	18,741258	24,659	0,986382
0,050	20	19,719880	25,947	0,985994

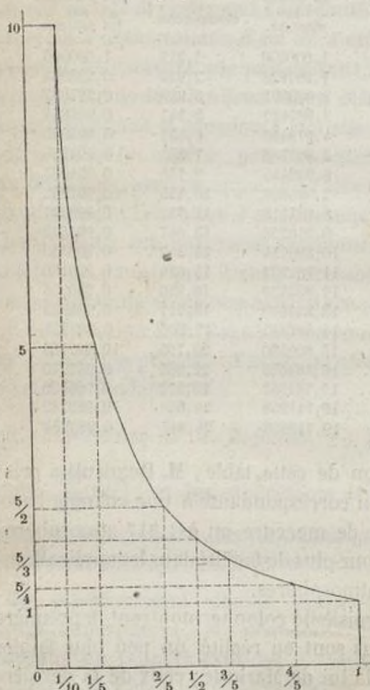
Dans la construction de cette table, M. Regnault a pris, pour unité, la pression correspondante à une colonne barométrique de 1 mètre de mercure ou à 1,317 atmosphère, nous y avons ajouté, pour plus de facilité dans les applications, les concordances en atmosphères.

Les chiffres de la troisième colonne montrent, à première vue, que les pressions sont en réalité un peu plus faibles que ne l'indiquerait la loi de Mariotte; ceux de la dernière donnent précisément les rapports entre la pression réelle et la pression calculée, car si l'on voulait connaître ce rapport il faudrait obtenir la valeur de $P' : \frac{EP}{E'} = E'P'$, en y supposant $EP = 1$, et l'examen des chiffres de cette colonne fait bien voir que ce rapport s'éloigne d'autant plus de l'unité que la réduction du volume est plus grande.

9. *Conclusion sur l'emploi de la loi de Mariotte dans les calculs.* — La concordance des résultats observés par M. Re-

gnault nous permettra d'appliquer, sans erreur sensible, la loi de Mariotte dans presque tous les cas où nous aurons à

Fig. 3.



déterminer le volume ou la pression d'un gaz, dans une condition déterminée.

Les pressions ainsi calculées seront toujours trop grandes, mais les réductions à leur faire subir, pour rester d'accord avec les résultats de M. Regnault, étant seulement, dans les cas extrêmes, déterminées par le coefficient 0,985994, on voit que l'erreur commise dans les limites de ces expériences ne s'élèvera jamais à plus de 0,014 de la pression totale; nous n'en tiendrons pas compte dans les calculs et

nous admettrons au point de vue pratique que les compressions des gaz se font conformément à la loi de Mariotte.

10. Représentation graphique de la relation entre les volumes et les pressions d'une même quantité de gaz. — Si l'on veut représenter, par une courbe, la relation entre les volumes et les pressions correspondantes d'une même quantité de gaz, il suffira de prendre pour abscisses, des nombres propor-

tionnels aux volumes, et, pour ordonnées, des nombres proportionnels aux pressions.

Dans la figure 3, ci-jointe, on a représenté l'unité de volume par 5 centimètres, et l'unité de pression par 1 centimètre, et l'on a appliqué la loi de Mariotte au calcul des différentes ordonnées. L'équation de la courbe est alors $xy = 5^{\text{e}^{\text{e}}}$, et c'est celle d'une hyperbole équilatère qui se prolongerait indéfiniment vers ses deux extrémités, en s'approchant de plus en plus des deux axes, qui seraient les asymptotes de la courbe.

Si, à la même échelle, on traçait la courbe résultant des observations de M. Regnault, on verrait que cette courbe s'élèverait moins que la précédente, mais dans une proportion si faible qu'on pourra presque la considérer comme identique avec l'hyperbole.

11. Détente des gaz. — Lorsqu'on permet à un gaz d'occuper des espaces de plus en plus grands, la pression varie encore conformément à la loi de Mariotte, et l'on dit alors qu'il se détend, parce qu'en effet sa tension diminue.

Dans les machines, la vapeur agit fréquemment en se détendant, et s'il était démontré que nous puissions appliquer la loi de Mariotte dans ces circonstances, nous aurions encore

$$P' = \frac{EP}{E'}$$

et la courbe qui représenterait cette nouvelle période d'action serait la continuation de l'hyperbole équilatère que nous avons construite au n° 10.

12. Application de la loi de Mariotte aux vapeurs. — Si l'on enferme une certaine quantité de vapeur d'eau dans le vide d'un tube barométrique à mercure, et si on maintient ce tube à une température constante, il est facile de voir qu'à mesure que l'on augmente la capacité de la chambre supérieure, en soulevant l'appareil, la tension de la vapeur diminue comme le ferait celle d'un gaz. Dans ce phénomène de

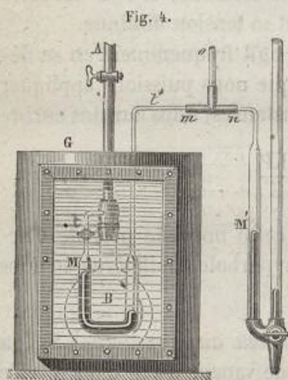
détente, la tension de la vapeur se modifie sensiblement comme l'indique la loi de Mariotte, et l'on est ainsi conduit à admettre que cette loi de la détente des gaz est également applicable aux vapeurs. Si, au contraire, on diminue, par l'enfoncement du tube, l'espace occupé par la vapeur, on voit que la pression augmente seulement jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle elle reste à peu près constante, jusqu'au moment où l'espace étant réduit à être égal au volume de l'eau qui constituait la vapeur, celle-ci est tout entière ramenée à l'état liquide.

Il y a donc une limite de pression au delà de laquelle la loi de Mariotte n'est en aucune façon applicable aux vapeurs, et c'est en deçà de cette limite seulement qu'il importerait de rechercher si cette loi, reconnue vraie pour les gaz, doit également être admise, en ce qui concerne les vapeurs des différents liquides, et plus particulièrement en ce qui concerne la vapeur d'eau.

Les physiciens n'ont pas encore vérifié directement si

la pression d'une certaine quantité de vapeur, maintenue à température constante, dans un vase clos, variait en raison inverse des volumes.

M. Regnault a bien proposé pour faire cette vérification un appareil dont la figure 4 indique les principales dispositions ; mais il n'est pas à notre connaissance que les expériences elles-mêmes aient été faites.



13. *Appareil de M. Regnault.* — B est un ballon communiquant avec une machine pneumatique par le tube A ; G, une caisse en tôle, fermée sur une de ses faces, par une glace ;

t, un tube qui met le ballon en communication avec le manomètre M, formé d'un tube en U, plongé dans la caisse;

t', un tube qui met le manomètre M en communication avec un autre manomètre M', placé dans l'atmosphère;

mno, ajustage à 3 tubulures, faisant partie du tube *t'*, et communiquant en *o* avec une machine pneumatique.

L'expérience se ferait en remplissant la caisse avec un liquide porté et maintenu à une température déterminée, en plaçant une ampoule remplie d'eau dans le ballon B et en faisant simultanément le vide, dans le ballon et dans l'intervalle des deux manomètres.

On déterminerait facilement la pression que la machine pneumatique ne peut enlever; on laisserait rentrer l'air dans le tube; on chaufferait ensuite jusqu'à l'ébullition, pour briser l'ampoule et convertir l'eau en vapeur; si la quantité d'eau est insuffisante pour saturer le ballon, on connaît à la fois son poids, son volume, sa température et sa pression. En faisant ensuite rentrer plus ou moins d'air par le tube *o*, on ferait varier la pression et le volume, et l'on pourrait voir si ces variations seraient respectivement celles qui correspondent à la loi de Mariotte.

14. *Expériences de M. Morin.* — En l'absence de toute détermination faite avec les précautions et les soins qu'exigent les observations si délicates des phénomènes physiques, nous aurons recours aux résultats de la pratique des machines à vapeur.

L'un de nous a fait sur une machine à vapeur, établie aux ateliers des Messageries royales, à Chaillot, une série d'expériences pour déterminer la loi de décroissance de la pression, lorsque le volume occupé par la vapeur dans le cylindre allait successivement en augmentant.

La pression en chaque instant était déterminée à l'aide d'un appareil que nous apprendrons à connaître sous le nom

d'indicateur de la pression dans les machines à vapeur. Cet appareil trace d'une manière continue la courbe même que nous avons construite d'après la théorie. En comparant ce tracé à celui de la courbe de Mariotte, M. Morin a reconnu que les ordonnées correspondant à un même volume ne différaient jamais entre elles au delà d'un vingtième, et que celle de la courbe théorique était généralement la plus grande.

15. Résultats généraux des observations. — La machine qui a servi aux expériences de M. Morin, quoique renfermée dans une chambre bien close, n'était point abritée contre le refroidissement par la double enveloppe que l'on emploie aujourd'hui pour les cylindres de toutes les machines à grande détente.

Dans les nombreux tracés que nous avons obtenus depuis lors sur des machines de ce genre, nous avons toujours reconnu que la décroissance de la pression n'était pas aussi rapide, et que les diagrammes obtenus indiquaient constamment, surtout pour les détentes les plus prolongées, une pression notablement supérieure à celle qui résulterait du calcul.

Cette circonstance, qui est peut-être due à la vaporisation, pendant la détente, d'une partie de l'eau mécaniquement entraînée, nous conduirait donc à admettre que les variations de la pression sont différentes, suivant que le cylindre est ou n'est pas muni de cette double enveloppe.

C'est là une des questions qui appelleront de nombreux détails, lorsque nous nous occuperons des tracés obtenus avec les indicateurs de pression. Jusque-là nous admettrons que les vapeurs, comme les gaz, se détendent conformément à la loi de Mariotte.

16. Comparaison entre les résultats de l'observation et les lois proposées pour la détente de la vapeur. — Plusieurs auteurs ont proposé des formules pour exprimer la relation entre les pressions et les volumes de la vapeur d'eau, mais ces formules

s'écarter encore plus de la réalité que les courbes fournies par l'indicateur et la loi de Mariotte.

L'examen de ces formules ne devant nous conduire à aucun résultat pratique, nous ne ferons que les indiquer, lorsque nous parlerons de la détermination de la densité de la vapeur d'eau, aux différentes températures et aux diverses pressions.

17. Condensation résultant de la détente. — Lorsque la vapeur se détend, sans changer sensiblement de température, il se présente un phénomène particulier, que nous indiquerons dès à présent, et dont on doit la connaissance à M. Hirn. Cet ingénieur a fait passer de la vapeur dans un tube, garni à ses extrémités de deux verres qui, permettent de juger de la transparence intérieure; cette transparence se maintient pendant toute la durée du passage de la vapeur par les deux orifices, et elle se conserve également si l'on ferme le robinet de sortie : mais si au contraire celui-ci reste ouvert pendant que le robinet d'introduction est fermé, la détente qui se produit détermine immédiatement un brouillard épais.

Il résulterait de là que la vapeur se condense en partie pendant la détente, sous forme de gouttelettes très-ténues. Il est probable cependant que cette condensation serait de beaucoup amoindrie, dans le cas où le refroidissement serait atténué par un courant de vapeur, circulant d'une manière continue autour du cylindre.

Les expériences de M. Morin ayant été faites dans des conditions analogues, il semblerait que, malgré la condensation, la vapeur suivrait, en se détendant, la loi de Mariotte, d'une manière très-approximative.

II. Tensions des vapeurs.

18. Tension maxima de la vapeur. — Nous savons déjà que lorsqu'on fait entrer un liquide dans le vide du baromètre, il y a immédiatement dépression; en ayant soin d'employer un excès de liquide, on voit facilement que cette dépression ne dépend pas du volume de la chambre barométrique.

Si l'on augmente ou si l'on diminue le volume de la chambre, il y a nouvelle formation de vapeur ou liquéfaction de celle déjà formée, mais la hauteur de la colonne de mercure reste parfaitement stationnaire, quel que soit le degré d'enfoncement du tube.

Il y a donc, pour chaque température, une certaine tension que la vapeur ne peut dépasser; cette tension de la vapeur, correspondant à chaque température, est ce qu'on appelle la tension *maxima* de la vapeur pour cette température; elle varie notablement suivant la nature du liquide.

19. Relation entre la tension maxima et la température d'ébullition des liquides. — L'ébullition n'est autre chose que la formation rapide de la vapeur; elle ne peut avoir lieu qu'à une température telle, que la tension correspondante de la vapeur soit au moins égale à la pression extérieure.

Il résulte de cette remarque qu'en faisant bouillir un même liquide sous diverses pressions, on peut par cela même déterminer approximativement la tension maxima de la vapeur à des températures variables.

20. Tension maxima de la vapeur d'eau aux différentes températures. — La détermination de la tension maxima de la vapeur d'eau au-dessous de son point d'ébullition intéresse vivement les phénomènes hygrométriques.

Aussi M. Kaemtz a-t-il fait de nombreuses expériences sur cette question; la table qu'il a donnée à cet égard est la seule qui eût été de quelque importance avant celle qui a été formée, avec tant de soins, par M. Regnault.

Quant aux pressions au-dessus de 100°, elles ont été surtout déterminées par Watt, par Dalton, par Dulong et Arago, et par l'Institut de Franklin, aux États-Unis.

21. Expériences de Watt. — Les expériences de Watt, qui paraissent n'avoir été publiées que dans la *Mechanical Philosophy* de Robison, en 1822, et plus tard dans l'*Encyclopédie métropolitaine* de Smedley, tome VIII, page 148, ont

donné, pour la pression de la vapeur, des chiffres qu'il est bon de comparer à ceux que l'on doit admettre aujourd'hui. Les différences sont surtout grandes pour les températures les plus basses, et nous nous bornerons à citer seulement quelques-uns des résultats, pour les différentes parties de l'échelle thermométrique.

Températures en degrés centigrades.	Pressions en atmosphères.
12,77	0,005
23,33	0,022
40,00	0,058
53,33	0,120
67,22	0,252
79,44	0,443
91,39	0,710

On considérait jusqu'alors comme nulle la pression de la vapeur à 0°, et il était réservé à Dalton de démontrer que, même à cette température de la glace fondante, la vapeur a déjà une tension très-appreciable.

22. *Expériences de Dalton* *. — Les expériences de Dalton ont été publiées dans les Mémoires de la Société philosophique de Manchester pour 1802, sous le titre : *Experimental Essays on the constitution of mixed gases*, etc. « Voici, dit-il, la méthode que j'emploie. Je prends un tube de baromètre parfaitement séché; je le remplis de mercure, que j'ai eu soin de faire bouillir auparavant, et je marque la place où il est stationnaire. Alors, ayant gradué le tube en pouces et dixièmes de pouce, au moyen d'une lime, je verse dedans un peu d'eau ou du liquide qui est l'objet de l'expérience, de manière à humecter ses parois; après quoi je remets le mercure et, renversant le tube avec précaution, j'exclus tout l'air. Le baromètre, au bout de quelque temps, présente une couche d'eau d'un huitième ou d'un dixième de pouce, au haut de la colonne de mercure, parce qu'étant

* Le mémoire de Dalton a été publié en France, dans la *Bibliothèque britannique*, tome XX, page 325, et dans le *Journal des sciences*, tome XII, page 185.

plus légère, elle monte au haut des parois du tube. On peut alors incliner un peu le tube, le mercure s'élèvera presque jusqu'en haut, ce qui est la marque du vide parfait. »

La chambre barométrique était alors chauffée, au moyen d'un manchon de verre ou d'étain, à la température à laquelle Dalton voulait déterminer la pression de la vapeur.

« La force de la vapeur de l'eau entre 80° et 212° (Fahrenheit) peut aussi être déterminée au moyen d'une machine pneumatique, et les résultats s'accordent parfaitement avec ceux qui ont été obtenus à l'aide des méthodes précédentes. Qu'on prenne un flacon de Florence à moitié rempli d'eau chaude, qu'on y entre la boule d'un thermomètre, qu'on couvre le tout d'un récipient sur un des plateaux d'une machine pneumatique, et qu'on place une éprouvette sur l'autre : on fera le vide lentement et on observera le thermomètre et le baromètre au moment où l'ébullition commencera. »

On voit ainsi comment Dalton a pu ajouter : « Après avoir répété les expériences par toutes ces méthodes, et soigneusement comparé les résultats, j'ai pu composer la table ci-jointe, qui donne la pression, et la température depuis 32° jusqu'à 212° (F.), ou en degrés centigrades de 0° à 100°. »

Pour se rendre compte de la loi suivant laquelle augmentent les pressions entre ces températures, Dalton a cherché, par des interpolations, quelles étaient les pressions correspondantes à chaque seizième de cet intervalle, c'est-à-dire pour chaque augmentation de température de 11°,25 (F.). Cette différence correspond à 6,25 degrés centigrades, et, en réduisant les chiffres de la table primitive en mesures françaises, on peut l'écrire ainsi qu'il suit :

Température en degrés centigrades.	Pression en atmosphères.	Rapport d'un terme au précéat.	Température en degrés centigrades.	Pression en atmosphères.	Rapport d'un terme au précéat.
0,00	0,007		56,25	0,159	1,36
6,25	0,010	1,48	62,50	0,215	1,35
12,50	0,015	1,46	68,75	0,285	1,33
18,75	0,021	1,45	75,00	0,376	1,32
25,00	0,031	1,44	81,25	0,488	1,30
31,25	0,044	1,43	87,50	0,628	1,29
37,50	0,063	1,41	93,75	0,802	1,27
43,75	0,087	1,40	100,00	1,000	1,25
50,00	0,117	1,38			

C'est l'étude de ce tableau qui a permis à Dalton de dire qu'en comparant les nombres de la table, on trouve une espèce de progression géométrique dans les pressions de la vapeur; et la *raison*, ajoute-t-il, au lieu d'être constante, diminue graduellement.

Il avait déjà reconnu que les pressions augmentent moins rapidement que les termes d'une progression géométrique, dont la raison aurait été 1,48 pour des intervalles de température de 6°,25.

Le même mémoire contient des observations assez nombreuses sur la vapeur de l'éther, ainsi que sur celles de l'alcool, de l'ammoniaque, du mercure et de l'acide sulfurique.

23. *Expériences d'Arago et Dulong.* — Les expériences entreprises par Arago et Dulong, sur la demande de l'Académie des sciences, ont été terminées en 1830, et sont décrites dans le tome XLIII des *Annales de chimie et de physique* (2^e série).

Dans ces expériences, on faisait agir la vapeur produite par une chaudière, à différentes températures, sur le réservoir inférieur du manomètre qui avait été précédemment employé, par les mêmes observateurs, à la vérification de la loi de Mariotte.

Les expériences ont été poussées jusqu'à 24 atmosphères et ont donné lieu à une table qui se trouve reproduite dans tous les traités de physique, mais la nature du procédé n'a permis de faire aucune observation sur les pressions inférieures à celle de l'atmosphère.

24. *Expériences de l'Institut de Franklin.* — Ces expériences, qui furent commencées en 1830, ont été citées par M. Regnault dans son mémoire, d'après les indications données dans l'*Encyclopédie britannique*, tome XX, p. 588.

Le moyen de détermination consistait à produire de la vapeur dans une petite chaudière munie d'un manomètre, et dans laquelle l'observateur pouvait suivre les phénomènes à

l'aide de deux petites fenêtres en glace, ménagées dans les fonds.

Il nous suffira d'indiquer seulement les résultats du tableau final, qui, quant aux pressions, ont été traduits par M. Regnault en mesures françaises :

Température en degrés centigrades.	Pression en atmosphères.	Température en degrés centigrades.	Pression en atmosphères.
100,00	1,00	157,50	6,00
112,78	1,50	160,55	6,50
121,11	2,00	163,33	7,00
128,89	2,50	166,11	7,50
135,00	3,00	168,89	8,00
140,00	3,50	171,39	8,50
144,17	4,00	173,88	9,00
148,06	4,50	176,11	9,50
151,39	5,00	178,05	10,00
154,44	5,50		

La commission américaine signale elle-même les différences entre ces résultats et ceux d'Arago et Dulong : « Pour comparer, dit-elle, nos observations avec celles des académiciens français, nous avons construit, sur la même feuille, la courbe donnée par les trente observations de la commission française, qui se trouvent comprises entre 1 et 10 atmosphères. Nous avons reconnu que la courbe de nos observations s'approche aux basses températures, plus près de notre courbe normale que celle des savants français; ces deux dernières courbes se coupent vers le milieu de l'échelle; notre courbe passe ensuite au-dessus de celle des physiciens français, et, vers 10 atmosphères, il y a une différence de 0,65 atmosphère, entre les deux courbes, à la température de 178 degrés. »

M. Regnault fait observer avec raison que cette différence ne peut provenir d'une erreur accidentelle d'expériences, et ses belles recherches nous permettent aujourd'hui de n'avoir plus aucune incertitude sur cette question.

25. Expériences de M. Regnault. — Les déterminations des pressions au-dessous de 60° ont été faites par M. Regnault, sous deux formes différentes, par la comparaison de divers

baromètres, dans la chambre de l'un desquels on introduisait une suffisante quantité d'eau :

1° Les deux baromètres étaient contenus, dans toute leur hauteur, dans une caisse à eau chaude, dans laquelle on entretenait par l'agitation une température uniforme ; ou bien la partie inférieure des deux baromètres était seule portée à la température voulue.

2° La vapeur, dégagée par une ampoule à une température donnée, pressait sur le sommet de l'une des colonnes barométriques, dont la dépression mesurait la force élastique de la vapeur.

Entre 50° et 100° M. Regnault s'est servi d'une cornue dans laquelle l'eau se distillait, sous une pression constante, qui pouvait être abaissée au moyen d'une machine pneumatique.

Pour les températures plus élevées et par conséquent pour les pressions supérieures à la pression atmosphérique, l'appareil consistait en une chaudière dans laquelle l'eau était entretenue à l'ébullition sous l'action d'une atmosphère artificielle dont la pression était déterminée par l'action d'une pompe foulante. On déterminait simultanément la température d'ébullition et la pression, c'est-à-dire les deux éléments qui nous occupent, et cette double détermination nécessitait des précautions infinies, dont on ne peut se faire une juste idée qu'en recourant au mémoire original de M. Regnault.

26. *Tables des tensions et des températures de la vapeur d'eau saturée.* — M. Regnault a résumé les résultats de toutes ses expériences dans des tables insérées dans les *Mémoires de l'Académie des sciences*. L'une d'elles donne, de degré en degré, la tension maxima de la vapeur d'eau depuis — 32° jusqu'à 230°. Nous la reproduisons en son entier à partir de 0°, en y ajoutant la valeur de la tension en atmosphères. D'autres tables, calculées de 0°,1 en 0°,1, sont plus particulièrement destinées aux observations météorologiques ou à la détermination des hauteurs du baromètre par l'observation de la température d'ébullition de l'eau.

TABLE DES PRESSIONS DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE
DE 0 A 230 DEGRÉS.

Températures.	Pressions en atmosphères.	Pressions en millimètres.	Différences.
0	0,006	4,600	0,340
1	0,006	4,940	0,362
2	0,007	5,302	0,385
3	0,007	5,687	0,410
4	0,008	6,097	0,437
5	0,009	6,534	0,464
6	0,009	6,998	0,494
7	0,010	7,492	0,525
8	0,011	8,017	0,557
9	0,011	8,574	0,591
10	0,012	9,165	0,627
11	0,013	9,792	0,665
12	0,014	10,457	0,705
13	0,015	11,162	0,746
14	0,016	11,908	0,791
15	0,017	12,699	0,837
16	0,018	13,536	0,885
17	0,019	14,421	0,936
18	0,020	15,357	0,989
19	0,022	16,346	1,045
20	0,023	17,391	1,104
21	0,024	18,495	1,164
22	0,025	19,659	1,229
23	0,027	20,888	1,296
24	0,029	22,184	1,366
25	0,031	23,550	1,438
26	0,032	24,988	1,517
27	0,033	25,505	1,596
28	0,036	28,101	1,681
29	0,039	29,782	1,766
30	0,041	31,548	1,858
31	0,043	33,406	1,953
32	0,046	35,359	2,052
33	0,049	37,411	2,154
34	0,052	39,565	2,262
35	0,055	41,827	2,374
36	0,058	44,201	2,490
37	0,061	46,691	2,611
38	0,064	49,302	2,737
39	0,068	52,039	2,867
40	0,072	54,906	3,004
41	0,076	57,910	3,145
42	0,080	61,055	3,291
43	0,084	64,346	3,444
44	0,089	67,790	3,601
45	0,093	71,391	3,767
46	0,098	75,158	3,935
47	0,104	79,093	4,111
48	0,109	83,204	4,295

TABLE DES PRESSIONS DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE
DE 0 A 230 DEGRÉS.

(Suite.)

Températures.	Pressions en atmosphères.	Pressions en millimètres.	Différences.
49	0,115	87,499	4,483
50	0,121	91,982	4,679
51	0,127	96,661	4,882
52	0,133	101,543	5,093
53	0,140	106,636	5,309
54	0,147	111,945	5,533
55	0,154	117,478	5,766
56	0,162	123,244	6,007
57	0,170	129,251	6,254
58	0,178	135,505	6,510
59	0,186	142,015	6,776
60	0,196	148,791	7,048
61	0,205	155,839	7,331
62	0,214	163,170	7,621
63	0,224	170,791	7,923
64	0,235	178,714	8,231
65	0,245	186,945	8,551
66	0,257	195,496	8,880
67	0,268	204,376	9,220
68	0,281	213,596	9,569
69	0,294	223,165	9,928
70	0,306	233,093	10,300
71	0,316	243,393	10,680
72	0,334	254,073	11,074
73	0,348	265,147	11,477
74	0,363	276,624	11,893
75	0,379	288,517	12,321
76	0,395	300,838	12,762
77	0,412	313,600	13,211
78	0,430	326,811	13,677
79	0,448	340,488	14,155
80	0,466	354,643	14,644
81	0,485	369,287	15,148
82	0,505	384,435	15,666
83	0,526	400,101	16,197
84	0,547	416,298	16,743
85	0,569	433,041	17,303
86	0,592	450,344	17,877
87	0,616	468,221	18,466
88	0,640	486,687	19,072
89	0,665	505,759	19,691
90	0,691	525,450	20,328
91	0,718	545,778	20,979
92	0,745	566,757	21,649
93	0,774	588,406	22,334
94	0,803	610,740	23,038
95	0,833	633,778	23,757
96	0,865	657,535	24,494

TABLE DES PRESSIONS DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE
DE 0 A 230 DEGRÉS.

(Suite.)

Températures.	Pressions en atmosphères.	Pressions en millimètres.	Différences.
97	0,897	682,029	25,251
98	0,930	707,280	26,025
99	0,964	733,305	26,695
100	1,000	760,000	27,590
101	1,036	787,590	28,420
102	1,073	816,010	29,270
103	1,112	845,280	30,130
104	1,151	875,410	31,000
105	1,192	906,410	31,910
106	1,234	938,310	32,830
107	1,277	971,140	33,770
108	1,321	1004,910	34,740
109	1,367	1039,650	35,720
110	1,415	1075,370	36,820
111	1,463	1112,090	37,740
112	1,512	1149,830	38,780
113	1,563	1188,610	39,860
114	1,616	1228,470	40,940
115	1,670	1269,410	42,060
116	1,725	1311,470	43,190
117	1,782	1354,660	44,340
118	1,840	1399,020	45,530
119	1,900	1444,550	46,730
120	1,962	1491,280	47,970
121	2,025	1539,250	49,220
122	2,090	1588,470	50,490
123	2,156	1638,960	51,800
124	2,225	1690,760	53,120
125	2,294	1743,880	54,470
126	2,366	1798,350	55,850
127	2,439	1854,200	57,270
128	2,515	1911,470	58,680
129	2,592	1970,150	60,130
130	2,671	2030,280	61,660
131	2,752	2091,940	63,090
132	2,835	2155,030	64,660
133	2,920	2219,690	66,230
134	3,007	2285,920	67,810
135	3,097	2353,730	69,430
136	3,188	2423,160	71,070
137	3,281	2494,230	72,770
138	3,377	2567,000	74,440
139	3,475	2641,440	76,190
140	3,576	2717,630	77,940
141	3,678	2795,570	79,730
142	3,783	2875,300	81,560
143	3,890	2956,860	83,400
144	4,000	3040,260	85,290

TABLE DES PRESSIONS DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE
DE 0 A 230 DEGRÉS.

(Suite.)

Températures.	Pressions en atmosphères.	Pressions en millimètres.	Différences.
145	4,112	3125,550	87,190
146	4,227	3212,740	89,130
147	4,344	3301,870	91,110
148	4,464	3392,980	93,110
149	4,587	3486,090	95,140
150	4,712	3581,230	97,200
151	4,840	3678,430	99,310
152	4,970	3777,740	101,440
153	5,104	3879,180	103,590
154	5,240	3982,770	105,790
155	5,379	4088,560	108,030
156	5,521	4196,590	110,290
157	5,666	4306,880	112,570
158	5,815	4419,450	114,910
159	5,966	4534,360	117,260
160	6,121	4651,620	119,660
161	6,278	4771,280	122,080
162	6,438	4893,360	124,550
163	6,602	5017,910	127,060
164	6,769	5144,970	129,570
165	6,945	5274,540	132,150
166	7,114	5406,690	134,740
167	7,291	5541,430	137,390
168	7,472	5678,820	140,080
169	7,656	5818,900	142,760
170	7,844	5961,660	145,530
171	8,035	6107,190	148,290
172	8,230	6255,480	151,120
173	8,429	6406,600	153,950
174	8,632	6560,550	156,850
175	8,838	6717,430	159,790
176	9,049	6877,220	162,750
177	9,263	7039,970	165,750
178	9,481	7205,720	168,800
179	9,703	7374,520	171,870
180	9,929	7546,390	174,980
181	10,159	7721,370	178,150
182	10,394	7899,520	181,320
183	10,632	8080,840	184,560
184	10,875	8265,400	187,830
185	11,123	8453,230	191,120
186	11,374	8644,350	194,470
187	11,630	8838,820	197,860
188	11,889	9036,680	201,270
189	12,155	9237,950	204,750
190	12,425	9442,700	208,230
191	12,698	9650,930	211,780
192	12,976	9862,710	215,330

TABLE DES PRESSIONS DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE
DE 0 A 230 DEGRÉS.

(Suite.)

Températures.	Pressions en atmosphères.	Pressions en millimètres.	Différences.
193	13,260	10078,040	218,970
194	13,548	10297,010	222,620
195	13,763	10519,630	226,320
196	14,139	10745,950	230,050
197	14,440	10975,000	233,820
198	14,749	11209,820	237,640
199	15,062	11447,460	241,500
200	15,380	11688,960	245,410
201	15,703	11934,370	249,320
202	16,031	12183,690	253,310
203	16,364	12437,000	257,300
204	16,703	12694,300	261,360
205	17,019	12955,660	265,460
206	17,396	13221,120	269,630
207	17,751	13490,750	273,780
208	18,111	13764,530	277,990
209	18,477	14042,520	282,280
210	18,848	14324,800	286,520
211	19,225	14611,320	290,900
212	19,608	14902,220	295,260
213	19,996	15197,480	299,690
214	20,391	15497,170	304,160
215	20,791	15801,330	308,610
216	21,197	16109,940	313,210
217	21,609	16423,150	317,750
218	22,080	16740,900	322,390
219	22,451	17063,290	327,070
220	22,892	17390,360	331,770
221	23,318	17722,130	336,550
222	23,761	18058,640	341,300
223	24,210	18399,940	346,130
224	24,665	18746,070	350,970
225	25,118	19097,040	355,880
226	25,595	19452,920	360,840
227	26,071	19813,760	365,850
228	26,552	20179,610	370,870
229	27,040	20550,480	375,920
230	27,534	20926,400	"

Nous avons déduit de cette première table, dans laquelle les températures varient de degré en degré, d'une ligne à la suivante, les nombres correspondant aux pressions mesurées par un certain nombre d'atmosphères et de fractions décimales d'atmosphère.

TABLEAU DES TEMPÉRATURES DE LA VAPEUR SATURÉE

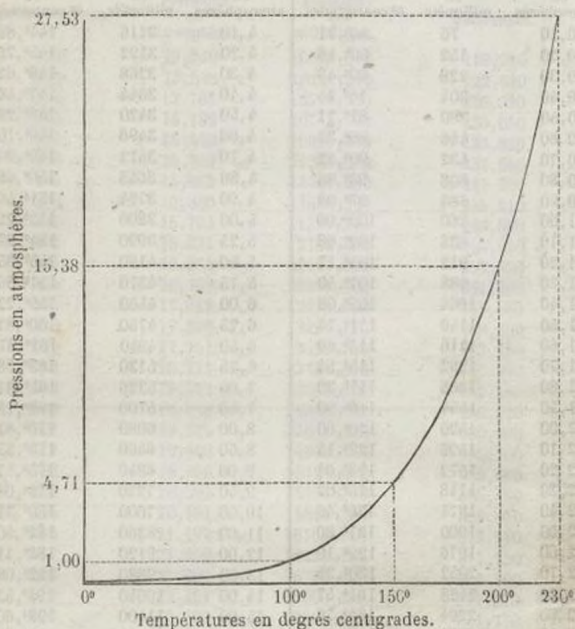
DE 0 A 25 ATMOSPHÈRES.

Pressions en atmosphères.	Pressions en millimètr.	Température en 0° centigrades.	Pressions en atmosphères.	Pressions en millimètr.	Température en 0° centigrades.
0,10	76	46°, 21	4,10	3116	144°, 89
0,20	152	60°, 46	4,20	3192	145°, 76
0,30	228	69°, 49	4,30	3268	146°, 62
0,40	304	76°, 25	4,40	3344	147°, 46
0,50	380	81°, 71	4,50	3420	148°, 29
0,60	456	86°, 32	4,60	3496	149°, 10
0,70	532	90°, 32	4,70	3572	149°, 90
0,80	608	93°, 88	4,80	3648	150°, 69
0,90	684	97°, 08	4,90	3724	151°, 46
1,00	760	100°, 00	5,00	3800	152°, 22
1,10	836	102°, 68	5,25	3990	154°, 07
1,20	912	105°, 17	5,50	4180	155°, 85
1,30	988	107°, 50	5,75	4370	157°, 56
1,40	1064	109°, 68	6,00	4560	159°, 22
1,50	1140	111°, 74	6,25	4750	160°, 82
1,60	1216	113°, 69	6,50	4940	162°, 37
1,70	1292	115°, 54	6,75	5130	163°, 88
1,80	1368	117°, 30	7,00	5326	165°, 31
1,90	1444	118°, 99	7,50	5700	168°, 15
2,00	1520	120°, 60	8,00	6080	170°, 81
2,10	1596	122°, 15	8,50	6460	173°, 35
2,20	1672	123°, 64	9,00	6840	175°, 77
2,30	1748	125°, 07	9,50	7220	178°, 08
2,40	1824	126°, 46	10,00	7600	180°, 31
2,50	1900	127°, 80	11,00	8360	184°, 50
2,60	1976	129°, 10	12,00	9120	188°, 41
2,70	2052	130°, 35	13,00	9880	192°, 08
2,80	2128	131°, 57	14,00	10640	195°, 53
2,90	2204	132°, 76	15,00	11400	198°, 80
3,00	2280	133°, 91	16,00	12160	201°, 90
3,10	2356	135°, 03	17,00	12920	204°, 86
3,20	2432	136°, 12	18,00	13680	207°, 69
3,30	2508	137°, 19	19,00	14440	210°, 40
3,40	2584	138°, 23	20,00	15200	213°, 01
3,50	2660	139°, 24	21,00	15960	215°, 51
3,60	2736	140°, 23	22,00	16720	217°, 93
3,70	2812	141°, 21	23,00	17480	220°, 27
3,80	2888	142°, 15	24,00	18240	222°, 53
3,90	2964	143°, 08	25,00	19000	224°, 72
4,00	3040	144°, 00			

27. Représentation graphique de la relation entre la température et la tension maxima de la vapeur d'eau. — M. Regnault a tracé lui-même sur le cuivre la courbe représentative de la relation entre les températures et les tensions

correspondantes. Cette courbe, qui est un véritable monument de la science, ne pourrait être reproduite avec une

Fig. 5.



précision suffisante, et il nous suffira de faire voir par la figure 5 quelle est sa forme générale ; c'est ce que nous faisons, dans le but de graver dans la mémoire l'image de la marche croissante de l'élévation de la pression maxima à mesure que la température augmente.

23. Forces élastiques de quelques autres vapeurs. — M. Regnault a donné, dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, page 1063 (1860) les résultats qu'il a obtenus en déterminant les forces élastiques de diverses autres vapeurs.

Nous extrayons du tableau qu'il en a dressé les chiffres suivants :

Tempé- ra- tures.	PRESSIONS EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.					PRESSIONS EN ATMOSPHERES.				
	Alcool.	Sulfure de carbone.	Éther.	Ether chlorhydri- que.	Acide sulfureux.	Alcool.	Sulfure de carbone.	Éther.	Ether chlorhydri- que.	Acide sulfureux.
-20	0,334	4,348	6,749	18,755	47,946	0,004	0,0572	0,0888	0,2467	0,6393
-10	0,658	8,101	11,335	30,209	76,249	0,008	0,1066	0,1491	0,3975	1,0032
0	1,283	13,198	18,334	46,518	116,506	0,016	0,1736	0,2412	0,6120	1,5329
+10	2,430	20,300	28,640	69,111	171,955	0,032	0,2671	0,3768	0,9094	2,2625
20	4,448	30,178	43,326	99,623	246,205	0,058	0,3971	0,5700	1,3108	3,2395
30	7,849	43,697	62,633	139,899	343,180	0,103	0,5749	0,8241	1,8407	4,5155
40	13,364	61,699	90,959	161,958	467,023	0,175	0,8118	1,1968	2,1310	6,1450
50	21,988	85,671	127,112	257,940	622,001	0,289	1,1272	1,6725	3,3939	8,1842
60	35,026	116,373	172,852	340,054	812,380	0,460	1,5312	2,2743	4,4744	10,6892
70	54,121	155,184	230,781	440,503		0,712	2,0419	3,0365	5,7961	
80	81,276	203,377	302,441	561,411		1,0694	2,6758	3,9794	7,3869	
90	118,843	262,223	389,805	704,751		1,5637	3,4503	5,2190	9,2730	
100	169,492	332,954	495,081	872,276		2,2301	4,3809	6,5142	11,4773	
110	236,163	416,718	620,837			3,1074	5,4830	8,1688		
120	321,968	514,543	770,220			4,2364	6,7703	10,1344		
130	430,104	627,303				5,6592	8,2539			
140	563,700	755,688				7,4171	9,9431			
150	725,873					9,5509				

Ces données sont fort intéressantes par rapport à l'emploi qui peut être fait de ces différentes vapeurs, dans des machines analogues aux machines à vapeur d'eau.

Depuis quelques années surtout, le nombre des tentatives qui ont été faites pour remplacer la vapeur d'eau par celle de divers autres liquides est devenu beaucoup plus considérable, bien qu'aucun de ces essais n'ait encore répondu, d'une manière absolument pratique, à l'objet que l'on avait en vue.

29. Formules qui expriment la relation entre la température et la tension de la vapeur d'eau saturée. — Les belles expériences de M. Regnault ont définitivement fait connaître, en chiffres précis, la tension de la vapeur saturée, pour toutes les températures usuelles, et l'on peut conclure de ces résultats qu'aucune relation simple n'existe entre cette pression maxima et la température correspondante. Les physiciens ont cependant proposé diverses formules d'interpolation qui expriment cette relation avec une approximation plus ou moins grande. Nous examinerons les principales de ces formules, et nous comparerons les chiffres qu'on en peut déduire, avec ceux qui résultent des tables de M. Regnault.

30. Formule de Dalton. — Dalton a proposé la loi suivante pour exprimer la relation entre la température et la pression de la vapeur d'eau saturée :

Les forces élastiques des vapeurs croissent suivant une progression géométrique lorsque les températures croissent en progression arithmétique.

Cela revient à dire que, si l'on a une suite de températures croissantes

$$t, \quad t_1 = t + 1, \quad t_2 = t + 2, \quad \dots \quad t_n = t + n,$$

les pressions correspondantes seront

$$p, \quad p_1 = pa, \quad p_2 = pa^2, \quad \dots \quad p_n = pa^n.$$

On tire de là $n = t_n - t$, et, par suite, $p_n = pa^{(t_n - t)}$.

Soit F la force élastique, en atmosphères, correspondant à la température T , on aura d'une manière générale $F = pa^{(T-1)}$, et comme on sait qu'on a $p = 1$, pour $t = 100$, cette formule peut se mettre sous la forme $F = a^{(T-100)}$.

Si la loi de Dalton était vraie, en mettant à la place de F , dans cette formule, les chiffres déterminés avec tant de soins par M. Regnault, et pour T les températures correspondantes, on devrait trouver pour a un nombre constant.

Cette formule peut se mettre sous la forme $a = \sqrt[T-100]{F}$, d'où

$$\log a = \frac{\log F}{T-100}. \quad [1]$$

Le tableau suivant contient, jusqu'à 10 atmosphères, les résultats du calcul que nous avons fait, de l'expression qui forme le second membre de cette égalité.

Pressions en atmosphères.	Températures déterminées par M. Regnault.	Valeurs de $T - 100$.	Valeurs calculées de $\log a$.
1	100,0	"	"
2	120,6	20,6	0,0146
3	133,9	33,9	0,0140
4	144,0	44,0	0,0137
5	152,2	52,2	0,0134
6	159,2	59,2	0,0131
7	165,3	65,3	0,0129
8	170,8	70,8	0,0127
9	175,8	75,8	0,0125
10	180,3	80,3	0,0124

On voit, par ce tableau, que la valeur de $\log a$ va constamment en diminuant, et que par conséquent la loi de Dalton n'est pas exacte.

Mais si l'on remarque qu'en ce qui concerne les machines à vapeur, les pressions ne sont comprises qu'entre 1 et 7 atmosphères, on peut donner à a une valeur moyenne dont la substitution dans la formule précédente fournira une relation approximative entre les pressions et les températures.

La moyenne des valeurs de $\log a$ entre 1 et 7 atmosphères est 0,013616666, mais l'emploi de ce nombre conduirait, pour

la température de 165°, à une pression trop élevée, et le chiffre le plus convenable entre ces limites est $\log a = 0,0132$. En introduisant cette valeur dans la formule [1], on peut calculer les valeurs de F et les comparer avec celles qui ont été déterminées par M. Regnault.

Le tableau suivant fera juger du degré d'approximation de la formule.

Températures déterminées par M. Regnault.	Pressions correspondantes.	Logarithmes des pressions, calculés par la formule $\log. F = 0,0132 (T - 100)$	Pressions correspondantes.
100,0	1	0,00000	1,0000
120,6	2	0,27192	1,8703
133,9	3	0,44748	2,8021
144,0	4	0,58080	3,8090
152,2	5	0,68904	4,8870
159,2	6	0,78144	6,0455
165,3	7	0,86196	7,2771

On voit donc que la valeur de $\log a = 0,0132$ ne conduit jamais à une erreur de plus de 1/5 d'atmosphère, si ce n'est à la pression de 7 atmosphères, pour laquelle l'erreur excède un quart d'atmosphère.

Toutefois la formule de Dalton peut être appliquée avec une approximation suffisante entre ces limites, et l'on a alors

$$\log F = 0,0132 (T - 100) \quad \text{ou} \quad F = (1,309)^{T-100},$$

et
$$T = 100 + \frac{\log F}{0,0132};$$

par exemple, pour $F = 7$ on trouve

$$\log F = 0,84509804, \quad \frac{\log F}{0,0132} = 64,15, \quad T = 164,10.$$

On est donc conduit à une erreur de $165,3 - 164,1 = 1,2$, ce qui est absolument sans inconvénient pour la pratique.

Si, dans la formule $T = 100 + \frac{\log F}{0,0132}$ on donne à F différentes valeurs, on trouve pour T les valeurs suivantes :

Valeurs de F.	Valeurs calculées de T.	Valeurs déterminées par M. Regnault.	Différences.	Erreurs proportionnelles.
1	100,00	100,00	0	0
2	122,65	120,60	+ 2,05	0,017
5	152,95	152,22	+ 0,73	0,004
10	175,75	180,30	- 4,65	0,026
15	189,09	198,80	- 9,71	0,049
20	198,56	213,01	- 14,45	0,068
25	205,90	224,72	- 18,82	0,084

51. Formule de Tredgold. — Cette formule est donnée par Arago et Dulong (*Annales de chimie et de physique*, t. XLIII, 2^e série, p. 108), sous la forme suivante :

$$T = 85 \sqrt[6]{P} - 75,$$

P étant la pression en centimètres de mercure,

T la température en degrés centigrades.

En la transformant de manière à avoir la pression en atmosphères, on trouve

$$T = 85 \sqrt[6]{N \times 76} - 75 = 85 \times 2,05 \sqrt[6]{N} - 75 \\ = 175 \sqrt[6]{N} - 75$$

et l'on en tire

$$N = \left(\frac{T + 75}{175} \right)^6.$$

Si l'on donne successivement à N différentes valeurs, on trouve pour T les valeurs correspondantes, consignées au tableau suivant :

Valeurs de N.	Valeurs calculées de T.	Températures déterminées par M. Regnault.	Différences.	Erreurs proportionnelles.
1	100,00	100,00	0,00	0,000
2	121,43	120,60	+ 0,83	0,007
5	153,84	132,22	+ 1,62	0,011
10	181,90	180,30	+ 1,60	0,00
15	200,87	198,80	+ 2,07	0,010
20	213,32	213,01	+ 0,31	0,001
25	224,29	224,72	- 0,43	0,002

L'erreur relative est la plus grande vers 5 atmosphères, mais elle ne dépasse guère 1 centième de la température vraie.

52. *Formule de Roche.* — M. Regnault a pris soin de discuter cette formule (*Mémoires de l'Académie des sciences*, t. XXI, p. 585), que nous pouvons écrire ainsi qu'il suit :

$$f = a\alpha^{\frac{t}{1+mt}}$$

On en tire

$$\log f = \log a + \frac{t}{1+mt} \log \alpha,$$

et par suite

$$t = \frac{\log f - \log a}{\log \alpha - m(\log f - \log a)}.$$

Arago et Dulong la présentent dans leur mémoire sous la forme :

$$t = \frac{11(\log f - \log 760)}{0,1644 - 0,03(\log f - \log 760)},$$

ce qui revient à

$$\begin{aligned} t &= \frac{\log f - \log 760}{\frac{0,1644}{11} - \frac{0,03}{11}(\log f - \log 760)} \\ &= \frac{\log f - \log 760}{0,01494 - 0,002727(\log f - \log 760)}. \end{aligned}$$

on en conclut par comparaison

$$a = 760,$$

$$\log \alpha = 0,01494 \quad \text{d'où} \quad \alpha = 1,035,$$

$$m = 0,002727.$$

La formule devient alors

$$f = 760 \times 1,035^{\frac{t}{1+0,002727t}},$$

dans laquelle f est la pression en millimètres de mercure, et t la température au-dessus de 100° , c'est-à-dire

$$f = 760N,$$

$$t = T - 100,$$

ce qui donne par substitution

$$N = 1,035^{1 + \frac{T-100}{0,002727(T-100)}}.$$

Et en résolvant par rapport à T ,

$$T = 100 + \frac{\log N}{0,01494 - 0,002727 \log N}.$$

En mettant pour N différentes valeurs, on trouve pour T les valeurs suivantes :

Valeurs de N .	Valeurs calculées de T .	Valeurs déterminées par M. Regnault.	Différences.	Erreurs proportionnelles.
1	100,00	100,00	0,00	0,000
2	121,32	120,60	+0,70	0,006
5	153,64	152,22	+1,42	0,009
10	182,58	180,30	+2,38	0,013
15	200,36	198,80	+1,56	0,008
20	214,23	213,01	+1,22	0,006
25	230,40	224,72	+5,68	0,025

Pour la pression de 10 atmosphères, l'erreur ne s'élève qu'à 0,013.

55. Formule de Coriolis. — Elle est ainsi donnée par Arago et Dulong, *Annales de chimie et de physique*, t. XLIII, p. 108 :

$$T = \frac{2,878^{\frac{5,355}{\sqrt{N}} - 1}}{0,01878},$$

et on en tire directement

$$N = \left(\frac{0,01878T + 1}{2,878} \right)^{\frac{5,355}{\sqrt{N}}}.$$

Nous comparerons, dans un tableau général, cette valeur de N avec celle de l'observation.

54. Formule d'Arago et Dulong. — MM. Arago et Dulong ont donné, dans les *Mémoires de l'Institut*, t. X, p. 230, une formule simple, dont ils ont déterminé la constante au moyen de l'observation faite par eux à la pression de 24 atmosphères.

Cette formule est celle-ci :

$$F = \left(1 + 0,7153 \frac{T-100}{100} \right)^3,$$

d'où l'on tire

$$\frac{T-100}{100} = \frac{\sqrt[3]{F}-1}{0,7153}$$

$$\text{et } T = \frac{100 \sqrt[3]{F}-100}{0,7153} + 100 = \frac{\sqrt[3]{F}-1}{0,007153} + 100,$$

$$\text{ou } F = [1 + 0,007153 (T-100)]^3 = (0,007153 T + 0,2847)^3.$$

Elle s'accorde, dit M. Regnault, d'une manière assez satisfaisante avec l'expérience, depuis 1 atmosphère jusqu'à 24 ; mais elle devient inexacte pour les forces élastiques plus faibles : ainsi, pour la température de 50°, la formule donne une force élastique de 0^m,083, tandis que l'observation donne 0^m,09198 ; pour la température de 0°, la formule donne 0^m,00187 au lieu de 0^m,0046 ; elle est donc surtout inexacte pour les basses températures.

55. Formules de M. Regnault. — Tel était l'état de la question lorsque M. Regnault a exécuté les diverses séries de ses expériences ; il a naturellement cherché à représenter, par différentes formules d'interpolation, la relation entre les forces élastiques de la vapeur saturée et les températures correspondantes.

Ces formules, de la forme générale $\log F = a + b\alpha^x + c\beta^x$, s'accordent parfaitement avec les données de l'expérience, dans les limites de températures pour lesquelles elles ont

été spécialement calculées; mais nous nous bornerons à indiquer celles qui représentent toute la série des observations de -32° à $+230^{\circ}$, soit avec le thermomètre à air, soit avec le thermomètre à mercure.

Formule H de M. Regnault :

$$\log F = a - bx_1^x - c\beta_1^x;$$

F est exprimé en millimètres; $x = T + 20$, la température étant exprimée en degrés centigrades observés sur le thermomètre à air.

Les valeurs des constantes sont celles-ci :

$$a = 6,2640348,$$

$$\log b = 0,1397743, \quad \log \alpha_1 = \bar{1},994049292,$$

$$\log c = 0,6924354, \quad \log \beta_1 = \bar{1},998343862.$$

Formule I de M. Regnault :

$$\log F = a - bx_1^x - c\beta_1^x;$$

F est exprimé en millimètres; $x = T + 20$, la température étant exprimée en degrés centigrades observés sur le thermomètre à mercure.

Les valeurs des constantes sont celles-ci :

$$a = 6,5761252,$$

$$\log b = 0,3176016, \quad \log \alpha_1 = \bar{1},994995207,$$

$$\log c = 0,6569893, \quad \log \beta_1 = \bar{1},998705255.$$

C'est au moyen de trois formules désignées par les lettres D, E et H, et dont une seule est indiquée ci-dessus, que M. Regnault a calculé la table générale des forces élastiques de la vapeur d'eau, dont nous avons extrait les chiffres les plus utiles pour l'étude des machines à vapeur : elles présentent, avec l'observation directe, la concordance la plus absolue.

36. *Comparaison entre les différentes formules proposées pour exprimer la relation entre la tension maxima de la vapeur et la température.* — Pour faciliter cette comparaison, nous avons réuni l'ensemble des formules principales proposées par les divers physiciens, en indiquant, en regard, les valeurs de T et de N qui en résultent immédiatement.

TABLEAU DES FORMULES QUI EXPRIMENT LA RELATION
ENTRE LA TEMPÉRATURE ET LA PRESSION DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE.

Formule de Dalton.

$$N = a^{(T-100)} \quad T = 100 + \frac{\log N}{0,0132}, \quad N = 1,309^{(T-100)}.$$

Formule de Tredgold.

$$T = a\sqrt[6]{N} - B, \quad T = 175\sqrt[6]{N} - 75, \quad N = \left(\frac{T+75}{175}\right)^6.$$

Formule de Roche.

$$N = a^{\left[\frac{T-100}{1+0,001(T-100)}\right]}, \quad T = 100 + \frac{\log N}{0,01494 - 0,00277 \log N}, \quad N = 1,035^{\frac{T-100}{1+0,002727(T-100)}}.$$

Formule de Coriolis.

$$T = \frac{a\sqrt[5]{N}-1}{c}, \quad T = \frac{2,878 \sqrt[5,355]{N}-1}{0,01878}, \quad N = \left(\frac{1+0,01878T}{2,878}\right)^{5,355}.$$

Formule d'Arago et Dulong.

$$\frac{T-100}{100} = \frac{\sqrt[5]{N}-1}{a}, \quad T = 100 + \frac{\sqrt[5]{N}-1}{0,007153}, \quad N = (0,007153 T + 0,2847)^5.$$

Formule de M. Regnault.

$$\log N = a - b\alpha_1 T^{+20} - c\beta_1 T^{+20} - \log 760.$$

En calculant, par chacune des formules précédentes, les valeurs de T, on voit immédiatement les écarts des unes et des autres.

Celle de Tredgold se rapproche de très-près des résultats de M. Regnault; mais l'on voit aussi qu'en choisissant convenablement les constantes de la formule plus simple de Dalton, on arrive encore à une approximation très-satisfaisante.

Les valeurs comparatives de T et de N sont données par le tableau ci-joint.

COMPARAISON ENTRE LES VALEURS DE LA TEMPÉRATURE,
FOURNIES PAR LES DIVERSES FORMULES.

Valeurs de N.	Tempé- ratures observées par M. Regnault.	Températures calculées par les différentes formules.					
		Formule de Dalton.		Formule de Tredgold.	Formule de Roche.	Formule de Coriolis.	Formule d'Arago et Dulong.
		*	**				
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	120,60	122,65	125,08	121,43	121,32	121,23	120,80
5	152,22	152,95	158,25	153,84	153,64	153,72	153,07
10	180,30	175,75	183,33	181,90	182,58	182,80	181,77
15	198,80	189,09	198,01	200,87	200,36	200,87	200,48
20	213,01	198,56	208,42	213,32	214,23	215,50	214,58
25	224,72	205,90	216,49	224,29	230,40	226,30	226,33

57. Conclusion. — La formule de M. Regnault, parmi toutes celles qui ont été proposées, offre seule une exactitude absolue; mais elle exige un calcul assez compliqué, et l'emploi de constantes dont la valeur se fixerait difficilement dans la mémoire; c'est la formule exacte du cabinet de travail; celle de Dalton ne devra être employée que par approximation, et il suffira de se rappeler cette valeur unique de $\log a = 0,0132$, qui permettra de trouver immédiatement, et à moins d'un degré près, la température correspondante à une pression donnée. Elle devra donc être considérée comme la plus commode, lorsque l'on n'aura point à sa disposition la copie des tables de M. Regnault, que l'on trouve heureusement dans la plupart des traités élémentaires de physique. La loi de Dalton n'en restera pas moins, pour l'esprit, comme l'expression d'une relation simple, nous oserions dire philosophique, entre les deux circonstances principales du phénomène que nous venons d'étudier dans les paragraphes qui précèdent.

* $\log. a = 0,0132$ pour les pressions de 1 à 7 atmosphères.

** $\log. a = 0,0120$ pour les pressions de 1 à 25 atmosphères.

III. Dilatation des gaz et des vapeurs.

58. Loi de Gay-Lussac sur la dilatation des gaz. — Gay-Lussac en France et Dalton en Angleterre ont étudié la dilatation de l'air, comparativement à celle du mercure, au moyen de deux thermomètres, l'un à air et l'autre à mercure, placés dans un même bain, convenablement chauffé.

La loi de Gay-Lussac consiste en ce que :

- 1° La dilatation de l'air est uniforme depuis 0° jusqu'à 100°;
- 2° Elle est mesurée, pour chaque degré, par la fraction 0,00375 du volume à 0°.

Le rapport entre l'accroissement du volume et le volume primitif, pour chaque degré de température, est ce que l'on appelle le *coefficient de dilatation*.

Dulong et Petit ont étendu le travail de Gay-Lussac pour des températures inférieures à 0°, et pour des températures supérieures à 100°, jusqu'à 360°.

Ils ont opéré par deux procédés différents, soit en mesurant les volumes de l'air ramené à 0°, soit en mesurant la hauteur de la colonne de mercure qui est rentré dans l'appareil pendant le refroidissement.

« Les résultats de ces deux procédés se confirment l'un par l'autre, car ils s'accordent parfaitement entre eux et montrent en même temps que la loi de Mariotte s'étend à toutes les températures. »

59. Module ou binôme de dilatation. — Si a est le coefficient de dilatation de l'air à partir de 0° et pour chaque degré de température, la dilatation d'un volume primitif E , en passant de la température 0 à la température t' , sera mesurée par le produit $E \times a \times t'$, et par conséquent le volume final sera $E' = E + E a t' = E (1 + a t')$; le coefficient $1 + a t'$, par lequel il faut multiplier le volume à 0°, pour avoir, sous la même pression, le volume à la température t' , est ce qu'on est convenu d'appeler *module* ou *binôme de dilatation* : sa valeur est différente suivant qu'on y introduit pour t' un nombre plus ou

moins grand, et son emploi sera pour nous d'un usage constant, dans toutes les questions où nous aurons à considérer des variations de température.

De la relation précédente on déduit

$$E = \frac{E'}{1 + at'},$$

ce qui revient à dire que le volume à 0° est égal au volume à une température quelconque divisé par le binôme de dilatation.

On aurait de même

$$E'' = E(1 + at'') = \frac{E'(1 + at'')}{1 + at'},$$

ce qui s'exprime en disant que le volume, à la température t'' , est égal au volume, à une autre température t' , multiplié par le rapport inverse des binômes de dilatation, condition qui s'exprime plus commodément, comme conséquence de la formule fondamentale par la relation :

$$E = \frac{E'}{1 + at'} = \frac{E''}{1 + at''},$$

qui est la base de tout calcul du même genre. On remarque d'ailleurs que par suite de la petite valeur de a , on peut simplifier les rapports de la forme $\frac{1 + at''}{1 + at'}$. On a en effet, en effectuant, autant que possible, la division

$$\frac{1 + at''}{1 + at'} = 1 + a(t'' - t') - \frac{a(t'' - t')at'}{1 + at'}.$$

Cette dernière quantité, qui contient a^2 au numérateur, est négligeable par rapport aux deux autres termes, et l'on écrit plus simplement

$$\frac{1 + at''}{1 + at'} = 1 + a(t'' - t').$$

On se sert plus particulièrement de cette formule pour les calculs de dilatation des solides et des liquides.

40. — *Expériences de M. Regnault.* — Depuis que les premières déterminations ont été faites, plusieurs coefficients de dilatation ont été proposés par divers physiciens, et M. Regnault (*Annales de chimie et de physique*, t. V, 1842) a repris la question dans son ensemble.

Les expériences de M. Regnault ont été faites par des procédés très-peu différents de ceux employés par Gay-Lussac et par Rudberg; mais il a su porter si loin l'exactitude de ces procédés, que les chiffres obtenus dans cinq séries successives, à l'aide d'appareils différents, n'ont présenté de variation que dans la sixième décimale.

Il résume ainsi les résultats de ces cinq séries distinctes :

Première série.....	0,0036623
Deuxième série.....	0,0036633
Troisième série.....	0,0036679
Quatrième série.....	0,0036650
Cinquième série.....	0,003670

41. *Dilatation de l'air sous diverses pressions.* — M. Regnault a d'ailleurs répété ces observations sous des pressions qui ont varié de 1 à 3 atmosphères, et les résultats qu'il a obtenus pour l'air atmosphérique lui ont fourni les coefficients que nous reproduisons dans le tableau suivant :

Pressions.	Coefficient moyen de dilatation entre 0 et 100°.
1,000	0,0036706
3,322	0,0036944
3,347	0,0036964

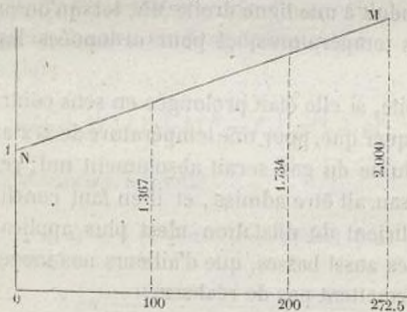
Nous ferons abstraction des différences minimales qui existent entre ces chiffres et nous admettrons d'une manière générale que le coefficient de dilatation de l'air est 0,00367. On voit que ce nombre se rapproche beaucoup de celui auquel Gay-Lussac s'était arrêté.

42. *Dilatation des gaz à pression constante ou à volume constant.* — L'augmentation du volume, sans variation de pression, est ce que l'on appelle la *dilatation à pression constante*, mais on peut aussi concevoir que le volume restant invariable, l'action de la chaleur se traduise par une augmentation de pression.

Si la loi de Mariotte était absolument exacte, il est évident que l'augmentation de pression serait celle qui résulterait de la réduction par compression du volume dilaté par la chaleur au volume primitif; mais l'expérience indique que la pression augmente d'une manière différente, et c'est cette augmentation de pression, observée directement, que l'on appelle *dilatation à volume constant*, malgré la contradiction manifeste qui existe entre les deux mots ainsi réunis. Au point de vue pratique, la dilatation à volume constant s'exprimera par la formule $P' = P (1 + at)$, dans laquelle on prendra pour a la valeur 0,00367, toutes les fois qu'il ne sera pas nécessaire de recourir, pour plus d'exactitude, à un coefficient mieux approprié aux circonstances spéciales de l'application à faire.

43. *Représentation graphique de la loi de Gay-Lussac sur la dilatation des gaz.* — La relation entre les volumes et les

Fig. 6.



températures d'une même quantité de gaz, à pression constante, est si simple, qu'il est à peine utile de chercher à la

représenter par un tracé. Cependant la figure 6, ci-jointe, permettra aux personnes les moins exercées au calcul de voir comment les variations des volumes ont lieu. Pour la température de 100° ,

$$1 + at = 1 + 100 \times 0,00367 = 1,367,$$

et ce chiffre donne la mesure de ce que devient un volume égal à 1, lorsque l'on passe de 0 à 100° ; à 200° , on trouverait

$$1 + at' = 1,734;$$

à 300° ,

$$1 + at'' = 2,101.$$

Le volume est presque doublé à cette dernière température, et il serait exactement le double du volume primitif si l'on avait

$$1 + at'' = 2, \text{ d'où } at'' = 1; t'' = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,00367} = 272^{\circ}50.$$

Si la même loi était applicable à des températures plus élevées, la même différence de $272^{\circ}50$ correspondrait à chaque augmentation de volume, égale au volume primitif du gaz.

On remarquera que, dans le cas de cette relation simple, le tracé conduit à une ligne droite MN, lorsqu'on prend pour abscisses les températures, et pour ordonnées les volumes successifs.

Cette droite, si elle était prolongée en sens contraire, semblerait indiquer que, pour une température de 272° au-dessous de 0 , le volume du gaz serait absolument nul; cette conséquence ne saurait être admise, et il en faut conclure que le même coefficient de dilatation n'est plus applicable à des températures aussi basses, que d'ailleurs nos moyens actuels ne nous permettent pas de réaliser.

44. Coefficient de dilatation des différents gaz. — M. Regnault a entrepris une série d'expériences analogues sur les

gaz les plus usuels. Le tableau suivant fait connaître les résultats de ces expériences, et l'on peut reconnaître que tous les chiffres qu'il renferme sont très-peu différents de la valeur $a = 0,00367$ qu'il convient d'adopter.

TABLEAU DU COEFFICIENT MOYEN DE DILATATION,
POUR CHAQUE DEGRÉ, ENTRE 0 ET 100°.

	Sous volume constant.	Sous pression constante.
Hydrogène.....	0,003667	0,003661
Air atmosphérique.....	0,003665	0,003670
Azote.....	0,003668	»
Oxyde de carbone.....	0,003667	0,003669
Acide carbonique.....	0,003688	0,003710
Protoxyde d'azote.....	0,003676	0,003719
Acide sulfureux.....	0,003845	0,003903
Cyanogène.....	0,003829	0,003877

Le coefficient de dilatation de l'oxygène n'a pu être déterminé, parce que l'oxydation du mercure a toujours apporté des causes d'erreur, dont l'influence était assez considérable.

43. *Coefficient de la dilatation de l'air aux diverses températures.* — Puisque l'air se dilate, pour chaque degré, de la même fraction de son volume à 0, il est facile de voir que s'il est d'abord porté à la température t' , pour avoir son volume à la température t'' , il faudra se servir d'un coefficient de dilatation différent et que nous désignerons par b .

On aura alors

$$(1 + at') \{ 1 + b(t'' - t') \} = 1 + at''$$

d'où l'on tire successivement

$$1 + at' + b(1 + at')(t'' - t') = 1 + at''$$

$$b = \frac{a(t'' - t')}{(1 + at')(t'' - t')} = \frac{a}{1 + at'}$$

Le tableau suivant indique les valeurs successives de b , pour

chaque degré, et pour des températures variant de 10 en 10°, jusqu'à 200°.

Températures initiales t'	Coefficient de dilatation par 1°. b	Températures initiales t'	Coefficient de dilatation par 1°. b
0	0,00367 = 1:272,5	110	0,00261 = 1:382,5
10	0,00353 1:282,5	120	0,00254 1:392,5
20	0,00341 1:292,5	130	0,00248 1:402,5
30	0,00330 1:302,5	140	0,00242 1:412,5
40	0,00320 1:312,5	150	0,00236 1:422,5
50	0,00310 1:322,5	160	0,00231 1:432,5
60	0,00300 1:332,5	170	0,00226 1:442,5
70	0,00292 1:342,5	180	0,00220 1:452,5
80	0,00283 1:352,5	190	0,00216 1:462,5
90	0,00275 1:362,5	200	0,00211 1:472,5
100	0,00268 1:372,5		

46. *Formule anglaise de la dilatation des gaz.* — On donne en Angleterre à la formule de la dilatation des gaz une disposition particulière, qu'il est bon de rapprocher de notre formule française. Celle-ci peut s'écrire :

$$\frac{E'}{E''} = \frac{1 + at'}{1 + at''} = \frac{\frac{1}{a} + t'}{\frac{1}{a} + t''} = \frac{272,5 + t'}{272,5 + t''}.$$

Pour exprimer les températures en degrés Fahrenheit T'' et T' , il suffira de recourir aux formules ordinaires de réduction

$$t' = \frac{T' - 32}{1,80}, \quad t'' = \frac{T'' - 32}{1,80},$$

En substituant dans la précédente équation, on trouve facilement

$$\frac{E'}{E''} = \frac{272,5 + \frac{T' - 32}{1,80}}{272,5 + \frac{T'' - 32}{1,80}} = \frac{490,5 + T' - 32}{490,5 + T'' - 32} = \frac{458,5 + T'}{458,5 + T''}.$$

On retrouve ainsi les chiffres de la formule anglaise que l'on écrit habituellement

$$\frac{E'}{E''} = \frac{458 + T'}{458 + T''}.$$

47. *Combinaison de la loi de Mariotte avec celle de Gay-Lussac.* — Un gaz étant primitivement à la pression P , sous le volume E , et à la température t , il nous est facile maintenant de calculer son volume E' à une autre pression P' et à une autre température t' ; il suffit d'obtenir le volume e de ce gaz à la température primitive t et à la nouvelle pression P' , ce qui se calcule par la formule de Mariotte :

$$EP = eP' \quad \text{d'où} \quad e = \frac{EP}{P'},$$

et d'appliquer ensuite, à ce volume e , la loi de Gay-Lussac sous la forme

$$E' = e \frac{1 + at'}{1 + at}.$$

En mettant pour e la valeur que nous avons trouvée en premier lieu, on a enfin

$$E' = \frac{EP}{P'} \times \frac{1 + at'}{1 + at},$$

relation que l'on met habituellement sous la forme

$$\frac{E'P'}{1 + at'} = \frac{EP}{1 + at}$$

et qui peut s'exprimer en disant qu'en multipliant le volume d'une certaine quantité de gaz par sa pression, et en divisant par le binôme de dilatation, on trouve toujours un nombre constant, quelles que soient d'ailleurs la température et cette pression. Si, dans cette formule, on fait

$$P' = 1; \quad t' = 0; \quad E' = E,$$

il vient

$$E_0 = \frac{EP}{1 + at}.$$

La fraction $\frac{EP}{1 + at}$ est donc toujours égale au volume du gaz à 0° et à la pression 1.

Cette formule peut être, avec une suffisante approximation, appliquée d'une manière générale à tous les gaz, lorsqu'on connaît le coefficient α de dilatation. On s'en sert seulement pour les vapeurs dans les limites qui conviennent tout à la fois aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac.

48. *Autre disposition de la formule combinée.* — En faisant une transformation analogue à celle qui nous a conduit à la formule anglaise de dilatation, mais en conservant notre échelle centigrade, nous pouvons écrire la formule générale ainsi qu'il suit :

$$\frac{EP'}{1 + \alpha t'} = \frac{EP}{1 + \alpha t} \quad \frac{EP'}{\frac{1}{\alpha} + t'} = \frac{EP}{\frac{1}{\alpha} + t}$$

$$\frac{EP'}{272,5 + t'} = \frac{EP}{272,5 + t}$$

Quelques auteurs emploient plus volontiers cette disposition, qui s'écrit encore :

$$EP' (272,5 + t) = EP (272,5 + t').$$

49. *Formule anglaise correspondante.* — On sait que la température t en degrés centigrades est exprimée en degrés Fahrenheit par la relation

$$t = \frac{T - 32}{1,80}.$$

On ne changera donc pas l'équation qui précède en écrivant :

$$\frac{EP}{EP'} = \frac{272,5 + \frac{T - 32}{1,80}}{272,5 + \frac{T' - 32}{1,80}} = \frac{490,5 + T - 32}{490,5 + T' - 32} = \frac{458,5 + T}{458,5 + T'}.$$

Les auteurs anglais suppriment le chiffre des dixièmes au numérateur et au dénominateur, et ils écrivent simplement :

$$\frac{EP}{EP'} = \frac{458 + T}{458 + T'}.$$

Notre formule du n° 46 n'est qu'un cas particulier de cette formule générale, dans lequel $P = P'$.

30. *Condition nécessaire pour obtenir de grandes pressions par l'action de la chaleur sur les gaz.* — L'air atmosphérique est employé dans quelques machines pour déterminer des efforts moteurs, dans des conditions analogues à celles de l'emploi de la vapeur pour le même objet. Avant de quitter la question de la dilatation des gaz, il est bon d'observer que ces efforts ne peuvent être du même ordre que ceux que l'on obtient à l'aide de la vapeur, qu'à la condition de recourir à des températures extrêmement élevées, pour lesquelles les pertes de chaleur dues aux refroidissements seraient beaucoup plus considérables.

Puisque le coefficient de dilatation de l'air à volume constant est 0,00367 pour chaque degré du thermomètre centigrade, et qu'en conséquence on a

$$P' = P (1 + 0,00367 t),$$

il s'ensuit que, si l'on veut que $P' = 2P$, il faut déterminer t de telle façon que

$$1 + 0,00367 t = 2$$

$$0,00367 t = 1$$

$$t = \frac{1}{0,00367} = 272^{\circ},5.$$

Et, pour obtenir des pressions croissant successivement d'une

atmosphère, il faudrait atteindre les limites indiquées par la dernière colonne de ce tableau :

1	0,00
2	272,50
3	545,00
4	817,50
5	990,00

Pour arriver à cette même pression de 5 atmosphères, nous savons qu'il suffit d'employer de la vapeur à 150°. De là un avantage très-considérable en faveur de l'emploi de la vapeur.

Ces grandes pressions de l'air atmosphérique seraient également déterminées par une compression mécanique; mais alors la chaleur ne jouerait qu'un rôle secondaire, et l'on aurait à dépenser pratiquement, pour cette compression, plus de travail mécanique que la machine n'en pourrait ensuite développer.

Pour laisser à la chaleur un rôle de quelque importance dans les machines à air, on comprime habituellement l'air à une pression déjà élevée, et l'on augmente ensuite cette pression par l'action de la chaleur. Si la compression primitive a amené l'air à une pression P , l'élévation de cet air à la température t donnera pour la pression finale

$$P' = P(1 + at),$$

c'est-à-dire que la pression initiale sera doublée, triplée, etc., par les mêmes différences de température de 272°, 5; 545°, etc.

31. Action combinée de la chaleur et de la pression sur les vapeurs. — Puisque la tension des vapeurs ne peut, pour chaque température, dépasser la limite fixée par les tableaux des nos 26 et suivants, on sait déjà qu'elles ne se comporteront comme des gaz et qu'elles n'obéiront aux lois réunies de Mariotte et de Gay-Lussac que dans les cas où cette limite supérieure ne serait pas atteinte.

En général, on ne considère les vapeurs, dans les machines, que dans des conditions particulières, que nous pouvons énumérer ainsi qu'il suit :

1° Période de formation, dans laquelle il suffit ordinairement de considérer la valeur de la pression maxima ;

2° Période de surchauffage, dans laquelle la tension n'est jamais augmentée que dans une faible proportion, par une augmentation de température ;

3° Période de détente, dans laquelle la pression s'abaisse, ainsi que nous l'avons dit déjà, suivant les indications de la loi de Mariotte ;

4° Période de condensation, dans laquelle la vapeur est suffisamment refroidie pour être en partie ramenée à l'état liquide.

Bien que nous ne rencontrions, parmi ces circonstances, aucune action qui rende les lois fondamentales inapplicables, nous énumérerons d'une manière succincte les différents phénomènes que la pression et la température exercent sur les vapeurs.

§2. Action de la chaleur et du froid sur les vapeurs. — Lorsqu'on chauffe une vapeur saturée dans un espace clos, elle obéit sensiblement à la loi de Gay-Lussac, et alors sa pression finale devient, ainsi que pour les gaz qui se dilatent à volume constant,

$$P' = P [1 + a (t' - t)].$$

Les accroissements de pression qui correspondent à la loi de Dalton étant toujours beaucoup plus rapides que ceux qui sont indiqués par cette formule, la pression P' ainsi déterminée sera, dans tous les cas, inférieure à celle du maximum de tension pour la température t' . Aucune condensation ne saurait donc avoir lieu dans ces circonstances.

Il en sera tout autrement si l'on cherche à refroidir de la

vapeur saturée. Quel que soit le degré de refroidissement qu'on lui fasse subir, la pression $P' = P [1 + a(t-t')]$, qui devrait résulter de l'application de la loi de Gay-Lussac, serait plus grande que la tension maxima, correspondant à cette température t' , et une condensation se produirait jusqu'à ce que la pression primitive se fût abaissée jusqu'à cette limite.

33. Action d'une diminution ou d'une augmentation de pression. — Les effets résultant d'une différence de pression sont plus complexes : lorsqu'on agit sur un gaz pour le comprimer, il s'échauffe; il se refroidit au contraire si on le raréfie, et l'influence de la température se fait sentir en même temps que celle de la pression.

C'est seulement en faisant abstraction de ces effets secondaires que l'on peut admettre, dans le cas d'une diminution de pression, que les volumes varient conformément à la loi de Mariotte :

$$E' = \frac{EP}{P'}.$$

Si on faisait passer un gaz de la pression P à la pression P' plus grande que P , on aurait de même

$$E' = \frac{EP}{P'}.$$

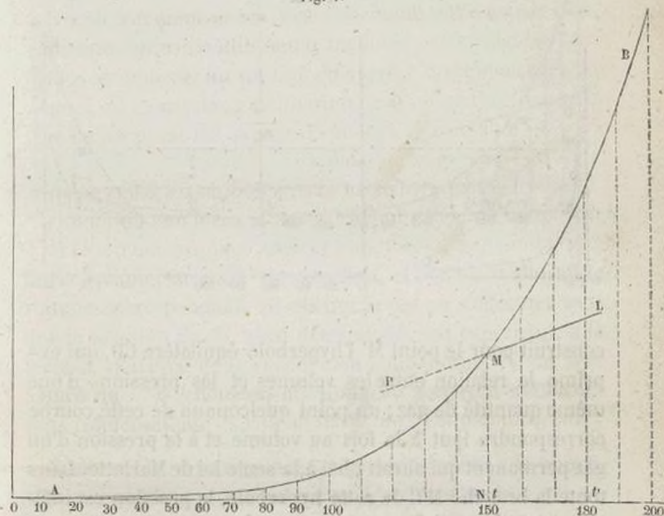
Mais, en ce qui concerne la vapeur saturée, la pression P' ne pouvant pas être plus grande que P , il y aura condensation de toute la quantité de vapeur qui excéderait la quantité nécessaire pour que la pression se maintienne constante à la tension maxima. Au moment même où l'augmentation de pression est exercée, il y aura cependant un léger échauffement à la faveur duquel la pression pourra se maintenir un peu plus grande, jusqu'à ce que l'équilibre de température se soit établi.

34. Représentation graphique des résultats. — La figure 7

aidera beaucoup à faire comprendre ces phénomènes dans tous leurs détails.

Dans cette figure, la courbe AB représente la relation entre la pression maxima et la température de la vapeur d'eau saturée : c'est une reproduction de la courbe de M. Regnault, n° 27.

Fig. 7.



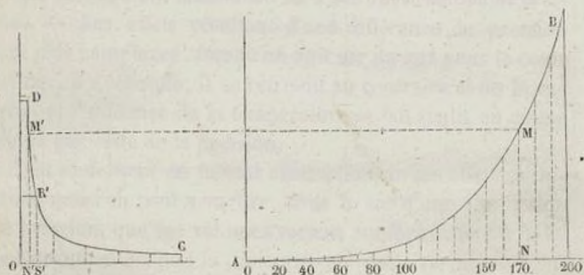
Soit M un point de cette courbe qui correspond à la température t et à la pression P pour cette température; si nous menons par ce point la droite PL qui représente la loi de Gay-Lussac pour la dilatation à volume constant, l'ordonnée Lt' de cette droite pour la température t' mesurera la pression de la vapeur primitive, dilatée jusqu'à t' ; cette ordonnée étant moindre que celle de la courbe AB pour la température t' , on voit qu'il n'y aura pas de condensation, mais il en serait tout autrement si l'on considérait un point de la droite PL situé à la gauche du point M.



Une seconde figure est nécessaire pour faire comprendre l'effet d'une modification dans la pression.

L'ordonnée MN (fig. 8) représentant, comme précédemment, la pression de la vapeur saturée à la température t , nous avons reporté cette ordonnée en M'N', et nous avons

Fig. 8.

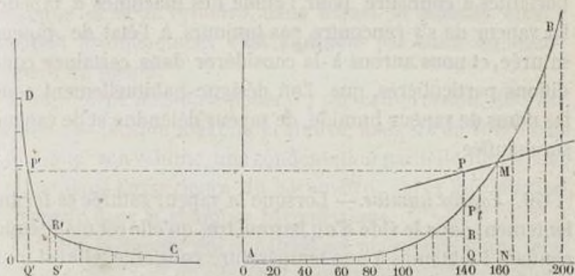


construit pour le point M' l'hyperbole équilatère CD, qui exprime la relation entre les volumes et les pressions d'une même quantité de gaz; un point quelconque de cette courbe correspondra tout à la fois au volume et à la pression d'un gaz permanent qui aurait obéi à la seule loi de Mariotte. Dans toute la branche M'C de cette hyperbole, la pression est inférieure à MN, et le volume qui en résulte suffit pour contenir, à l'état gazeux, toute la vapeur primitive; dans la branche M'D, au contraire, on voit que toute augmentation de pression correspond à une diminution de volume, et la vapeur saturée ne se prêterait point à cette réduction.

L'emploi de ces représentations graphiques est très-commode pour faire comprendre ces phénomènes assez complexes; si l'on voulait chercher le résultat d'une modification simultanée de température et de pression, on s'attacherait d'abord à déterminer (fig. 9) sur la branche AB de la courbe de Dalton le point M, qui correspond à la pression P et à la température t ; on mènerait la droite PM, au moyen de la-

quelle on connaîtrait la valeur de la pression P , à volume constant, à la température t' ; on reporterait l'ordonnée PQ sur la courbe CD , au moyen de laquelle on étudierait l'in-

Fig. 9.



fluence d'une variation de pression, et l'on en déduirait le volume correspondant. Si ces tracés ont pu s'effectuer sans que la pression finale, ainsi déterminée, soit supérieure à la tension maxima de la vapeur à la température t' , on sera assuré que les changements indiqués pourront s'effectuer sans condensation.

EXEMPLE. La vapeur saturée est primitivement à la température de 160° , et par conséquent à la pression de 6,121 atmosphères. Je veux l'abaisser à 140° , ce qui l'amènerait, si la loi de Gay-Lussac était applicable, à la pression $\frac{P}{1 + a(t' - t)}$

qui est mesurée par l'ordonnée PQ , que je reporte en P' sur la courbe CD de la figure; je veux abaisser cette pression PQ à 1,75 atmosphère, ce qui me fournit le point R , qui est moins élevé que le point P' , qui représente la pression maxima pour la température t' : la vapeur pourra donc se prêter, sans condensation, à ces changements, et son volume final sera représenté par OS' .

Nous avons, dans ces tracés, séparé les axes auxquels les deux courbes sont rapportées; mais il suffirait, dans la pra-

tique, de les réunir, à la seule condition de se rappeler leurs significations distinctes.

55. *Des conditions dans lesquelles se trouve la vapeur dans les machines.* — Les indications qui précèdent sont très-importantes à connaître pour l'étude des machines à vapeur. La vapeur ne s'y rencontre pas toujours à l'état de vapeur saturée, et nous aurons à la considérer dans certaines conditions particulières, que l'on désigne habituellement sous les noms de vapeur humide, de vapeur détendue et de vapeur surchauffée.

56. *Vapeur humide.* — Lorsque la vapeur saturée se forme lentement dans le vide d'un baromètre, qu'elle est maintenue pendant longtemps à une température constante, elle est tout à fait comparable, par sa constitution, à celle d'un gaz; mais il n'en est pas de même pour celle qui se forme et qui circule dans les appareils de l'industrie, dans lesquels on se propose d'en produire le plus grand poids possible dans un temps donné.

La vapeur ainsi obtenue renferme toujours une quantité d'eau entraînée, dont nous apprendrons à déterminer la proportion, et cette eau intervient dans les phénomènes, en donnant à cette vapeur humide des propriétés toutes particulières.

Nous nous bornerons, pour le moment, à indiquer les différences d'aspect qu'elle présente avec la vapeur simplement saturée. Celle-ci, qu'on désigne, dans les ateliers, sous le nom de vapeur sèche, est complètement invisible au sortir des orifices par lesquels elle s'échappe; ce n'est qu'à 50 centimètres environ de ces orifices qu'elle prend l'aspect nuageux qui caractérise la vapeur humide dès sa sortie.

Les chauffeurs un peu expérimentés ne se trompent pas dans les circonstances extrêmes, mais on comprend qu'il n'en est pas de même pour les cas intermédiaires, qui se rapprochent plus ou moins de l'un ou de l'autre de ces deux aspects.

57. *Vapeur détendue.* — Si un espace est rempli de vapeur

saturée, et si l'on augmente cet espace, sans que la température puisse changer, nous avons vu que la vapeur se détend comme un gaz, suivant une loi peu différente de celle de Mariotte.

C'est à cet état de vapeur détendue que se trouve la vapeur contenue dans un cylindre, dans lequel la capacité qu'elle occupait primitivement s'est agrandie par suite du mouvement du piston.

Cette vapeur détendue pourrait, par compression, être ramenée à sa tension maxima primitive, mais si l'on continuait à diminuer son volume, une condensation partielle aurait lieu, comme dans l'expérience du baromètre, après introduction de vapeur dans la chambre barométrique.

Lorsque la vapeur qui se détend est maintenue à une température élevée, et qu'elle était primitivement chargée d'une certaine quantité d'eau maintenue en suspension, il peut arriver que cette eau se vaporise en partie, et c'est à cette circonstance que l'on doit attribuer sans doute une partie de la différence que nous avons signalée, dans les machines à enveloppe, entre la pression réelle et la valeur de celle que l'on déduirait de l'application de la loi de Mariotte à la période de détente. Cette observation devra plus particulièrement appeler notre attention lorsque nous nous occuperons des machines à détente.

58. *Vapeur surchauffée.* — Si un espace est rempli de vapeur saturée et si l'on vient à chauffer cette vapeur, sans la laisser en communication avec le liquide qui l'a formée, elle s'échauffera graduellement et conservera l'état gazeux, soit qu'on la maintienne dans la même capacité, soit qu'on augmente cette capacité. La vapeur, en cet état, est ce que l'on appelle de la vapeur surchauffée, c'est-à-dire ayant une température supérieure à celle qui correspond, dans les tables, à sa tension réelle; elle peut être ramenée à l'état de saturation, soit par une diminution convenable de température, soit par une augmentation de pression.

Si la vapeur que l'on surchauffe est de la vapeur humide, l'eau excédante ne manquera pas de se vaporiser, et l'on pourra, par la formation de cette vapeur, augmenter soit la pression, soit le volume primitif.

Nous verrons ultérieurement en quoi la vapeur surchauffée peut être utile et le parti qu'on en a tiré dans certaines circonstances.

59. *Rapprochement à établir entre la vapeur détendue et la vapeur surchauffée.* — Soit que l'on fasse détendre de la vapeur à une température déterminée, de manière à diminuer sa pression, soit que l'on porte cette vapeur à une température plus élevée, tout en la maintenant à une pression inférieure à la pression maxima, pour cette température, on a, dans l'un et l'autre cas, de la vapeur qui peut supporter, sans se condenser, une certaine diminution de température ou une certaine augmentation de pression.

L'un et l'autre procédé fournissent de la vapeur non saturée, qui, dans des limites plus ou moins grandes, peut se comporter comme un gaz, non pas seulement lorsqu'on élève la température ou lorsqu'on diminue la pression, mais encore quand on modifie ces deux éléments en sens inverses.

On conçoit dès à présent l'utilité pratique de cette vapeur détendue ou surchauffée, qui conserve son état gazeux dans les mêmes circonstances par lesquelles la vapeur saturée serait partiellement condensée. Ces qualités particulières de la vapeur surchauffée auraient dès longtemps généralisé son emploi, si ces avantages n'étaient rachetés par la température élevée qu'on risque de lui faire acquérir dans la plupart des applications, au grand préjudice des parties frottantes qui sont exposées à son action.

60. *Tension de la vapeur dans un espace inégalement chaud.* — La vapeur se condensant sur le point le plus froid des parois qui la retiennent, jusqu'à ce que la pression soit descendue à celle de la vapeur saturée qui correspond à la température de ce point, on indique, dans la plupart des ouvrages

spéciaux, que la pression est toujours celle qui correspond au point le plus refroidi. Mais il est important de remarquer que cette tension n'est la même en tous les points qu'après un certain temps, et que, dans le cas où la vapeur est en mouvement rapide, cet équilibre n'existe jamais.

On aura donc soin de n'appliquer ce principe de physique que dans le cas où la vapeur serait hermétiquement contenue dans un vase dont toutes les parties seraient restées individuellement à une même température, pendant un temps suffisant pour que l'équilibre se soit complètement établi.

61. *Tension d'un mélange de gaz et de vapeur.*— On admet, d'après l'expérience, que la tension d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des tensions des deux fluides mélangés, en telle sorte que la vapeur peut exister dans le mélange avec toute tension inférieure à la tension maxima correspondant à sa température.

On voit, par conséquent, que la vapeur peut subsister sous une grande pression, pourvu qu'elle n'ait pas, par elle-même, un volume plus réduit que celui qui correspond, pour chaque température, à la tension maxima.

Il se forme dans l'air la même quantité de vapeur que dans le vide, à égalité de température. Les mélanges de gaz et de vapeur sont rarement employés; mais dans ces derniers temps, MM. Lyon Playfair et Wanklyn se sont servis de ce principe pour déterminer la densité de diverses vapeurs.

On admettait, d'après cette même propriété, que la vapeur des mêmes substances acquerrait, aux mêmes températures, dans l'air et dans les différents gaz, la même tension. Les expériences que M. Regnault a publiées dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome XXXIX, pages 301 et 397, ont établi que cette loi de Dalton n'est pas vérifiée dans la plupart des cas, et que la présence du gaz détermine toujours une diminution de tension de la vapeur, par rapport à celle que cette vapeur acquerrait dans le vide.

IV. Densités des gaz et des vapeurs.

62. *De la densité et de l'unité de densité.* Un litre d'eau à 4° pèse un kilogramme.

Le même volume d'eau pèse moins à toute autre température.

La densité d'un corps, à une température quelconque, est le rapport du poids de ce corps au poids d'un égal volume d'eau, prise à cette température de 4 degrés centigrades. Les densités indiquées dans les tables se rapportent à la température 0, et l'on voit qu'il faut alors comparer le poids d'un certain volume du corps à 0°, au poids d'un égal volume d'eau à 4°. Ainsi définie, la densité d'un corps est égale au poids du décimètre cube de ce corps. On compare habituellement la densité d'un gaz à celle de l'air, et l'on dit alors que la densité de ce gaz est le rapport entre le poids de ce gaz et le poids d'un égal volume d'air, à la température de 0° et à la pression d'une atmosphère. Il en résulte que pour connaître la densité par rapport à l'eau, il faut diviser la densité par rapport à l'air par le rapport entre les poids de volumes égaux d'eau et d'air. Il serait mieux de se servir dans ce cas de l'expression de pesanteur spécifique par rapport à celle de l'air.

65. *Poids du mètre cube et volume du kilogramme.* — Le mètre cube d'eau pesant 1000 kilogrammes, il est clair que le poids du mètre cube d'un corps dont la densité par rapport à l'eau est d , sera 1000 d . Si la densité d' de ce corps est donnée par rapport à l'air, il suffira de multiplier d' par le poids du mètre cube d'air.

Si un mètre cube d'une certaine substance pèse p kilogrammes, il est clair qu'un kilogramme de cette substance aura pour volume $\frac{1^{\text{m.c.}}}{p}$, en telle sorte que l'une de ces quatre quantités étant connue :

d la densité par rapport à l'eau ;

$d' = \frac{d}{a}$ la densité par rapport à l'air, a étant la densité de l'air par rapport à l'eau ;

$p = 1000 d = 1000 ad^{\text{kil}}$ le poids du mètre cube ;

$e = \frac{1^{\text{m.c.}}}{p}$ le volume du kilogramme ,

on pourra immédiatement déterminer les trois autres si la densité de l'air par rapport à l'eau est connue.

64. Densité de l'air et de quelques gaz. — M. Regnault a trouvé que le poids du litre d'air, à la température de 0° et sous la pression de 1 atmosphère, est $1^{\text{er}}, 29318$.

1 kilogramme d'air occupe donc dans ces conditions un volume de..... $0^{\text{me}}, 77329$

Et un mètre cube pèse..... $1^{\text{k}}, 29318$

On admettait précédemment que le poids du mètre cube était..... $1^{\text{k}}, 29905$

La densité de l'air par rapport à l'eau est

$$1^{\text{k}}, 29318 : 1000^{\text{k}} = 0,00129318.$$

C'est également à M. Regnault que l'on doit la détermination de la densité des autres gaz, telle que nous l'indiquons dans le tableau ci-joint. Nous y avons réuni les chiffres qui expriment le poids du mètre cube et le volume du kilogramme.

TABLEAU DES DENSITÉS, DES POIDS DU MÈTRE CUBE
ET DES VOLUMES DU KILOGRAMME DES DIFFÉRENTS GAZ,
À LA TEMPÉRATURE DE 0° DEGRÉ ET À LA PRESSION DE 1 ATMOSPHÈRE.

Désignation des gaz.	Densité par rapport à l'air.	Densité par rapport à l'eau.	Poids du mètre cube.	Volume du kilogramme.
Air atmosphérique...	1,00000	0,001293187	$1^{\text{k}}, 293187$	$0^{\text{me}}, 7733$
Azote.....	0,97137	0,001256167	$1, 256167$	$0 , 7961$
Hydrogène.....	0,06926	0,000089578	$0, 089578$	$11 , 1633$
Oxygène.....	1,10563	0,001429802	$1, 429802$	$0 , 6994$
Acide carbonique....	1,52901	0,001977414	$1, 977414$	$0 , 5057$

65. Détermination de la densité d'un gaz, suivant sa pression et sa température. — Une même quantité de gaz dans ses différents états satisfait toujours à la relation du n° 47, dans

laquelle nous exprimerons les pressions en atmosphères par les lettres N et N' .

$$\frac{EN}{E'N'} = \frac{1+at}{1+at'} \quad \text{d'où l'on tire} \quad E' = \frac{EN(1+at')}{N'(1+at)}.$$

Si nous supposons $N = 1$, $t = 0$, il vient simplement

$$\frac{E'}{E} = \frac{1+at'}{N'}.$$

Or, ce rapport entre les volumes est égal au rapport inverse des densités; on a donc :

$$\frac{d'}{d} = \frac{N'}{1+at'}, \quad d' = \frac{dN'}{1+at'}.$$

Si p est le poids du mètre cube dans l'un des cas, p' ce poids dans l'autre circonstance :

$$p' = \frac{pN'}{1+at'}$$

et le volume du kilogramme sera donné par la formule

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{p} \frac{1+at'}{N'}.$$

Ces formules étant déduites, comme conséquences forcées, de la loi de Mariotte et de celle de Gay-Lussac, sont exactes toutes les fois que les principes de ces lois sont applicables; c'est ce qui arrive pour tous les gaz permanents; quant aux vapeurs, nous aurons à voir si elles se conforment à ces mêmes principes avec une exactitude suffisante.

66. Expériences de Gay-Lussac sur la détermination de la densité de la vapeur d'eau. — La facilité avec laquelle la vapeur se condense rend la détermination de la densité de la vapeur d'eau fort délicate; mais Gay-Lussac s'est mis à l'abri de cette difficulté en vaporisant sur le mercure, à une température de 100° , une petite quantité d'eau, pesée

exactement, et contenue dans une ampoule dont la dilatation même de l'eau produisait la rupture.

Nous n'avons pu retrouver le mémoire original de Gay-Lussac, mais Biot a conservé, dans son *Traité de physique expérimentale et mathématique*, tome I, p. 295, les éléments d'une des expériences de cet habile physicien, dans laquelle la vapeur, portée à la température de 100° et ramenée par le calcul à la pression d'une atmosphère, occupait un volume égal à 1696,4 fois le volume primitif de l'eau vaporisée, ramené au maximum de densité; un kilogramme de vapeur occuperait donc, dans ces conditions, un volume de 1^{m.c.},6964.

On admettait, à ce moment, que le volume occupé par 1 kilogramme d'air à la même température et à la même pression était 1^{m.c.},0577.

La densité de la vapeur par rapport à l'air, telle qu'elle a été calculée par Gay-Lussac, était donc

$$\frac{1,0577}{1,6964} = 0,624,$$

ou à peu près 5/8.

Depuis les recherches de M. Regnault, on sait que le volume du kilogramme d'air à 0° et à la pression d'une atmosphère est 0^{m.c.},7735; à 100° ce volume deviendrait

$$0,7735 (1 + at) = 0,7735 \times 1,367 = 1^{m.c.},0617.$$

La densité de la vapeur par rapport à l'air, telle qu'elle résulte des expériences de Gay-Lussac, devrait donc être calculée aujourd'hui, pour la température de 100°, par le rapport

$$\frac{1,0617}{1,6964} = 0,627.$$

Nous verrons au n° 70 que des considérations tirées de la composition chimique de l'eau conduisent à un chiffre 0,622, peu différent du précédent, et que nous emploierons exclusivement dans nos calculs.

67. *Conséquences de ces expériences.* — Bien que les expé-

riences de Gay-Lussac n'aient été faites que pour des températures très-peu différentes de 100°, on a admis que, puisque les vapeurs se comportent comme les gaz, au point de vue de la loi de Mariotte et de celle de la dilatation, la densité de la vapeur d'eau devait être, à toute pression et à toute température, exprimée par les $\frac{5}{8}$ ^e de celle de l'air atmosphérique, à la même température et à la même pression.

63. *Résultats obtenus par divers physiciens sur la densité de la vapeur d'eau.* — Un grand nombre de déterminations ont été faites de la densité de la vapeur d'eau. Nous empruntons aux leçons autographiées de M. Regnault, au Collège de France, le tableau suivant, qui montre combien Watt s'était approché, dans ses évaluations, du chiffre que nous admettons aujourd'hui.

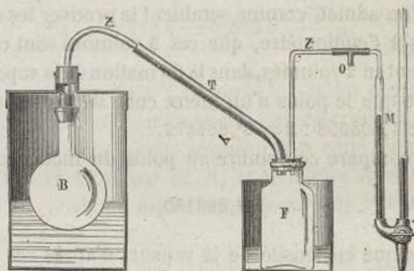
RÉSULTATS OBTENUS PAR DIVERS PHYSICIENS
SUR LA DENSITÉ DE LA VAPEUR D'EAU*.

Noms des observateurs.	Température de l'observation.	Densité rapportée à celle de l'air.
Watt.....	100°,00	0,63340
Davy.....	ordinaire	0,66660
Dalton.....	ordinaire	0,70000
Anderson.....	9°,45	0,65233
Id.....	15°,00	0,66298
Id.....	25°,00	0,63237
Id.....	28°,34	0,62507
Clément Desormes...	12°,50	0,53106
Id.....	12°,50	0,54705
Mayer.....	18°,75	0,80124
Despretz.....	17°,44	0,58518
Id.....	19°,31	0,70367
Gay-Lussac.....	100°,00	0,62350
Brunner.....	9°,50	0,64903
Schmid.....	100°,00	0,72200
Southern.....	109°,45	0,64789
Id.....	132°,23	0,69592
Id.....	146°,16	0,70945
Muncke.....	0°,00	0,82738
Id.....	43°,75	0,62210

* Leçons de physique expérimentale professées au Collège de France, pendant l'année 1845, par M. V. Regnault, membre de l'Institut.

69. Appareil de M. Regnault. — Aucune expérience n'a été publiée sur la densité de la vapeur d'eau au-dessous du point de saturation, mais M. Regnault a donné, dans son cours du Collège de France, la description d'un appareil qui serait très-propre à une telle détermination.

Fig. 10.



Le ballon B (fig. 10), renfermant une quantité d'eau suffisante, est maintenu à la température d'ébullition d'un liquide, dans lequel il est plongé; l'eau se distille en même temps et vient se condenser dans un récipient F par le tube T; ce récipient serait mis en communication avec une machine pneumatique par la tubulure O, du tube de communication *t*, qui aboutit à un manomètre M.

Lorsque l'eau du ballon serait entièrement vaporisée et que le manomètre indiquerait une pression inférieure à celle de l'atmosphère, on fermerait la communication avec la machine pneumatique, et l'on s'assurerait que la pression reste constante pendant un temps suffisant. On pèserait alors le ballon, déjà taré avant l'opération, après qu'on y avait fait le vide. La différence entre les deux pesées, divisée par la capacité du ballon, ferait connaître le poids du mètre cube ou la densité.

70. Observation tirée de la composition de l'eau. — L'eau étant composée d'un volume d'oxygène et de deux volumes

d'hydrogène, on peut déduire de cette composition le poids théorique d'un mètre cube de vapeur d'eau.

1 mètre cube d'oxygène pèse à 0°.....	1 ^k ,429802
2 mètres cubes d'hydrogène pèsent à 0°.....	0, 179156
	<hr/> 1 ^k ,608958

Et si l'on admet, comme semblent le prouver les expériences faites à l'eudiomètre, que ces 3 volumes sont condensés exactement en 2 volumes, dans la formation de la vapeur d'eau, on trouve que le poids d'un mètre cube de vapeur d'eau devrait être 1,608958 : 2 = 0^k,804479.

Si on compare ce nombre au poids du mètre cube d'air,

$$1^k,293180,$$

on trouve que la densité de la vapeur, d'après ces données,

$$\text{serait } \frac{0,804479}{1,293180} = 0,622.$$

71. Expériences de M. Regnault. — Dans son *Traité de chimie*, page 97, M. Regnault s'exprime ainsi :

« Si nous déterminons sa valeur numérique (celle du rapport entre la densité de la vapeur et celle de l'air) pour des températures supérieures à 100° et successivement croissantes, nous reconnaitrons qu'à partir de 130° environ, ce rapport reste sensiblement constant pour toutes les températures supérieures, et qu'il est représenté par la fraction 0,622. »

Bien que cette conclusion ne repose jusqu'à présent que sur les expériences faites sur la vapeur d'eau, à la pression d'une atmosphère et au-dessus, il convient d'accepter pour les pressions inférieures ce chiffre de 0,622, à l'aide duquel nous calculerons la table qui devra remplacer celle de Gay-Lussac, avec de très-petites modifications dans les chiffres.

72. Poids d'un mètre cube de vapeur aux diverses températures et aux diverses pressions. — Connaissant le poids k d'un mètre cube d'air à 0° et sous la pression d'une atmosphère,

on aura le poids d'un mètre cube d'air à la pression N et à la température T par la formule

$$K = k \frac{N}{1 + aT},$$

et le poids du kilogramme de vapeur à la même température et à la même pression sera

$$K' = 0,622 K = 0,622 k \frac{N}{1 + aT}.$$

Connaissant donc N et T , d'après les tables des pressions de M. Regnault, on commencera par déterminer le poids du mètre cube d'air à cette pression et à cette température, ce qui donnera la valeur de K , et il suffira ensuite, pour connaître le poids du mètre cube de vapeur, de multiplier cette quantité par 0,622.

C'est au moyen de cette relation qu'ont été calculés, dans la table du n° 74, le volume du kilogramme et le poids du mètre cube de la vapeur d'eau saturée aux différentes températures.

75. Volumes d'un kilogramme de vapeur aux diverses températures et aux diverses pressions. — Connaissant le volume e d'un kilogramme d'air à 0° et sous la pression d'une atmosphère, on aura son volume E à la pression N et à la température T par la formule

$$E = e \frac{1 + aT}{N},$$

et le volume d'un kilogramme de vapeur à la même température et à la même pression sera

$$E' = \frac{E}{0,622} = \frac{e}{0,622} \frac{1 + aT}{N}.$$

Connaissant donc N et T , on commencera par déterminer le volume du kilogramme d'air à cette pression et à cette température, ce qui donnera la valeur de E , et il suffira en-

suite, pour connaître le volume du kilogramme de vapeur, de diviser cette quantité par 0,622.

74. *Tableau des poids du mètre cube et des volumes du kilogramme de vapeur d'eau, aux diverses températures et aux diverses pressions.* — En mettant, dans les formules précédentes, les valeurs numériques qui ont été précédemment déterminées, on trouve successivement, pour toutes les températures et toutes les pressions :

Densité de l'air par rapport à l'eau,

$$d = \frac{0,00129318 N}{1 + 0,00367 T};$$

Poids du mètre cube d'air à la pression N et à la température T,

$$k = \frac{1,29318 N}{1 + 0,00367 T};$$

Volume du kilogramme d'air à la pression N et à la température T,

$$E = \frac{1}{k} = \frac{1 + 0,00367 T}{1,29318 N};$$

Densité de la vapeur par rapport à l'eau,

$$d' = \frac{0,622 \times 0,00129318 N}{1 + 0,00367 T};$$

Poids du mètre cube de vapeur saturée,

$$k' = 0,622 k = \frac{0,622 \times 1,29318 N}{1 + 0,00367 T};$$

Volume du kilogramme de vapeur saturée,

$$E' = \frac{1}{k'} = \frac{1 + 0,00367 T}{0,622 \times 1,29318 N}.$$

C'est en partant de ces formules qu'ont été calculés les chiffres du tableau suivant :

TABLEAU DES POIDS DU MÈTRE CUBE ET DES VOLUMES DU KILOGRAMME
DE VAPEUR D'EAU SATURÉE AUX DIVERSES PRESSIONS.

Pressions en atmosphères.	Tempéra- tures.	Poids du mètr. cube d'air.	Volumé du kilogramme d'air.	Poids du mètr. cube de vapeur.	Volumé du kilogram. de vapeur.
0,10	46°,21	0°,1109	9 ^{m.c.} ,0171	0°,0690	14,4959
0,20	60,46	0,2116	4,7258	0,1316	7,5972
0,30	69,49	0,3091	3,2342	0,1923	5,1993
0,40	76,25	0,4041	2,4746	0,2514	3,9782
0,50	81,71	0,4974	2,0104	0,3094	3,2319
0,60	86,32	0,5892	1,6972	0,3665	2,7284
0,70	90,32	0,6798	1,4710	0,4228	2,3648
0,80	93,88	0,7694	1,2996	0,4786	2,0892
0,90	97,08	0,8581	1,1653	0,5337	1,8733
1,00	100,00	0,9459	1,0570	0,5884	1,6995
1,50	111,74	1,3756	0,7271	0,8556	1,1689
2,00	120,60	1,7928	0,5577	1,1151	0,8966
2,50	127,80	2,2006	0,4544	1,3688	0,7305
3,00	133,91	2,6012	0,3844	1,6179	0,6180
3,50	139,24	2,9954	0,3338	1,8631	0,5366
4,00	144,00	3,3842	0,2954	2,1050	0,4749
4,50	148,29	3,7684	0,2653	2,3439	0,4265
5,00	152,22	4,1484	0,2410	2,5803	0,3874
5,50	155,85	4,5245	0,2210	2,8142	0,3553
6,00	159,22	4,8973	0,2041	3,0461	0,3281
6,50	162,37	5,2670	0,1898	3,2761	0,3051
7,00	165,31	5,6341	0,1774	3,5044	0,2852
8,00	170,81	6,3591	0,1572	3,9554	0,2527
9,00	175,77	7,0748	0,1413	4,4005	0,2272
10,00	180,31	7,7820	0,1287	4,8404	0,2069
11,00	184,50	8,4818	0,1179	5,2757	0,1895
12,00	188,41	9,1744	0,1090	5,7065	0,1752
13,00	192,08	9,8604	0,1015	6,1332	0,1630
14,00	195,53	10,5405	0,0949	6,5562	0,1516
15,00	198,80	11,2151	0,0891	6,9758	0,1433
16,00	201,90	11,8846	0,0842	7,3922	0,1354
17,00	204,86	12,5491	0,0797	7,8055	0,1281
18,00	207,69	13,2090	0,0757	8,2160	0,1217
19,00	210,40	13,8645	0,0721	8,6237	0,1159
20,00	213,01	14,5159	0,0689	9,0289	0,1108
21,00	215,51	15,1635	0,0659	9,4317	0,1059
22,00	217,93	15,8072	0,0632	9,8321	0,1016
23,00	220,27	16,4473	0,0608	10,2302	0,0977
24,00	222,53	17,0839	0,0585	10,6262	0,0940
25,00	224,72	17,7175	0,0564	11,0203	0,0907

75. *Rapport entre le volume de la vapeur saturée et celui de l'eau liquide.* — Si nous nous reportons à la sixième colonne du tableau qui précède, nous remarquerons que le volume de 1 kilogramme d'eau étant de 1 décimètre cube, le rapport entre le volume de 1 kilogramme de vapeur et

celui de 1 kilogramme d'eau sera obtenu en divisant chacun des chiffres de cette colonne par 0,001, ou, ce qui revient au même, en la multipliant par 1000.

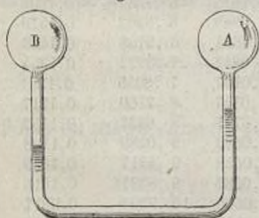
Le rapport entre le volume de la vapeur saturée, aux différentes températures et pressions, et celui de l'eau liquide à 4° est donc facile à calculer, et les résultats de ce calcul sont indiqués dans le tableau suivant :

Pressions en atmosphères.	Températures.	Rapport entre le volume de la vapeur et celui de l'eau.
0,10	46,21	14496
0,50	81,71	3232
1,00	100,00	1699
2,00	120,60	897
3,00	133,91	618
4,00	144,00	475
5,00	152,22	387

Ce rapport entre le volume de la vapeur et celui de l'eau qui s'est vaporisée est ce que l'on appelle quelquefois le volume spécifique de la vapeur. Nous rencontrerons particulièrement cette expression en parlant des expériences de M. W. Fairbairn.

76. Indicateur du point de saturation de M. W. Fairbairn.—

Fig. 11.



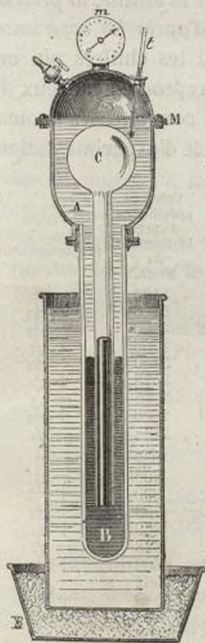
Cet appareil est fondé sur un principe très-simple. Imaginez qu'on ait introduit dans les deux boules A et B, d'un tube analogue au thermomètre différentiel de Leslie des quantités différentes d'un même liquide, 1 gramme et 2 grammes, par exemple, en isolant ces quantités de liquide

l'une de l'autre, au moyen d'une colonne de mercure interposée. En supposant que le vide ait été fait dans l'appareil, avant sa fermeture, si l'on chauffe à une égale température ses deux boules A et B (fig. 11), la pression s'élèvera de la même quantité des deux côtés, et la colonne de mercure restera immobile jusqu'à ce que le gramme de liquide de la boule A soit en-

tièrement vaporisé. A partir de ce moment, la pression croîtra plus rapidement dans la seconde boule B, où de nouvelles quantités de liquide peuvent encore se vaporiser, et cette circonstance avertira par conséquent que l'entière vaporisation est complètement effectuée dans la première. Bien que cette description puisse faire comprendre le principe sur lequel M. W. Fairbairn s'est appuyé pour déterminer avec précision l'instant de la complète vaporisation, il ne sera pas inutile de décrire l'appareil dont il s'est servi, dans ses dernières expériences sur la détermination des volumes de la vapeur d'eau.

77. Appareil de M. W. Fairbairn. — L'appareil de cet

Fig. 12.



illustre ingénieur se compose d'une véritable chaudière A (fig. 12), chauffée par des becs de gaz; cette chaudière se prolonge inférieurement par une sorte de poche B, en verre, entièrement fermée, au fond de laquelle on verse une certaine quantité de mercure. Au moyen du joint que l'on voit en M, on a préalablement placé dans cette chaudière un ballon C, dont le col vient plonger dans le mercure, et dans lequel on a introduit la petite quantité d'eau à vaporiser. Si l'eau de la chaudière et l'eau du ballon sont en excès par rapport à la température à laquelle l'appareil est maintenu, les deux pressions se maintiendront égales, et le mercure restera sensiblement au même niveau, dans la poche B et dans le col du ballon.

Mais aussitôt que toute l'eau du ballon aura été vaporisée, le chauffage ne pourra plus y déterminer qu'une augmentation de pression,

par simple dilatation, tandis que la pression dans la chaudière continuera à s'élever suivant la loi de Dalton, par suite de la présence du liquide qu'elle contient. Cette différence sera aussitôt accusée par la dénivellation du mercure, dont on pourra suivre avec une lunette l'ascension, dans le col du ballon, aussitôt que la dénivellation commencera à se produire.

Un thermomètre *t* indique la température de la vapeur; un manomètre *m* fait connaître la pression dans la chaudière; le volume se déduit de la hauteur du mercure; on connaît donc à la fois le poids de l'eau vaporisée, la température, la pression de la vapeur et son volume, et l'on a ainsi tous les éléments nécessaires pour en calculer la densité.

73. *Tableau indiquant la relation entre la densité, la pression et la température de la vapeur saturée, d'après les expériences de MM. W. Fairbairn et Tate.* — Parmi les chiffres qui ont été publiés par M. W. Fairbairn, nous reproduisons ceux du tableau suivant, qui suffiront pour faire connaître les anomalies que semble accuser ce nouveau mode d'expérimentation.

Numéros des expé- riences.	Pressions en atmosphères.	Température maxima de saturation.	Volumes spécifiques d'après l'expérience.	Volumes spécifiques d'après la formule du N° 79.	Erreur proportionnelle.
1	0,1773	58°,20	8275,3	8183	— $\frac{1}{99}$
2	0,2880	68,51	5333,5	5326	— $\frac{1}{107}$
3	0,3058	70,75	4920,2	4900	— $\frac{1}{100}$
4	0,4167	77,18	3722,6	3766	+ $\frac{1}{37}$
5	0,4214	77,49	3715,1	3740	+ $\frac{1}{149}$
6	0,4552	79,40	3438,1	3478	+ $\frac{1}{89}$
7	0,5350	83,50	3051,0	2985	— $\frac{1}{46}$
8	0,6136	86,83	2623,4	2620	+ $\frac{1}{374}$
9	0,7646	92,65	2149,5	2124	— $\frac{1}{99}$
1'	1,7915	117,16	943,1	937	— $\frac{1}{137}$
2'	1,8555	118,23	908,0	906	— $\frac{1}{104}$
3'	1,8679	118,45	892,5	900	+ $\frac{1}{111}$
4'	2,2338	124,17	759,4	758	— $\frac{1}{249}$
5'	2,5467	128,41	649,2	669	+ $\frac{1}{37}$
6'	2,7248	130,56	635,3	628	— $\frac{1}{61}$
7'	2,8140	131,78	605,7	608	+ $\frac{1}{301}$
8'	3,0824	134,86	584,4	562	— $\frac{1}{79}$
9'	3,0105	134,05	543,2	545	+ $\frac{1}{371}$
10'	3,3287	137,45	515,0	519	+ $\frac{1}{178}$
11'	3,4938	139,21	497,2	496	— $\frac{1}{497}$
12'	3,7692	141,80	458,3	461	+ $\frac{1}{137}$
13'	4,0857	144,74	433,1	428	— $\frac{1}{36}$
14'	3,8183	142,36	449,6	456	+ $\frac{1}{75}$

Si l'on compare les volumes fournis par ces expériences à ceux de la table déduite de la densité de l'air, on voit qu'en général ceux-ci sont plus grands, et qu'ainsi les densités résultant de la table de Gay-Lussac seraient plus faibles que les densités réelles, calculées pour la même pression ; les différences ne sont pas cependant tellement grandes, qu'il soit absolument nécessaire d'en tenir compte dans les calculs.

79. *Relation entre le volume spécifique et la pression de la vapeur saturée.* — M. W. Fairbairn, en discutant les divers résultats de ses expériences, est arrivé, page 219 de son *Mémoire*, aux deux formules empiriques suivantes, qui se déduisent l'une de l'autre :

$$V = 25,62 + \frac{1257605}{P + 18,29},$$

$$P = \frac{1257605}{V - 25,62} - 18,29,$$

dans lesquelles V est le volume spécifique d'un poids donné de vapeur saturée, à la pression P, mesurée en millimètres de mercure.

Si N est la pression en atmosphères, on a $P = 760N$, ce qui ramène les deux formules aux suivantes :

$$V = 25,62 + \frac{1655}{N + 0,024},$$

$$N = \frac{1655}{V - 25,62} - 0,024.$$

Si, dans l'avant-dernière formule, on fait $N = 1$, il vient

$$V = 25,62 + \frac{1655}{1,024} = 25,62 + 1616,21 = 1641,83.$$

Ce chiffre diffère notablement de celui qui résulte des observations directes de Gay-Lussac.

Ces valeurs de V, déduites de la formule précédente, sont d'ailleurs les mêmes que celles qui devraient figurer à la cinquième colonne du dernier tableau.

30. *Relation entre le volume et la pression de la vapeur d'eau saturée.*— Le volume de la vapeur saturée dépend à la fois de sa température et de sa pression, et il faut, pour le calculer, recourir aux tables de M. Regnault, qui donnent, pour chaque température, la pression maxima correspondante. Si la relation entre la température et la pression pouvait être exprimée par une formule simple entre N et T , il suffirait de s'en servir pour éliminer T dans l'expression du volume. En l'absence de cette formule simple, les physiciens ont cependant cherché à faire disparaître le terme en T , dans la valeur des volumes, et nous nous proposons de donner quelques indications sur les résultats auxquels ils sont parvenus.

Le volume d'un kilogramme de vapeur saturée est donné (n° 74) par la formule

$$E' = \frac{1 + 0,00367 T}{0,622 \times 1,29318 N} = \frac{272 + T}{272 \times 0,622 \times 1,29318 N} = \frac{272 + T}{218,78 N};$$

et pour obtenir la valeur de E' , il faut connaître à la fois T et N .

Si cependant on voulait calculer E' entre des limites restreintes, on pourrait donner à T une valeur moyenne et n'avoir plus qu'à considérer la pression.

Veut-on, par exemple, avoir une formule applicable entre 100 et 120°, on fera $T = 110^\circ$, et l'on trouvera

$$E' = \frac{272 + 110}{218,78 N} = \frac{382}{218,78 N} = \frac{1}{0,573 N},$$

et le rapport entre le volume de la vapeur et celui de l'eau sera :

$$\frac{1000}{0,573 N} = \frac{1}{0,000573 N}.$$

Cette valeur de E' donnerait pour $N = 1$,

$$E' = 1745 \text{ au lieu de } 1699;$$

et pour $N = 2$,

$$E' = 872 \text{ au lieu de } 896.$$

On voit, par conséquent, qu'elle conduirait à des résultats trop différents de la réalité.

81. Formule de Navier. — Navier a proposé une formule à deux constantes qui donne des valeurs de E' plus exactes; cette formule est la suivante :

$$E' = \frac{1000}{0,09 + 0,0000484p} = \frac{1}{0,00009 + 0,000000484p},$$

dans laquelle p représente la pression en kilogrammes par mètre carré. En remplaçant p par 10333 N, on ramènerait cette formule à la forme

$$E' = \frac{1}{0,00009 + 0,0005N}.$$

Elle est très-simple, mais moins exacte que celle proposée plus tard par M. de Pambour.

Si l'on donne successivement à N des valeurs variant de 1 à 5, on trouve :

Valeurs de N .	Valeurs calculées de E' .	Volumes de la table.
1,0	1695	1699
1,5	1190	1168
2,0	918	896
3,0	628	618
4,0	478	475
5,0	386	387

82. Formule de M. de Pambour. — M. de Pambour est arrivé à une exactitude plus grande en calculant séparément, par la même méthode, une formule pour les pressions inférieures à deux atmosphères :

$$E' = \frac{10000}{0,4227 + 0,000529p} = \frac{1}{0,00004227 + 0,000000529p},$$

et pour les pressions supérieures à deux atmosphères :

$$E'' = \frac{10000}{1,421 + 0,000471p} = \frac{1}{0,0001421 + 0,0000000471p}.$$

Ces formules reviendraient aux suivantes en remplaçant p par 10333N :

$$E' = \frac{1}{0,00004227 + 0,00054662N},$$

$$E'' = \frac{1}{0,001421 + 0,00048668N}.$$

Elles se rapprochent assez de la vérité, puisqu'elles conduisent aux valeurs suivantes :

Valeurs de N.	Valeurs de E'.	Volumes de la table.
1,0	1698	1699
1,5	1159	1168
2,0	881	896
3,0	624	618
4,0	478	475
5,0	388	387

83. Application à la vapeur non saturée. — La vapeur saturée conservant l'état gazeux lorsqu'on augmente sa température, hors de la présence du liquide, il était naturel d'admettre qu'elle se comporte dans ces conditions comme un gaz, et on lui a jusqu'à présent appliqué les mêmes formules dont on se sert pour les gaz permanents.

Cette application, qu'il serait nécessaire de soumettre à l'expérience, nous permettrait de calculer le poids de la vapeur surchauffée à une température quelconque, à partir de son point de saturation.

84. Poids du mètre cube de vapeur surchauffée à pression constante. — Nous avons vu que le poids du mètre cube de vapeur saturée à la température T et à la pression N était donné par la formule

$$K' = \frac{0,622 \times 1,29318N}{1 + 0,00367T}.$$

Si nous portons cette vapeur à la température T' , plus grande que T , sous la même pression, on avait admis qu'elle

se comporterait comme un gaz et que, par conséquent, elle se dilaterait conformément au binôme de dilatation. Le poids du mètre cube diminuerait donc dans les mêmes proportions, et l'on aurait, pour ces nouvelles circonstances :

$$K'_1 = \frac{0,622 \times 1,29318 N}{(1 + 0,00367 T)[1 + 0,00367 (T' - T)]},$$

ou approximativement,

$$K'_1 = \frac{0,622 \times 1,29318 N}{1 + 0,00367 T'},$$

en négligeant au dénominateur le terme

$$0,00367 T \times 0,00367 (T' - T),$$

qui est relativement très-petit.

Les expériences de MM. W. Fairbairn et Tate ont apporté un nouveau jour sur cette question de la vapeur surchauffée.

35. Expériences de MM. W. Fairbairn et Tate sur la vapeur surchauffée. — Les questions relatives aux volumes de la vapeur surchauffée seraient facilement résolues, si l'on connaissait la loi de la dilatation de la vapeur saturée pour diverses élévations de température.

Pour déterminer le coefficient de dilatation de la vapeur surchauffée, MM. W. Fairbairn et Tate ont élevé successivement, dans leur appareil, la température d'une même quantité de vapeur, et ils ont mesuré son volume dans des conditions déterminées de pression et de température.

Après avoir établi par l'expérience la différence de volume entre deux températures, ce qui leur fournissait la valeur du coefficient de dilatation à partir de la première, ils ont dû recourir à une formule analogue à celle du n° 45 pour comparer cette dilatation à celle qui se produirait pour de l'air amené dans les mêmes conditions. C'est ainsi qu'ils ont

pu former le tableau suivant des dilatations en volumes pour divers intervalles de température.

TABLEAU INDIQUANT LE COEFFICIENT DE DILATATION
DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE.

Numéros des expériences.	Température maxima de saturation.	Températures entre lesquelles la dilatation est comptée.	Coefficient de dilatation de la vapeur.	Coefficient de dilatation de l'air.
1	58°, 20	60,00 — 76,66	0,00303	0,00301
2	68°, 51	71,11 — 87,77	0,00324	0,00291
3	70°, 75	{ 70,75 — 76,77 76,77 — 98,83	0,01200 0,00288	0,00291 0,00286
5	77°, 49	{ 77,49 — 82,22 82,22 — 93,33	0,00900 0,00298	0,00285 0,00282
6	79°, 40	{ 79,40 — 82,22 82,22 — 93,33	0,00905 0,00282	0,00284 0,00282
7	83°, 50	{ 83,61 — 85,55 85,55 — 98,61	0,00618 0,00286	0,00281 0,00279
8	86°, 83	88,30 — 99,44	0,00298	0,00277
1'	117°, 16	117,22 — 120,55	0,00348	0,00256
4'	124°, 17	{ 125,00 — 126,11 125,00 — 128,88	0,00459 0,00300	0,00251 0,00251
6'	130°, 56	{ 131,11 — 132,77 132,77 — 137,22	0,00856 0,00281	0,00248 0,00246
7'	131°, 78	{ 132,77 — 133,88 133,88 — 137,22	0,00776 0,00326	0,00246 0,00245
9'	134°, 05	{ 139,44 — 140,55 140,55 — 142,77	0,00604 0,00338	0,00243 0,00242
13'	144°, 74	{ 147,22 — 148,33 148,33 — 150,00	0,00636 0,00282	0,00239 0,00237

Les résultats indiqués par cette table montrent distinctement que, dans les dix degrés qui suivent la température de saturation, la dilatabilité de la vapeur est notablement plus grande que celle de l'air; mais elle s'en rapproche pour les températures plus élevées; dans l'expérience n° 6, par exemple, entre les températures de 79,40 et 82°,28, le coefficient de dilatation est 0,00900, c'est-à-dire trois fois aussi grand que celui de l'air, tandis que, entre 82,22 et 93°,33, le coefficient est très-peu différent de celui des autres fluides élastiques.

Il paraîtrait, d'après cela, que plus la vapeur est surchauffée, plus elle se rapproche des propriétés de l'air, et que c'est surtout dans le voisinage du point de saturation qu'elle se dilate beaucoup plus que les gaz permanents.

Ces résultats sont remarquables et concordent assez bien

avec l'idée qu'on peut se faire des propriétés de la vapeur saturée, comparées à celles de la vapeur chargée d'humidité. Ils auraient besoin, toutefois, d'une confirmation tirée d'expériences plus nombreuses et plus rapprochées, et nous ne pouvons les signaler, quant à présent, qu'avec les doutes qu'inspirent toujours des faits nouveaux et incomplètement expliqués.

36. Formule de M. Clausius. — Bien que nous n'ayons pas pour objet d'étudier en ce moment la théorie dynamique de la chaleur, il ne sera pas hors de propos de faire voir comment M. Clausius a pu déduire, de cette théorie, des chiffres qui présentent avec ceux de M. W. Fairbairn une remarquable concordance.

M. Clausius a fait voir, dès 1850 (*Annales de Poggendorf*, tome XLIX, page 514), qu'il était possible de calculer le volume de la vapeur saturée d'un liquide, lorsque l'on connaît la pression de cette vapeur en fonction de la température, la chaleur latente et l'équivalent mécanique de la chaleur.

Pour la vapeur d'eau, il a obtenu la formule suivante :

$$Ap(S - \sigma) \frac{a}{a + t} = m - ne^{kt},$$

dans laquelle t est la température, p la pression sur l'unité de surface, S le volume de l'unité de poids de la vapeur au maximum de densité, σ le volume du même poids d'eau; a le nombre $273 = \frac{1}{0,0036665}$; A , l'inverse de la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur; e la base des logarithmes népériens; enfin, m , n et k , trois constantes dont les valeurs sont

$$m = 31,549, \quad n = 1,0486, \quad k = 0,007138.$$

En partant de cette formule, il trouve

$$\frac{S - \sigma}{v} = \frac{1}{Ap_0 v_0} (m - ne^{kt}),$$

en désignant par p_0 la pression et par v_0 le volume de l'unité de poids de l'air atmosphérique à la température 0° .

Si dans cette formule on fait

$$A = \frac{1}{421}, \quad t = 0, \quad \frac{v}{S} = 0,622,$$

elle peut se mettre sous la forme

$$\frac{S - \sigma}{v} = M - N\alpha^t$$

en faisant

$$M = 1,6630, \quad N = 0,05527, \quad \alpha = 1,007164,$$

ce qui permet de calculer S .

TABLEAU DES VOLUMES D'UN KILOGRAMME DE VAPEUR SATURÉE

AUX DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES.

Températures.	Volumen en mètres cubes d'un kilogr. de vapeur saturée		
	d'après l'hypothèse du rapport 0,622.	d'après les expériences de M. Fairbairn.	d'après la formule de M. Clausius.
58,21	8,38	8,27	8,23
68,52	5,41	5,33	5,29
70,76	4,94	4,91	4,83
77,18	3,84	3,72	3,74
77,49	3,79	3,71	3,69
79,40	3,52	3,43	3,43
83,50	3,02	3,05	2,94
86,53	2,68	3,62	2,60
92,66	2,18	2,15	2,11
117,17	0,991	0,941	0,947
118,23	0,961	0,906	0,917
118,46	0,954	0,891	0,911
124,17	0,809	0,758	0,769
128,41	0,718	0,648	0,681
130,67	0,674	0,634	0,639
131,78	0,654	0,604	0,619
134,87	0,602	0,583	0,569
137,46	0,562	0,514	0,530
139,21	0,537	0,496	0,505
141,81	0,502	0,457	0,472
142,36	0,495	0,448	0,465
144,74	0,466	0,432	0,437

M. Clausius a formé avec les valeurs ainsi calculées le tableau qui précède, et il les a comparées à celles qu'il a déduites, soit de la formule de Gay-Lussac, soit des résultats obtenus directement par MM. W. Fairbairn et Tate.

Ce tableau présente une très-grande concordance avec les chiffres de ces derniers expérimentateurs; il est d'ailleurs extrait en totalité d'un mémoire adressé par M. Clausius à l'Académie des sciences et inséré dans les *Comptes rendus* (tome LII, page 708).

87. Conclusions quant aux calculs de la densité de la vapeur d'eau saturée et non saturée, dans les applications. — Malgré les divergences qui résultent des déterminations de M. W. Fairbairn, et qui se trouvent dans une certaine mesure corroborées par les considérations théoriques de M. Clausius, nous devons, après tout ce qui précède, reconnaître que l'on peut sans grande erreur étendre aux vapeurs, en tant qu'elles ne sont point amenées à une condensation partielle, les formules qui servent à calculer les densités des gaz.

Nous continuerons donc à considérer le poids du mètre cube de vapeur comme étant égal aux 0,622 de celui de l'air à la même température et à la même pression*, nous réservant toutefois de recourir, quand il sera nécessaire, aux résultats de MM. W. Fairbairn et Tate pour les calculs relatifs à la dilatation produite dans la vapeur surchauffée, près du point de saturation.

88. Expériences de MM. Lyon Playfair et Wanklyn. — Pour

* Nous n'avons pas parlé de la formule très-simple que M. Redtenbacher a proposée pour calculer le poids du mètre cube de vapeur saturée lorsqu'on connaît seulement sa pression. Cette formule à deux termes $k = a + bN$ ne peut convenir que pour des pressions très-peu différentes les unes des autres; celle que M. Redtenbacher a calculée pour les pressions de 2 à 5 atmosphères revient à $k = 0,1427 + 0,48875 N$; à peu près exacte entre ces limites, elle donnerait lieu à des erreurs d'autant plus considérables qu'on s'en éloignerait davantage; pour $N = 10$, on trouverait $k = 5,0302$ au lieu du chiffre 4,8404 auquel on arrive par la formule de Gay-Lussac.

obtenir la densité des diverses vapeurs, ces physiciens ont fait passer à travers le liquide à vaporiser et porté à une certaine température, un gaz permanent, l'hydrogène, par exemple; on prend la densité du mélange, on la corrige de la quantité d'hydrogène contenue dans l'appareil, et l'on obtient ainsi la densité de la vapeur pure, à la température à laquelle on a opéré. Les auteurs ont déterminé de cette manière les densités des vapeurs d'eau, d'alcool, d'acide acétique, etc. Ils ont trouvé que par leur mélange avec des gaz permanents, les vapeurs se conforment aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac, et fournissent ainsi des densités que l'on peut calculer comme nous avons appris à le faire.

Les chiffres obtenus par MM. Playfair et Wanklin n'ont pas encore été publiés.

V. Chaleur employée à la formation des vapeurs.

89. Définition de l'unité de chaleur ou calorie. — Nous avons maintenant à nous occuper d'un autre ordre de quantités, dont l'unité doit être définie.

On sait que l'on appelle unité de chaleur ou *calorie* la quantité de chaleur nécessaire pour élever un kilogramme d'eau, de la température de 0 à la température de 1 degré.

Il semblerait qu'il eût été plus rationnel de prendre pour unité de chaleur celle qui se dégage dans les phénomènes calorifiques, que présentent les combustibles, mais on verra par la suite qu'il est réellement beaucoup plus simple de tout rapporter à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau.

On a admis pendant longtemps que cette quantité de chaleur était la même pour chacun des degrés de l'échelle thermométrique, mais les expériences de M. Regnault ont fait voir qu'il n'en est pas rigoureusement ainsi.

90. Chaleur spécifique, ou capacité des corps pour la chaleur.

— Un kilogramme des différents corps n'exige pas la même quantité de chaleur pour passer de 0 à 1°.

Et le même corps, suivant qu'on le considère à une température initiale différente, n'exige pas exactement la même quantité de chaleur pour que sa température s'élève de l'un des degrés de l'échelle thermométrique.

Cette quantité de chaleur spéciale est ce que l'on appelle pour chaque corps sa capacité pour la chaleur ou sa chaleur spécifique.

Lorsque nous connaissons la chaleur spécifique de l'eau pour les différentes températures, on pourra déterminer la capacité de tous les liquides par la méthode des mélanges, c'est-à-dire en déterminant la température commune à laquelle parviennent deux liquides, que l'on mélange et qui étaient primitivement à des températures différentes.

Bien qu'on ne puisse mélanger en général un corps solide avec un corps liquide, la méthode des mélanges est fréquemment applicable à la détermination de la capacité des corps solides, dont la conductibilité pour la chaleur est assez grande, parce qu'alors l'équilibre de température s'établit encore, avec rapidité, entre ce solide et le liquide dans lequel on le plonge.

91. Méthode des mélanges. — Soit P' le poids d'un corps à la température T' , c' sa capacité pour la chaleur : le nombre des calories nécessaires pour élever sa température jusqu'à la température T' sera exprimé par le produit $P'c'T'$; P étant le poids d'une certaine quantité d'un autre corps à la température T , pour laquelle la capacité de ce corps pour la chaleur est c ; PcT sera le nombre de calories correspondant.

Si l'on mélange ces deux corps, on aura, pour résultat, une température commune t ; et comme la quantité totale de chaleur n'aura pas varié, on pourra écrire l'égalité

$$P'c'T' + PcT = (Pc + P'c')t,$$

d'où

$$c' = \frac{Pc(t - T)}{P'(T' - t)},$$

formule d'où l'on pourra tirer la valeur de c' , lorsque l'on connaîtra c et qu'on aura pu observer toutes les températures.

Si $c = 1$, cette relation devient

$$c' = \frac{P(t-T)}{P'(T'-t)},$$

ce qui permet de comparer les capacités des différents corps à celle de l'eau prise pour unité.

Pour appliquer cette relation à la détermination de la capacité de la vapeur d'eau, il faudrait, à la rigueur, que $t - T$ fût peu différent de 1, ainsi que $T' - t$.

Nous ferons observer, dès à présent, que, par l'extension de la méthode des mélanges aux limites qui viennent d'être indiquées, on commettrait une erreur grave si, comme on le fait quelquefois dans la pratique, on l'étendait aux phénomènes dans lesquels des changements d'état se produisent, ou même lorsque les propriétés physiques de l'un des corps éprouvent une modification sensible.

Nous verrons que, dans ces circonstances, il est nécessaire de tenir compte de certaines quantités de chaleur, qui sont absorbées ou dégagées par suite de ces changements d'état.

92. Expériences de M. Regnault sur l'eau liquide. — M. Regnault, en employant la méthode des mélanges, a été directement conduit à cette conséquence, que si la capacité de l'eau, pour chaque degré de l'échelle thermométrique comprise entre 0 et 30° est représentée par 1,000, de 30 à 110° elle sera 1,005, de 30 à 190° elle sera 1,015.

Elle va constamment en augmentant, et la quantité de chaleur correspondante peut être représentée par la formule générale

$$Q = T + 0,00002 T^2 + 0,0000003 T^3.$$

En partant de cette formule, dans laquelle Q représente des calories et T des degrés centigradés, les résultats des

expériences de M. Regnault peuvent être résumés ainsi qu'il suit :

Capacités moyennes.	Températures entre lesquelles ces capacités conviennent.
1,0000	0° à 1°
1,0050	0 à 100
1,0160	0 à 200
1,0204 (1)	0 à 230

(1)
1.0204

M. Regnault lui-même s'exprime ainsi (*Mémoires de l'Académie*, tome XXI, page 745) : « La faible variation que subit la capacité calorifique de l'eau avec la température est une circonstance heureuse pour la mesure de la chaleur spécifique des corps par la méthode des mélanges; car elle permet de supposer que la capacité calorifique de l'eau du calorimètre reste constante entre les limites de températures, toujours très-restreintes, qui sont atteintes dans nos expériences. »

95. *Tableau de la chaleur spécifique de quelques substances de 0° à 100°.* — Sans avoir à discuter ici les procédés à l'aide desquels on a cherché à déterminer la capacité des différents corps pour la chaleur, nous indiquons dans le tableau suivant quelques-uns des chiffres qui sont employés le plus fréquemment :

Substances.	Chaleurs spécifiques.
Eau.....	1,00500
Fonte.....	0,12983
Fer.....	0,11379
Acier.....	0,11650
Cuivre.....	0,09515
Laiton.....	0,09391
Marbre.....	0,21585
Craie.....	0,21485
Plomb.....	0,0293
Étain.....	0,0475
Zinc.....	0,0927
Verre.....	0,1770

Les cinq derniers chiffres de ce tableau sont dus à Laplace

et Lavoisier pour l'étain, et pour les autres métaux à Dulong et Petit.

94. *Loi de Dulong et Petit.* — Dans un travail considérable publié en 1819, Dulong et Petit furent conduits à énoncer de la manière suivante la loi qu'ils ont appelée : loi des chaleurs spécifiques des atomes simples.

Les capacités des corps simples pour la chaleur sont en raison inverse de leurs poids atomiques; on pourrait aussi l'énoncer en disant que le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique des différents corps simples doit être constant.

Bien que des considérations purement chimiques aient conduit à admettre, dans les chiffres qui expriment les poids atomiques de plusieurs substances, des modifications de quelque importance, depuis les expériences de Dulong et Petit, M. Regnault, dans un travail spécial, a reconnu que la plupart des corps simples satisfont à la loi si remarquable de la chaleur spécifique des atomes.

Parmi les corps simples dont nous aurons à nous occuper, le charbon est le seul qui s'en éloigne d'une manière notable. Cette loi se vérifie par les chiffres suivants, qui suffisent à montrer dans quelles limites restreintes peut varier le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique :

Désignation des corps simples.	Chaleurs spécifiques.	Poids atomiques.	Produits.
Fer.....	0,11379	339,21	38,597
Zinc.....	0,09555	403,23	38,526
Cuivre.....	0,09515	395,70	37,849
Plomb.....	0,03140	1294,50	40,647
Étain.....	0,05623	735,29	41,345
Charbon.....	0,02411	152,88	36,873

Tous ces produits s'éloignent fort peu du chiffre 40, qui permettrait au besoin de retrouver la chaleur spécifique, lorsque l'on connaîtrait le poids atomique du même corps simple.

95. *Lois des chaleurs spécifiques des corps composés.* — On a cherché à étendre la loi de Petit et Dulong aux corps composés, et M. Regnault a formulé de la manière suivante les énoncés qui résument en quelque sorte les conclusions de ses expériences :

1° « La chaleur spécifique des alliages, à une distance un peu grande de leur point de fusion, est exactement la moyenne des chaleurs spécifiques des métaux qui la composent. » Cette moyenne doit être calculée en affectant la chaleur spécifique de chacun des métaux du coefficient qui représente la proportion dans laquelle il entre dans la composition de l'alliage que l'on considère.

Dans ces circonstances, le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique varie, pour les alliages usuels, entre 40 et 42.

2° « Dans tous les corps composés, de même composition atomique et de constitution chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques. On trouvera dans le mémoire de M. Regnault (*Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. I), tous les développements que l'on pourra désirer sur cette question importante.

96. *Chaleur spécifique des gaz.* — Les gaz ayant toujours une densité très-faible, pour déterminer leur chaleur spécifique; il faut absolument opérer sur des volumes considérables, si l'on veut obtenir quelque exactitude.

Le kilogramme du même gaz peut occuper d'ailleurs des volumes très-différents, suivant sa température initiale et sa pression, et il importe encore de savoir si la capacité des gaz pour la chaleur varie seulement avec la température, ou si, au contraire, cette capacité se modifie lorsque la pression est plus ou moins considérable.

Enfin, le gaz peut s'échauffer à pression constante ou à volume constant, et l'on ne doit pas s'attendre que sa chaleur spécifique soit la même dans deux circonstances aussi différentes.

On voit donc combien il est nécessaire d'être précis dans des expériences de cette nature, qui n'ont donné lieu, avant M. Regnault, qu'à un petit nombre de déterminations.

Nous citerons seulement, à cet égard, les belles expériences de Delaroche et Bérard, celles de MM. Delarive et Marcet, et celles de Dulong.

Les lois formulées par ces habiles expérimentateurs seront plus facilement comprises lorsque nous aurons indiqué les principaux chiffres auxquels M. Regnault est arrivé, et qui doivent être admis maintenant d'une manière exclusive.

97. Expériences de M. Regnault. — On a souvent considéré la chaleur spécifique prise par rapport à l'air, et la chaleur spécifique prise par rapport à l'eau : c'est cette dernière seule qui figure dans les tableaux que nous donnons ci-après, parce que les chiffres qui en donnent la mesure sont ceux qui entrent directement dans les calculs de dépense de chaleur que nous aurons à faire fréquemment.

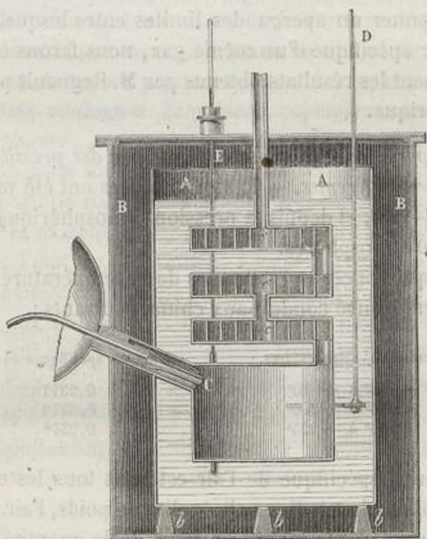
Les expériences de M. Regnault n'ont pas encore été publiées, mais M. Laboulaye, dans les *Annales du Conservatoire*, t. I, p. 552, a donné une description sommaire des appareils; ces appareils avaient à résoudre trois problèmes différents : 1° obtenir un courant de gaz à pression et à vitesse constante; 2° échauffer ce gaz dans un bain, à une température constante; 3° le ramener dans un calorimètre à une température parfaitement déterminée. La chaleur qu'il abandonnait au calorimètre dans ces circonstances permettait d'évaluer, par degrés, la perte qu'il subissait et qui était précisément la mesure de sa chaleur spécifique.

La figure 13 ci-après représente le calorimètre de M. Regnault, dans lequel il fallait obtenir une grande surface de refroidissement, tout en n'employant qu'une petite quantité d'eau.

Le calorimètre proprement dit se compose du vase cylindrique AA, renfermé dans un autre vase BB, dont il est entièrement séparé par une couche d'air et, dans le fond, par quelques cales en bois peu conductrices bbb.

Le courant de gaz s'introduit en C par le tuyau que représente la figure, et il passe successivement dans les compartiments superposés c' c'' c''' , qui communiquent les uns à la suite des autres et qui sont formés de petits canaux en spirale, entre chacun desquels l'eau du calorimètre peut passer. Un agitateur D permet de maintenir toutes les parties du liquide à la même température, que le grand thermomètre E indique à chaque instant.

Fig. 13.



Après avoir circulé dans toutes les parties de l'appareil, le gaz s'échappe à une température t peu différente de celle du liquide. Si la température, à l'entrée dans le calorimètre, était T , et si l'on désigne la chaleur spécifique par c , la chaleur totale perdue par chaque kilogramme de gaz sera comme précédemment mesurée par le produit $c(T-t)$; l'échauffement connu de l'eau du calorimètre permet d'ob-

tenir une autre évaluation k de ce nombre de calories, et de la relation $c(T-t) = k$, on tire directement $c = \frac{k}{T-t}$.

Les conséquences générales de ces expériences pourront être résumées de la manière suivante :

1° La capacité des gaz par rapport à l'eau ne varie pas sensiblement avec la température.

2° La capacité des gaz par rapport à l'eau n'est que très-peu modifiée, suivant que la pression initiale varie de 1 à 10 atmosphères.

Pour donner un aperçu des limites entre lesquelles varie la chaleur spécifique d'un même gaz, nous ferons connaître spécialement les résultats obtenus par M. Regnault pour l'air atmosphérique.

93. Capacité de l'air atmosphérique sous des pressions et des températures différentes. — Les expériences ont été variées de -30° à $+225^\circ$, et depuis la pression atmosphérique jusqu'à celle de 10 atmosphères.

En ce qui concerne l'influence de la température, M. Regnault s'est trouvé conduit aux chiffres suivants :

Limites des températures.	Chaleurs spécifiques de l'air.
-30° à $+10^\circ$	0,2377
$+10^\circ$ à $+100^\circ$	0,2379
$+100^\circ$ à $+225^\circ$	0,2376

La chaleur spécifique de l'air est dans tous les cas inférieure à 0,25, c'est-à-dire qu'à égalité de poids, l'air absorbe à pression constante moins du quart de la quantité de chaleur qui serait nécessaire pour élever le même poids d'eau d'un égal nombre de degrés.

Le chiffre qui correspond aux variations de température comprises entre $+10^\circ$ et $+100^\circ$, est le plus grand des trois nombres du tableau, mais il ne diffère du premier que de $\frac{2}{2377} = 0,0008$, ou de 8 dix-millièmes ; on pourra toujours négliger cette différence dans les calculs.

En ce qui concerne l'influence de la pression, nous ne

saillions mieux faire que de reproduire le paragraphe dans lequel M. Regnault lui-même résume les résultats qu'il a obtenus.

« Dans des expériences sur l'air atmosphérique, faites sous des pressions qui ont varié depuis 1 jusqu'à 10 atmosphères, je n'ai pas trouvé de différences entre les quantités de chaleur qu'une même masse de ce gaz abandonne en se refroidissant d'un même nombre de degrés. Ainsi, contrairement aux expériences de Delaroche et Bérard, qui ont constaté une différence très-notable pour des pressions qui variaient seulement de 1 atmosphère à 1,33, la chaleur spécifique d'une même masse de gaz serait indépendante de sa densité. Des expériences, faites sur plusieurs autres gaz, m'ont conduit à des résultats analogues. Je présente cependant cette loi avec quelque réserve; je ne puis pas encore décider si la capacité calorifique sous différentes pressions est absolument constante ou si elle subit une variation très-légère, puisque nos expériences exigent peut-être une très-légère correction provenant de l'état de mouvement du gaz. » (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome XXXVI, page 685.)

Quant aux chiffres eux-mêmes, nous ne pouvons citer que ceux qui ont été extraits par M. Laboulaye du travail inédit de M. Regnault, pour des circonstances dans lesquelles la pression seule avait varié :

N ^o des expériences.	Pression initiale.	Chaleur spécifique.	Différences proportionnelles.
1	7,466	0,22546	} - 0,0031
1 bis	1,000	0,22716	
2	3,949	0,23226	} + 0,0016
2 bis	1,000	0,23201	

Les nombres de la troisième colonne diffèrent de la chaleur spécifique $c = 0,2377$, parce que, dans ces expériences spéciales, M. Regnault s'est borné à rendre constante l'influence des causes d'erreur de son appareil, et non à les éliminer complètement.

Toujours est-il que, dans chacune des comparaisons que

l'on peut faire, la différence ne s'élève qu'à $-0,0031$ et à $+0,0016$, c'est-à-dire, au maximum, de trois millièmes environ; et cette différence étant tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, lorsque la pression s'élève à 7 ou à 4 atmosphères, on ne pourrait dire, quant à présent, si la chaleur spécifique augmente ou diminue avec la pression.

Nous réunissons dans le tableau suivant le résultat des expériences de M. Regnault sur tous les gaz que nous aurons à considérer dans l'étude des machines à vapeur :

Désignation des gaz.	Chaleurs spécifiques à pression constante.
Air.....	0,2377
Oxygène.....	0,2182
Azote.....	0,2440
Hydrogène.....	3,4046
Oxyde de carbone.....	0,2479
Acide carbonique.....	0,2164
Hydrogène protocarboné.....	0,5929
Hydrogène bicarboné.....	0,3694
Gaz ammoniac.....	0,5080
Acide sulfureux.....	0,1553

On voit déjà, par cette table, que, pour le plus grand nombre des gaz qui y sont compris, la capacité pour la chaleur est peu différente de celle de l'air, si ce n'est pour l'hydrogène et ses différents composés, pour lesquels la chaleur spécifique par kilogramme est souvent beaucoup plus grande.

99. *Loi de Dulong sur la chaleur spécifique des gaz.* — Nous avons jusqu'ici considéré la chaleur spécifique comme la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier de 1° la température de 1 kilogramme des différents corps.

En ce qui concerne la chaleur spécifique des gaz, les physiciens ont été conduits à comparer les quantités de chaleur nécessaire pour faire varier de 1° des volumes égaux des différents gaz; c'est ce qu'ils ont improprement appelé la chaleur spécifique à égalité de volume.

Dulong, dans un travail qui n'a pas été retrouvé dans ses papiers, avait énoncé sur cette chaleur spécifique des gaz deux lois d'un grand intérêt :

1° Les gaz composés formés de gaz simples, qui dans leur réunion ne sont pas condensés, ont la même chaleur spécifique que les gaz simples, à égalité de volume.

Les déterminations de M. Regnault ont encore vérifié cette loi; il suffit, pour le faire voir, de comparer entre eux les produits que l'on obtient en multipliant, comme nous l'avons fait dans le tableau suivant, la chaleur spécifique de chaque gaz par sa densité par rapport à l'air :

Désignation des gaz.	Chaleur spécifique.	Densité par rapport à l'air.	Produits.
Air.....	0,2377	1,0000	0,2377
Oxygène.....	0,2182	1,1056	0,2412
Azote.....	0,2440	0,9713	0,2370
Hydrogène.....	3,4060	0,0692	0,2356
Oxyde de carbone.	0,2479	0,9694	0,2399

L'hydrogène, dont la chaleur spécifique est si grande à égalité de poids, par rapport à celle des autres gaz, rentre complètement dans cette loi, et l'on peut, en conséquence, se rappeler d'une manière générale qu'on retrouverait la valeur de la chaleur spécifique de 1 kilogramme de chacun des gaz précédents, en divisant celle de l'air, égale à 0,2377, par la densité de chacun d'eux, prise par rapport à l'air.

2° Les gaz composés dans lesquels il y a une même condensation en volumes ont des chaleurs spécifiques à égalité de volumes, égales entre elles, mais différentes de celles des gaz simples.

Nous nous bornerons à citer quelques gaz qui rentrent dans cette catégorie :

Désignation des gaz.	Chaleur spécifique.	Densité par rapport à l'air.	Produits.
Acide carbonique.....	0,2164	1,5290	0,3277
Hydrogène protocarboné....	0,5929	0,5527	0,3572
Hydrogène bicarboné.....	0,3694	0,9692	0,3580

Pour ces trois gaz, dont nous aurons souvent à nous occuper, le produit se rapproché beaucoup du nombre 0,35.

100. Chaleur spécifique des gaz à volume constant. — Nous n'avons considéré jusqu'ici que la chaleur spécifique des gaz, dans le cas où ces gaz sont maintenus, pendant qu'ils s'échauffent ou qu'ils se refroidissent, à une pression constante. Le volume du gaz varie alors conformément à la loi de Gay-Lussac.

Lorsqu'un gaz se dilate ainsi, il développe contre l'atmosphère ambiante un travail mécanique, qui est aujourd'hui considéré, d'après la théorie mécanique de la chaleur, comme l'équivalent d'une certaine dépense de calorique.

Sans entrer, pour le moment, dans les détails que cette question comporte, nous devons cependant remarquer que si cette conclusion est exacte, elle exige qu'une égale élévation de température, d'un même volume de gaz, détermine une plus grande dépense de chaleur, lorsque ce gaz est maintenu à pression constante, que lorsqu'il s'échauffe sans changer de volume. Dans ce dernier cas, en effet, si l'on suppose inextensible l'enveloppe qui renferme le gaz, il ne pourra se produire qu'un travail de compression des molécules les unes contre les autres, mais aucun travail mécanique ne sera transmis à l'extérieur.

Les physiciens avaient depuis longtemps reconnu que la chaleur spécifique c d'un gaz à pression constante est en effet plus grande que la chaleur spécifique c' à volume constant.

D'après Dulong, le rapport entre ces deux capacités aurait été mesuré par le nombre $\frac{c}{c'} = 1,421$; d'après les expériences de Gay-Lussac et Welter, M. Pouillet avait trouvé $\frac{c}{c'} = 1,375^*$.

Ces valeurs, déduites de l'expérience, constituent aujourd'hui une des preuves les plus convaincantes et les plus philosophiques en faveur de la théorie mécanique de la chaleur.

Nous verrons en effet que, comme conséquence immédiate de cette théorie, on serait conduit à admettre que $\frac{c}{c'} = 1,41$,

* *Traité de physique*, édition de 1832, t. I, p. 403.

valeur qui se rapproche avec une étonnante précision de celles que nous venons d'indiquer.

101. Chaleur spécifique de l'air à volume constant.—Aucune expérience directe n'a encore été imaginée pour la détermination de la chaleur spécifique de l'air à volume constant.

MM. Clément et Desormes, en ramenant, par compression, le gaz dilaté à son volume primitif et en mesurant l'élévation de température qui en résulte, ont trouvé $\frac{c}{c'} = 1,348$.

M. Masson, en opérant d'une manière inverse, c'est-à-dire en laissant dilater l'air comprimé, jusqu'à ce qu'il soit revenu à sa tension initiale, a trouvé $\frac{c}{c'} = 1,41$.

Ce nombre est identique avec celui qui résulte de la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur, et nous en déduirons

$$c' = \frac{c}{1,41} = \frac{0,2377}{1,41} = 0,1686;$$

c'est la valeur dont nous nous servirons, s'il en est besoin, pour la chaleur spécifique de l'air à volume constant.

102. Chaleur spécifique des vapeurs.—M. Regnault a employé, dès 1853, l'appareil que nous avons décrit, à la détermination de la chaleur spécifique d'un certain nombre de vapeurs. Bien que nous ne connaissions pas encore les détails de ces expériences, nous reproduirons, d'après les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, les valeurs de ces déterminations pour les vapeurs de quelques liquides.

Désignation des liquides.	Densité par rapport à l'air à 0° et à 1 at.	Chaleur spécifique de la vapeur.
Eau.....	0,6210	0,4750
Alcool.....	1,5890	0,4513
Ether.....	2,5563	0,4810
Sulfure de carbone.....	2,6325	0,1575
Chloroforme.....	5,30..	0,1568
Benzine.....	2,6943	0,3754
Essence de térébenthine....	4,6978	0,5061

103. Chaleur spécifique de la vapeur d'eau. — A l'égard de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau, M. Regnault s'exprime de la manière suivante :

« La chaleur spécifique que j'ai obtenue pour la vapeur d'eau, par un grand nombre d'expériences, est de 0,475 ; elle n'est guère que la moitié de celle qui a été trouvée par Delaroché et Bérard. Il est remarquable que la chaleur spécifique de la vapeur soit à très-peu près égale à celle de la glace, et seulement la moitié de celle de l'eau liquide. »

M. Laboulaye, qui a eu entre les mains le mémoire original de M. Regnault, indique, pour la chaleur spécifique de la vapeur d'eau, 0,4803 au lieu de 0,475, pour des limites de température comprises entre 128 et 220°. La différence entre ces deux évaluations est d'ailleurs assez faible pour qu'il ne soit pas indispensable d'en tenir compte.

104. Chaleur latente. — Les échanges de chaleur ne se traduisent pas toujours par des indications appréciables au thermomètre, et nous avons à nous occuper de ces phénomènes, dans lesquels un certain nombre de calories semblent disparaître, ou, pour nous servir de l'expression consacrée, passent à l'état de chaleur latente.

Lorsque l'on fait fondre un kilogramme de glace à 0°, par son mélange avec un kilogramme d'eau à 75°, on observe qu'après la fusion, le mélange tout entier marque sensiblement 0° au thermomètre.

Les 75 calories qu'a perdus le kilogramme d'eau liquide n'ont servi à rien autre chose qu'à fondre le kilogramme de glace, sans aucunement modifier la température de cette glace après la fusion. Ces 75 calories, qui ne se retrouvent plus dans les évaluations thermométriques, sont donc nécessaires pour opérer la fusion, et l'on dit alors que 1 kilogramme de glace exige pour se fondre une dépense de 75 calories, qui passent à l'état de chaleur latente.

Lorsqu'au contraire l'eau passe de l'état liquide à l'état solide, on démontre qu'elle restitue ces 75 calories par kilo-

gramme, en telle sorte que si la liquéfaction ne s'opère qu'à l'aide d'une certaine dépense de chaleur, la congélation ne se produit jamais qu'à la condition de rendre disponible toute la chaleur latente de fusion. Ce phénomène est général, et l'on peut mesurer, pour les différents corps, la quantité de chaleur qui est ainsi absorbée ou rendue libre, dans chaque changement d'état.

105. Chaleur latente de vaporisation. — Le passage de l'état liquide à l'état gazeux donne également lieu à une dépense spéciale de chaleur, que l'on distingue sous le nom de chaleur latente de vaporisation.

Black, le maître de Watt et l'inventeur de la méthode des mélanges, est le premier physicien qui se soit occupé scientifiquement de cette circonstance, dans le passage de l'eau à l'état de vapeur.

« Il avait placé un petit vase rempli d'eau, sur le couvercle d'un poêle en fonte dans lequel entretenait un feu assez régulier, pour que l'on pût admettre que le vase recevait dans des temps égaux des quantités sensiblement égales de chaleur; il compara le temps que l'eau mit à parvenir à l'ébullition au temps que la même eau mit à s'évaporer complètement. »

Plus tard il fit de nouvelles expériences par la méthode des mélanges, au moyen de laquelle il reconnut que la chaleur latente de vaporisation, nécessaire pour faire passer 1 kilogramme d'eau bouillante à l'état de vapeur, s'élevait à 530 calories. Nous verrons bientôt combien ce premier chiffre de Black se rapproche de celui que nous admettons aujourd'hui.

106. Chaleur totale de la vapeur d'eau. — Aucune question de physique expérimentale n'a été l'objet de plus nombreuses recherches que celle de la détermination de la chaleur nécessaire pour la transformation, en vapeur saturée à 100°, de 1 kilogramme d'eau prise à 0°.

Watt en 1781	a trouvé.....	633,3 calories.
Rumford	—	670,6 —
Ure	—	637,5 —
Gay-Lussac	—	650 —
Clément et Desormes	—	650 —
Despretz	—	640 —
Brix	—	640 —

En ce qui concerne la formation de la vapeur aux autres températures, deux lois ont été proposées par Watt et par Southern.

107. Loi de Watt. — La quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kilogramme d'eau liquide à 0°, pour sa transformation en vapeur saturée, sous une pression quelconque, est constante.

Cette loi, qui serait très-commode pour les calculs de dépense de chaleur, conduit à des résultats très-éloignés de la vérité; le calorique dépensé augmente réellement avec la température, suivant une loi que nous apprendrons à connaître.

108. Loi de Southern. — La chaleur latente de vaporisation est constante pour toutes les pressions.

Cette loi est plus inexacte que la première et conduit à des dépenses de chaleur beaucoup trop considérables.

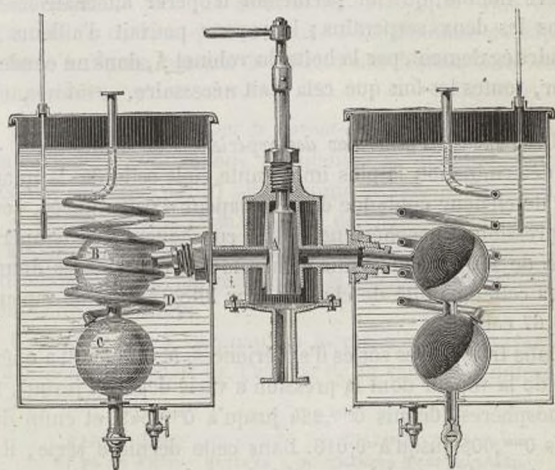
On comprend d'ailleurs que la différence entre ces deux lois tient à toute la chaleur dépensée pour amener l'eau liquide de 0° à la température de vaporisation; elles seraient en quelque sorte identiques, si cette quantité de chaleur était constante; mais nous savons déjà qu'elle est proportionnelle au nombre de degrés dont la température de l'eau doit s'élever avant sa vaporisation.

109. Expériences de M. Regnault. — M. Regnault a repris toutes ces déterminations en opérant la condensation de la vapeur dans les serpents d'un double calorimètre à eau, que nous représentons fig. 14.

La vapeur puisée au centre d'une chaudière maintenue,

autant que possible, à une température constante, était amenée jusqu'à un robinet A, placé entre les deux calorimètres, par des tubes enfermés dans des manchons, remplis égale-

Fig. 14.



ment de vapeur à la même température; de cette manière on évitait toute condensation, et l'inclinaison des tubes d'amenée, leur longueur totale de 4 mètres, ainsi que toutes les précautions prises, avaient aussi pour objet d'éviter tout entraînement d'eau. Du robinet A la vapeur se rendait, au centre du calorimètre, dans la boule B; elle retombait, en partie condensée, dans la boule C, et pénétrait dans le serpentin D, où elle achevait sa condensation au contact des parois de ce serpentin, constamment plongées dans l'eau froide du calorimètre.

Dans des expériences aussi délicates, il fallait mesurer l'échauffement dû à l'air extérieur, résultant de ce que l'eau des calorimètres était dans chaque expérience à une température inférieure à la température ambiante; tenir compte de la chaleur transmise aux calorimètres par conductibilité,

et enfin recueillir, avec le plus grand soin, l'eau condensée dans chaque opération.

C'est pour rendre les observations plus rapides, et par conséquent plus sûres, que M. Regnault s'est servi d'un calorimètre double, qui lui permettait d'opérer alternativement dans les deux serpentins; la vapeur pouvait d'ailleurs se rendre également, par la boîte du robinet A, dans un condenseur, toutes les fois que cela était nécessaire.

110. *Résultats généraux des expériences de M. Regnault.* — La détermination la plus importante était celle de la quantité de chaleur contenue dans la vapeur d'eau saturée, sous la pression atmosphérique et par conséquent à la température de 100°. La moyenne générale des expériences donne pour cette quantité de chaleur, par kilogramme de vapeur, 636,67 calories.

Dans trois autres séries d'expériences, M. Regnault a opéré sur de la vapeur dont la pression a varié depuis 1 jusqu'à 14 atmosphères, depuis 0^{atm},224 jusqu'à 0^{atm},643, et enfin depuis 0^{atm},005 jusqu'à 0,018. Dans cette dernière série, il a directement mesuré la quantité de chaleur enlevée au calorimètre par la vaporisation d'une certaine quantité d'eau, au lieu d'opérer par condensation, comme dans les expériences précédentes.

L'ensemble de ces déterminations constitue certainement l'un des travaux les plus importants et peut-être le plus considérable de la physique.

111. *Chaleur contenue dans un kilogramme de vapeur saturée.* — Nous n'indiquerons pas les chiffres directs obtenus par M. Regnault; il suffira de dire qu'ils se résument dans la formule générale

$$L = 606,5 + 0,305 T,$$

dans laquelle L est la quantité totale de chaleur contenue dans 1 kilogramme de vapeur saturée et T sa température.

On voit que cette quantité de chaleur augmente peu avec la température.

Le terme 0,305 T pourrait être considéré comme une capacité calorifique particulière de la vapeur d'eau, maintenue constamment à l'état de saturation, tandis que 606,5 est la quantité de chaleur qu'abandonne 1 kilogramme de vapeur saturée à 0°, en passant à l'état d'eau liquide à la même température.

112. Chaleur latente ou de formation de la vapeur d'eau. —

Puisque nous connaissons maintenant la quantité totale de chaleur contenue dans 1 kilogramme de vapeur d'eau saturée à la température T, et la quantité de chaleur contenue dans 1 kilogramme d'eau liquide à cette même température, nous aurons facilement, par différence, la mesure de la chaleur latente de vaporisation.

C'est ainsi que M. Regnault a formé le tableau suivant des quantités de chaleur de l'eau et de la vapeur à différentes températures.

TABLEAU DES QUANTITÉS DE CHALEUR DE L'EAU
ET DE LA VAPEUR SATURÉE A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES.

Températures.	Chaleur abandonnée par 1 kilogr. d'eau passant de T à 0.	Chaleur spécifique moyenne de l'eau entre 0 et T.	Chaleur contenue dans 1 kilogr. de vapeur à T.	Chaleur latente de la vapeur saturée à T.
0	0,000	"	606,5	606,5
10	10,002	1,0002	609,5	599,5
20	20,010	1,0005	612,6	592,6
30	30,026	1,0009	615,7	585,7
40	40,051	1,0013	618,7	578,7
50	50,087	1,0017	621,7	571,6
60	60,137	1,0023	624,8	564,7
70	70,210	1,0030	627,8	557,6
80	80,282	1,0035	630,9	550,6
90	90,381	1,0042	633,9	543,5
100	100,500	1,0050	637,0	536,5
110	110,641	1,0058	640,0	529,4
120	120,806	1,0067	643,1	522,3
130	130,997	1,0076	645,1	515,1
140	141,215	1,0087	649,2	508,0
150	151,462	1,0097	651,5	500,7
160	161,741	1,0109	655,3	493,6
170	172,052	1,0121	658,2	486,2
180	182,398	1,0133	661,4	479,0
190	192,769	1,0146	664,4	471,6
200	203,200	1,0160	667,5	464,3
210	213,660	1,0174	670,5	456,8
220	224,162	1,0189	673,6	449,4
230	234,708	1,0204	676,6	441,9

Les chiffres de la dernière colonne montrent que la chaleur latente de la vapeur saturée va constamment en diminuant à mesure que la température augmente, depuis 606,5 calories par kilogramme, pour la température de la glace fondante, jusqu'à 441,9 seulement, pour la température de 230°.

La quantité totale de chaleur va au contraire en augmentant avec la température, mais entre les mêmes limites, elle ne varie que de 606,5 à 676,6 calories.

115. *Comparaison entre la formule de M. Regnault et celles de Watt et de Southern.* — Pour permettre d'apprécier d'un seul coup d'œil les erreurs que l'on commettrait, en employant les formules primitives de Watt ou de Southern, nous avons formé le tableau comparatif suivant, dans lequel nous avons mis en regard, pour les pressions comprises entre 1 et 25 atmosphères, les quantités de chaleur calculées par les différentes formules. Il convient toutefois de faire observer que, pour la pression d'une atmosphère, nous avons, avec chaque formule, employé le chiffre 637, qui résulte définitivement des expériences de M. Regnault.

COMPARAISON

ENTRE LES FORMULES DE M. REGNAULT, DE WATT ET DE SOUTHERN.

Pressions.	Températures.	Nombre de calories contenues dans un kilogr. de vapeur d'eau.		
		Formule de M. Regnault. $L = 606,5 + 0,305 T.$	Formule de Watt. $L = 637.$	Formule de Southern. $L = 537 + T.$
1,00	100°,00	637,00	637	637,00
2,00	120°,60	643,28	637	657,70
3,00	133°,91	647,34	637	670,91
4,00	144°,00	649,42	637	681,00
5,00	152°,22	652,93	637	689,22
6,00	159°,22	655,06	637	696,22
7,00	165°,39	656,94	637	702,39
8,00	170°,81	658,60	637	707,81
9,00	175°,77	660,10	637	712,77
10,00	180°,31	661,49	637	717,31
15,00	198°,80	667,13	637	735,80
20,00	213°,01	671,46	637	750,01
25,00	225°,72	675,34	637	762,72

La loi de Watt donne pour toutes les pressions des nombres trop faibles, celle de Southern des nombres trop forts.

114. Chaleur totale de la vapeur surchauffée. — Lorsque la vapeur saturée, et séparée du liquide qui lui donne naissance, continue à être chauffée, nous avons vu, en parlant de la chaleur spécifique des gaz, qu'elle exigerait alors, pour chaque degré, une dépense spéciale de chaleur, que M. Regnault a estimée à $0^{\text{cal}},475$ par kilogramme. Si l'on ajoute cette consommation à la quantité de chaleur totale de la vapeur saturée, on arrive, pour l'expression totale de la chaleur contenue dans 1 kilogramme de vapeur, surchauffée de la température de saturation T , à la température finale T' :

$$L = 606,5 + 0,305T + 0,475(T' - T).$$

Nous aurons constamment à faire usage de cette formule dans les calculs relatifs à la production de la vapeur.

Cette capacité spéciale, $0^{\text{cal}},475$ par kilogramme de vapeur et par degré, dans les conditions où la vapeur se conduit comme un gaz, devait nécessairement être plus grande que celle qui correspond aux différents états de la vapeur saturée, puisque, dans ce dernier cas, il y a, par rapport au premier, réduction relative dans l'augmentation de volume, et que toute réduction de cette nature paraît en général se traduire par un dégagement de chaleur.

115. Chaleur totale de la vapeur humide. — Bien qu'aucune expérience scientifique n'ait été faite sur cette question, on admet en général que la quantité totale de la chaleur contenue dans la vapeur humide est mesurée par la somme des quantités de chaleur contenues isolément dans la vapeur saturée qui la constitue, pour la plus grande part, et dans l'eau liquide que cette vapeur entraîne.

On aurait alors

$$L = 606,5 + 0,305T$$

pour chaque kilogramme de vapeur saturée, et

$$l = T$$

pour chaque kilogramme d'eau entraînée.

Si l'on désigne par p et par q les poids respectifs de chacune de ces parties, dans un kilogramme du mélange, on aura en définitive, pour la mesure de la chaleur totale,

$$L' = p(606,5 + 0,305T) + qT.$$

416. *Quantité d'eau à injecter pour condenser un kilogramme de vapeur.* — Pour condenser 1 kilogramme de vapeur aux diverses températures et aux diverses pressions, il semblerait, au point de vue théorique, qu'il n'y aurait à lui enlever, par un moyen quelconque, que sa chaleur de vaporisation.

Mais en opérant avec de l'eau en excès, il est évident que de nouvelle vapeur se formerait aux dépens de cette eau, si sa température était plus élevée que celle qui correspond à la pression que l'on veut conserver.

Il faut donc aussi refroidir l'eau de condensation, et par conséquent enlever à la vapeur tout l'excès de calorique qu'elle contient sur celui qu'elle conserverait à l'état liquide, à la température de la condensation.

Soit Q le poids de vapeur à condenser,

T sa température,

Q' le poids de l'eau de condensation,

T' sa température,

T'' la température que doit prendre le mélange,

le nombre de calories contenues dans le poids Q de vapeur sera :

$$Q(606,5 + 0,305T);$$

le nombre de calories contenues dans l'eau de condensation sera :

$$Q'T'';$$

enfin le nombre des calories contenues dans le mélange sera mesuré par

$$(Q + Q')T'';$$

et l'on aura la relation

$$(Q + Q')T'' = Q(606,5 + 0,305T) + Q'T'';$$

d'où l'on tire

$$Q' = \frac{Q(606,5 + 0,305T - T'')}{T'' - T'}.$$

Si l'on suppose $T = 150^\circ$, $T'' = 30^\circ$, $T' = 10^\circ$, il vient

$$Q' = Q \frac{652 - 10}{20} = 32Q.$$

C'est là le chiffre théorique qui peut être appliqué dans la plupart des circonstances, où l'on a besoin de condenser la vapeur.

117. *Tableau général des données numériques relatives à la vapeur d'eau saturée.* — Nous avons réuni dans le tableau suivant les principales données numériques relatives à la vapeur d'eau.

Les pressions en atmosphères sont échelonnées par dixièmes d'atmosphère jusqu'à une atmosphère, ensuite par demi-atmosphère ou par atmosphère seulement.

Les températures en degrés centigrades sont celles qui résultent des expériences de M. Regnault.

Les volumes du kilogramme de vapeur et les poids du mètre cube ont été calculés, comme aux nos 75 et 74, en admettant pour la densité de la vapeur le rapport constant 0,622 de celle de l'air pour la même température et la même pression. Enfin, les quantités de chaleur contenues dans 1 kilogramme de vapeur sont déduites de la formule générale de M. Regnault, que nous avons donnée au n° 111.

Pressions en atmosphères.	Températures en degrés centigrades.	Volumes du kilogramme.	Poids du mètre cube.	Quantités de chaleur contenues dans de la vapeur.
at.		m.e.	kil.	cal.
0,1	46°,2	14,4959	0,0690	620,59
0,2	60,46	7,5972	0,1316	624,94
0,3	69,49	5,1993	0,1923	627,69
0,4	76,25	3,9782	0,2514	629,76
0,5	81,71	3,2319	0,3094	631,42
0,6	86,32	2,7284	0,3665	632,83
0,7	90,32	2,3648	0,4228	634,05
0,8	93,88	2,0892	0,4786	635,13
0,9	97,08	1,8733	0,5337	636,11
1,0	100,00	1,7015	0,5883	637,00
1,5	111,74	1,1689	0,8556	640,58
2,0	120,60	0,8966	1,1151	643,28
2,5	127,80	0,7305	1,3688	645,48
3,0	133,91	0,6180	1,6179	647,34
3,5	139,24	0,5366	1,8631	648,97
4,0	144,00	0,4749	2,1050	650,42
4,5	148,29	0,4265	2,3439	651,73
5,0	152,22	0,3874	2,5803	652,93
5,5	155,85	0,3553	2,8142	654,03
6,0	159,22	0,3281	3,0461	655,06
6,5	162,37	0,3051	3,2761	656,02
7,0	165,31	0,2852	3,5044	656,92
7,5	168,15	0,2685	3,7299	657,78
8,0	170,81	0,2527	3,9554	658,60
8,5	173,35	0,2400	4,1779	659,37
9,0	175,77	0,2272	4,4005	660,11
9,5	178,08	0,2166	4,6204	660,81
10,0	180,30	0,2069	4,8404	661,48
11,0	184,50	0,1895	5,2757	662,76
12,0	188,41	0,1752	5,7065	663,95
13,0	192,08	0,1632	6,1332	665,07
14,0	195,53	0,1526	6,5562	666,12
15,0	198,80	0,1432	6,9758	667,14
16,0	201,90	0,1354	7,3922	668,09
17,0	204,86	0,1281	7,8055	668,99
18,0	207,69	0,1217	8,2160	669,85
19,0	210,40	0,1159	8,6237	670,68
20,0	213,01	0,1108	9,0289	671,47
21,0	215,51	0,1059	9,4317	672,23
22,0	217,93	0,1016	9,8321	672,97
23,0	220,27	0,0977	10,2302	673,68
24,0	222,53	0,0940	10,6262	674,34
25,0	224,72	0,0907	11,0203	675,04

113. *Tableau général des données numériques relatives aux vapeurs des divers liquides.* — Nous avons également réuni dans un tableau spécial les données numériques que nous avons pu recueillir sur un certain nombre d'autres vapeurs, mais seulement pour la température de l'ébullition.

DÉSIGNATION DES LIQUIDES.	CHALEUR spécifique des liquides.	TEMPÉRATURES d'ébullition à 1 atmosphère.	DENSITÉ des vapeurs par rapport à l'air.	POIDS du mètre cube à la température de l'ébullition.	VOLUME du kilogramme à la température de l'ébullition.	CHALEUR latente de vaporisation.	CHALEUR spécifique de la vapeur.
Alcool.....	0,6440 F. 0,6725 R.	78°,00 F. 78°,23 R.	»	»	»	208,9 F. »	0,4513 R.
Éther sulfurique	0,5207 R. 0,5030 F.	79° L. 37° L. 34°,87 R.	1,6138 G. 2,5860 G.	»	»	91,1 F.	0,4810 R.
Chloroforme	»	63° L. 60°,33 R.	»	2,841	0,352	»	0,1568 R.
Sulfure de carbone	0,2179 R.	45°,76 R. 47° L.	» 2,6447 G.	» 2,083	» 0,480	»	0,1575 R.
Essence de térébenthine....	»	157° L. 160°,05 R.	5,0130 G.	»	»	»	2,3776
Benzine.....	0,3999 R.	80°,14 R.	»	»	»	»	0,3754 R.
Mercure.....	0,3332 R.	357°,20 R. 360° L.	6,976 R.	9,0625 R.	0,1103	»	»

Dans ce tableau, les lettres majuscules qui sont placées à côté des chiffres font connaître les noms des observateurs auxquels nous en sommes redevables : R, Regnault; G, Gay-Lussac; L, Legrand; F, Favre et Silbermann.

VI. Action mécanique de la vapeur.

119. *Mode d'action de la vapeur dans les phénomènes mécaniques.* — Les vapeurs, lorsqu'elles sont contenues dans un espace clos, exercent sur les parois des efforts qui peuvent être très-considérables. Si une partie de ces parois vient à céder, il y a tout à la fois effort exercé sur la paroi mobile et déplacement dans le sens de cet effort; il y a donc travail produit, et c'est sous cette forme que les vapeurs sont employées à développer le travail qui nous est fourni par les machines à vapeur.

Cette action principale est toujours accompagnée de phénomènes accessoires dont nous aurons constamment à nous occuper. Considérée comme corps en mouvement, la vapeur obéit aux lois de l'écoulement des fluides élastiques. Dans une certaine mesure, la pression peut être employée à la faire circuler avec une vitesse plus ou moins grande; cette vitesse, à son tour, peut déterminer, lorsqu'on lui oppose un obstacle, des pressions plus ou moins considérables. La vapeur en mouvement, comme tout autre mobile, représente, par sa demi-force vive, une certaine quantité de travail, qui aura pu être développée sur elle, soit par une action mécanique, soit par l'action de la chaleur.

120. *Emploi général de la pression de la vapeur comme force motrice.* — La propriété que possède la vapeur d'eau, suivant sa température, de développer de grandes pressions lorsque l'on fait agir la chaleur sur l'eau liquide, et le bas prix relatif des effets mécaniques que l'on peut obtenir de cette façon, ont rendu l'emploi de la vapeur général.

Bien des tentatives ont été faites pour employer les vapeurs des différents liquides comme celle de l'eau, mais ces va-

peurs sont toutes, par rapport à celle-ci, d'un prix fort élevé, et quelque précaution que l'on prenne pour les recueillir, après qu'elles ont produit leur effet, on en perd toujours quelque peu. Si cette perte est sans importance quand il s'agit de la vapeur d'eau, il n'en est pas de même pour l'éther et pour les autres liquides volatils, dont le prix est en général assez élevé. Aussi la vapeur d'eau est-elle pour ainsi dire exclusivement employée dans les machines à vapeur.

121. *Transmission de l'action de la vapeur à distance.* — La rapidité avec laquelle la moindre différence de pression fait circuler la vapeur la rend éminemment propre à transmettre son action à distance; et à l'exception des machines portatives, l'appareil qui vaporise l'eau est toujours placé à une certaine distance de la machine sur laquelle les efforts de la vapeur doivent être exercés.

Cette séparation du générateur et de la machine est d'un très-grand intérêt pour la facilité de l'installation. Elle est d'ailleurs précieuse au point de vue de la sécurité, car le générateur seul, par suite d'un excès momentané de pression, peut donner lieu à une explosion; et en l'éloignant des ateliers, on éloigne avec lui tous les dangers que déterminent l'imprévoyance des chauffeurs, et quelquefois aussi des circonstances encore inexpliquées.

122. *Précautions à prendre pour cette transmission.* — Mais cette transmission à distance n'est pas exempte d'inconvénients : si la vapeur se refroidit en chemin, elle perd de sa force élastique, elle se condense en partie dans le trajet, et l'on a ainsi dépensé, sans aucun profit, une partie du combustible qui l'avait amenée à une température et à une pression plus élevées.

Nous aurons donc à examiner les moyens à l'aide desquels on peut efficacement combattre cette influence. Mais ce refroidissement n'est pas la seule cause de la diminution de pression dans un conduit de vapeur.

Tout écoulement d'un fluide quelconque entraîne dans son trajet des frottements au contact des parois, et des pertes de force vive à chaque changement de section ou de direction, qui modifie sa vitesse. Pour la vapeur, nous verrons que les vitesses d'écoulement sont toujours très-grandes, et c'est là une raison de plus pour que notre attention soit sérieusement appelée sur tous les phénomènes relatifs à la circulation de la vapeur.

La forme des conduits n'est pas non plus sans importance, car les tourbillonnements qui se produisent dans certaines circonstances sont encore des causes de pertes de force vive que l'on doit chercher à écarter.

123. *Travail théorique de la vapeur à pleine pression.* — Sans anticiper sur la théorie de la machine à vapeur, il est nécessaire que nous entrions déjà dans quelques évaluations sur le travail que la vapeur à pleine pression peut développer, lorsqu'elle pénètre, comme dans le cylindre d'une machine, entre son couvercle fixe et son piston mobile.

On voit immédiatement que, dans cette circonstance, le travail produit est proportionnel à l'effort exercé P et au chemin parcouru L , et que l'on a pour l'expression de ce travail

$$T = PL = 10330 NAL = 10330 NE,$$

si l'on désigne par N le nombre d'atmosphères, par A la section du cylindre et par E son volume.

Le travail produit augmente proportionnellement au produit NE de la pression par le volume, et l'on sait que, si l'on considère un kilogramme de vapeur, E diminue quand N augmente, dans la proportion que nous allons rappeler.

124. *Observation sur le travail de la vapeur à pleine pression.* — Le volume E d'un kilogramme de vapeur, à la pression N et à la température de saturation t qui y correspond, est donné, n° 75, par la formule

$$E = \frac{e}{0,622} \frac{1+at}{N}.$$

En substituant cette valeur de E dans l'expression précédente, il vient :

$$T = 10330 \frac{e}{0,622} (1 + at),$$

e étant le volume du kilogramme d'air à 0° et à la pression de 1 atmosphère.

Sous cette forme on voit immédiatement que le travail d'un kilogramme de vapeur à pleine pression varie seulement comme le module de dilatation $1 + at$. Si l'on n'utilisait que cette portion du travail de la vapeur, l'emploi des hautes pressions ne présenterait qu'un très-faible avantage; aussi Watt, qui s'était déjà rendu compte de cette circonstance, n'employait-il la vapeur que sous des pressions très-peu différentes de la pression atmosphérique.

125. Travail théorique par unité de chaleur dépensée. — La chaleur contenue dans un kilogramme de vapeur saturée est

$$L = 606,5 + 0,305t.$$

Le travail théorique de ce kilogramme de vapeur à pleine pression est, ainsi que nous venons de le voir,

$$T = 10330 \frac{e}{0,622} (1 + at) = \frac{10330 \times 0,77329}{0,622} (1 + at) = 12843 (1 + at).$$

Il résulte de ce rapprochement que le travail correspondant à la dépense d'une unité de chaleur sera exprimé par

$$\frac{T}{L} = \frac{12843 (1 + at)}{606,5 + 0,305t}.$$

Afin de fixer les idées sur les variations de ce travail, nous ferons successivement

$$t = 100^{\circ}, \quad 150^{\circ}, \quad 200^{\circ};$$

ce qui donne :

Valeurs de t .	Valeurs de $\frac{T}{L}$.
100	27,56
150	30,52
200	33,36

Les quantités de chaleur augmentant moins rapidement que les quantités de travail, le nombre de kilogrammètres par calorie augmente sensiblement avec la température, mais les différences ne sont pas considérables, et c'est surtout par l'utilisation de la détente de la vapeur que l'on peut arriver à une économie de grande importance.

126. Travail de la détente. Lorsqu'un certain volume de vapeur a été introduit dans une capacité cylindrique, fermée par un piston, et qu'on permet au piston de se mouvoir, sans introduire de nouvelle vapeur, la pression diminue à mesure que le volume augmente, et l'on dit que la vapeur agit par sa détente.

Ce travail de la détente, comme celui de tout effort variable, se mesure, pour chaque partie élémentaire du parcours, par le produit de l'effort et du chemin parcouru, et il est, dans certaines circonstances, facile d'obtenir ainsi, d'un kilogramme de vapeur, un travail beaucoup plus considérable que celui de la pleine pression.

Nous devons, quant à présent, nous borner à dire que ce travail est surtout considérable pour les pressions les plus élevées, qui permettent une détente proportionnellement plus grande, et c'est ce qui explique la tendance générale des constructeurs à augmenter de plus en plus la pression motrice et par conséquent la pression de la vapeur dans les chaudières.

127. Perte de chaleur et de travail à l'échappement. — Si, après avoir fourni une certaine quantité de travail en agissant à pleine pression et une certaine quantité de travail par sa détente, la vapeur est mise librement en communication avec l'atmosphère, elle s'y précipite avec une vitesse plus ou moins grande, en emportant avec elle toute la chaleur correspondante à sa température et à sa pression finales.

Toute cette chaleur est donc perdue pour l'effet utile, et l'écoulement ayant lieu avec une certaine vitesse, il y a perte

également de toute la quantité de travail correspondante à la force vive due à cette vitesse, eu égard au poids de la vapeur ainsi-écoulée.

Cette quantité de travail n'est jamais très-considérable, mais on comprend cependant que si la vitesse à l'échappement est seulement de 300 mètres, il soit quelquefois utile d'en tenir compte. La perte de travail dans cette circonstance, tout arbitraire, serait par kilogramme :

$$\frac{pv^2}{2g} = \frac{1 \times 300^2}{19,61} = 4589 \text{ kilogrammètres.}$$

Nous chercherons à voir s'il est possible de l'utiliser par quelque procédé mécanique.

128. Utilisation d'une partie de la chaleur conservée par la vapeur à l'échappement. — En ce qui concerne la chaleur que conserve la vapeur à l'échappement, on l'utilise souvent, soit pour chauffer l'eau, qui doit être introduite dans la chaudière, au contact du tuyau d'échappement; soit en faisant passer la vapeur dans de l'eau froide où elle se condense. Ce dernier mode d'utilisation de la vapeur à l'échappement constitue les machines à condensation; il permet tout à la fois d'échauffer l'eau de condensation et d'anéantir, en quelque sorte, la pression de la vapeur au moment où elle formerait obstacle à la marche rétrograde du piston.

Cette utilisation de la chaleur n'est dans tous les cas que partielle, et nous verrons que la plus grande partie de cette chaleur est toujours perdue, dans l'état actuel des choses, pour l'effet utile dans la machine.

129. Notion de l'équivalent mécanique de la chaleur. — Les considérations précédentes sont suffisantes pour établir qu'il existe certaines relations entre les phénomènes physiques de la chaleur et les actions mécaniques que ces phénomènes déterminent.

Ces relations ont, depuis quelques années surtout, été l'objet d'un grand nombre de recherches; les physiciens et

les mécaniciens admettent aujourd'hui, pour la plupart, que chaque calorie est la représentation d'une certaine quantité de travail. Cette quantité théorique, qui serait le maximum du travail que l'on pourrait développer par chaque calorie, est ce que l'on appelle l'équivalent mécanique de la chaleur.

D'après les expériences de M. Joule, cet équivalent devrait être estimé à 425 kilogrammètres, et s'il est vrai que le travail puisse être considéré comme l'équivalent d'une certaine quantité de chaleur, chaque fois que, dans un appareil où la chaleur et le travail sont en jeu, on aurait dépensé une calorie, cette calorie devrait être représentée par un travail effectué de 425 kilogrammètres.

On s'éloignera d'autant plus de cette utilisation de la chaleur que les pertes seront plus grandes, et nous avons vu en parlant du travail à pleine pression, que la chaleur de la vapeur n'était en général utilisée en travail de pleine pression que pour 30 kilogrammètres par calorie, soit pour environ $30 : 425 = 0,07$ de l'équivalent mécanique.

Mais il importe de remarquer dès à présent que la plus grande partie de la chaleur que contenait la vapeur à sa sortie de la chaudière, lui reste encore après sa sortie de la machine, puisque sa température est encore, avant la condensation, fort élevée; si d'ailleurs on tenait compte de la force vive de cette vapeur dans l'effet utile, on y trouverait encore la représentation, au point de vue de l'équivalent mécanique, d'une certaine quantité de chaleur.

Nous n'entrerons quant à présent dans aucun détail sur les faits qui tendent à établir cette sorte de substitution du travail à la chaleur, ou de la chaleur au travail, qui en serait la contre-partie; nous nous bornerons à indiquer, ainsi que l'a fait observer M. Masson, cette confirmation des expériences de M. Joule, qui est comme la conséquence du rapport entre les chaleurs spécifiques de l'air à pression constante ou à volume constant.

150. *Comparaison entre les chaleurs spécifiques de l'air à*

pression constante ou à volume constant. — Soit c la chaleur spécifique de l'air à pression constante, le poids d'un mètre cube de cet air étant exprimé par d , la dépense pour élever cette quantité d'air de 1° sera cd , et le travail développé par l'expansion de cet air sera mesuré par ap , a étant le coefficient de dilatation et p la pression par mètre carré.

Si cet air avait été chauffé de 1° à volume constant, la consommation de chaleur aurait été $c'd$, en désignant par c' la chaleur spécifique, dans ces nouvelles conditions; quant au travail produit dans cette nouvelle circonstance, à l'intérieur, il est absolument nul, puisque les efforts exercés n'ont été accompagnés d'aucun déplacement ni d'aucune variation de volume.

Dans l'hypothèse où le travail développé devrait être la représentation de la différence entre les quantités de chaleur qui viennent d'être évaluées, on aurait à établir la relation suivante entre le travail ap correspondant à l'augmentation de volume et la différence $cd - c'd$, entre les quantités de chaleur dépensées, ce qui donne

$$(cd - c'd) X = ap.$$

X serait dans cette relation un coefficient particulier qui représenterait la quantité de travail afférente à une calorie, ce qui revient à dire que X serait l'équivalent mécanique de la chaleur.

On tire de cette relation

$$c' = c - \frac{ap}{dX}.$$

Toutes les quantités qui entrent dans le second membre de cette relation sont connues, si l'on admet avec M. Joule que $X = 425$, car nous avons vu que p étant égal à 10330 kilogrammes; on a

$$c = 0,2377, \quad d = 1,293, \quad a = 0,00367.$$

En mettant ces valeurs, toutes expérimentales, dans la valeur de c' , il vient.

$$c' = 0,2377 - \frac{0,00367 \times 10330}{1,293 \times 425} = 0,2377 - 0,0690 = 0,1687.$$

Et l'on retrouve ainsi le chiffre exact du rapport

$$\frac{c}{c'} = \frac{0,2377}{0,1687} = 1,41,$$

qui résulte des expériences de Gay Lussac et Welter, avec la petite différence que nous avons signalée de 1,375 au lieu de 1,41.

Cette concordance toute fortuite est certainement le fait le plus probant en faveur de la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur.

Nous la discuterons en détail et nous en ferons connaître les principales conséquences, lorsque nous résumerons les diverses considérations qui se rattachent à l'emploi de la vapeur comme puissance motrice.

CHAPITRE II.

DES COMBUSTIBLES ET DE LEUR POUVOIR CALORIFIQUE.

I. De la combustion et de ses produits.

131. *Chaleur dégagée ou absorbée dans les réactions chimiques.* — L'ensemble des phénomènes chimiques a fait voir que lorsque deux corps se combinent ou qu'un corps composé se décompose, il y a développement ou absorption de chaleur. Ces phénomènes sont plus ou moins marqués suivant la nature des corps que l'on considère, et ils sont surtout très-apparens dans les combinaisons de certains corps avec l'oxygène.

132. *Combinaison avec l'oxygène.* — L'oxygène, qui entretient la vie des animaux, par la combinaison qui s'opère entre ce gaz et le carbone du sang, est de tous les corps celui qui a le plus d'affinités. On appelle combustibles les corps qui se combinent facilement avec l'oxygène, et l'on dit en langage ordinaire que l'oxygène brûle ces corps combustibles.

La plupart des phénomènes qui déterminent, pour nos besoins usuels, le développement d'une certaine quantité de chaleur sont dus aux réactions de l'oxygène.

133. *Des corps combustibles et des conditions nécessaires à la combustion.* — Les corps combustibles les plus répandus sont le carbone et l'hydrogène, qui entrent dans la constitution de la généralité des matières organiques.

Ces deux substances, isolées ou réunies, se combinent facilement avec l'oxygène, particulièrement lorsqu'elles sont portées à la température rouge.

La combinaison se développe alors avec énergie et une grande quantité de chaleur est mise en liberté : c'est ainsi que la combustion se continue d'elle-même, lorsqu'on a commencé à enflammer une portion de la substance, inflam-

mation d'autant plus facile que cette substance est plus divisée.

L'air atmosphérique, qui contient seulement un cinquième de son poids d'oxygène, entretient aussi la combustion des corps les plus combustibles, la plupart du temps avec flamme, mais ces phénomènes sont beaucoup plus éclatants dans l'oxygène que dans l'air; au point de vue industriel nous n'aurons ordinairement à considérer la combustion qu'autant qu'elle est alimentée par l'air atmosphérique.

154. *Composition de l'air atmosphérique.* — L'air est, presque exclusivement, un mélange d'oxygène et d'azote.

M. Regnault a trouvé :

Pour poids du mètre cube d'air.....	1 ^k ,293187
— — d'azote....	1,256267
— — d'oxygène.	1,429802

En supposant que l'air soit exclusivement formé d'oxygène et d'azote et appelant x la proportion d'oxygène, en volume, qu'il contient, on trouve

$$x \times 1,429802 + (1 - x) \times 1,256267 = 1,293187,$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{1,293187 - 1,256267}{1,429802 - 1,256267} = \frac{0,036920}{0,173535} = 0,213.$$

La composition de l'air atmosphérique en volume est donc

Oxygène.....	0,213
Azote.....	0,787
	<hr/> 1,000

De ces chiffres on peut déduire les conséquences suivantes :

Le volume de l'air est égal à 4,694 fois le volume de l'oxygène qu'il contient.

Le volume de l'air est égal à 1,271 fois le volume de l'azote qu'il contient.

Le volume de l'azote de l'air est égal à 3,694 fois celui de l'oxygène de cet air.

Quant à la composition en poids, il suffit de remarquer que :

$$\begin{array}{l} 0^{\text{m}^{\text{c}}},213 \text{ d'oxygène pèsent } 0,213 \times 1^{\text{k}},429802 = 0^{\text{k}},304548 \\ 0,787 \text{ d'azote pèsent... } 0,787 \times 1,256267 = 0,988682 \\ \hline 1,293230 \end{array}$$

Ou en réduisant proportionnellement de manière à obtenir pour total 1 kilogramme seulement :

Oxygène.....	0 ^k ,236
Azote.....	0,764
	<hr/>
	1,000

De sorte que :

Le poids de l'air est égal à 4,246 fois le poids de l'oxygène qu'il contient.

Le poids de l'air est égal à 1,308 fois le poids de l'azote qu'il contient.

Le poids de l'azote de l'air est égal à 3,246 fois celui de l'oxygène de cet air.

Enfin le volume d'air qui contient 1 kilogramme d'oxygène est égal à $4,694 \times 0,6994 = 3^{\text{m}^{\text{c}}},883$.

Dans les calculs qui précèdent on n'a tenu compte ni de la vapeur d'eau ni de l'acide carbonique que l'air renferme toujours en petites quantités. Quant à l'azote, qui ne joue presque toujours qu'un rôle absolument passif dans les phénomènes de la combustion, on pourra calculer son volume ou son poids lorsqu'on connaîtra les quantités correspondantes d'air ou d'oxygène.

155. Composition des combustibles. — Les combustibles employés dans l'industrie sont principalement formés d'hydrogène et de carbone : le carbone imparfaitement brûlé constitue, sous le nom d'oxyde de carbone, un gaz éminemment combustible. L'hydrogène et le carbone en se combinant entre eux peuvent donner naissance à divers composés parmi

lesquels le gaz hydrogène protocarboné et le gaz hydrogène bicarboné doivent surtout fixer notre attention, ces gaz se formant en grande abondance dans la combustion de la houille. Ce sont principalement ces composés qui donnent naissance, lorsqu'ils brûlent imparfaitement, à la fumée si intense qui se dégage fréquemment de nos foyers de chaudières à vapeur.

Nous avons réuni dans un même tableau les données relatives aux gaz combustibles et aux produits qu'ils forment par leur combinaison avec l'oxygène.

Lorsque la combustion est complète ces produits ne peuvent être que de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau, mais il arrive fréquemment que, faute d'être placée dans les conditions les plus favorables, une partie du combustible échappe à la combustion : les produits auxquels on donne en général le nom de gaz brûlés, peuvent contenir alors soit de l'hydrogène libre, soit de l'oxyde de carbone, soit de l'hydrogène combiné avec du carbone, soit même du carbone en suspension à l'état solide.

La vapeur de carbone a été comprise au tableau, bien qu'elle ne puisse exister isolément, mais les chimistes ont admis, par analogie, que le carbone se comportait absolument dans les réactions chimiques comme si le poids du mètre cube de sa vapeur était égal à $1^{\text{e}},095224$. En partant de cette donnée, le volume du kilogramme serait $0^{\text{m}},9139$. L'adoption de ces chiffres permet de considérer l'oxyde de carbone comme formé de un demi-volume de carbone et de un demi-volume d'oxygène ; l'acide carbonique comme résultant de la réunion de un demi-volume de vapeur de carbone et de un volume d'oxygène, condensés en un seul volume ; ce qui revient à dire, d'après l'expérience, que l'acide carbonique a le même volume que l'oxygène qui entre dans sa composition, et que l'oxyde de carbone a un volume double de celui de son oxygène.

On sait, d'après Gay-Lussac, que les gaz se combinent toujours dans des rapports simples en volume, et que le volume du gaz composé est toujours dans un rapport simple avec

TABLEAU DE LA COMPOSITION ET DU POIDS DU MÈTRE CUBE DES GAZ DE LA COMBUSTION.

DÉSIGNATION DES GAZ.	FORMULES ATOMIQUES.	EQUIVALENTS chimiques, celui de l'hydrogène étant 1.	COMPOSITION en volume.	POIDS du mètre cube.	VOLUME du kilogramme.
Oxygène.....	O	8	O	$1^k,429802 r^*$	0,6994
Azote.....	Az	14	Az	$1,256167 r$	0,7961
Air atmosphérique.....	$0,236 O + 0,764 Az$	»	$0,213 O + 0,787 Az$	$1,293187 r$	0,7735
Hydrogène.....	H	1	H	$0,089578 r$	11,1633
Vapeur d'eau.....	HO	9	$H + \frac{1}{2} O$	$0,804579 d$	1,2429
Vapeur de carbone.....	C	6	C	$1,095224 e$	0,9131
Oxyde de carbone.....	CO	14	$\frac{1}{2} C + \frac{1}{2} O$	$1,262513 c$	0,7927
Acide carbonique.....	CO ²	22	$\frac{1}{3} C + O$	$1,977414 r$	0,5057
Hydrogène protocarboné.....	C ² H ⁴	16	$\frac{1}{2} C + 2H$	$0,726968 c$	1,3756
Hydrogène bicarboné.....	C ⁴ H ⁴	28	C + 2H	$1,274780 c$	0,7846

* r, Densités déterminées directement par M. Regnault. — e, Composition déduite des densités déterminées par M. Regnault. — c, Densités déduites par le calcul des résultats précédents, d'après la composition des gaz. — d, Densité résultant de l'application de la même méthode à la vapeur d'eau.

les volumes des gaz composants. Nous avons déjà fait une application de ces lois relatives à la combinaison des gaz, lorsque nous avons calculé, n° 70 la densité de la vapeur d'eau. Tous les chiffres de la quatrième colonne du tableau précédent, confirment ces lois générales, qui ne peuvent être étendues à l'air atmosphérique, dans lequel il y a seulement mélange d'oxygène et d'azote, mais non pas constitution d'un véritable composé, jouissant de propriétés différentes de celles qui résultent individuellement de chacun des gaz qui entrent dans le mélange.

156. *Proportions dans lesquelles les gaz sont consommés ou produits dans la combustion du carbone et de l'hydrogène.* — Le carbone exigeant deux équivalents d'oxygène pour passer à l'état d'acide carbonique, et un équivalent seulement pour passer à l'état d'oxyde de carbone, on voit que son équivalent 6 correspondra à $6 + 2 \times 8 = 22$ d'acide carbonique, ou à $6 + 8 = 14$ d'oxyde de carbone.

Quant à l'hydrogène, dont l'équivalent a été pris pour unité, on sait qu'il se combine avec un équivalent d'oxygène, ou huit fois son poids, pour former de l'eau : chaque kilogramme d'hydrogène donne ainsi 9 kilogrammes de vapeur d'eau.

On arrive, par des calculs analogues, à la détermination des poids de gaz brûlés, que l'on obtiendrait par la combustion des gaz composés; tous les éléments des calculs ont été consignés en regard des résultats dans le tableau de la page 125.

157. *Combustion par l'air atmosphérique.* — Chaque kilogramme d'oxygène correspondant à $4^k,246$ d'air atmosphérique, il suffira de multiplier dans chaque cas, par ce coefficient, la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion pour connaître le poids d'air qui pourrait également rendre cette combustion complète.

C'est ainsi qu'ont été calculés les chiffres de la troisième colonne du tableau de la page 126, qui peut résumer tout ce qu'il est important de connaître, quant aux poids des produits de la combustion.

TABLEAU DES PRODUITS DE LA COMBUSTION PAR L'OXYGÈNE, EN POIDS.

DÉSIGNATION DU COMBUSTIBLE.	FORMULES atomiques.	ÉQUIVALENT chimique H=1.	PRODUITS de la combustion.	FORMULE atomique.	ÉQUIVALENT chimique H=1.	POIDS de l'oxygène fixé.	POIDS d'oxygène par kilogramme de combustible.	POIDS des produits de la combustion par kilogr. de combustible.
Carbone.....	C	6	Acide carbonique.	CO ²	22	16	2,66	3,66
Carbone.....	C	6	Oxyde de carbone.	CO	14	8	1,33	2,33
Oxyde de carbone.....	CO	14	Acide carbonique.	CO ²	22	8	0,57	1,57
Hydrogène.....	H	1	Eau.....	HO	9	8	8,00	9,00
Hydrogène protocarboné.	C ² H ⁴	16	Acide carbonique.	2CO ²	44			
			Eau.....	4HO	36			
					80	64	4,00	5,00
Hydrogène bicarboné....	C ⁴ H ⁴	28	Acide carbonique.	4CO ²	88			
			Eau.....	4HO	36			
					124	96	3,43	4,43

TABLEAU DES PRODUITS DE LA COMBUSTION DE 1 KILOGR. DES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES,
PAR L'OXYGÈNE ET PAR L'AIR ATMOSPHÉRIQUE.

DÉSIGNATION DU COMBUSTIBLE.	PRODUITS DE LA COMBUSTION.	COMBUSTION PAR L'OXYGÈNE.		COMBUSTION PAR L'AIR.	
		POIDS de l'oxygène fixé.	POIDS des produits de la combustion par kilogramme.	POIDS D'AIR correspondant au poids de l'oxygène.	POIDS total des gaz après la combustion, par kilogramme.
Carbone.....	Acide carbonique.....	2,66	3,66	11,29	12,29
Carbone.....	Oxyde de carbone.....	1,33	2,33	5,65	6,65
Oxyde de carbone.....	Acide carbonique.....	0,57	1,57	2,42	3,42
Hydrogène.....	Eau.....	8,00	9,00	33,97	34,97
Hydrogène protocarboné.....	Acide carbonique et eau.....	4,00	5,00	16,99	17,99
Hydrogène bicarboné.....	Acide carbonique et eau.....	3,43	4,43	14,57	15,57

153. *Volumes des produits de la combustion de 1 mètre cube des différents combustibles par l'oxygène et par l'air.* — Les gaz brûlés ayant une composition simple en volume, par rapport aux volumes des gaz combustibles qui entrent en combinaison avec l'oxygène, il est très-facile d'indiquer ce rapport, au moyen de quelques considérations fort simples.

Pour l'hydrogène bicarboné, par exemple, dont un volume est formé par la condensation en un seul de 1 volume de vapeur de carbone et de 2 volumes d'hydrogène, on voit immédiatement que le volume de vapeur de carbone exige 2 volumes d'oxygène; que les deux volumes d'hydrogène exigent 1 volume d'oxygène seulement, et qu'ainsi 3 volumes d'oxygène sont nécessaires; et que ces trois volumes forment 2 volumes d'acide carbonique et 2 volumes de vapeur d'eau, en tout 4 volumes de gaz brûlés pour 1 volume de gaz combustible. Quant au volume d'air nécessaire, il sera 4,694 fois aussi grand que celui de l'oxygène, et l'augmentation de volume résultant de la combustion, étant restreinte aux mêmes éléments, restera identiquement la même que dans le premier cas; les résultats de ces calculs sont réunis dans le tableau de la page 128.

Si l'on ajoute à chacun des chiffres de la sixième colonne le volume du gaz combustible, on trouve en général un chiffre plus grand que celui qui exprime le volume des produits de la combustion.

Dans ce cas il y a, par le fait même de la combustion, réduction de volume; cependant, pour les hydrogènes carbonés, le volume final est égal à la somme des volumes des gaz avant la combustion, et il en est de même pour la vapeur de carbone passant à l'état d'acide carbonique.

Quant à la combustion du carbone, on remarquera que le volume des gaz brûlés est précisément égal à celui de l'oxygène, en telle sorte qu'à égalité de température, le volume des gaz qui se dégageraient du foyer serait le même que celui des gaz introduits, soit en employant l'oxygène pur, soit en employant l'air atmosphérique.

TABLEAU DES PRODUITS DE LA COMBUSTION EN VOLUMES.

DÉSIGNATION DU COMBUSTIBLE.	COMPOSITION en volume- d'un volume du combustible.	DÉSIGNATION des PRODUITS DE LA COMBUSTION.	COMPOSITION en volume des produits de la combustion.	VOLUME des produits de la combustion.	VOLUMES d'oxygène fixés.	VOLUMES d'air correspondants.
Carbone.....	C	Acide carbonique.....	$2(\frac{1}{2}C + O)$	2	2,0	9,388
Carbone.....	C	Oxyde de carbone.....	$2(\frac{1}{2}C + \frac{1}{2}O)$	2	1,0	4,694
Oxyde de carbone.....	$\frac{1}{2}C + \frac{1}{2}O$	Acide carbonique.....	$1(\frac{1}{2}C + O)$	1	0,5	2,347
Hydrogène.....	H	Eau.....	$1(H + \frac{1}{2}O)$	1	0,5	2,347
Hydrogène protocarboné...	$\frac{1}{2}C + 2H$	Acide carbonique.....	$1(\frac{1}{2}C + O)$			
		Eau.....	$2(H + \frac{1}{2}O)$	3	2,0	9,388
Hydrogène bicarboné.....	$C + 2H$	Acide carbonique.....	$2(\frac{1}{2}C + O)$			
		Eau.....	$2(H + \frac{1}{2}O)$	4	3,0	14,082

159. *Volumes d'air et d'oxygène nécessaires pour brûler 1 kilogramme des différents combustibles.* — La table précédente nous indique le rapport entre le volume des produits de la combustion et celui des gaz brûlés; il suffirait évidemment de connaître le volume de combustible qui correspond à 1 kilogramme, pour calculer immédiatement les volumes d'air et d'oxygène nécessaires pour brûler 1 kilogramme des différents combustibles.

En ce qui concerne l'hydrogène protocarboné, par exemple, un volume de ce gaz exige 9,388 volumes d'air; or le volume du kilogramme d'hydrogène carboné est de 1^{mc},3756; celui de l'air nécessaire à sa combustion sera donc

$$9,388 \times 1,3756 = 12^{\text{mc}},91.$$

Pour la combustion du kilogramme d'hydrogène protocarboné par l'oxygène, 2 volumes de ce dernier gaz sont nécessaires, soit

$$2 \times 1,3756 = 2^{\text{mc}},75;$$

et le volume des produits étant égal à 3 fois le volume du gaz combustible, ou à

$$3 \times 1,3756 = 4^{\text{mc}},12,$$

on voit que l'on obtiendrait, de même, le volume des gaz brûlés, lors de la combustion par l'air, en ajoutant 1^{mc},3756 aux 12^{mc},91 que nous avons indiqués plus haut; ce volume total sera, en définitive,

$$12^{\text{mc}},91 + 1^{\text{mc}},3756 = 14^{\text{mc}},29.$$

Les différents chiffres obtenus de cette manière sont ceux qu'il importe le plus de connaître dans la pratique, et nous les avons, pour la facilité des recherches, réunis dans le tableau suivant; le combustible étant en général solide, on apprécie sa quantité en poids, tandis que l'on évalue en mètres cubes les quantités d'air introduites.

TABLEAU DES VOLUMES D'OXYGÈNE ET D'AIR NÉCESSAIRES POUR BRÛLER 1 KILOGRAMME
DES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	DÉSIGNATION des PRODUITS DE LA COMBUSTION.	VOLUME du kilogramme du gaz combustible.	VOLUME d'oxygène nécessaire pour brûler 1 volume du combustible.	VOLUME d'oxygène nécessaire pour brûler 1 kilogr. de combustible.	VOLUME d'air nécessaire pour brûler 1 volume du combustible.	VOLUME d'air nécessaire pour brûler 1 kilogramme du combustible.
		m.c.	m.c.	m.c.	m.c.	m.c.
Carbone.....	Acide carbonique.....	0,9131	2,0	1,8262	9,388	8,5722
Carbone.....	Oxyde de carbone.....	0,9131	1,0	0,9131	4,694	4,2861
Oxyde de carbone.....	Acide carbonique.....	0,7927	0,5	0,3964	2,347	1,8605
Hydrogène.....	Eau.....	11,1633	0,5	5,5816	2,347	26,2002
Hydrogène protocarboné...	Acide carbonique et eau...	1,3756	2,0	2,7512	9,388	12,9141
Hydrogène bicarboné.....	Acide carbonique et eau...	0,7846	3,0	2,3538	14,082	11,0487

II. Quantité de chaleur dégagée par la combustion.

140. *Détermination de la quantité de chaleur dégagée par la combustion.* — Cette détermination a occupé un grand nombre d'observateurs, parmi lesquels nous citerons : Lavoisier et Laplace, Rumford, M. Despretz et Dulong.

Les expériences ont été faites, soit avec un calorimètre à glace, soit avec un calorimètre à eau, analogue à celui qui a servi à la détermination de la chaleur latente de la vapeur d'eau.

M. Despretz et Dulong avaient trouvé, pour le pouvoir calorifique des deux principes combustibles :

Noms des observateurs.	Carbone.	Hydrogène.
Despretz.....	7170	23640
Dulong.....	7800	34742

On voit que ces chiffres diffèrent notablement les uns des autres, surtout en ce qui concerne l'hydrogène.

141. *Expériences de MM. Favre et Silbermann.* — MM. Favre et Silbermann ont exécuté un travail considérable sur le même sujet; et par les soins qu'ils ont apporté dans leurs déterminations, on doit considérer leurs chiffres comme les plus exacts.

Leur procédé consistait à opérer la combustion dans une chambre spéciale, constamment alimentée avec les gaz nécessaires pour entretenir la combustion; cette chambre était contenue dans un calorimètre à eau, disposé de manière à éviter autant que possible le refroidissement.

Les gaz et les combustibles étaient introduits dans la chambre à l'état de pureté, et les produits de la combustion étaient en quelque sorte analysés, par l'appareil lui-même, en se dégageant. L'acide carbonique était retenu par un tube à potasse, l'eau par un tube à ponce sulfurique; un peu plus loin l'oxyde de carbone était amené à l'état d'acide carbonique, en passant sur de l'oxyde de cuivre, porté à une tem-

pérature suffisante, et cet acide lui-même était absorbé par un nouveau tube à potasse.

Les expériences de MM. Favre et Silbermann ont compris un grand nombre de substances; nous nous bornerons à indiquer les résultats qu'ils ont obtenus sur les produits de la combustion de l'hydrogène, du carbone et de leurs composés.

TABLEAU DES QUANTITÉS DE CHALEUR DÉGAGÉES
PAR LA COMBUSTION D'UN KILOGR. DE COMBUSTIBLE.

Désignation des substances.	Chaleur dégagée.
Hydrogène à 15°.....	34462,0
Charbon, de C à CO ²	8080,4
Charbon de sucre.....	8039,8
Charbon des cornues à gaz.....	8047,3
Graphite naturel.....	7811,5
Graphite naturel.....	7781,5
Graphite des hauts fourneaux.....	7785,3
Graphite des hauts fourneaux.....	7737,1
Diamant.....	7770,1
Oxyde de carbone, de CO à CO ²	1029,5 *
Charbon, de C à CO (par différence).....	5678,2
Hydrogène protocarboné C ² H ⁴	13063,0
Hydrogène bicarboné C ² H ⁴	11857,8

142. *Chaleur dégagée par la combinaison de 1 kilogramme d'oxygène avec différents combustibles.* — Welter, en 1822, avait été conduit par l'expérience à croire que les combustibles, en brûlant avec le même poids d'oxygène, dégagent des quantités de chaleur égales entre elles ou multiples les unes des autres.

Cette loi n'a pas été confirmée d'une manière générale; et dans un travail postérieur publié dans les *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, tome XXXVII, M. Despretz a modifié les conclusions de Welter en disant que la quantité de chaleur est constante quand le volume du gaz produit par la combustion est le même que celui de l'oxygène brûlé; c'est ce qui arrive lors de la transformation du carbone en acide carbonique.

* Le chiffre de 2402,2, que l'on trouve dans la plupart des tables, se rapporte à la quantité de gaz qui contiendrait 1 kilogramme de carbone.

Il avait du reste trouvé des chiffres assez concordants, pour la combustion du carbone et celle de l'hydrogène, puisqu'en combinant, dans ces deux cas, un kilogramme d'oxygène, les chiffres de ses expériences étaient, pour l'hydrogène 2578, et pour le carbone 2967.

Si nous calculons ce même nombre de calories d'après les chiffres de MM. Favre et Silbermann, nous obtenons pour l'hydrogène, qui consomme 8 fois son poids d'oxygène,

$$34462 : 8 = 4308,$$

et pour le charbon, qui en consomme seulement 16 : 6,

$$8080,4 : \frac{16}{6} = 3030.$$

On voit que l'un de ces chiffres est très-différent de ceux qui avaient été indiqués précédemment.

145. Observation sur le pouvoir calorifique de l'hydrogène. —

Dans les expériences qui ont conduit aux chiffres précédents pour l'hydrogène, ce gaz était introduit avec l'oxygène à la température de 15°, et les produits de la combustion étaient recueillis à l'état d'eau liquide; le calorimètre a donc recueilli, tout à la fois, et le calorique dégagé par la combustion, et le calorique dégagé par cette condensation.

Si l'on voulait éliminer cette dernière influence, il faudrait remarquer que le nombre 606,5, représentant la quantité de calories qu'abandonne un kilogramme de vapeur à 0°, en passant à l'état d'eau liquide à la même température, et chaque kilogramme d'hydrogène formant 9 kilogrammes d'eau, il y a lieu de retrancher de 34462, 9 fois 606,5 ou 5458,5, pour avoir la mesure de la chaleur réellement dégagée par la combustion. Le chiffre de l'hydrogène se trouve ainsi réduit à 29003,5, qui se rapproche beaucoup plus des nombres précédemment adoptés. Encore une partie de cette chaleur résulte-t-elle de ce qu'il y a condensation de 1 volume 1/2 en un seul.

La même correction, appliquée aux différents carbures d'hydrogène, conduirait aux chiffres suivants :

1 kilogramme d'hydrogène protocarboné formant $\frac{36}{16} = 2,25$ d'eau, dont la condensation fournit

$$2,25 \times 606,5 = 1264,62 \text{ calories;}$$

1 kilogramme d'hydrogène bicarboné formant $\frac{36}{8} = 1,28$ d'eau, dont la condensation fournit

$$1,28 \times 606,5 = 776,32 \text{ calories,}$$

les nombres corrigés de cette influence seront donc :

Pour l'hydrogène protocarboné,

$$13063 - 1264,6 = 11798,4;$$

pour l'hydrogène bicarboné,

$$11857,8 - 776,3 = 11081,5.$$

144. *Quantités de chaleur dégagées par un même corps, à des degrés d'oxydation différents.* — Les travaux si importants de Dulong, sur la question qui nous occupe, avaient conduit ce célèbre physicien à poser en principe que la quantité totale de chaleur dégagée par un corps simple, en brûlant, est la même, soit qu'il atteigne immédiatement le degré d'oxydation le plus élevé, soit qu'il n'y parvienne qu'après avoir passé par les états d'oxydation intermédiaires.

MM. Favre et Silbermann ont adopté ce principe lorsqu'ils ont indiqué, pour pouvoir calorifique de la formation de l'oxyde de carbone, la différence entre les chaleurs dégagées par la combustion complète d'un kilogramme de carbone, et par la combustion de la quantité d'oxyde de carbone nécessaire pour obtenir le même poids d'acide carbonique.

145. *Chaleur dégagée par la combustion des corps composés.* — La seconde loi de Dulong consiste en ce que, dans la

combustion d'un corps composé, la quantité de chaleur dégagée est peu différente de la somme de celles qui seraient dégagées séparément par la combustion des éléments qui le composent.

Si l'on appliquait ce principe à l'hydrogène protocarboné, par exemple, on calculerait séparément :

La quantité de chaleur fournie par deux équivalents de charbon pesant 12, soit $12 \times 8080 \dots\dots\dots = 96960$

Et la quantité de chaleur fournie par quatre équivalents d'hydrogène pesant 4, soit $4 \times 34462 = 137848$

Total..... 234808

Le poids total étant 16, on aura pour le pouvoir calorifique de 1 kilogramme,

14675.

MM. Favre et Silbermann ont trouvé directement :

13063.

Le même calcul, appliqué à l'hydrogène bicarboné, conduirait aux résultats suivants :

Carbone, $4 \times 6 \times 8080 \dots\dots\dots = 193920$

Hydrogène, $4 \times 1 \times 34462 \dots\dots\dots = 137848$

331768

Et, en divisant par le poids total 28,

11849,

le chiffre de l'expérience est

11857,

et fournit une vérification presque absolue du principe qui nous occupe.

A défaut d'expériences directes, nous serons souvent conduit à faire des applications de ce principe, dont l'emploi est si général que la plupart des auteurs ne craignent pas d'indiquer, sous le nom de pouvoir calorifique des différents combustibles de l'industrie, des chiffres obtenus de cette façon, tandis que nous verrons bientôt qu'il n'existe en réalité aucune détermination directe du pouvoir calorifique des combustibles les plus importants.

146. *Chaleur dégagée par la combustion de quelques corps composés.* — Il ne sera pas superflu d'indiquer ici quelques-uns des chiffres, résultant de déterminations au calorimètre, qui ont été obtenus par divers physiciens, soit sur des combustibles que l'on emploie fréquemment dans l'industrie, soit sur ceux qui s'en rapprochent par leur composition et leurs propriétés.

Désignation des substances.	Chaleur dégagée par la combustion de 1 kilogramme.	Noms des observateurs.
Huile de colza.....	9307	Rumfort.
Huile d'olive.....	9862	Dulong.
Bicarbone d'hydrogène, bouillant à 180° (C^2H^2) ¹¹	11262	Favre et Silbermann.
Essence de térébenthine $C^{20}H^{16}$..	10852	Favre et Silbermann.
Naphte.....	7338	Rumfort.
Alcool à 42° de Beaumé.....	6855	Dulong.
Alcool à 33° de Beaumé.....	5261	Dulong.
Alcool de vin (C^2H^2) ² H^2O	7184	Favre et Silbermann.
Esprit de bois (C^2H^2) H^2O^2	5307	Favre et Silbermann.
Éther sulfurique C^4H^8O	9027	Favre et Silbermann.
Suif.....	7569	Laplace et Lavoisier.
Suif.....	8369	Rumfort.
Cire.....	10496	Favre et Silbermann.
Blanc de baleine (C^2H^2) ³² O^4	10342	Favre et Silbermann.
Acide stéarique (C^2H^2) ¹⁹ O^4	9716	Favre et Silbermann.
Houille moyenne.....	7600	Dulong.
Bois très-sec.....	3652	Dulong.
Bois.....	4314	Rumfort.

147. *Observation sur les combustibles liquides.* — On remarquera que les hydrocarbures liquides ont, en général, un pouvoir calorifique moindre que celui des combustibles ga-

zeux. Cela tient évidemment à ce que les liquides absorbent nécessairement du calorique pour passer à l'état gazeux.

L'identité de composition d'une même nature de liquide, et particulièrement de ceux qui proviennent des graines oléagineuses, les rendrait très-propres à servir d'unité de comparaison pour les quantités de chaleur dépensées dans différentes opérations. La lampe Carcel serait alors l'appareil de combustion le plus convenable, en ce qu'elle consomme très-régulièrement 40 grammes d'huile, par heure, pour chaque bec de 2 centimètres de diamètre. Chaque lampe semblable dégagerait par heure

$$0^k,040 \times 9300 = 372 \text{ calories,}$$

que l'on peut toujours reproduire, sans en faire la vérification expérimentale, dans des conditions suffisamment identiques*.

143. *Composition et pouvoir calorifique de l'huile de colza.*— D'après les indications qui nous ont été données par un habile chimiste, mais sans qu'on puisse cependant accorder une foi complète à cette composition, l'huile de colza se composerait de

$$\begin{array}{r} 0,710 \text{ carbone,} \\ 0,105 \text{ hydrogène,} \\ 0,185 \text{ oxygène.} \\ \hline 1,000 \end{array}$$

D'après cette composition, la chaleur dégagée par la com-

* La dépense d'une machine à vapeur consommant 3 kilogrammes de charbon par force de cheval, pourrait être exprimée en carcel par la relation suivante :

$$n = \frac{3 \times 8000}{372} = 64,5.$$

bustion d'un kilogramme d'huile de colza ne pourrait s'élever au delà de

$$0,710 \times 8000 = 5680$$

$$0,105 \times 34000 = 3570$$

$$\text{Total} \dots \dots 9250$$

Il est à remarquer que ce chiffre est précisément celui de Rumfort; ce rapprochement démontre suffisamment que cet habile expérimentateur a condensé la vapeur d'eau formée, et qu'il en a tenu compte dans son évaluation du pouvoir calorifique de l'huile d'éclairage.

149. *Application des données précédentes à la détermination de la température initiale des gaz brûlés.* — Les indications qui viennent d'être données suffisent pour déterminer la température des gaz de la combustion. Pour en faire l'application à la température des gaz provenant de la combustion du carbone pur, par la quantité d'air strictement nécessaire à sa combustion, il suffira de rappeler que :

1° Un kilogramme de carbone, en brûlant, dégage 8000 calories.

2° Les produits de la combustion par l'air atmosphérique pesant 12^k,29 sont formés de

3^k,66 d'acide carbonique;

8^k,63 d'azote.

Soit T la température commune à laquelle ces deux gaz sont portés, en se rappelant que, pour chaque degré de l'échelle thermométrique et pour chaque kilogramme, l'acide carbonique dépense 0,2164 calorie, et l'azote 0,2440, la quantité de chaleur nécessaire pour les amener à cette température T sera,

$$(3,66 \times 0,2164 + 8,63 \times 0,2440) T = 8000,$$

et cette quantité de chaleur pourra être égale à celle qui est

produite par la combustion. De là l'équation précédente, dont on tirera

$$T = \frac{8000}{3,66 \times 0,2164 + 8,63 \times 0,2440} = \frac{8000}{0,792 + 2,106} = 2760^{\circ}.$$

Cette température serait nécessairement beaucoup moins élevée si la quantité d'air employée à la combustion était plus grande, puisque cet air participerait à l'échauffement général, et il faudrait introduire dans la relation qui précède la quantité de chaleur correspondant à sa capacité pour la chaleur, c'est-à-dire 0,2377, multiplié par son poids en kilogrammes.

En général, on pourra, dans ces calculs approximatifs, prendre 0,22 pour la capacité commune des différents gaz et arriver alors beaucoup plus simplement à la détermination de la température. Quant à la vapeur d'eau, cependant, il ne faut pas oublier que sa capacité de surchauffement est beaucoup plus considérable et égale à 0,475.

La température des gaz brûlés serait un peu moins élevée pour l'hydrogène, parce que la chaleur dégagée doit se répartir, à égalité de poids du combustible, sur un poids de gaz brûlé beaucoup plus grand.

Le pouvoir calorifique de ce gaz doit être réduit, ainsi que nous l'avons vu, à 29 000 calories, lorsque la vapeur d'eau ne se condense pas; cette chaleur doit se répartir entre les 9 kilogrammes de vapeur d'eau, qui sont formés aux dépens de l'oxygène, et les 29,552 d'azote correspondants; on a donc

$$T = \frac{29000}{9 \times 0,48 + 29,552 \times 0,2440} = \frac{29000}{11,53} = 2515^{\circ}.$$

Un excès d'air abaisserait encore cette température, qui serait d'ailleurs beaucoup plus élevée pour les principaux carbures d'hydrogène.

150. *Énumération des combustibles employés dans l'industrie.* — Les combustibles employés dans l'industrie sont le

plus généralement à l'état solide, et le carbone entre, pour la plus grande part, dans leur composition.

Tous ces combustibles renferment de l'eau, à l'état hygrométrique, en quantité plus ou moins considérable. Quelques-uns contiennent plusieurs centièmes d'hydrogène, et la présence de cet hydrogène modifie considérablement leurs propriétés.

Les principaux combustibles sont d'origine végétale, mais nous les extrayons des grands amas souterrains formés aux dépens des anciens végétaux, à diverses époques géologiques, et nous les désignons alors sous le nom générique de combustibles minéraux : ce sont les houilles, les lignites, les tourbes, que l'on emploie tels qu'on les extrait, ou après leur avoir fait subir certaines préparations : le coke, le charbon de tourbe, etc., sont dans ce cas.

On désigne plus particulièrement sous le nom de combustibles végétaux les bois, sous toutes leurs formes, et les produits que l'on obtient par la torréfaction de ces bois ; la tannée est elle-même une matière ligneuse, dont les principes ont été épuisés, en partie, dans certaines opérations des arts.

Les combustibles liquides sont surtout employés à l'éclairage, mais leur prix élevé ne permet pas de s'en servir habituellement pour la production de la chaleur. Nous n'aurons donc, en aucune façon, à nous en occuper. Disons cependant que dans certaines circonstances les liquides, lorsqu'ils sont assez volatils pour se mélanger, à l'état de vapeurs combustibles, avec l'air atmosphérique, peuvent constituer des mélanges inflammables qui portent en eux-mêmes l'air, ou l'oxygène nécessaire à leur propre combustion.

Parmi les gaz, au contraire, nous compterons au nombre des combustibles de l'industrie les gaz des hauts fourneaux et le gaz d'éclairage, dont les applications s'étendent chaque jour et qui peuvent en effet fournir des moyens de chauffage économiques. L'étendue et la régularité de la flamme, et par conséquent la permanence d'une température parfaitement

uniforme ont beaucoup contribué, depuis plusieurs années surtout, à multiplier les applications, qui ont été faites, des fourneaux à gaz dans plusieurs industries.

131. Quantité d'air nécessaire à la combustion. — On dit qu'une combustion est complète lorsque la totalité du carbone et la totalité de l'hydrogène ont été transformées en acide carbonique et en eau. Il suit de là que la quantité d'air théoriquement nécessaire à la combustion est celle qui serait suffisante pour brûler isolément tout l'hydrogène et tout le carbone qui existent à l'état libre dans le combustible. Les carbures d'hydrogène devront compter à cet égard pour l'hydrogène et le carbone qu'ils renferment; mais il n'en serait plus de même pour l'oxyde de carbone, l'acide carbonique et l'eau hygrométrique du combustible.

L'oxyde de carbone ne devrait être compté, dans la détermination du volume d'air nécessaire, que pour la transformation de cet oxyde de carbone en acide carbonique. Quant à l'eau et à l'acide carbonique, qui sont arrivés au degré le plus élevé d'oxydation, ils ne sauraient plus dépenser aucune quantité d'air atmosphérique ni d'oxygène, et ils ne doivent entrer pour rien dans le calcul.

On pourra, dans tous les cas, se servir des tableaux du n° 137 pour avoir l'évaluation du volume total.

En pratique, la quantité d'air employée est toujours beaucoup plus grande que celle qui est ainsi calculée, et nous verrons que dans la plupart des cas ce volume théorique est au moins doublé.

132. Volume des produits gazeux de la combustion. — Les mêmes tableaux du n° 137 permettront de calculer dans chaque cas le volume des produits gazeux de la combustion : il suffira d'ajouter, au volume de l'air introduit, l'augmentation qui résulte de chacune des réactions qui constituent la combustion complète.

Il faut toutefois remarquer qu'en ce qui concerne les produits gazeux de la combustion du carbone, le volume tout

entier de l'acide carbonique doit être ajouté au volume primitif. Quant à l'eau formée, on devra dans chaque cas s'assurer si, eu égard à la température finale, il ne s'est produit aucune condensation.

133. Pouvoir calorifique des combustibles de l'industrie. —

La plupart des tables des pouvoirs calorifiques ont été formées en additionnant les pouvoirs calorifiques des différents éléments en lesquels chaque combustible peut être décomposé.

On est trop ordinairement réduit à opérer par ce moyen, qui est très-souvent inexact, en ce qu'il ne tient compte ni de l'état primitif dans lequel les divers éléments sont associés dans le combustible, ni des quantités de chaleur latente qui correspondent au passage de l'état solide à l'état gazeux.

L'habitude est tellement générale, à cet égard, qu'on ne prend plus soin d'indiquer si les déterminations ont été directement faites ou si elles ont été ainsi calculées par voie d'addition.

Il serait extrêmement important que des expériences fussent faites, avec le calorimètre, sur la plupart des combustibles de l'industrie, par des procédés analogues à ceux qui ont été employés par MM. Favre et Silbermann.

III. Combustibles de l'industrie.

134. Combustibles solides. — Nous établirons parmi les combustibles solides deux grandes divisions : les combustibles minéraux et les combustibles végétaux.

Les combustibles minéraux contribuent pour la presque totalité au chauffage des chaudières à vapeur. Ce n'est qu'exceptionnellement que l'on a recours aux autres combustibles, particulièrement dans les localités où le bois est abondant, où l'on n'a pas découvert encore de mine de houille, mais pour peu que les arrivages y deviennent plus faciles, les combustibles végétaux y seront bientôt abandonnés.

Ceux-ci ne sont, la plupart du temps, employés qu'à l'état

de résidus, soit du travail du bois, soit du tannage, et l'on a dans ces derniers temps fabriqué, avec ces débris torréfiés et mélangés avec de l'argile, des charbons artificiels, qui jouissent de cette propriété de brûler lentement et de se conserver en feu pendant un temps considérable, grâce à l'enveloppe de cendres qui les recouvre, aussitôt que la surface extérieure a brûlé.

155. Combustibles minéraux. — La houille est le combustible qui se rencontre en plus grandes masses : elle présente un grand nombre de variétés, et dans certaines formations particulières, aux deux extrémités de l'échelle géologique, elle prend le nom d'anthracite et de lignite.

La tourbe diffère du lignite en ce que les amas, qu'elle forme, ont conservé de la manière la plus apparente les traces des végétaux qui la constituent. Elle n'a dans l'industrie qu'une importance secondaire, mais si son emploi était plus généralisé, elle pourrait utilement suppléer à la houille dans bien des circonstances, par suite de son bas prix. C'est surtout lorsqu'elle a été séchée et calcinée de manière à former le coke de tourbe ou la tourbe carbonisée, qu'elle devient un combustible vraiment industriel, d'un transport facile et d'une richesse suffisante.

Le coke de houille est surtout recherché dans les opérations pour lesquelles les produits volatils de la houille pourraient exercer une action nuisible ou seulement désagréable.

156. Gisement des combustibles minéraux. — La houille, qui forme de grands dépôts dans le sein de la terre, a une origine végétale : elle s'est formée sous les eaux en couches horizontales plus ou moins épaisses, pendant les premières périodes géologiques, et parmi les formations sédimentaires les plus anciennes.

Ces couches ont été postérieurement soumises à divers soulèvements, qui les ont relevées, à des courants qui les ont dispersées, en telle sorte qu'elles n'ont pas toujours les allures qu'on devrait s'attendre à rencontrer dans un dépôt sédi-

mentaire. Ce mode de formation des houilles nous indique déjà que l'on doit retrouver dans leur composition une partie de l'hydrogène et du carbone qui constituent en général les matières végétales, et que ces substances doivent être associées aux débris pulvérulents des roches qui formaient les rives; de là l'origine des substances minérales que l'on rencontre, en proportions plus ou moins grandes, dans toutes les variétés de houilles.

Les lignites et la tourbe forment, pour les périodes géologiques plus récentes, les analogues de la houille, mais ces combustibles conservent des traces plus ou moins nombreuses de la texture primitive, et une plus grande proportion des principes volatils des végétaux dont ils proviennent.

137. *Caractères chimiques des combustibles minéraux.* —

M. Frémy a présenté à l'Académie des sciences*, sous le titre de: *Recherches chimiques sur les combustibles minéraux*, un travail important, qui assigne à chacun d'eux, des caractères chimiques assez tranchés pour permettre de les distinguer les uns des autres. La classification qu'il en donne est d'ailleurs la même que celle des géologues, mais il établit une distinction plus méthodique entre les différents lignites, suivant que leur transformation est plus ou moins avancée.

Nous indiquerons sommairement les caractères de ces différents combustibles.

1° *Tourbe.* — Très-facile à distinguer d'après son apparence; la potasse y détermine la présence de l'acide ulmique; on peut, au moyen de l'acide azotique ou des hypochlorites alcalins, purifier et extraire en quantité notable les fibres ligneuses et les cellules des rayons médullaires.

La présence de l'acide ulmique suffit pour distinguer la tourbe des tissus non altérés.

* Le 28 janvier 1861, comptes rendus, page 14.

- 2° *Bois fossile ou lignite xyloïde.* — Conserve la forme du végétal, mais se réduit facilement en poudre; en partie soluble dans les alcalis, comme la tourbe; mais son altération est plus profonde, car il se dissout presque entièrement dans l'acide azotique et les hypochlorites alcalins.
- 3° *Lignite compacte ou parfait.* — Les dissolutions alcalines n'agissent pas sur ce combustible, mais il se dissout complètement dans l'acide azotique et les hypochlorites.
- 4° *Houille.* — Insolubilité complète dans les dissolutions alcalines et les hypochlorites; l'acide azotique ne l'attaque que lentement.
- 5° *Anthracite.* — Résiste aux réactifs qui modifient les combustibles précédents; l'acide azotique ne l'attaque qu'avec une extrême lenteur.

Au point de vue chimique, trois réactifs suffiraient donc pour distinguer, les uns des autres, les divers combustibles minéraux, et les caractères de chacun d'eux pourraient être indiqués de la manière suivante.

	Action de la potasse.	Action de l'acide azotique.	Action des hypochlorites.
1. Tourbe.....	Acide ulmique.	Purification des tissus non altérés.	Purification des tissus non altérés.
2. Bois fossile ou lignite xyloïde..	Id.	Dissolution presque complète.	Dissolution presque complète.
3. Lignite parfait ou compacte...	Sans action.	Dissolution complète.	Dissolution complète.
4. Houille.....	Id.	Action lente.	Sans action.
5. Anthracite.....	Id.	— très-lente.	Id.

Ces distinctions ne sont peut-être pas absolues, mais elles établissent néanmoins des caractères tranchés, quant aux

lignite, que l'on confondait très-fréquemment avec la houille.

Quant à ce qui concerne les distinctions à établir entre les différents combustibles minéraux au point de vue de leur emploi, nous désignerons sous le nom générique de houilles tous les combustibles qui se présentent sous la forme de fragments noirs, brillants et denses, en y comprenant les anthracites et les lignites.

138. Classification industrielle des houilles. — Au point de vue de leur emploi, les houilles se partagent surtout en houilles maigres et en houilles grasses. En les classant dans cet ordre, les anthracites occuperaient le premier rang. Plus brillants et plus purs que la plupart des houilles, ils constituent le charbon le plus compacte, le plus difficile à enflammer et à maintenir en feu. Ils sont surtout caractérisés par l'absence complète de flamme et par la facilité avec laquelle ils décrépitent et se pulvérisent pendant la combustion.

Les houilles maigres sont celles qui brûlent sans se déformer, et dont les résidus, qui restent isolés les uns des autres, rappellent la forme générale des fragments avant la mise en feu.

Les houilles grasses, au contraire, se déforment par la chaleur; elles laissent exsuder au feu une matière plus molle, presque fluide, qui se boursoufle et qui réunit souvent plusieurs fragments entre eux.

On comprend que ces propriétés aient une grande influence sur la combustion. Pour obtenir un feu convenable dans les foyers des chaudières à vapeur, il faut que l'air puisse circuler constamment entre les fragments: les houilles maigres sont donc les meilleures pour cet usage. Les houilles grasses, dont les propriétés collantes sont très-favorables pour la forge, ne sauraient convenir au chauffage des chaudières à vapeur.

Les Anglais désignent les principales variétés de houilles

par des noms tout aussi caractéristiques; ils sont surtout préférables parce qu'ils établissent une subdivision plus grande, et ils ont, pour cette raison, été complètement adoptés par l'industrie.

M. Regnault, dans son mémoire de 1837, traduit de la manière suivante les dénominations anglaises :

Dénominations anglaises.	Dénominations françaises.	Principaux gisements.
Splint coal.....	Houille esquilleuse....	Wylam; Glasgow.
Cannel coal.....	Houille compacte.....	Lancashire; Edimbourg.
Cherry coal.....	Houille molle.....	Newcastle; Glasgow.
Caking coal.....	Houille collante.....	Newcastle; Durham.

Les lignites ne sont pas compris dans cette nomenclature, mais ils devraient être placés, comme charbons maigres, entre les anthracites et le splint coal; quelques variétés de lignites sont cependant bitumineuses.

159. Composition des houilles. — M. Regnault a publié, en 1837, dans les *Annales des mines* (3^e série, t. XII, p. 131), un grand travail sur la composition élémentaire des combustibles.

Nous avons conservé, dans le tableau de ses analyses, l'ordre même qui avait été adopté par l'auteur, et qui indique celui de la superposition géologique des principales formations houillères : chaque échantillon, avant d'être analysé, avait été soumis, pendant trente minutes, à une température de 120°, suffisante pour l'amener à une dessiccation uniforme.

M. Regnault a également déterminé, pour chacun de ces combustibles, la nature et la quantité du résidu de la calcination en vase clos; ce produit, que l'on désigne sous le nom de coke, représente à peu près la totalité du carbone et des matières minérales qui entrent dans la composition de chaque variété.

159. TABLEAU DES ANALYSES DE M. REGNAULT SUR LA COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DES COMBUSTIBLES.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE et azote.	CENDRES.	CARBONE FIXE restant dans le résidu de la calcina- tion.	POUVOIRS CALORIFIQUES calculés		
						du carbone.	de l'hydro- gène.	Total.
COMBUSTIBLES DE LA PÉRIODE CARBONIFÈRE.								
1° Étage inférieur; terrain de transition.								
Anthracite de Pennsylvanie.....	90,45	2,43	2,45	4,67	85,33	7236	605	7841
Anthracite de la Mayenne.....	91,98	3,92	3,16	0,94	90,16	7358	1136	8494
2° Étage supérieur; terrain houiller.								
Anthracite du pays de Galles.....	92,56	3,33	2,53	1,58	89,82	7405	966	8371
Houille anthraciteuse de Rolduc (Prusse).....	91,45	4,18	2,12	2,25	87,15	7316	1212	8528
Houille de Rochebelle, à Alais.....	89,27	4,85	4,47	1,41	76,59	7142	1406	8548
Houille de Lavaysse (Aveyron).....	82,12	5,27	7,48	5,13	64,87	6570	1528	8098
Houille flénuée de Mons.....	84,67	5,29	7,94	2,10	»	6774	1534	8308
Houille flénuée de Mons.....	83,87	5,42	7,03	3,68	»	6710	1572	8282
Houille d'Épinac.....	81,12	5,10	11,25	2,53	61,07	6490	1479	7969
Houille de Blanzy (1 ^{re} qualité).....	76,48	5,23	16,01	2,28	55,72	6118	1517	7635
Cannel-coal du Vigan (Lancashire).....	84,07	5,71	7,82	2,40	56,60	6726	1656	8382
Houille de Commentry.....	82,72	5,29	11,75	0,24	63,16	6618	1534	8152
Houille de Rive-de-Gier (moyenne).....	84,90	5,19	6,94	2,97	»	6792	1505	8297

COMBUSTIBLES DES TERRAINS SECONDAIRES.								
1° Étage inférieur; marnes irisées; terrains jurassiques.								
Houille de Noroy (Haute-Saône).....	63,28	4,35	13,17	19,20	71,70	5062	1261	6323
Anthracite de Lamure (Isère).....	89,77	1,67	3,99	4,57	85,43	7182	484	7666
Anthracite de Macot (Tarantaise).....	71,49	0,92	1,12	26,47	66,10	5719	267	5986
Houille d'Obernkirchen (Westphalie).....	89,50	4,83	4,67	1,00	76,80	7160	1401	8561
Houille de Céral (Aveyron).....	75,38	4,74	9,02	12,86	46,54	6030	1375	7405
2° Étage supérieur; terrain crétacé.								
Houille de Saint-Girons (Ariège).....	72,94	5,45	17,53	4,08	40,72	5835	1580	7415
Jayet de Sainte-Colombe (Côte-d'Or).....	75,41	5,79	17,91	0,89	41,49	6033	1679	7712
COMBUSTIBLES DES TERRAINS TERTIAIRES.								
Lignite du Grand-Rocher (Bouches-du-Rhône).....	63,88	4,58	18,11	13,43	35,57	5110	1328	6438
Lignite de Dax.....	70,49	5,59	18,93	4,99	46,61	5639	1623	7262
Lignite de Mont-Meisnier (Hesse-Cassel).....	71,71	4,85	21,67	1,77	47,63	5737	1406	7143
Lignite des Basses-Alpes.....	70,02	5,20	21,77	3,01	47,99	5602	1508	7110
Lignite de Ellebogen (Bohême).....	63,29	4,98	26,24	5,49	25,51	5063	1444	6507
Lignite d'Alphée (Grèce).....	61,20	5,00	24,78	9,02	32,38	4896	1450	6346
Asphalte du Mexique.....	79,18	9,30	8,72	2,80	8,80	6334	2697	9031
Lignite bitumineux de Cuba.....	75,85	7,25	12,96	3,94	40,46	6068	2102	8170
COMBUSTIBLES DE FORMATION CONTEMPORAINE.								
Tourbe de Vulcaire.....	56,31	5,63	29,86	8,20	"	4505	1633	6138
Tourbe de Long.....	58,09	5,93	31,37	4,61	"	4647	1720	6367
Tourbe du Champ-du-Feu (Vosges).....	57,79	6,11	30,77	5,33	"	4623	1772	6395

160. TABLEAU DES ANALYSES DE M. DE MARSILLY SUR LA COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DES COMBUSTIBLES.

DESIGNATION DES COMBUSTIBLES.	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE et azote.	CENDRES.	CARBONE FIXE restant dans le résidu de la calcina- tion.	POUVOIRS CALORIFIQUES calculés		
						du carbone.	de l'hydro- gène.	Total.
1. HOUILLES DU BASSIN DE MONS.								
Houilles flenu sèches.								
Haut-flenu.....	82,95	5,42	10,93	0,70	62,88	6236	1572	7808
Belle-et-Bonne. Petite-Cossette; fosse n° 21....	80,03	5,50	9,37	5,10	57,90	6402	1595	7997
Belle-et-Bonne. Grande-Houbarte; fosse n° 21....	82,41	5,60	10,89	1,10	63,66	6593	1624	8217
Levant du flenu.....	82,91	5,22	10,13	1,74	65,22	6633	1514	7147
Couchant du flenu.....	81,73	5,38	9,77	3,12	62,36	6538	1560	8098
Midi du flenu maigre.....	79,96	4,92	8,89	6,23	59,79	6397	1427	7824
Midi du flenu demi-gras.....	83,38	5,12	9,70	1,80	63,94	6670	1485	8155
Houilles flenu grasses.								
Grand-Hornu.....	83,30	5,63	8,54	2,53	65,78	6664	1633	8297
Nord du bois de Boussu. Grand-Gaillet-Sentinelle.	82,25	5,34	9,51	2,90	65,26	6580	1549	8129
Nord du bois de Boussu. Fosse Alliance.....	80,55	5,53	9,52	4,40	64,75	6444	1604	8048
Grand-Buisson.....	83,40	5,40	7,76	3,44	66,66	6672	1566	8238
Houilles dures.								
Escouffiaux.....	85,10	5,49	7,25	2,16	70,74	6808	1592	8400
Baron de Mecklembourg.....	83,17	5,13	6,99	4,80	67,85	6653	1488	8141
Sainte-Hortense; bonne veine.....	85,11	5,35	7,61	1,93	73,24	6808	1551	8359
Houilles fines forges.								
Ferrand.....	86,13	4,60	7,92	1,35	73,36	6890	1334	8224
Elonges.....	86,69	5,04	6,86	1,41	73,45	6935	1462	8397
Agrappe; veine 5 paumes.....	86,68	4,78	6,10	2,44	76,37	6924	1386	8310
— veine Grande-Cèreuse.....	85,30	4,87	6,49	3,34	76,99	6824	1412	8236
Bellevue; fosse n° 8.....	86,38	4,48	6,09	3,05	77,53	6910	1299	8209
Jolinet et Roinge.....	88,85	4,87	4,46	1,82	78,69	7108	1412	8520
2. BASSIN DU CENTRE (MONS).								
Houilles grasses.								
Haine Saint-Pierre.....	85,82	4,49	7,29	2,40	79,23	6866	1302	8168
Bois-du-Luc.....	82,73	4,64	7,13	5,50	73,30	6618	1346	7964
Sars-Longchamps.....	84,61	4,52	6,58	4,29	77,32	6769	1311	8080
La Louvière.....	86,44	4,64	4,12	4,80	75,24	6915	1346	8261
Bracquagnies.....	88,40	4,69	5,21	1,70	78,52	7072	1360	8432
Mariemont.....	87,36	4,68	5,68	2,28	78,77	6989	1357	8346
Houssu.....	86,40	4,56	4,56	6,82	77,08	6912	1322	8234
Houilles demi-grasses.								
Haine Saint-Pierre.....	83,40	4,43	5,84	6,33	76,31	6672	1285	7957
Bois du Luc.....	88,72	4,48	5,70	1,70	75,90	7050	1299	8349
Barcoup.....	87,26	4,28	5,56	2,90	79,55	6981	1241	8349
Sars-Longchamps.....	87,02	4,43	6,57	1,98	78,53	6902	1285	8222
Mariemont.....	88,62	4,31	4,77	2,30	81,40	7090	1250	8247
Mariemont.....	84,76	4,57	5,61	5,49	79,17	6781	1325	8340
La Louvière.....	83,27	4,57	5,70	6,47	76,26	6662	1325	8106
Bracquagnies.....	90,46	4,30	4,34	0,90	83,89	7237	1247	7987
Houssu.....	87,47	4,85	4,72	2,96	80,54	6998	1406	8484
Barcoup.....	85,75	4,20	5,45	2,60	80,37	6860	1218	8404
3. BASSIN DE CHARLEROY.								
Houilles grasses.								
Saint-Martin; fosse n° 3, veine Bavette.....	86,23	4,62	5,81	3,84	76,14	6808	1340	8238
Trienkarsin; fosse n° 6, veine 10 paumes.....	86,47	4,68	5,30	3,55	80,88	6918	1357	8275
Poirier; fosse Saint-Louis.....	83,21	4,47	5,80	6,52	77,08	6657	1296	7953
Houilles demi-grasses.								
Bayemont; fosse Saint-Charles.....	80,64	4,06	5,67	9,62	76,12	6451	1177	7628
Trienkarsin; fosse n° 4, Sébastopol.....	88,64	4,06	4,36	2,94	86,46	7091	1177	8268
Sacré-Madame; veine Petite-Sablonnière.....	88,34	4,37	4,52	2,77	84,78	7067	1267	8334
Lodelinsart; fosse n° 7.....	86,29	4,26	4,41	5,04	81,98	6903	1235	8138
Sars-lès-Moulins; fosse n° 7.....	88,69	4,25	5,26	1,80	83,77	7095	1232	8327
Ardenoises; fosse Feignat, veine Engins.....	86,02	4,03	4,74	5,21	81,45	6882	1169	8051
Carabinier-Français; veine 8 paumes.....	83,90	3,85	5,58	6,58	81,92	6712	1116	7828
— fosse n° 2, veine 11 paumes.....	87,85	4,13	5,53	2,49	85,66	7028	1198	8226
Gouffre; fosse n° 3, veine Gros-Pierre.....	83,94	3,87	6,20	5,99	82,16	6715	1122	7837
Houilles maigres.								
Roton; veine Greffier.....	84,50	3,90	5,10	6,50	80,67	6760	1131	7891
Pont-du-Loup; veine Nord.....	89,12	3,90	5,61	1,37	88,45	7129	1131	8260
Falmuée; Grande-Veine.....	89,30	3,97	5,13	1,60	87,30	7144	1151	8295
Beaulet; fosse n° 1, veine des Haies.....	90,89	3,65	3,98	1,48	89,38	7271	1058	8329
Bois d'Heigne; fosse n° 1, veine des Haies.....	89,22	3,83	4,52	2,43	88,82	7138	1111	8249

TABLEAU DES ANALYSES DE M. DE MARSILLY SUR LA COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DES COMBUSTIBLES. (Suite.)

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE et azote.	CENDRES.	CARBONE FIXE restant dans le résidu de la calcina- tion.	POUVOIRS CALORIFIQUES calculés		
						du carbone.	de l'hydro- gène.	Total.
4. BASSIN DE VALENCIENNES.								
Houilles grasses à longue flamme.								
Division de Denain.								
Fosse Renard; veine Marck	82,55	5,47	7,68	4,30	62,38	6604	1586	8190
— veine Président	85,54	5,46	7,50	1,50	65,85	6843	1583	8426
— veine Marie	86,39	5,32	6,99	1,30	66,20	6911	1543	8454
— veine Paul	85,68	5,21	7,21	1,90	67,72	6854	1511	8365
Fosse Orléans; Grande-Veine	83,28	5,23	8,09	3,40	65,42	6662	1517	8179
Fosse Napoléon; veine Perier	84,84	5,53	6,83	2,80	64,95	6787	1604	8391
— veine Marie-Louise	87,10	5,18	6,82	0,90	69,38	6968	1502	8470
Fosse Mathilde; veine Zoé	81,12	5,07	8,11	5,70	63,39	6490	1467	7957
Fosse-Ernestine	84,10	5,09	6,01	4,80	66,39	6728	1473	8201
Fosse Jean-Bart; veine Edouard	83,85	4,93	7,22	4,00	78,97	6708	1430	8138
Fosse Lebre; nouvelle veine	86,34	4,95	6,81	1,90	70,93	6907	1435	8342
— 2 ^e nouvelle veine	87,05	4,91	5,04	3,00	71,56	6964	1424	8388
Division de Saint-Waast.								
Fosse Davy; veine Curochon	81,10	4,54	7,80	6,50	65,40	6488	1316	7804
Fosse du Temple; veine Taffin	85,95	5,24	6,31	2,50	69,60	6876	1520	8396
Houilles grasses marécales à courte flamme.								
Division de Saint-Waast.								
Fosse de la Réussite	85,90	5,03	6,57	2,50	73,41	6872	1459	8331
Grosse-Fosse	86,47	4,90	5,53	3,10	74,45	6918	1421	8339
Fosse de Tinchon	86,73	4,68	5,59	3,00	75,08	6938	1357	8295
— Ernest; veine n° 19	86,15	4,78	5,97	3,10	75,80	6892	1386	8278
Houilles demi-grasses.								
Division de Saint-Waast.								
Fosse du Temple; 1 ^{re} veine du Nord	85,98	4,61	4,91	4,50	77,08	6878	1337	8215
Grosse-Fosse	88,95	4,41	3,84	2,80	83,00	7116	1279	8395
Division d'Anzin.								
Fosse Chauffour; grande veine	83,50	4,35	6,35	5,80	74,94	6660	1261	7921
5. BASSIN DU PAS-DE-CALAIS.								
— la Cave; veine Rosiers	82,98	4,81	6,51	5,70	69,72	6638	1395	8033
— Bleut-Borne; veine Georges	87,89	4,50	4,81	2,80	82,93	7031	1305	8336
— Saint-Louis; veine Deludie	89,53	4,43	4,54	1,50	84,65	7162	1285	8447
— Moulin; veine Nord	88,03	4,15	4,32	3,50	83,83	7042	1203	8245
Houilles maigres.								
Vieux-Condé.								
Fosse de Sartean; veine 6 paumes	91,16	3,83	3,61	1,40	90,88	7292	1111	8403
— Vieille-Machine; veine à sillon	86,39	3,51	4,20	5,90	86,33	6911	1018	7929
Fresne.								
Fosse Bonnepart; veine Toussaint	90,54	3,66	2,70	3,10	90,07	7243	1061	8304
— grande veine	86,47	3,49	3,84	6,20	83,75	6917	1008	7925
6. HOUILLES D'ANGLETERRE.								
Hartley	78,35	5,55	14,60	1,50	60,04	5868	1610	7478
Hunwich	86,80	5,51	5,86	1,83	69,51	6944	1598	8542
Byers Green	85,57	5,24	8,49	1,48	70,62	6846	1520	8366
Anthracite du pays de Galles	92,66	3,08	2,66	1,60	89,67	7413	893	8306
7. TOURBES.								
De Bresles, noire, 1 ^{re} qualité	47,78	7,16	36,06	9,00	»	3822	2076	5898
— mousseuse, 2 ^e qualité	46,80	5,63	41,15	6,40	»	3744	1633	5377
Tourbe noire de Thesby, 1 ^{re} qualité	50,67	5,76	36,87	6,70	»	4054	1770	5824
— mousseuse, 2 ^e qualité	43,65	5,79	36,66	14,00	»	3492	1679	5171
Tourbe noire de Bourdon, 1 ^{re} qualité	47,69	6,01	39,30	7,00	»	3815	1743	5558
— de Camon, 1 ^{re} qualité	46,11	5,99	38,50	9,40	»	3689	1747	5436
Tourbe blanche de Remiencourt	12,99	2,22	19,71	65,08	»	1039	644	1683

Si l'on parcourt les différentes colonnes du tableau des pages 148 et 149, on remarque que la proportion de carbone va en diminuant à mesure que l'on se rapproche des formations plus récentes, et qu'à peu d'exceptions près, les proportions de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote vont au contraire en augmentant, comme si dans les combustibles les moins anciens, les gaz, n'ayant pu encore se dégager qu'en partie, devaient continuer à disparaître, pour constituer des produits en tout semblables à ceux des premières périodes carbonifères.

La proportion de cendres est très-variable, et l'on ne remarque pas qu'elle soit plus grande dans les tourbes que dans un certain nombre de houilles anciennes.

Quant à la teneur en azote seul, elle est dans tous les cas très-faible et ne paraît s'élever jusqu'à 2 pour 100 que dans les tourbes; elle a été déterminée par M. Regnault pour les combustibles ci-après indiqués :

Anthracite de Lamure.....	0.36
Houille maréchale de Rive-de-Gier....	1.70
Houille d'Obernkirchen.....	1.66
Lignite de Ellebogen.....	1.77
Tourbe de Vulcaire.....	2.09

160. Expériences de M. de Marsilly. — M. de Marsilly a fait plus récemment un travail très-considérable sur les houilles employées dans le nord de la France. Les chiffres de ses nombreuses analyses trouvent naturellement leur place à côté de ceux de M. Regnault.

Les échantillons avaient été maintenus dans le vide sec, de douze à vingt-quatre heures avant l'analyse, procédé dont le principal avantage était certainement d'éviter l'influence d'une température élevée pendant la dessiccation.

L'anhracite est encore, dans cette longue liste, le combustible le plus riche en carbone, et la proportion de cendres y est très-faible.

En ce qui concerne l'azote, les résultats sont très-voisins de ceux qui ont été indiqués par M. Regnault.

Haut-Flenu.....	1,15
Escouffiaux.....	1,25
Agrappe.....	1,37
Bracquignies (demi-gras).....	1,00
Mariemont (demi-gras).....	0,75
Poirier (houille grasse).....	1,37
Carabinier-Français.....	1,00
Bois d'Heigne.....	0,40
Fosse-Renard (veine Paul).....	1,64
Fosse-Sartean (veine 6 paumes).....	1,66
Bruai.....	1,87
Naux.....	1,52

Cette proportion est beaucoup plus considérable pour la tourbe : M. de Marsilly a trouvé 2.627 dans la tourbe de Camon, et seulement 1.92 dans celle de Thésy.

161. *Analyse de la houille de Ronchamp, par M. Rivot.* — La houille de Ronchamp est presque exclusivement employée à Mulhouse, et M. Rivot en a donné, en 1859, l'analyse très-complète, qui suit :

Carbone.....	88,00	Carbone fixe.....	71,00	Coke.....	74,40
Hydrogène....	5,10	Matières vola- tiles.....	25,60	Matières volatiles..	25,60
Oxygène.....	2,00	Cendres.....	3,40		100,00
Azote.....	1,10				
Eau hygro- métrique....	0,40				
Cendres sili- ceuses.....	3,40				
	100,00				

Nous pourrions multiplier ces tableaux de la composition des houilles, mais les analyses isolées qui ont été faites de la plupart d'entre elles ne sauraient présenter aucun intérêt. Si nous citons en particulier celle de la houille de Ronchamp par M. Rivot, c'est que cette analyse est absolument com-

plète, et qu'elle se rapporte au combustible même qui a été employé dans les belles expériences récemment faites par la Société industrielle de Mulhouse, pour comparer entre elles diverses dispositions de chaudières à vapeur.

M. Daubrée a d'ailleurs donné* l'analyse de quelques autres houilles du Bas-Rhin, qui se rapprochent beaucoup du bassin de Sarrebruck par leur position géographique.

	Houille d'Erlenbach.	Houille de Lulay.
Charbon.....	0,52	0,76
Cendres.....	0,27	0,10
Matières volatiles.....	0,21	0,14
	1,00	1,00

La première est une houille grasse qu'on ne peut débarrasser, des schistes, qu'en la triant avec le plus grand soin. La seconde est une houille sèche, qui renferme souvent jusqu'à 0,20 de cendres.

162. Houilles du bassin de Sarrebruck. — Les houilles très-fumeuses de Sarrebruck sont de qualités inférieures; elles alimentent cependant tout le département de la Moselle; nous aurons surtout à en parler lorsque nous nous occuperons des appareils fumivores. Voici d'ailleurs ce qu'en dit M. Jacquot dans ses études géologiques sur le bassin de la Sarre.

« Relativement à leur emploi dans les arts, on peut diviser les houilles du bassin de la Sarre en plusieurs catégories. Les houilles à coke ne se rencontrent que dans la partie tout à fait inférieure de la formation; elles sont généralement assez tendres. Les couches qui leur sont superposées fournissent en général d'assez bonnes houilles de grille; telles sont celles que l'on exploite dans les mines de Louisenthal, Gersweiler, Geislautern et Hostenbach. Quant aux couches les plus élevées de la formation, elles ne donnent en général qu'un com-

* Description géologique et minéralogique du Bas-Rhin, par M. A. Daubrée.

bustible sec, fortement pyriteux, qui ne peut guère servir que pour le chauffage domestique. »

163. Houille chinoise. — Nous citerons encore, mais plutôt à titre de simple curiosité, les compositions de la houille récemment découverte en Chine et sur laquelle le *Bulletin de l'Académie impériale des sciences* de Saint-Petersbourg fournit les renseignements suivants :

« MM. Fritzsche et Zenine, de l'Académie de Saint-Petersbourg, ont analysé un échantillon de houille trouvé sur le territoire que la Chine a cédé, dans ces derniers temps, à la Russie. La pesanteur spécifique de cette houille est 1,299; elle a donné 55,69 pour 100 de coke bien collant, et, après combustion complète, 11,07 de cendre. Le gaz qu'elle fournit donnait une flamme brillante. La houille contient, en quelques endroits, des pyrites, mais la quantité en est trop insignifiante pour porter atteinte à sa valeur commerciale. L'analyse élémentaire a donné :

Carbone.....	59,48
Hydrogène.....	5,20
Eau.....	2,19
Cendres.....	11,07
Oxygène.....	22,06
	<hr/> 100,00 »

On voit, par les indications qui précèdent, que ce combustible est de qualité très-médiocre.

164. Généralités sur la composition de la houille. — D'après tout ce qui précède, on peut dire, d'une manière générale, que les différents combustibles minéraux sont principalement formés de carbone et d'hydrogène, et qu'ils contiennent des proportions de matières minérales incombustibles, dont la proportion varie notablement d'un combustible à l'autre. L'azote n'entre jamais dans la composition élémentaire que pour 2 pour 100.

Les anthracites contiennent habituellement 0,90 de car-

bone, très-peu d'hydrogène, très-peu de cendres; mais on en rencontre cependant qui en renferment exceptionnellement jusqu'à 25 pour 100.

Les diverses qualités de houilles ne diffèrent notablement entre elles, quant à leur analyse élémentaire, que par la proportion des cendres qu'elles renferment. On peut dire, en général, qu'elles sont formées de 0,82 de carbone, 0,05 d'hydrogène, 0,08 d'oxygène et d'azote, 0,04 à 0,05 de cendres, celles-ci pouvant d'ailleurs remplacer le carbone dans une proportion beaucoup plus considérable. Les lignites sont moins riches en carbone. Ils en contiennent 0,70 en moyenne; la proportion d'oxygène et d'azote s'élève habituellement dans ces combustibles jusqu'à 20 pour 100.

Les tourbes ne contiennent que 0,55 de carbone; la proportion d'hydrogène reste la même; celle de l'oxygène et de l'azote réunis s'y élève à environ 0,30; les cendres n'y sont pas, en général, beaucoup plus abondantes que dans les autres combustibles.

Bien que les chiffres précédents n'indiquent qu'une sorte de moyenne générale, manquant complètement de toute précision, ils suffisent cependant pour faire comprendre les différences que doivent présenter ces combustibles, au point de vue de leur pouvoir calorifique. L'état de liberté ou de combinaison de l'oxygène et de l'azote n'étant d'ailleurs pas connu, on voit à quelles incertitudes on s'exposerait en déterminant, par voie d'addition, la valeur calorifique de ces combustibles, d'après leur composition élémentaire.

163. *Expériences de MM. Richardson et Liebig.* — Les tableaux qui précèdent permettent de reconnaître l'influence, sur la composition des combustibles, de l'ancienneté de la formation, et donnent des renseignements précieux sur les différentes houilles d'une même localité. M. Wye Williams, de Manchester, dont nous aurons plusieurs fois à indiquer les travaux, a publié, d'après Richardson et Liebig, une table dans laquelle on peut plus sûrement comparer entre elles les

diverses classes, que nous avons établies, quant aux qualités industrielles des houilles.

Nature des houilles.	Provenance.	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène et azote.	Matières non volatiles.
Splint	{ Wylam.....	74,823	6,180	5,085	13,912
ou houille esquilleuse...	{ Glasgow....	82,924	5,491	10,457	1,128
Cannel coal	{ Lancashire..	83,753	5,660	8,039	2,548
ou houille sèche à lon- gue flamme.....	{ Edimbourg..	67,597	5,405	12,482	14,566
Cherry	{ Newcastle..	84,846	5,048	8,480	1,676
ou houille molle.....	{ Glasgow....	81,204	5,452	11,923	1,421
Caking coal	{ Newcastle..	87,952	5,239	5,416	1,393
ou houille grasse.....	{ Durham....	83,274	5,171	9,036	2,519

A peine pourrait-on conclure de ces chiffres que les houilles maigres sont les moins riches en carbone, car cette différence, pour quelques-unes, ne provient absolument que de la grande quantité de cendres qu'elles renferment.

Sous le rapport de la composition élémentaire, on n'a aucune donnée certaine sur l'influence que peut avoir la proportion des différents éléments, sur la richesse ou sur les propriétés des diverses variétés de houille; on remarquera cependant que les houilles les plus chargées de cendres appartiennent presque toujours aux deux premières divisions.

166. Poids de l'hectolitre de houille. — La houille se vend généralement à l'hectolitre, et son pouvoir calorifique étant toujours rapporté au kilogramme, il est nécessaire de connaître le poids qui correspond à cette mesure commerciale.

La densité de la houille a été déterminée par MM. de La Bèche et Playfair sur un grand nombre d'échantillons, de provenance anglaise; la moyenne de leurs déterminations pour la houille, n° 219, est de 1^k,286; celle de l'anthracite de Slievardagh (Irlande) s'élève jusqu'à 1,59. A l'aide de ces déterminations, les auteurs ont pu comparer le poids réel d'un mètre cube de charbon, tel qu'il est livré au commerce, au poids que pèserait un mètre cube s'il n'y avait aucun vide

entre les fragments. Le rapport le plus faible, 0,614, est relatif au charbon de Porth-Mawr (pays de Galles) ; le plus élevé, 0,781, a été fourni par le charbon de Pentrefelin.

Ainsi, l'influence des vides réduit le poids de l'hectolitre de 0,614 à 0,781 du poids résultant de la densité. Le chiffre moyen 0,7, appliqué à une densité de 1,25, donnerait, pour le poids de l'hectolitre,

$$0,7 \times 1,25 \times 100 = 87,5 \text{ kilogrammes.}$$

La table, qu'a donnée M. Pécelet, du poids de l'hectolitre de certaines houilles françaises et belges se rapproche beaucoup de ce chiffre moyen.

Provenances des houilles.	Poids de l'hectolitre.
Labarthe.....	88 ⁴
Blanzy.....	87
Combelle.....	86
La Taupe.....	85
Saint-Étienne.....	84
Decize.....	83
Creuzot.....	79
Mons.....	80

C'est sur ce dernier chiffre que l'on compte pour les houilles de bonne qualité, mais il serait plus convenable d'estimer le poids moyen de l'hectolitre à 85 kilogrammes.

167. Propriétés et usages de la houille. — La houille, nous l'avons déjà dit, est le combustible par excellence pour les foyers des chaudières à vapeur ; c'est, à égalité de volume, celui qui contient le plus de carbone, et ce qui le rend surtout précieux, c'est qu'il se présente naturellement en fragments anguleux, offrant une grande surface à l'action des gaz qui doivent le brûler, et conservant pendant la combustion la consistance convenable. Cette dernière propriété est d'un grand intérêt et est surtout importante dans les houilles des deux premières sections de la classification anglaise ; lorsque l'absence de tout suintement à la surface empêche

les fragments de s'agglutiner, et par conséquent d'obstruer, pendant la combustion, les canaux à travers lesquels il est nécessaire que l'air circule avec une certaine uniformité, on obtient facilement une intensité suffisamment régulière dans le foyer. A l'inverse, les houilles grasses ne sauraient convenir aussi bien pour l'usage des chaudières à vapeur.

Celles qui doivent être préférées sont les houilles dites maigres à longue flamme : car, à l'avantage que nous venons de signaler, elles joignent encore celui de produire une flamme assez longue pour échauffer directement les parois placées à une certaine distance du foyer.

Dans les cas, cependant, où l'on a besoin d'une température très-régulière, les houilles à petite flamme sont préférables. Il convient toutefois de remarquer que la flamme disparaît, pour toutes les houilles, longtemps avant que la combustion soit complète; et, pendant sa durée, il y a toujours un chauffage excessif qui nuit à la régularité de la marche.

Ce sont d'ailleurs les combustibles à longue flamme qui donnent le plus de fumée; et, sous ce rapport les charbons maigres, analogues à ceux de Charleroy, sont, à pureté égale, d'un emploi plus avantageux.

168. Altérabilité de la houille. — Depuis longtemps les industriels savent bien que le charbon perd, par son exposition à l'air et aux influences atmosphériques, une partie de sa puissance calorifique; mais la science n'avait pas rendu compte des causes de cette altération, qui restait encore à l'état problématique; des analyses, faites à diverses époques sur le même combustible, avaient même conduit à nier ces altérations.

M. de Marsilly, dans le mémoire déjà cité, a repris cette question et a constaté que certaines houilles au moins, celles qui proviennent des mines à grisou, subissent, par leur exposition à l'air, une modification véritable dans leur composition; voici en quels termes il s'exprime dans ce travail :

« Deux gros morceaux de houille de Bellevue, extraits de-

puis six jours environ et arrivés directement de la fosse, ont été pulvérisés rapidement; la poussière a été placée dans un grand vase que l'on a recouvert d'une cloche de forme conique; au bout de douze heures, en enlevant la cloche, et en approchant une allumette enflammée, il se produisait une flamme longue et éclairante.

« J'ai répété l'expérience, avec le même succès, sur les charbons de Ferrand et de l'Agrappe (bassin de Mons).

« Quand ces charbons avaient été plusieurs jours exposés à l'air, il ne se dégageait plus de gaz inflammable.

« Quand cette exposition a duré plusieurs mois, on ne retire plus de gaz hydrogène carboné, même en chauffant la houille jusqu'à 300°.

« Ainsi, 500 grammes de houille du Nord du bois de Boussu ont été réduits en poussière et laissés pendant cinq mois exposés à l'air : au bout de ce temps, chauffés au bain d'huile jusqu'à 300°, il s'est dégagé du gaz, mais ce gaz n'était plus inflammable. »

Des expériences semblables, faites sur les charbons gras de Bellevue et d'Élonges, ont donné le même résultat, le charbon « frais donnait du gaz inflammable, le charbon vieux n'en donnait point. »

M. de Marsilly est très-réservé à l'égard des autres houilles : « Pour les houilles provenant des mines où il n'y a pas de grisou, nous ne voudrions exprimer aucune opinion, car nous n'avons pas suffisamment étudié la question. »

Les faits qui précèdent sont toutefois suffisants pour établir que, dans certaines circonstances au moins, les conditions atmosphériques exercent une influence à laquelle il serait imprudent de ne pas chercher à les soustraire. Les praticiens savent d'ailleurs très-bien qu'il convient de maintenir les approvisionnements en lieux clos, et qu'ils ne doivent être conservés ainsi que dans la mesure imposée par les conditions du marché. On peut dire, en général, que le vieux charbon est toujours moins bon que le charbon nouvellement extrait de la mine.

169. Propriétés et usages des anthracites. — Les anthracites jouiraient, au degré le plus élevé, de tous les avantages de la houille, si leur combustion n'était rendue beaucoup plus difficile par leur densité plus grande, et par l'absence d'une proportion suffisante de gaz combustibles.

Ils sont surtout employés pour la cuisson de la chaux, opération dans laquelle leur décrépitation est moins à craindre; on en connaît de nombreux gisements qui se font principalement remarquer par la facilité avec laquelle les premières atteintes du feu déterminent une telle division du combustible, qu'il tomberait pour ainsi dire en poussière, au travers des interstices de la grille. Cependant on est parvenu à utiliser quelques anthracites, particulièrement en lançant au milieu du foyer un courant continu de vapeur; les poussières adhèrent alors plus facilement entre elles, et la perte, par la grille, est considérablement réduite. La plupart des anthracites s'éteignent plus facilement que la houille, lorsqu'ils sont simplement déplacés par l'action du tisonnage: un feu d'anthracite est toujours difficile à conduire.

170. Propriétés et usage des lignites. — La plupart des lignites se rapprochent tellement des houilles maigres, qu'on peut les confondre avec elles, et ils servent aux mêmes usages. Les lignites plus imparfaits, qui conservent encore la structure du tissu végétal, sont moins abondants et ne sont employés que très-accidentellement comme combustibles. Ils tiennent alors un rang intermédiaire entre la houille et le bois, et participent aux propriétés des uns et des autres.

171. Propriétés et usages de la tourbe. — La tourbe diffère beaucoup de tous les combustibles que nous venons d'énumérer: elle se présente toujours sous forme spongieuse et élastique, résultant de l'agglomération des débris végétaux qui la composent; elle retient toujours, dans son tissu, une très-grande quantité d'eau, et l'on n'en peut tirer un parti utile qu'après l'avoir découpée en morceaux réguliers, ordi-

nairement en forme de briques ou de petits parallépipèdes, et l'avoir soumise à une dessiccation plus ou moins prolongée, et souvent à une compression qui diminue son volume primitif.

La tourbe, ainsi préparée, a une densité très-variable, mais toujours inférieure de beaucoup à celle de la houille. On pourrait augmenter cette densité en malaxant convenablement la tourbe avant de la soumettre à la dessiccation; mais ce n'est que quand elle a été calcinée qu'elle peut être comparée aux autres combustibles. Cependant la tourbe crue, à cause de son bas prix relatif, est employée dans un grand nombre de localités : sur plusieurs lignes de l'Allemagne elle est presque exclusivement employée au chauffage des locomotives, malgré le grand encombrement qui résulte de son emploi. Les amas de tourbes se rencontrent fréquemment dans des localités qui sont dépourvues de houille, et cette circonstance ajoute encore un grand intérêt aux recherches qui ont été faites pour arriver à son utilisation.

Nous avons indiqué la composition de quelques tourbes dans les tableaux relatifs aux combustibles minéraux; nous ajouterons seulement que le poids du mètre cube de tourbe, à 20 pour cent d'eau, varie en général de 210 à 230 kilogrammes, mais qu'en formant avec ce combustible des briquettes bien fabriquées, on peut arriver facilement au poids de 500 et même 600 kilogrammes par mètre cube.

Un grand nombre d'ouvrages ont été publiés sur la tourbe : on trouvera beaucoup de renseignements utiles sur ses applications, soit dans le mémoire de M. Noury (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1858), soit dans un ouvrage spécial que M. Challeton de Brughat vient de publier sous ce titre : *De la tourbe : études sur les combustibles employés dans l'industrie*.

Nous verrons ultérieurement que, sous ses différentes formes, la tourbe n'est jamais douée que d'un pouvoir calorifique très-faible : elle ne constituera jamais qu'un combustible secondaire, dont l'emploi se trouve limité à certaines circonstances exceptionnelles.

172. Du coke. — Le coke s'obtient par la calcination, en vase clos, des différentes variétés de houille, soit dans des fourneaux spéciaux, soit dans les cornues à gaz. Dans le premier cas, la calcination se produit par la combustion des produits gazeux qui se dégagent de la masse charbonneuse, par suite de l'élévation de température que cette combustion elle-même détermine; dans le second cas, cette élévation de température est obtenue en brûlant un combustible quelconque, en dehors de la cornue, que l'on soumet pendant longtemps à l'action du foyer.

173. Classification des cokes. — Dans les deux cas, le coke retient la plus grande partie du carbone et des cendres du combustible primitif, à l'exclusion presque complète des gaz, éliminés par la calcination.

Le coke préparé pour les besoins de la métallurgie, et que l'on désigne plus particulièrement sous le nom de coke de four, s'obtient en traitant, pour ce seul produit, et à une température très-élevée, soit la houille elle-même, soit plus généralement les menus de houille, débarrassés autant que possible, par un lavage, de la plus grande partie des matières terreuses avec lesquelles ils sont mélangés.

Dans certains cas on pulvérise même les houilles trop impures pour les soumettre à cette opération du lavage, avant leur conversion en coke.

Le coke de gaz est celui que l'on retire des cornues des usines à gaz : préparé à une température moins élevée, il est généralement moins agglutiné, moins poreux, et il brûle beaucoup moins bien; aussi est-il beaucoup moins recherché comme combustible.

174. Composition du coke. — La composition des cokes dépend beaucoup de celle des houilles dont ils proviennent. On verra, par le tableau suivant, qu'on peut compter en général sur 0.85 de carbone. Il arrive fréquemment que, malgré le lavage des menus de houille, la teneur en cendres

soit plus grande dans le coke que dans la houille. L'expulsion des matières volatiles ayant toujours pour effet de concentrer le même poids de cendres sur un moindre poids total, une houille qui serait formée de 0,80 carbone, 0,15 matières volatiles, 0,05 de cendres, donnerait un résidu composé seulement de 0,80 de carbone et de 0,05 de cendres, dont la composition par kilogramme serait : carbone, 0,93; cendres, 0,07.

TABLEAU DE LA COMPOSITION DE QUELQUES ÉCHANTILLONS DE COKE.

	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène et azote.	Cendres.
<i>Analyses de M. de Marsilly.</i>				
Coke d'Agrappe.....	91,30	0,33	2,17	6,20
Coke du bois du Luc.....	91,59	0,47	2,05	5,89
<i>Analyses de M. Berthier.</i>				
	Produits volatils.			
Coke de Saint-Étienne.....	85,8	2,7		11,5
Coke de Bessèges.....	82,4	3,8		13,8
Coke du Treuil (Saint-Étienne).	82,0	3,0		15,0
Coke de Rive-de-Gier.....	75,0	3,5		21,5
<i>Cokes de gaz.</i>				
Coke de Montmartre (Paris)...	64,0	18,0		18,0 18
Coke du Luxembourg (Paris)...	59,0	18,0		23,0

Dans tous les cas, le poids de l'hectolitre de coke est assez faible; on peut compter en moyenne sur 40 ou 45 kilogrammes pour le coke de four, et seulement 30 à 35 pour le coke de gaz.

175. Altérabilité de la houille par rapport à la fabrication du coke. — Dans le mémoire dont nous avons déjà parlé, au n° 168, M. de Marsilly a cherché à se rendre compte des altérations que la houille paraît subir quant aux qualités que l'on y recherche pour la fabrication du coke. « Le gaz hydrogène carboné n'est pas le seul, dit-il, qui se dégage par l'exposition à l'air; la houille perd encore en partie le principe gras, qui détermine la formation du coke lors de la calci-

nation. Tous les fabricants de coke attachent une grande importance à n'employer que des charbons frais; ils assurent que le vieux charbon ne colle pas bien. »

M. de Marsilly a en effet vérifié qu'avec des charbons gras de Jolivet et Ravége, après un séjour de six mois sur le rivage, on n'a pu obtenir qu'un coke mal formé, en partie pulvérulent, et trop mauvais pour être livré au commerce.

176. Rendement des houilles en coke. — Les houilles ne sont pas privées, par la calcination, de la totalité de leurs produits volatils, et elles perdent, par cette opération, une partie de leur carbone, qui s'échappe en combinaison et à l'état d'hydro-carbures. On peut compter d'une manière générale sur 0.70 ou 0.75 du poids de la houille en coke, ainsi qu'on peut le voir par les analyses suivantes de M. Gaultier.

	Coke.	Produits volatils.
<i>Houilles d'Angleterre.</i>		
Iron bridge.....	54,60	45,40
Mertyr Tilwill.....	86,30	12,70
Coal-brooke-Dale.....	53,68	46,82
Puant.....	52,80	48,20

<i>Houilles de Saint-Étienne.</i>		
Puits Saint-Henri.....	77,90	22,10
Couche corrode.....	72,95	27,50
Couche des planches.....	74,90	25,10
Couche du bon menu.....	59,70	30,30
Couche du dessus.....	73,20	26,70
Couche de la grande fendue...	66,40	33,60
Couche de la petite fendue....	78,20	21,80

<i>Houilles de Rive-de-Gier.</i>		
Puits Saint-Matthieu.....	72,70	27,00
Puits de la Grande-Croix.....	71,70	28,70
Puits du Coin.....	68,50	31,50
Puits de la Monge.....	83,20	16,80
Puits des Combes.....	70,10	29,90

177. Proportion des cendres dans le coke. — Les matières minérales qui existaient dans la houille sont retenues en

totalité dans le coke, et leur proportion se trouve d'autant plus augmentée que les matières volatiles éliminées étaient plus abondantes.

Voici, d'après les mêmes analyses, la teneur en cendres d'un certain nombre d'échantillons de coke.

	Proportion p. 100 de coke.	Couleur de la cendre.
<i>Cokes d'Angleterre.</i>		
Iron Bridge.....	1,30	Blanche légère.
Dudley.....	6,32	Rouge un peu jaunâtre.
Mertyr Tilwill.....	7,13	Légère, jaunâtre.
Écosse.....	6,78	<i>Idem.</i>
Coal-brooke-Dale.....	7,10	Grise.
Puant.....	7,60	Un peu rougeâtre.
<i>Cokes de Saint-Étienne.</i>		
Puits Saint-Henri.....	22,35	Grise.
Puits du Fils.....	23,90	<i>Idem.</i>
Puits Robert.....	4,64	<i>Idem.</i>
Puits des Planches.....	11,30	Un peu rougeâtre.
Puits corrode.....	5,90	<i>Idem.</i>
Puits de la grande fendue.....	8,90	<i>Idem.</i>
Puits de la petite fendue.....	39,80	<i>Idem.</i>
<i>Cokes de Rive-de-Gier.</i>		
Puits de la Grande-Croix....	4,70	Grise un peu rougeâtre.
Puits Saint-Matthieu.....	6,20	<i>Idem.</i>
Puits des Combes.....	6,20	Grise moins foncée.
Puits de la Monge.....	4,64	Grise.

178. *Composition des cendres de coke.* — Quant à la composition de ces cendres, on verra, par les indications qui suivent, que la silice et l'alumine y sont de beaucoup les matières les plus abondantes : les scories sont d'autant plus fusibles qu'elles contiennent plus de chaux, de magnésie et de fer ; et, dans la combustion de la houille, dans tout foyer dont la température est élevée, elles arrivent, suivant leur composition, à un état plus ou moins voisin de la vitrification.

TABLEAU DE LA COMPOSITION DES CENDRES DE COKES DE DIFFÉRENTES PROVEANCES.

	Sulfure de calcium.	Silice.	Alumine.	Carbonate de chaux.	Carbonate de magnésie.	Peroxyde de fer.	Peroxyde. de manganèse
<i>Cokes d'Angleterre.</i>							
Iron Bridge.....	12,55	42,10	34,40	4,80	0,40	5,28	Trace.
Dudley.....	8,64	35,40	30,40	6,48	0,00	18,68	Trace.
Mertyr Tilwill.....	4,56	41,60	35,44	6,46	1,08	10,80	Trace.
<i>Cokes de Saint-Étienne.</i>							
Puits Saint-Henri.....	2,40	73,20	14,40	0,80	0,70	7,98	Trace.
Puits du Fils.....	2,40	54,90	37,00	3,20	0,00	2,30	Trace.
Puits corode.....	4,90	56,50	23,00	0,40	0,76	14,38	Trace.
Puits Robert.....	5,60	44,50	34,34	7,00	0,50	7,18	Trace.
Puits dessus.....	2,20	50,00	32,00	1,40	0,70	13,28	Trace.
Puits des Planches.....	3,60	43,50	36,20	6,20	0,50	9,42	Trace.
Puits de la grande fendue....	3,50	58,20	34,00	0,30	0,30	3,32	Trace.
<i>Cokes de Rive-de-Gier.</i>							
Puits de la Grande-Croix.....	3,20	55,00	19,80	8,80	0,00	13,00	
Puits des Combes.....	8,70	36,30	11,00	24,20	0,00	19,06	Trace.
Puits Saint-Matthieu.....	4,90	55,00	22,24	5,50	8,80	3,32	Trace.

ET DE LEUR POUVOIR CALORIFIQUE.

179. Propriétés et usages du coke. — On pourrait s'étonner, à première vue, que, pour obtenir un meilleur charbon, on soit, dans certains cas, conduit à perdre, par la calcination, une partie des principes éminemment combustibles de la houille, et ceux-là mêmes qui constituent le gaz d'éclairage, dont l'application au chauffage devient tous les jours plus générale. Le coke est, en effet, de la houille privée de ses principes les plus combustibles; il s'allume moins bien que la houille; il s'éteint plus facilement.

Quant aux usages métallurgiques du coke, il est facile de comprendre que l'expulsion du soufre soit d'une telle importance, qu'il convienne de perdre ainsi une partie de la richesse du combustible naturel; mais cet avantage n'est pas le seul que présente le coke par rapport à la houille. La réunion des menus en masses solides rend la circulation de l'air plus facile, les surfaces de contact sont plus grandes, l'agglomération des fragments n'est plus possible, le feu n'est jamais engorgé avec le coke, comme il peut l'être avec la houille la moins collante.

Ces qualités, qui sont pour la conduite d'un haut fourneau de première nécessité, sont loin d'être indifférentes pour le chauffage des chaudières à vapeur : le coke peut brûler sous une grande épaisseur; on peut dès lors mettre plus de combustible dans un foyer d'une grandeur donnée, et par conséquent obtenir, dans le même espace, un plus grand effet calorifique.

Le coke, étant privé de la plus grande partie des matières volatiles de la houille, ne produit ni flamme ni fumée, circonstance à laquelle il doit de fournir une température plus régulière, et d'être presque exclusivement applicable dans les localités où la fumée pourrait produire un notable préjudice.

Si le coke n'était, à égalité de pouvoir calorifique, d'un prix plus élevé que la houille, il devrait certainement, à ces propriétés bien caractéristiques, de devenir d'un emploi général.

180. *De la tourbe carbonisée.* — La tourbe crue ou comprimée est fréquemment employée pour le service des chaudières à vapeur. En Allemagne, plusieurs lignes de fer sont exclusivement alimentées avec ce combustible.

La tourbe carbonisée pourrait également servir à cet usage, mais dans les mêmes conditions que le coke de houille, et son prix de revient serait, à égalité de pouvoir calorifique, beaucoup plus élevé que celui de la tourbe comprimée.

Le coke de tourbe s'obtient, soit de la tourbe desséchée, soit de la tourbe comprimée, par des procédés qui se rapprochent beaucoup de ceux employés pour la fabrication du charbon de bois ou pour celle du coke de houille; l'opération doit se faire sur les lieux mêmes d'extraction pour éviter les frais de transport d'un poids mort considérable. On n'obtient, en meule, de résultats satisfaisants qu'avec la tourbe comprimée, mais dans les fours on peut opérer sur les deux natures de combustibles crus, amenés à ne contenir plus que 20 pour cent d'eau.

Le retrait en volume est très-considérable, le coke ne représentant que 0,25 ou 0,40 du volume avant la coction, suivant que l'on opère dans l'une ou l'autre de ces circonstances. Si la tourbe n'a été ni comprimée ni malaxée le produit de la calcination ne pèse pas même 200 kilogr. par mètre cube; lorsqu'au contraire les premières préparations ont été bien faites, on peut obtenir du charbon pesant 350 et jusqu'à 380 kilogr. par mètre cube; ce charbon est alors dur et compacte; sa cassure est presque métallique, et il est, sous le rapport de la sonorité, tout à fait analogue au charbon de bois.

Dans les deux cas, le pouvoir calorifique de ce combustible doit être évalué, d'après son poids, à environ de 7500 à 8000 calories par kilogramme, mais il convient beaucoup mieux à certains usages métallurgiques qu'au chauffage des chaudières à vapeur.

181. *Combustibles minéraux artificiels.* — Les houilles les

plus dépourvues de principes bitumineux ne s'agglutinent pas par la calcination, et l'on ne pourrait isolément les convertir en coke. D'ailleurs cette calcination se fait toujours aux dépens de la richesse du combustible, et l'on a cherché, par divers moyens, à réunir les menus de houille sans les soumettre à cette déperdition.

Dans certains cas une pression énergique est suffisante; dans d'autres, il faut joindre à la houille, dans la proportion de 7 à 8 pour cent, l'élément bitumineux que l'on trouve à l'état de goudron dans les résidus des usines à gaz. Plus fréquemment encore on pétrit les menus de houille. C'est par ces divers procédés que l'on fabrique les briquettes, les agglomérés et les péras qui constituent, dès aujourd'hui, des industries fort importantes et qui fournissent, notamment aux chemins de fer, des combustibles artificiels tout à fait comparables à la houille, et d'un aussi grand pouvoir calorifique.

Nous donnerons, d'après divers auteurs, la composition de quelques-uns de ces combustibles artificiels, qui conviennent surtout aux foyers de grandes dimensions.

COMPOSITION DE QUELQUES COMBUSTIBLES MINÉRAUX
ARTIFICIELS.

Désignation des combustibles.	Carbone.	Hydrogène.	Autres produits volatils.	Cendres.
<i>Analyses de M. de Marsilly.</i>				
Briquettes de l'usine de Gosselies (Charleroy)	84,92	4,12	5,36	5,60
Briquettes de Montigny-sur- Sambre.....	82,74	4,11	5,05	8,20

M. Revollier, de Saint-Étienne, a établi aux mines d'Anzin une presse hydraulique fabricant, par jour, jusqu'à 120 000 kilogr. d'agglomérés, dans lesquels il ne fait entrer que 6 pour cent de brai sec. Les briquettes, qui ont un volume de 6 décimètres cubes, pèsent 7^k,40, ce qui correspond à une densité de 1,23. La forme régulière de ces briquettes permet de les empiler facilement et sans perte de place.

Dans certaines circonstances, particulièrement en Belgique, les menus les plus impurs, agglutinés avec de l'argile et séchés à l'air libre, servent encore à confectionner des briquettes employées au chauffage domestique. On ne saurait trop encourager ces industries secondaires qui arrachent à la destruction une véritable partie de la richesse publique, et qui déjà s'exploitent sur des quantités notables.

182. Combustibles végétaux. — Tous les tissus végétaux, lorsqu'ils ont été soumis à une dessiccation suffisante, sont plus ou moins propres à servir de combustibles, mais leurs formes et leurs dimensions modifient considérablement les conditions dans lesquelles ils doivent être utilisés.

Le tissu ligneux est le seul que l'on rencontre en volumes suffisants pour former un combustible brûlant avec persistance et avec une certaine lenteur. Aussi les bois constituent-ils le moyen de chauffage le plus général; il est recommandable surtout par l'absence de toute fumée, et par une régularité qui résulte de ce que la flamme se maintient pendant plus longtemps que pour la houille, à partir de l'allumage du combustible.

Les menus combustibles végétaux, tels que les copeaux, les écorces, les feuilles, n'ont sans doute qu'une importance secondaire, mais nous verrons qu'en certains cas ils peuvent être utilement employés pour le chauffage des chaudières à vapeur.

183. Classification des bois. — Considérées comme bois de chauffage les diverses essences jouissent de propriétés différentes, soit quant à la durée, soit quant au poids du stère (ou mètre cube).

Sous ce rapport, les différents bois sont classés comme bois durs, bois tendres et bois résineux.

Mais on établit, pour la même essence, une grande différence entre les bois qui ont été, pendant leur transport, plongés dans l'eau, et que l'on désigne pour cette raison sous

le nom de bois *flottés*, et les bois *neufs* qui n'ont pas ainsi été délavés pendant leur transport.

L'altération qui résulte de l'action de l'eau ne saurait sans doute être très-marquée au point de vue de la composition du combustible, mais en séchant ensuite le bois se fendille, et l'on admet en général qu'il fournit alors moins de chaleur, ce qui pourrait, en partie, s'expliquer par la dépense de calorique nécessaire pour vaporiser l'excès d'eau qu'il retient à la suite de son immersion. La conservation plus complète de l'écorce assure en outre l'allumage plus facile du bois neuf, qui est, pour les usages domestiques, beaucoup plus recherché.

Sous le rapport de la durée de la combustion, les branches d'un diamètre de 10 à 20 centimètres sont certainement préférables et le bois de chauffage a d'autant plus de valeur qu'il se rapproche davantage de ces dimensions.

184. Composition chimique des bois. — On a fait un assez grand nombre d'analyses de bois préalablement desséchés; elles ne présentent entre elles que de très-faibles différences, ainsi qu'on peut le voir par le tableau suivant :

TABLEAU DE LA COMPOSITION DE PLUSIEURS VARIÉTÉS
DE BOIS DESSÉCHÉS.

Désignation des bois.	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Cendres.
<i>Analyses de M. Baer.</i>				
Hêtre 2 ^e qualité.....	0,483	0,060	0,450	0,005
Hêtre blanc.....	0,481	0,061	0,449	0,008
Chêne.....	0,489	0,059	0,431	0,002
Pin jeune.....	0,506	0,063	0,426	0,005
Pin flotté, vieux.....	0,499	0,051	0,434	0,006

Analyse de MM. Poumarède et Figuiér.

Peuplier.....	0,460	0,063	0,498	»
---------------	-------	-------	-------	---

On remarque que, pour tous ces bois, la proportion d'oxygène, en poids, est à peu près sept fois aussi grande que celle

de l'hydrogène : Si l'on se souvient que chaque kilogramme d'hydrogène exige théoriquement 8 kilogrammes d'oxygène pour être brûlé, on voit immédiatement que les bois ont, pour ainsi dire, en eux-mêmes tout l'oxygène nécessaire à la combustion de l'hydrogène qu'ils renferment ; il serait difficile de décider si cette combinaison spontanée s'effectue lors de la décomposition, mais il est cependant à remarquer que la proportion de l'hydrogène par rapport au carbone dans la houille est beaucoup moindre que ce même rapport dans les bois.

M. Chevandier a également fait sur les bois de nombreuses recherches, et il ne sera pas sans intérêt de joindre aux renseignements qui précèdent ceux qui résultent de son excellent travail.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE M. CHEVANDIER.

Désignation des bois.	Carbone.	Hydrogène libre.
Chêne à glands sessiles.....	0,496	0,006
Chêne à glands pédonculés.....	0,496	0,007
Hêtre.....	0,492	0,006
Charme.....	0,486	0,006
Bouleau.....	0,508	0,011
Aune.....	0,509	0,011
Saule.....	0,500	0,006
Tremble.....	0,493	0,009
Sapin.....	0,509	0,009
Pin.....	0,511	0,009

Les analyses de M. Chevandier ont été faites sur des bois de toutes dimensions en quartiers ou en rondins ; il en a conclu que la composition de chaque espèce de bois, écorce comprise, peut être considérée comme constante et que la proportion de carbone ne varie que très-peu d'une essence à l'autre ; en nombres ronds on peut admettre que tous les bois contiennent environ 50 pour 100 de leur poids de carbone. La proportion de l'hydrogène libre est plus variable : généralement de 0,006, elle s'élève à 0,009 pour les bois résineux, et à 0,011 pour le bouleau et pour l'aune.

185. *Proportion d'eau hygrométrique.*—Les bois retiennent

toujours une proportion d'eau plus ou moins considérable ; lorsqu'ils ont été desséchés, comme pour les analyses précédentes, ils absorbent rapidement l'humidité de l'air et reprennent en quelque sorte leur humidité naturelle, c'est-à-dire celle qu'ils conserveraient après avoir été soumis, pendant longtemps, à la dessiccation à l'air libre.

On doit à M. Chevandier une étude fort complète de cette question, ainsi qu'on en pourra juger par le résumé qu'il a fait, de ses expériences sur ce sujet, dans un tableau spécial, que nous reproduisons à la page suivante.

Il résulte, de ce tableau, que, pour le bois ordinaire de chauffage, la proportion d'eau conservée après deux ans d'abatage, s'élève encore à 0,20 et qu'elle ne s'abaisse pas, pour les bois de quartiers, au-dessous de 0,16.

Les bois ordinaires renferment quelquefois jusqu'à 0,30 d'eau, provenant de la dessiccation incomplète de la sève.

La dessiccation la plus prolongée, dans les circonstances atmosphériques ordinaires, leur conserve encore, le plus habituellement, jusqu'à 0,10 de leur poids hygrométrique.

Il est à remarquer que, pour la même durée de dessiccation spontanée, les rondinages conservent plus d'eau que les quartiers, et que, parmi eux, les rondinages de branches sont, suivant les essences, tantôt plus humides, tantôt plus secs que les rondinages de brins ; ces derniers sont d'autant plus difficiles à dessécher qu'ils appartiennent à des essences plus tendres.

136. Poids du stère de bois. — La densité des bois usuels est, pour presque tous, inférieure à celle de l'eau, mais cette densité donnerait une notion très-fausse du poids du mètre cube ou du stère, les vides laissés entre les rondins, lors du mesurage, représentant souvent plus de la moitié du volume total. Le poids du stère varie donc par suite de la régularité et des dimensions des échantillons et par suite de l'état de sécheresse après lequel le pesage a été fait.

185. QUANTITÉS D'EAU HYGROMÉTRIQUE CONTENUE DANS LES DIFFÉRENTES ESSENCES DE BOIS DE DIVERSES QUALITÉS

SOUMIS A LA DESSICCATION SPONTANÉE, APRÈS DIFFÉRENTS TEMPS DE COUPE.

MACH. A VAPEUR. I.

12

ESSENCES.	BOIS DE QUARTIERS.				RONDINAGES DE BRANCHES.				RONDINAGES DE BRINS.			
	6 mois.	1 an.	18 mois.	2 ans.	6 mois.	1 an.	18 mois.	2 ans.	6 mois.	1 an.	18 mois.	2 ans.
Hêtre.....	0,2334	0,1934	0,1740	0,1574	0,3348	0,2400	0,1980	0,2032	0,3044	0,2346	0,1860	1,1995
Chêne.....	0,2963	0,2375	0,2074	0,1916	0,3120	0,2690	0,2455	0,2109	0,3271	0,2674	0,2335	0,2028
Charme.....	0,2468	0,2018	0,1877	0,1794	0,3138	0,2589	0,2233	0,1930	0,2719	0,2308	0,2060	0,1859
Bouleau.....	0,2328	0,1810	0,1598	0,1717	0,3734	0,2899	0,2412	0,2178	0,3972	0,2901	0,2273	0,1952
Tremble.....	0,3100	0,2155	0,1587	0,1677	0,3569	0,2601	0,2185	0,1994	0,4045	0,2622	0,1777	0,1792
Aune.....	0,2237	0,1917	0,1527	0,1672	»	»	»	»	0,4243	0,2409	0,1906	0,1805
Saule.....	»	»	»	»	»	»	»	»	0,3644	0,2313	0,1712	0,1758
Sapin.....	0,2856	0,1665	0,1478	0,1722	0,2829	0,1714	0,1509	0,1866	0,3378	0,1687	0,1521	0,1809
Pin.....	0,2931	0,1854	0,1581	0,1796	0,3530	0,1759	0,1572	0,1739	0,4149	0,1867	0,1563	0,1742

ET DE LEUR POUVOIR CALORIFIQUE.

177

Nous mettons en regard, dans le tableau suivant, quelques-unes des déterminations qui ont été faites par M. Berthier sur des bois à l'état ordinaire, et par M. Chevandier sur des bois secs.

TABLEAU DES POIDS DU STÈRE DE BOIS A DIFFÉRENTS ÉTATS

	DE DESSICCATION.	
	Bois ordinaires.	Bois secs
	Kilogr.	Kilogr.
Chêne coupé depuis un an en bûches fendues (Moulins).	275	»
Chêne, <i>idem</i> , coupé en quatre.....	515	»
Chêne, gros bois coupé depuis 5 ans, refendu (Moulins)	386	»
Chêne, gros bois coupé en quatre.....	485	»
Chêne des environs de Cahors, coupé depuis 1 an.....	525	»
Chêne de charbonnage coupé depuis 1 an.....	240	»
Chêne à glands sessiles, bois de quartier.....	»	380
Chêne à glands pédonculés, bois de quartier.....	»	370
Chêne, rondinage de brins.....	»	317
Chêne, rondinage de branches.....	»	277
Hêtre des environs de Moulins en gros rondins refendus.	375	»
Hêtre, bois de quartier.....	»	380
Hêtre, rondinage de brins.....	»	314
Hêtre, rondinage de branches.....	»	281
Bouleau des environs de Moulins, en gros rondins.....	400	»
Bouleau, bois de quartier.....	»	338
Bouleau, rondinage de brins.....	»	318
Bouleau, rondinage de branches.....	»	269
Sapin, en gros bois.....	320	»
Sapin, bois de quartier.....	»	277
Sapin, rondinage de brins.....	»	312
Sapin, rondinage de branches.....	»	287
Orme.....	320	»
Charme.....	398	»
Charme, en quartiers.....	»	370
Charme, branchages.....	»	298
Aune, en quartiers.....	»	283
Saule, en quartiers.....	»	285
Pin, bois de quartier.....	»	256
Pin, rondinage de branches.....	»	281

Le chêne est de tous les bois celui qui varie le plus quant au poids du stère. Le hêtre et le charme pèsent environ 400 kil. Le sapin et le pin seulement 300. Les autres bois sont intermédiaires.

187. Propriétés et usages des bois. — Le bois est surtout employé pour le chauffage domestique. Il n'est utilisé pour le chauffage des chaudières à vapeur que dans les pays de

grandes forêts, et particulièrement pour la navigation fluviale en Amérique, où il ne coûte pour ainsi dire que le prix de l'abatage. Il exige, en général, des foyers vastes, dans lesquels l'accès de l'air n'a pas besoin d'être autant facilité que pour la houille; à cet effet on remplace quelquefois les barreaux de la grille par des plaques percées de trous circulaires.

Les résidus de la combustion consistent toujours en cendres légères et pulvérulentes, qui ne gênent jamais le tirage et que l'on recueille, la plupart du temps, pour la valeur des substances alcalines qu'elles renferment.

Les bois soumis à la distillation donnent naissance à des produits particuliers que nous n'avons pas à énumérer, mais qui sont obtenus dans des conditions telles que 0,15 à 0,18 de carbone restent seulement comme résidus, d'après les expériences de M. Berthier, qui a recueilli les chiffres suivants; ces chiffres ont été confondus dans quelques ouvrages avec ceux de la composition élémentaire que nous avons indiqués au n° 184.

TABLEAU DU RÉSULTAT DE LA DISTILLATION

DES DIFFÉRENTS BOIS.

Désignation des bois.	Carbone.	Produits volatils.	Cendres.
Bois de chêne de Pontgibaud...	0,171	0,825	0,004
Bois de hêtre.....	0,137	0,863	»
Bois d'aune.....	0,152	0,845	0,003
Bois de noisetier.....	0,134	0,862	0,004
Bois de bouleau.....	0,137	0,860	0,003
Bois de Bourdaine, à Essonne..	0,138	0,860	0,002
Bois de sapin de Pontgibaud...	0,183	0,813	0,004
Bois de sapin de Niederbronn...	0,148	0,848	0,004
Liège.....	0,183	0,815	0,002

Ces indications sont importantes pour établir que l'emploi des bois, comme combustible, doit toujours être fait dans des conditions convenables pour que les produits volatils ne puissent échapper à la combustion.

188. Menus combustibles végétaux. — Les brindilles et tous les résidus du travail mécanique des bois sont surtout employés pour l'allumage. L'écoulement de ces produits secon-

daïres, tels que les déchets, les copeaux et les sciures est généralement assuré pour cet usage. Cependant le développement qu'ont pris, dans ces dernières années, les grands ateliers de construction ont accumulé, sur certains points, de si grandes quantités de ces matières que l'on a commencé à en faire usage pour les foyers des machines à vapeur. A Paris même, plusieurs générateurs sont exclusivement alimentés avec de la sciure de bois.

La sciure seule constitue un combustible lent, dans lequel l'air pénètre difficilement et qui ne saurait fournir, sans certaines précautions, un feu clair; les déchets, au contraire, et les copeaux s'allument très-vite, et se réduisent, en peu d'instants, en un charbon qui développe beaucoup moins de chaleur. De là une grande inégalité, qui se rencontre également dans les pays de production sucrière, dans lesquels on cherche à utiliser toutes les bagasses (partie ligneuse de la canne à sucre), pour le chauffage exclusif des chaudières à vapeur.

Nous verrons que ces inégalités ne peuvent être combattues qu'en donnant aux générateurs des dimensions exagérées, par rapport à celles qui conviendraient pour l'emploi d'un combustible qui dégagerait une chaleur plus uniforme.

Tous ces combustibles n'ont aucune valeur commerciale; il n'en est pas de même des fagots que l'on fait en forêt avec les mêmes bois. Lorsqu'on donne à ces fagots une longueur de 0^m,906, et un diamètre de 0,649, M. Chevandier a pu estimer leur poids ainsi qu'il suit :

Désignation des bois.	Poids de 100 fagots.
Hêtre.....	300 kil.
Chêne.....	230
Charme.....	250
Bouleau.....	280
Tremble.....	250
Aune.....	300
Saule.....	280
Sapin.....	340
Pin.....	250

L'identité de composition que nous avons déjà remarquée entre les différentes essences de bois permettra de calculer,

d'une manière générale, d'après ces poids, le pouvoir calorifique des fagots et autres menus bois.

Parmi les débris végétaux qui ont été préalablement utilisés dans certaines industries spéciales, nous citerons encore la tannée ou résidu des écorces de chêne, employées pour le tannage des cuirs, qui forme, dans les environs des tanneries, un combustible d'une certaine importance. A Paris on fait, avec la tannée, de petites *mottes* très-légères qui brûlent lentement, et qui conviennent parfaitement pour entretenir, pendant longtemps, un feu couvert. L'industrie des charbons artificiels a fait disparaître la fabrication des mottes de tannée, en permettant d'utiliser, d'une manière plus avantageuse, les résidus de tan.

189. Charbon de bois. — La combustion du bois ne dégage pas, comme celle de la houille, une fumée noire et persistante, mais elle donne cependant naissance à des produits empyreumatiques et à une grande quantité de vapeur d'eau qui, en absorbant, pour sa formation, une partie de la chaleur produite, empêche la température de s'élever autant qu'avec des combustibles moins hygrométriques.

Ce résultat est obtenu avec le charbon de bois, que l'on fabrique en forêts, en brûlant les petits rondins ou les quartiers fendus en meules abritées, dans une certaine mesure, du contact de l'air extérieur.

Le charbon de bois brûle lentement, et se recouvre en brûlant d'une couche de cendre qui rend encore moins active l'action de l'air sur sa surface; il se conserve longtemps dans sa forme primitive, et il constitue, parmi les combustibles végétaux l'analogue, du coke pour la houille.

Comme celui-ci, il conserve proportionnellement une plus grande quantité de cendre que le combustible cru dont il provient; une analyse de M. Sauvage lui donne la composition suivante :

Carbone.....	0,79
Matières volatiles.....	0,14
Cendres.....	0,07
	<hr/> 1,00

L'analogie qui existe entre le coke et le charbon de bois, existe aussi dans les usages de l'un et de l'autre combustible. Comme le coke, ce charbon est employé dans les hauts fourneaux, mais seulement pour la production des fontes de qualité supérieure, sur lesquelles on craindrait que le coke exerçât une action nuisible, par le soufre qu'il retient toujours en petite quantité.

Voici les poids du mètre cube de quelques charbons de bois préparés pour les besoins de l'industrie :

Chêne et hêtre.....	240 à 250 kil.
Bouleau.....	220 à 230
Pin.....	200 à 210
Sapin.....	135

Le charbon de bois n'est plus employé aujourd'hui dans les foyers des chaudières à vapeur.

190. Rendement des bois en charbon. — Le rendement des bois en charbon varie, dans de très-grandes proportions, suivant l'essence, et surtout suivant la nature du procédé employé. Dans la fabrication en meules, qui est la plus générale, et celle qui fournit les meilleurs charbons, une partie du combustible primitif est employé à élever la température, et le rendement peut dans ces circonstances s'abaisser jusqu'à 20 pour cent : il se forme d'ailleurs beaucoup de menu, beaucoup de fraisil, et c'est là encore une cause de perte très-grande.

On voit, d'après ces indications, que la conversion du bois en charbon se traduit toujours par une perte énorme d'éléments calorifiques, et qu'il n'y a lieu d'y avoir recours que quand il est absolument nécessaire d'obtenir un combustible bien homogène, d'une consistance déterminée, et surtout exempt de toute matière étrangère.

Aussi l'emploi du charbon de bois est-il exclusivement réservé aux usages métallurgiques, dans certaines circonstances spéciales, à ceux de l'économie domestique, en foyers ouverts, dans lesquels la moindre fumée serait intolérable, à

ceux enfin de certaines fabrications particulières pour lesquelles l'absence de fumée est d'une égale importance.

Pour tous ces emplois, le charbon doit être léger, sonore, et fragile. Les charbons de bois durs sont les meilleurs, mais ceux des bois tendres sont préférés dans la bijouterie, comme supports des pièces à souder au chalumeau.

191. Combustibles végétaux artificiels. — Le charbon de bois, pour conserver sa valeur commerciale, dans les villes, doit avoir la forme cylindrique des branchages avec lesquels il a été confectionné. Sa friabilité rend cette conservation difficile et dans les transports il se forme une grande quantité de *poussier* de charbon qui n'avait, jusqu'à ces dernières années, qu'une valeur minime.

Aujourd'hui tous ces débris sont utilisés par la fabrication des charbons artificiels, connus généralement sous le nom de charbon de Paris, fabrication à laquelle plusieurs usines sont maintenant consacrées.

La tannée et les moindres parcelles de bois sont recherchées pour cette industrie, qui consiste à mélanger toutes les matières charbonneuses qui en proviennent, avec une petite quantité d'argile, et à agglomérer, par cuisson, le mélange, dans des moules qui affectent la forme du charbon de bois de la meilleure dimension.

Dans quelques circonstances on ajoute au mélange un peu de matière bitumineuse qui, en se carbonisant dans le moule, ajoute à la consistance du produit.

Tous ces charbons artificiels jouissent, plus encore que le charbon de bois, de la propriété de brûler lentement sans s'éteindre : la couche de poussière d'argile dont les fragments se recouvrent, ralentit tellement l'action de l'air, que le moindre fragment peut brûler isolément pendant plus d'une heure sans s'éteindre. Cette propriété rend les charbons artificiels éminemment propres aux opérations qui exigent un feu doux et très-régulier : aussi leur emploi pour les opérations des laboratoires est-il devenu presque général, quoi-

que les fabricants aient souvent abusé de la proportion d'argile qu'ils ont fait entrer dans leurs compositions.

Pour le service des chaudières à vapeur, le charbon de Paris ne saurait être utilisé que pour des appareils de très-petites dimensions et dans des circonstances exceptionnelles.

192. Des combustibles gazeux. — L'étude des gaz combustibles présente aujourd'hui un double intérêt au point de vue de celle des machines à vapeur. Ils sont, dans certaines circonstances, employés dans des foyers spéciaux pour produire, à la manière ordinaire, la vapeur dont on a besoin : sous ce rapport, leur action doit être comparée à celles des combustibles qu'ils remplaceraient ; mais ils sont aussi utilisés, plus directement, pour produire, par leur combustion en vase clos, une augmentation de pression, servant elle-même de pression motrice, dans des machines spéciales.

Les principaux gaz qui puissent être employés, de l'une ou l'autre façon, sont l'oxyde de carbone, le gaz d'éclairage, le gaz des hauts fourneaux, et les différents mélanges que l'on obtient en saturant l'air atmosphérique avec des vapeurs d'hydrocarbures volatils.

Le plus important de ces combustibles est sans aucun doute le gaz qui se dégage des fourneaux métallurgiques, et que l'on recueille, depuis une vingtaine d'années, sans aucun frais, pour le chauffage de la plupart de ces usines.

193. Oxyde de carbone. — L'oxyde de carbone s'obtient toutes les fois que l'on fait agir, à une température élevée, l'oxygène ou l'air atmosphérique, sur du charbon en excès. La préparation de ce gaz n'exige donc d'autres matériaux que ceux qui sont le plus à notre disposition, et par conséquent les plus économiques. L'opération se fait en vase clos ; on peut même utiliser la chaleur qui se dégage dans cette dernière combustion, et le gaz produit peut servir, sous forme de jets, que l'on enflamme et que l'on dirige à volonté sur les surfaces de chauffe des chaudières à vapeur.

L'emploi de cet oxyde de carbone constitue le principe de l'appareil Beaufumé, qui a certainement résolu, de la manière la plus absolue, le problème de la suppression de la fumée, sans augmentation de dépense : malgré cet avantage incontestable, il n'a eu qu'un succès momentané, les appareils étant mis rapidement hors de service.

Toujours est-il que le gaz oxyde de carbone, qui était le produit de la première réaction, constituait un combustible excellent, dont il est d'autant plus nécessaire d'étudier la combustion, que nous retrouverons ce gaz, en proportion plus ou moins grande, dans les autres combustibles gazeux.

L'oxyde de carbone pèse par mètre cube 1^k,263 ; il produit un volume d'acide carbonique égal au sien en se combinant avec un demi volume d'oxygène. Il y a donc condensation d'un volume et demi en un seul.)

Lorsqu'on brûle ce gaz par l'air atmosphérique, il faudrait employer 2,347 d'air, et la condensation serait la même que précédemment, c'est-à-dire de un demi volume seulement, soit

$$\frac{0,5}{2,347 + 1} = 0,149 \text{ du volume total.}$$

L'oxyde de carbone préparé par le procédé de Beaufumé n'est pas pur : il contient de la vapeur d'eau, et en moindre proportion, des hydrogènes carbonés dont il serait nécessaire de tenir compte, dans chaque cas particulier, si l'on voulait obtenir des résultats absolument exacts.

194. Composition du gaz d'éclairage. — Le gaz de houille étant maintenant utilisé pour le chauffage, comme pour l'éclairage, il ne sera pas inutile de le considérer comme un combustible normal, dont le pouvoir calorifique peut servir de point de comparaison avec les autres combustibles.

Ce gaz n'a pas une composition uniforme, et M. Payen a donné séparément l'analyse des produits de la distillation de la houille, pour chacune des cinq heures pendant lesquelles dure ordinairement cette opération, dans les usines.

Si l'on prend la moyenne de ces chiffres, on aura la com-

position moyenne du gaz d'éclairage, en volume, ainsi qu'il suit :

	Poids du mètre cube de chacun des gaz.	Poids de chacun des gaz dans 1 ^{m.c.} .	Poids de chacun des gaz dans 1 ^{kil.} .
Hydrogène protocarboné.	0,59 0,727	0,429	0,702
Hydrogène bicarboné....	0,09 0,275	0,025	0,041
Oxyde de carbone.....	0,07 1,263	0,088	0,144
Hydrogène	0,21 0,090	0,019	0,031
Azote.....	0,04 1,256	0,050	0,082
	1,00	0,611	1,000

Les nombres de la troisième colonne, obtenus en multipliant la proportion de chacun des gaz, en volumes, par le poids du mètre cube de ce gaz, conduisent, par voie d'addition, au chiffre 0,611 pour le poids du mètre cube du gaz d'éclairage.

Pour connaître les volumes élémentaires qui correspondent à un poids total de 1 kilogramme, il a suffi d'augmenter chacun des nombres individuels dans la proportion de 0,611 à 1,000 : c'est ainsi qu'ont été obtenues les dernières indications du tableau.

D'après ce même chiffre 0,611, le volume du kilogramme de gaz d'éclairage serait 1^{m.c.} : 0,611 = 1^{m.c.}637; malgré les petites différences qui pourraient se présenter, c'est le nombre que nous emploierons constamment dans nos calculs.

195. Combustion du gaz d'éclairage. — Tous les gaz qui entrent dans la composition du gaz d'éclairage, à l'exception de l'azote, sont combustibles; et pour connaître les produits de la combustion, il suffira d'examiner isolément la combustion de chacun des gaz qui entrent dans la composition totale.

C'est ainsi qu'ont été calculés les chiffres du tableau suivant, d'après lequel il faut conclure que, pour être brûlé complètement, un mètre cube de gaz d'éclairage exige 1,62 mètre cube d'oxygène et non moins que 7,5 mètres cubes d'air atmosphérique.

TABLEAU DES DIFFÉRENTS GAZ A CONSIDÉRER DANS LA COMBUSTION DU GAZ D'ÉCLAIRAGE.

Composition du gaz d'éclairage en volumes.		Produits de la combustion.	Composition en volumes, des gaz brûlés.	Volumes d'acide carbonique.	Volumes de vapeur d'eau.	Volume d'azote.	Volume total des gaz brûlés.	Volumes d'oxygène fixés.	Volumes d'air corres- pondants.
Hydrogène protocarboné	0,59	Acide carbonique.	$0,59 \left(\frac{1}{2}C + O \right)$	0,59	»	»	0,59	0,59	2,769
		Eau	$0,59 \times 2 \left(H + \frac{1}{2}O \right)$	»	1,18	»	1,18	0,59	2,769
Hydrogène bicarboné...	0,09	Acide carbonique.	$0,09 \times 2 \left(\frac{1}{2}C + O \right)$	0,18	»	»	0,18	0,18	0,845
		Eau	$0,09 \times 2 \left(H + \frac{1}{2}O \right)$	»	0,18	»	0,18	0,09	0,422
Oxyde de carbone.....	0,07	Acide carbonique.	$0,07 \left(\frac{1}{2}C + O \right)$	0,07	»	»	0,07	0,035	0,164
Hydrogène	0,21	Eau	$0,21 \left(H + \frac{1}{2}O \right)$	»	0,21	»	0,21	0,105	0,493
Azote.....	0,04	Azote	$0,04 \times Az$	»	»	0,04	0,04	»	»
	1,00			0,84	1,57	0,04	2,45	1,59	7,462

ET DE LEUR POUVOIR CALORIFIQUE.

196. Volume des produits de la combustion. — Il sera, pour nous, très-important de savoir si les produits de la combustion du gaz d'éclairage ont, à égalité de température, un volume différent de celui des gaz primitifs. Le tableau qui précède nous permet de résoudre cette question d'une manière simple.

Si l'on considère la combustion par l'oxygène seul, on voit que le volume final est de..... 2,45
tandis que le volume primitif était formé de

Oxygène.....	1,59
Gaz d'éclairage.....	1,00
Total.....	<u>2,59</u>

La diminution de volume sera donnée par la différence 0,16.

La réduction proportionnelle de volume est donc dans ce cas $0,16 : 2,59 = 0,054$.

Mais cette diminution de volume resterait la même si la combustion avait lieu par l'air atmosphérique, et elle devrait être rapportée au volume total des gaz, avant la combustion, qui est ici beaucoup plus considérable :

Air atmosphérique.....	7,462
Gaz d'éclairage.....	1,000
Total.....	<u>8,462</u>

D'après ces indications, la condensation proportionnelle se réduirait à $0,16 : 8,462 = 0,018$.

Cette condensation, moindre que les deux centièmes du volume primitif, peut être négligée dans la pratique, et nous avons profité de cette circonstance pour employer le gaz comme combustible dans nos expériences récentes sur le tirage des cheminées. Nous n'avons ainsi eu à considérer qu'un volume unique, et cette question très-complexe s'est trouvée simplifiée d'une manière notable, sous ce rapport.

Il ne faut pas oublier cependant que, parmi les gaz brûlés, se trouvent de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique, et

que si l'on venait à ramener ces produits à l'état liquide, la condensation serait beaucoup plus considérable.

Pour la vapeur d'eau, cette condensation s'effectue déjà, dans quelques machines à gaz; et, quant à l'acide carbonique, il serait facile de l'absorber avec une dissolution alcaline.

Les condensations seraient alors augmentées des volumes partiels de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique, et elles s'élèveraient proportionnellement aux chiffres suivants :

TABLEAU DES RÉDUCTIONS DE VOLUME DANS LA COMBUSTION
DU GAZ D'ÉCLAIRAGE.

Circonstances dans lesquelles la condensation est évaluée.	Combustion par l'oxygène.	Combustion par l'air atmosphérique.
La vapeur et l'acide carbonique restant gazeux..	0,054	0,018
La vapeur d'eau étant condensée.....	0,661	0,202
La vapeur et l'acide carbonique étant liquéfiés...	0,980	0,300

Ces chiffres sont très-importants pour la théorie des machines à gaz.

197. *Composition des gaz des hauts fourneaux.* — Bien que la composition des gaz des hauts fourneaux soit extrêmement variable, on peut cependant admettre, d'une manière générale, que ceux du gueulard, dans un haut fourneau à coke, se composent en poids, d'environ

- 0,82 (azote, acide carbonique et acide sulfureux) produits non combustibles.
- 0,02 hydrogène.
- 0,03 hydrogène carboné, qui ne se brûle pas facilement.
- 0,13 oxyde de carbone.

Si, pour un instant, nous considérons l'oxyde de carbone comme le seul gaz dont la combustion puisse être utilisée, nous voyons que le poids total de la masse gazeuse est environ 8 fois aussi grand que le poids de cet oxyde; ce rapport serait de 7 seulement, si l'on considérait comme combustibles les 0,13 d'oxyde de carbone et les 0,02 d'hydrogène.

La proportion en volume pourrait être déterminée par le calcul suivant :

Composition	Densités	Volumes	Volumes
en poids.	des gaz.	correspondants.	par rapport à celui de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène
Azote.....	68	1,256167	54,13
Acide carbonique..	12	1,977414	6,57
Acide sulfureux. .	2	2,234...	0,81
Hydrogène carboné	3	1,274780	2,35
Oxyde de carbone..	13	1,262513	10,29
Hydrogène.....	2	0,089578	22,33
	100		96,48

On peut admettre, d'après ces chiffres, que la densité moyenne des gaz est 1 et que le volume total est triple de celui de l'oxyde de carbone, de l'hydrogène et de l'hydrogène carboné réunis.

198. Combustion du gaz des hauts fourneaux. — Chaque kilogramme de gaz contient

0^k,13 d'oxyde de carbone.
0^k,02 d'hydrogène.

En se reportant au tableau de la combustion du carbone et de l'hydrogène en poids, on trouve que

14^k d'oxyde de carbone exigent 40^k d'air, donc 0^k,13 exigera $0,13 \times \frac{40}{14} = 0^k,37$
1^k d'hydrogène exige 40^k d'air, donc 0^k,02 exigera $0,02 \times 40 = 0^k,80$
Total.... 1^k,17

Ainsi 1 kilogramme de gaz de haut fourneau exigera pour sa combustion 1^k,17 d'air, et le poids des gaz brûlés sera 2^k,17.

Ce poids d'air de 1^k,17 a pour volume $\frac{1,17}{1,293287} = 0^{mc},90$, et le volume des gaz brûlés peut également être calculé, puisque ces gaz se composent de :

1° 0^k,85 de gaz incombustibles qui ne changent pas de

nature et qui représentent, après comme avant la combustion, et suivant les indications données au n° 197,.... 638^{lit},60

2° 0^k,13 oxyde de carbone, ayant un volume de
102^{lit},90 et produisant $102,90 \times 5 = 514 \quad 50$
d'acide carbonique;

3° 0^k,02 d'hydrogène, ayant un volume de 223^{lit},30
et produisant, en vapeur d'eau, $223,30 \times 3 = 669 \quad 90$
Total..... 1823 00

Nous admettrons donc d'une manière générale que chaque kilogramme de gaz des hauts fourneaux exige environ 1^k,17 ou 0^m°,90 d'air pour sa combustion complète, et que le volume des produits de la combustion est de 1823 litres ou de 1^m°,823.

Si le volume du kilogramme est à peu près 1 mètre cube, nous voyons que le volume primitif étant de 2^m°,17, il y a, par la combustion, réduction à 1,823, et, par conséquent, une condensation proportionnelle de $\frac{2,17 - 1,823}{2,17} = 0,16$; elle est, par conséquent, beaucoup plus grande que pour le gaz d'éclairage.

Il arrive le plus ordinairement que la combustion est faite avec un excès d'air, et la condensation proportionnelle est alors diminuée dans un rapport plus ou moins grand.

199. Autres combustibles gazeux. — On commence à employer, dans plusieurs industries, particulièrement en Angleterre, des fours à gaz, dans lesquels le chauffage se fait exclusivement au moyen des produits gazeux qui se dégagent directement du combustible: ce procédé offre, dans certaines circonstances, l'avantage de donner lieu à une flamme longue et persistante, et, par conséquent, à une grande uniformité dans le chauffage.

Les gaz ainsi développés avec la houille ou avec la tourbe sont composés d'oxyde de carbone et d'hydrocarbures plus ou moins brûlés, mais leur composition spéciale étant connue,

on pourra toujours appliquer, à la combustion de ces gaz, des calculs analogues à ceux qui ont été employés pour les gaz perdus des hauts fourneaux ou pour le gaz d'éclairage.

200. *Air atmosphérique chargé de vapeurs d'hydrocarbures.*

— On peut s'étonner de ce que nous plaçons l'air atmosphérique parmi les combustibles; mais les gaz dont nous venons de parler, abstraction faite de l'oxyde de carbone et de l'acide carbonique qu'ils renferment, ont, lorsqu'ils sont mélangés avec de l'air, une composition analogue au mélange que l'on obtient en faisant barboter de l'air dans les hydrocarbures liquides; l'air est, dans ces conditions, le véhicule le plus commode des vapeurs d'hydrocarbure, qui seules peuvent brûler.

Depuis longtemps on a proposé d'employer ces vapeurs, en mélange avec le gaz d'éclairage, pour augmenter son pouvoir éclairant, ou même pour donner à l'hydrogène non carboné le pouvoir éclairant qui lui manque. Dans plusieurs patentes on avait indiqué comme gaz pouvant brûler dans le cylindre des machines, de l'air atmosphérique chargé de vapeur combustible. On indiquait comme propriété caractéristique de ce produit, qu'il portait avec lui l'oxygène nécessaire à sa combustion.

Nous ne croyons pas que l'on ait encore déterminé le pouvoir calorifique d'un tel mélange; mais il résulte de certains faits dont nous avons été témoins, qu'il chauffe à l'égal du gaz d'éclairage, mélangé avec huit fois son volume d'air atmosphérique. Ce mélange constitue donc un véritable combustible, qui s'emploiera certainement à la manière des autres combustibles gazeux.

201. *Propriétés et usages des combustibles gazeux.* — Les combustibles gazeux qu'emploie l'industrie proviennent tous de la houille ou de la tourbe; les hydrocarbures liquides sont eux-mêmes recueillis dans les produits de cette distillation.

Ils présentent, sur les combustibles solides, cet avantage de pouvoir, à l'aide de précautions convenables, brûler sans fumée, et ils deviendraient peut-être d'un emploi général s'ils pouvaient être obtenus à bas prix.

A cet égard, ils ne représentent qu'une partie de la richesse combustible de la houille, et par conséquent ils ne sauraient être produits, pour eux-mêmes, qu'avec une perte considérable dans le prix de revient.

Il en est tout autrement lorsque ces gaz sont le résultat naturel de réactions dans lesquelles leur formation est, pour ainsi dire, indispensable. C'est le cas des opérations métallurgiques, dans lesquelles de grandes masses de charbon sont toujours traversées par des quantités d'air atmosphérique, que l'on ne peut augmenter sans entraîner la combustion, et par conséquent la déperdition du métal qu'il s'agit de produire. Aussi l'emploi, comme combustible, des gaz produits dans ces conditions, est-il de tous points avantageux.

Dans quelques circonstances encore on pourra tirer un avantage particulier des combustibles gazeux.

Le gaz d'éclairage, pour le chauffage domestique, coûte certainement plus cher que le charbon; mais on ne le consomme que quand on l'utilise; la facilité de l'allumage et de l'extinction compense en partie l'augmentation de dépense que ce procédé, si commode d'ailleurs, exige pour la production d'une certaine quantité de chaleur.

L'emploi des gaz combustibles, brûlés dans les cylindres mêmes des machines, constitue aujourd'hui une application sérieuse qui, malgré l'augmentation de dépense qu'elle entraîne, est, pour certains cas, d'un grand intérêt.

Ces motifs nous ont paru assez graves pour consacrer quelques pages à l'étude spéciale des propriétés de ces combustibles gazeux.

IV. Pouvoirs calorifiques et valeurs comparatives des combustibles de l'industrie.

202. Détermination du pouvoir calorifique des combustibles.

Le seul procédé vraiment certain à employer pour la détermination du pouvoir calorifique des différents combustibles, devrait consister en essais calorimétriques analogues à ceux

qui ont été exécutés par MM. Favre et Silbermann. De cette manière on pourrait recueillir exactement la quantité de chaleur que chaque combustion dégagerait et classer les combustibles suivant leurs pouvoirs calorifiques.

Cependant aucune détermination de cette nature n'a encore été faite sur les combustibles de l'industrie, et l'on en est réduit à faire des calculs, là où des données certaines seraient surtout nécessaires.

On calcule ordinairement le pouvoir calorifique d'un corps composé, en additionnant les pouvoirs calorifiques des éléments dont il se compose ; mais il est évident que cette méthode ne saurait être exacte que pour les corps qui conservent, avant et après la combustion, le même état moléculaire, et qu'en ce qui concerne la houille, par exemple, on néglige ainsi toute la quantité de chaleur qui sera nécessairement absorbée pour faire passer le carbone, l'hydrogène, l'eau elle-même, de l'état solide ou de l'état liquide, à l'état gazeux : les pouvoirs calorifiques que l'on donne dans toutes les tables sont plus ou moins entachés de cette source d'erreur.

Lorsqu'on a voulu obtenir des déterminations directes on s'est contenté d'employer, dans un même foyer, différents combustibles et de mesurer la quantité d'eau vaporisée par chaque kilogramme. Ce mode de détermination, bien qu'il paraisse répondre plus directement aux questions soulevées par l'étude des machines à vapeur, n'est pas non plus à l'abri de toute critique.

Le même foyer ne saurait être également approprié à la meilleure utilisation de tous les combustibles ; ceux-ci, placés sur la même grille, donnent, avec plus ou moins de facilité, passage à l'air appelé par la combustion, et par conséquent laissent perdre, avec les gaz qui s'échappent, une quantité de chaleur très-variable.

Nous indiquerons successivement les résultats qui ont été obtenus par ces deux méthodes, également insuffisantes.

205. Expériences à faire. Les observations qui précèdent

démontrent toute l'utilité que présenteraient des expériences calorimétriques directes, faites sur les combustibles de l'industrie, dans leurs différents états; c'est seulement par un travail de cette nature que l'on pourra décider, quant aux combustibles solides, certaines questions pour lesquelles nous sommes encore réduits à faire des conjectures.

Dans quelle mesure le pouvoir calorifique des houilles diminue-t-il par les influences atmosphériques?

Les houilles les plus riches en hydrogène sont-elles les plus avantageuses?

Quelle est la quantité de chaleur absorbée par le passage des éléments solides de la houille à l'état gazeux?

Quel est le volume d'air strictement nécessaire à la combustion complète d'un kilogramme de chaque combustible?

Ce sont là autant de questions qui demandent à être résolues par des expériences spéciales et sur lesquelles nous ne pourrions aujourd'hui donner que de simples appréciations.

204. Pouvoir calorifique des combustibles. En l'absence de résultats fournis par des expériences calorimétriques directes nous indiquerons successivement les résultats auxquels on est parvenu séparément, soit en faisant la somme des pouvoirs calorifiques des éléments que l'analyse chimique a fait connaître, soit par des évaluations résultant de procédés analytiques plus rapides, soit enfin par la détermination des quantités d'eau vaporisées dans des circonstances déterminées.

Les expériences de vaporisation nous paraissent encore les plus sûres, du moins au point de vue de la valeur comparative des différents combustibles solides.

205. Pouvoir calorifique des combustibles solides, déduit de leur composition chimique. Tous les chiffres obtenus par la vaporisation de l'eau ne peuvent servir qu'à nous donner une évaluation certainement trop faible du pouvoir calorifique des différents combustibles, puisqu'une perte plus ou moins considérable est, dans tous les cas, faite par l'élévation de température des gaz de la combustion.

En déduisant les pouvoirs calorifiques des mêmes combustibles, de leur composition chimique, nous arriverions, d'un autre côté, à des évaluations trop grandes.

Les comparaisons auxquelles pourront donner lieu ces deux modes d'évaluation nous conduiront à une appréciation plus convenable de la puissance calorifique des différents combustibles.

Les colonnes que nous avons ajoutées aux tableaux de M. Regnault et de M. de Marsilly (nos 159 et 160), en estimant le pouvoir calorifique du carbone à 8000 et celui de l'hydrogène à 29 000, nous fournissent, pour la houille, de nombreuses indications.

Le chiffre le plus élevé pour les houilles du terrain houiller, analysées par M. Regnault, est de 8548, le plus bas de 7625; mais, pour les autres étages, on trouve, comme nombres extrêmes, 8561 pour la houille de Westphalie, 6323 pour celle de Noroy (Haute-Saône), qui renferme 19 pour 100 de cendres.

Pour les lignites, les évaluations moyennes seraient de beaucoup inférieures, quoique les chiffres ne s'abaissent pas au-dessous de 6306.

L'asphalte de Cuba, qui contient 9,30 d'hydrogène, fournit le total le plus élevé, 9031.

Les tourbes donnent plus de 6000 calories, mais on ne pourrait compter, dans la plupart des cas, que sur un chiffre bien inférieur.

Le travail de M. de Marsilly conduit à des résultats presque identiques.

Aucune houille française ne dépasse 8520; la houille anglaise de Hanwick seule fait exception, et fournit un total de 8542 calories. Aucun combustible de cette classe n'a donné moins de 7147 (Levant du flenu), et la seule houille de Hartley a donné moins de 7500.

Les pouvoirs calorifiques, calculés pour les divers anthracites, sont compris entre 7500 et 8300.

Les tourbes analysées par M. de Marsilly sont toutes comprises entre 5171 et 5898, à l'exception de la tourbe de Re-

miencourt qui ne contient pas moins de 65 pour 100 de cendres, et qui, pour cette raison, est de qualité tout à fait inférieure.

Pour résumer tous ces résultats dans un petit nombre de chiffres, nous n'avons pas trouvé de meilleur moyen que de joindre, aux indications extrêmes que nous venons de donner, la valeur calorifique moyenne de tous les combustibles analysés par M. Regnault et par M. de Marsilly.

POUVOIR CALORIFIQUE MOYEN DES DIVERS COMBUSTIBLES
ANALYSÉS PAR MM. REGNAULT ET DE MARSILLY.

Désignation des combustibles.	Pouvoir calorifique moyen, calculé en calories.
Anthracites.....	7884
Houilles.....	8103
Lignites.....	6996
Asphalte.....	9031
Jayet de Sainte-Colombe.....	7712
Tourbes ordinaires.....	5796
Tourbe blanche de Remiencourt.	1683

En ce qui concerne le coke, les deux analyses de M. de Marsilly conduisent aux chiffres suivants :

Coke d'Agrappe.....	7300
Coke du bois du Luc.....	7463

Le pouvoir calorifique du coke serait, d'après ces données, notablement inférieur à celui de la houille, ce qui tient évidemment, dans le calcul, à ce que la proportion d'hydrogène est moindre.

Les combustibles végétaux présentent une uniformité de composition presque absolue : aussi le pouvoir calorifique des différents bois analysés par M. Berthier, se calcule-t-il en nombres qui ne diffèrent que de 5267 à 5875 calories.

Les analyses de M. Chevandier conduisent à des chiffres que nous considérerons comme plus exacts, attendu que l'hydrogène n'y est compris que pour la proportion qui y est à l'état de liberté. Cette circonstance explique l'infériorité des pouvoirs calorifiques, calculés d'après ces analyses : ils

ne varient que de 4132 à 4391 calories; la moyenne générale est 4340 calories.

A raison de 0,80 de carbone, le charbon de bois aurait un pouvoir calorifique de $0,80 \times 8000 = 6400$, chiffre qui est notablement supérieur à celui du bois.

206. *Quantité d'eau qu'un kilogramme de combustible peut vaporiser.* — Avant de nous occuper des expériences faites sur la vaporisation de l'eau, il convient de nous rendre compte de ce qu'un kilogramme de combustible peut théoriquement vaporiser.

Un kilogramme d'eau, pris à 0, exige (n° 111), pour se convertir en vapeur saturée, une quantité de chaleur

$$L = 606,5 + 0,305 t.$$

Cette quantité de chaleur varie de 637, pour 100°, à 652,25, pour 150°, et l'on obtiendra des résultats approximatifs en l'évaluant d'une manière générale à 650 calories.

En partant de cette base, 1 kilogramme de carbone, qui développe 8000 calories par sa combustion, pourrait théoriquement vaporiser 12 kilogrammes d'eau. 1 kilogramme d'hydrogène, à raison de 29 000 calories, pourrait vaporiser jusqu'à 44 kilogrammes; mais ces chiffres ne pourraient être atteints, dans la pratique, par suite de la diffusion complète de la chaleur conservée par les produits de la combustion, et par conséquent perdue, quant à la quantité d'eau vaporisée.

Il convient toutefois de remarquer, dès à présent, que toute l'eau sortie d'une chaudière n'est pas nécessairement vaporisée : une partie de cette eau est entraînée mécaniquement, pendant l'ébullition, avec la vapeur elle-même, et cette eau, ainsi entraînée, n'absorbant pas, comme la vapeur, 650 calories par kilogramme, doit, si elle est comptée comme vapeur, augmenter, dans une certaine proportion, les chiffres des observations.

Ces deux causes, en quelque sorte contradictoires, se compensent dans une certaine mesure, et doivent être chacune

prise en grande considération dans les résultats des expériences de vaporisation.

207. *Expériences faites sur la quantité d'eau que peut vaporiser un kilogramme des différents combustibles.* — Les expériences sur ce sujet sont assez nombreuses, mais elles sont toutes entachées des incertitudes qui peuvent seulement être évitées par des déterminations calorimétriques directes. En opérant différemment, on ne peut tenir compte de la chaleur emportée par les gaz brûlés, et les résultats sont plus ou moins influencés par les circonstances extérieures.

Parmi ces expériences, celles de M. Brix doivent surtout être remarquées, en ce qu'elles ont été accompagnées de toutes les précautions nécessaires pour que rien n'échappe à la combustion.

On pourrait d'ailleurs tenir compte de la chaleur emportée par les gaz brûlés, et c'est par ce moyen que M. Péclet a déduit le pouvoir calorifique de certains combustibles de la quantité de vapeur qu'ils produisent. Ces expériences peuvent, en outre, fournir directement des indications fort utiles sur la valeur relative des combustibles.

208. *Expériences de MM. de la Bèche et Playfair.* — On trouve dans la dernière édition de Tredgold une table très-intéressante des résultats auxquels étaient précédemment parvenus MM. de la Bèche et Playfair, par des moyens analogues. Ces résultats ne sont toutefois relatifs qu'aux combustibles minéraux de l'Angleterre : nous en donnons une traduction complète en mesures françaises.

C'est à ce tableau que nous avons renvoyé dans le n° 166 lorsque nous nous sommes occupés du poids moyen de l'hectolitre de houille et du rapport entre ce poids et celui que l'on déduirait, abstraction faite des vides, de la densité.

La septième colonne a été ajoutée par nous, en estimant, comme dans tous les autres tableaux, à 650 calories la dépense de chaleur de chaque kilogramme de vapeur.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES FAITES PAR SIR H. DE LA BECHE ET LE DOCTEUR PLAYFAIR,
POUR DÉTERMINER LA VALEUR ÉCONOMIQUE DE DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES.

200

DÉSIGNATION des COMBUSTIBLES.	Poids réel du mètre cube.	Poids du mètre cube, déduit de la densité.	Rapport entre ces poids.	Volume par 1000 kilogrammes.	Kilogrammes d'eau vaporisés à 100° par kilogramme de combustible.	Calories correspondantes.	Kilogrammes d'eau, déduction faite des cendres du combustible.	Kilogrammes d'eau vaporisés par heure.	Kilogrammes d'eau vaporisés par mètre cube de combustible.
<i>Houilles du pays de Galles.</i>				m.c.					
Graigola.....	962,37	1300,855	0,742	1,053981	9,35	6078	9,66	199,99	263,08
Anthracite Jones et Co.....	931,714	1089,701	0,679	1,088519	9,46	6149	9,70	185,44	255,95
Veine old Castle Fiery.....	814,425	1286,343	0,633	1,245356	8,94	5811	»	210,32	206,19
Veine du quai Fiery.....	988,624	1327,648	0,685	1,104090	9,40	6120	10,60	240,04	275,77
Binea.....	973,620	1301,285	0,702	1,110884	9,94	6461	10,30	220,59	266,33
Llangennech.....	909,609	1299,124	0,695	1,113715	8,86	5759	9,20	169,06	237,25
Pentrepeth.....	923,260	1297,282	0,705	1,098428	8,72	5668	8,98	172,82	234,79
Pentrefelin.....	1058,246	1355,027	0,781	0,958293	6,36	4134	7,40	112,00	221,79
Duffrin.....	851,253	1313,036	0,643	1,191568	10,14	6591	11,80	185,42	244,67
Mynydd Newydd.....	900,995	1297,282	89	1,125605	9,52	6188	10,59	213,22	242,92
Veine du roc des trois Quartiers.	900,934	1327,372	0,674	1,124473	8,84	5746	»	220,54	225,80
Veine Cwm. frood Rock.....	884,162	1253,116	0,706	1,147121	8,70	5655	9,35	171,95	217,84
Cwm. Nanty-gros.....	895,744	1278,080	0,701	1,132400	8,42	5473	8,82	183,08	213,59

DES COMBUSTIBLES

Resolven.....	908,909	1307,204	0,712	1,081158	9,53	6195	10,44	176,79	253,23
Pontypool.....	890,941	1307,204	0,676	1,138345	7,47	4842	8,04	113,43	188,48
Bedwas.....	807,651	1311,184	0,711	1,254699	9,79	6364	9,99	216,06	223,95
Ebbw Vale.....	853,460	1259,602	0,676	1,196380	10,21	6636	10,64	208,48	246,52
Porth-mawr.....	853,460	1387,153	0,914	1,189586	7,53	4895	7,75	157,39	181,80
Coleshill.....	846,910	1287,286	0,658	1,196380	8,00	5200	8,34	184,10	192,07
<i>Houilles anglaises.</i>									
Couche Dalkeith Jewel.....	725,938	1274,337	0,625	1,273383	7,08	4203	7,10	160,89	159,72
Couche Dalkeith Coronation....	826,324	1257,389	0,657	1,227521	7,71	5012	7,86	167,64	180,42
Wallsend, Elgin.....	968,287	1257,389	0,694	1,161276	8,46	5499	8,67	198,27	208,75
Foldel Splint.....	879,748	1257,389	0,699	1,152783	7,56	4914	7,69	210,63	188,35
Grange-mouth.....	867,643	1287,286	0,674	1,136080	7,40	4810	7,91	172,32	181,85
<i>Houilles écossaises.</i>									
Broomhill.....	838,742	1247,466	0,673	1,207987	7,30	4745	7,66	180,19	173,61
Lindney (forêt de Dean).....	870,850	1280,375	0,680	1,164673	8,52	5538	8,98	220,69	219,18
<i>Irlande.</i>									
Anthracite de Slievardagh.....	1005,770	1592,657	0,630	1,009534	9,85	6402	10,49	214,41	280,21
<i>Charbons artificiels.</i>									
Patente de Wylam.....	1045,211	1097,749	0,948	0,974147	8,92	5798	9,74	189,75	262,97
— de Bell.....	1044,505	1137,653	0,918	0,971033	8,53	5544	8,65	248,74	262,32
— de Warlich.....	1104,361	1154,625	0,935	0,918376	10,36	6724	10,60	207,40	324,05

ET DE LEUR POUVOIR CALORIFIQUE.

201

209. Expériences de M. Brix. — M. Brix a consigné dans un ouvrage spécial les résultats de ses nombreuses expériences. C'est dans ses *Recherches sur la puissance calorifique des principaux combustibles de l'État prussien*, Berlin, 1853, que nous avons trouvé les chiffres les plus précis sur la question qui nous occupe.

Les expériences ont été faites dans un même appareil, disposé pour utiliser le mieux possible la chaleur des produits de la combustion, mais on n'a pas tenu compte de la perte par les gaz brûlés, et par conséquent les plus grands chiffres de M. Brix devront être considérés comme des valeurs encore trop faibles de la chaleur dégagée par la combustion.

TABLEAU DU POUVOIR DE VAPORISATION DES COMBUSTIBLES,
PAR M. BRIX.

Désignation des combustibles.	Pouvoir de vaporisation					
	du combustible naturel			du combustible desséché à 110°.		
	Maxim.	Calories corres- pondantes.	Minim.	Maxim.	Calories corres- pondantes.	Minim.
<i>Bois.</i> — Pin sylvestre,						
vieilles tiges.....	4,13	2684	»	5,15	3348	»
<i>Idem</i> , jeunes tiges.	3,64	2366	»	4,80	3120	»
Aune.....	3,83	2490	»	4,68	3042	»
Bouleau.....	3,85	2502	»	4,52	2938	»
Chêne.....	3,55	2308	»	4,64	3016	»
Hêtre.....	3,60	2340	»	4,42	2873	»
Charme.....	3,66	2379	»	4,45	2892	»
<i>Tourbe</i>	4,08	2652	2,51	5,42	3523	4,66
<i>Lignite</i>	4,02	2613	3,74	5,59	3633	5,97
	2,36	1534	1,15	5,53	3594	3,14
<i>Matières carbonisées.</i> —						
Charbon de pin sylv.	7,13	4635	6,44	7,93	5154	7,26
Charbon de tourbe..	7,24	4706	6,43	7,59	4933	6,66
Coke.....	7,50	4875	6,59	8,12	5278	7,07
<i>Houilles.</i> — Anglaise de						
Hunarck.....	8,20	5330	7,10	8,23	5350	7,12
Anglaise de Hawt- horn.....	8,04	5226	7,06	8,20	5330	7,16
Prussienne de Sarre- brück.....	0,07	5246	6,54	8,23	5350	6,94
De l'Inde.....	8,95	5818	8,59	9,00	5850	8,69

Ces chiffres de M. Brix offrent une concordance remarquable

avec ceux de la pratique des ateliers; ils doivent par conséquent inspirer toute confiance et ils nous seront d'une grande utilité.

210. Expériences de M. Wicksteed. — Nous citerons encore les expériences de M. Wicksteed, telles qu'elles sont rapportées dans le *Dictionnaire* d'Apleton; mais déjà ces évaluations ont été déduites de la pratique courante des ateliers, et nous aurons à reveni, par de nombreuses citations, sur la vaporisation obtenue dans les chaudières à vapeur; par chaque kilogramme de combustible. La dernière colonne a été, comme pour les tableaux précédents, calculée par nous à raison de 650 calories par kilogramme de vapeur.

TABLEAU DES POUVOIRS DE VAPORISATION DE DIVERS COMBUSTIBLES
D'APRÈS LES EXPÉRIENCES DE M. WICKSTEED.

Désignation des combustibles.	Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	Calories correspondantes.
Anthracite.....	9,01	5856
Houille du pays de Galles, 1 ^{re} qualité.....	9,49	6168
Houille du pays de Galles, qualité moyenne	8,04	5226
Petit charbon de Newcastle, 1 ^{re} qualité....	8,52	5538
Petit charbon de Newcastle, qualité moyenne.....	8,07	5245
Petit charbon de Newcastle et de Galles, par moitié.....	7,86	5109
Gros charbon de Newcastle, qualité moyenne	7,66	4979
Charbon du Derbyshire.....	6,77	4410
Charbon du Derbyshire et de Newcastle, par moitié.....	7,71	5011
Charbon du Northumberland (Blyth-main).	6,60	4290
Coke de gaz.....	7,91	5141
Coke de gaz et petit charbon de Newcastle, par moitié.....	7,90	5135

211. Observations sur l'état de combinaison dans lequel se trouve l'hydrogène dans les combustibles. — L'hydrogène peut se trouver dans les combustibles à l'état d'eau toute formée, à l'état de combinaison avec le carbone, et, très-rarement sans doute, à l'état de liberté.

L'eau contenue dans le charbon doit diminuer la puissance calorifique du combustible, puisque chaque kilogramme d'eau doit absorber environ 650 calories. Mais il n'en est pas de même de l'hydrogène pur et des hydrogènes carbonés.

Ils devraient produire par kilogramme, d'après les résultats des expériences de MM. Favre et Silbermann :

Hydrogène.....	34000
Hydrogène protocarboné.....	13000
Hydrogène bicarboné.....	11800

Mais ces chiffres sont relatifs à la combustion des éléments constitutants de ces corps à l'état de gaz, et il est évident que, pour arriver individuellement à cet état, ils doivent dépenser une certaine quantité de calorique latent et de calorique de combinaison.

On admet en Angleterre qu'il y a compensation entre ces actions calorifiques et frigorigènes, et l'on estime les différents charbons d'après leur seule teneur en carbone.

M. Pécelet ne partageait pas cette manière de voir, et il a donné, page 89, un tableau des puissances calorifiques de divers combustibles minéraux, en faisant la somme des pouvoirs calorifiques du carbone et de l'hydrogène en excès qu'ils renferment.

Nous ne connaissons aucune expérience calorimétrique, faite à ce point de vue, sur les combustibles, si ce n'est une série de déterminations faites par Johnston, et consignées dans *A report of the navy department on american coals*. Washington, 1844. Mais ces expériences elles-mêmes n'offrent pas la certitude que présenteraient des recherches faites avec le calorimètre.

212. Expériences de Johnston.—Les expériences de Johnston ont porté sur différents combustibles, pour lesquels on a déterminé la teneur en charbon seul, et pour lesquels on a comparé le pouvoir calorifique déduit de l'expérience, au pouvoir calorifique calculé d'après cette teneur.

Désignation des combustibles.	Vaporisation produite par chaque kilogramme de combustible.	Pouvoir calorifique calculé d'après la teneur en charbon.
Comté de Cambria (Pensylvanie) ..	11,550	11,522
Midlothian (Virginie).....	11,460	11,731
Newcastle (Angleterre).....	10,898	10,545
Clover Hill (Virginie).....	10,537	10,445
Charbon d'Ecosse.....	10,206	10,393
Charbon indien (Cannelton).....	9,557	9,509
Moyenne.....	10,501	10,691

Pour être concluants, ces résultats devraient être accompagnés de l'indication de l'hydrogène en excès, afin que l'on pût comparer le pouvoir calorifique réel à celui qui serait déduit du calcul fait en tenant compte à la fois du carbone et de l'hydrogène.

D'ailleurs Johnston n'a pas tenu compte de la chaleur emportée par les gaz brûlés, et la seule conséquence qu'on pourrait tirer de sa comparaison consisterait dans une sorte de compensation entre la chaleur perdue et celle qui pourrait être produite par l'hydrogène, sous ses différents états.

Nous calculerons le pouvoir calorifique des combustibles dans les deux hypothèses, en prenant pour celui du carbone le chiffre de 8000, et celui de 29 000 pour l'hydrogène.

215. *Essai des combustibles minéraux par l'oxyde de plomb.*

— On détermine facilement la proportion du carbone contenue dans un combustible donné, en le mélangeant avec de l'oxyde de plomb, qui, à une haute température, cède son oxygène au carbone, pour le convertir en acide carbonique.

On doit compter que 12^k,92 de plomb sont combinés dans cet oxyde avec un kilogramme d'oxygène, et en multipliant cette quantité par 2,66, on voit que chaque kilogramme de carbone correspond à 34^k,36 de plomb réduit.

Le poids du plomb réduit fait connaître le poids d'oxygène et par suite le poids du carbone avec lequel cet oxygène s'est combiné.

Nous ne connaissons qu'une seule série d'expériences dans lesquelles on ait comparé le pouvoir de vaporisation des charbons aux indications données par ce mode d'analyse.

Ces expériences sont encore dues à Johnston et ont été faites sur trente-sept échantillons, parmi lesquels huit échantillons d'antracites très-purs; on en jugera par cette circonstance

qu'un kilogramme de carbone doit correspondre, comme nous l'avons dit déjà, à 2^k66 d'oxygène.

Nombre des échantillons.	Origine et nature des combustibles.	Pouvoir de vaporisation d'après l'expérience.	Rapports.	Oxygène combiné, par unité de combustible.	Rapports.
8	Anthracites de Pennsylvanie et un échantillon de Virginie..	10,537	1,00	2,5102	1,00
11	Charbons de Maryland et de Pennsylvanie..	10,877	1,03	2,4499	0,98
10	Houilles bitumineuses de Virginie.....	9,523	0,91	2,1765	0,86
8	Houilles bitumineuses	8,710	0,83	2,1413	0,85

L'auteur en conclut que l'analyse par la litharge suffit pour déterminer la valeur calorifique d'un charbon.

Cette conclusion est sujette aux mêmes observations que la précédente.

Lorsque le combustible soumis à ce mode d'essai contient de l'hydrogène, cet hydrogène concourt à réduire l'oxyde de plomb à raison de 8 d'oxygène pour 1 d'hydrogène, tandis que le carbone ne produit le même effet que dans la proportion de 2,66 pour 1.

L'hydrogène compte dans ce mode d'analyse pour 3 de carbone, et les expériences de Johnston conduiraient à penser qu'il faut le compter pour cette proportion dans le calcul de la valeur calorifique du combustible.

On voit que cela reviendrait à prendre 24 000 pour le pouvoir calorifique réel de l'hydrogène, ou, en d'autres termes, que ce serait admettre sur ce point la loi de M. Despretz, d'après laquelle le pouvoir calorifique des diverses substances était considéré comme proportionnel à la quantité d'oxygène introduite dans la combinaison.

214. *Comparaison entre les diverses valeurs obtenues pour le pouvoir calorifique de combustibles carbonisés.* — Les combustibles carbonisés, ne contenant qu'une très-faible portion d'hydrogène, sont ceux pour lesquels il importe d'abord de com-

parer entre eux le pouvoir calorifique calculé et le pouvoir de vaporisation.

En rapprochant les uns des autres les différents chiffres que nous avons obtenus par les deux méthodes, nous trouvons les indications suivantes :

Désignation des combustibles.	Pouvoir calorifique déduit de l'analyse.	Pouvoir calorifique déduit de la vaporisation.	Rapport entre les chiffres des 2 dernières colonnes.
Coke.....	7380	5278	0,715
Charbon de bois....	6400	5154	0,805

Le rapport est beaucoup plus élevé pour le charbon de bois que pour le coke ; cette différence ne saurait toutefois être attribuée uniquement à l'hydrogène, qui entre pour très-peu de chose dans le calcul du pouvoir calorifique du coke ; mais il faut observer, d'un autre côté, que nous avons supposé que ce gaz n'entraît pour rien dans l'analyse de M. Sauvage, la seule que nous possédions.

215. *Comparaison entre les diverses valeurs obtenues pour le pouvoir calorifique des combustibles crus.* — Sans attacher à cette comparaison une trop grande importance, nous chercherons à la faire de la même façon pour les combustibles crus les plus importants, la houille et le bois.

Désignation des combustibles.	Pouvoir calorifique déduit de la composition.	Pouvoir calorifique déduit de la vaporisation.	Rapport entre les chiffres des deux dernières colonnes.
Houille.....	8103	5450 *	0,672
Bois.....	4340	3176 **	0,732

Si l'on voulait tirer quelque conclusion de ces rapprochements, on devrait remarquer que l'utilisation de la chaleur produite par la combustion de la houille est la moins favorable de toutes, ce qui est d'ailleurs confirmé par les faits pratiques ; et que ce sont réellement les combustibles les

* Moyenne des quatre déterminations de M. Brix.

** Moyenne des sept déterminations de M. Brix.

moins hydrogénés, les bois, le coke, le charbon, qui utilisent le mieux les pouvoirs calorifiques des divers éléments qui entrent dans leur composition.

Nous tiendrons compte de cette observation générale lorsque nous évaluerons le pouvoir calorifique réel des différents combustibles.

Il nous faut d'ailleurs observer que les gaz brûlés entraînent toujours une partie considérable de la chaleur dégagée par la combustion : cette chaleur perdue ne peut être représentée dans la production de vapeur, et l'on en doit conclure que l'écart qui paraît exister entre les résultats des deux modes d'évaluation n'est pas aussi considérable en réalité.

Si des expériences de combustion étaient faites avec le calorimètre, elles conduiraient inévitablement, par cette cause, à des chiffres plus rapprochés de ceux qui ont été déduits de la composition, que de ceux qui résultent de la traduction en calories de la quantité d'eau vaporisée.

X **216.** *Observation sur l'action de la vapeur d'eau dans les foyers.*
— Plusieurs inventeurs ont soutenu qu'en lançant un jet de vapeur d'eau sur du charbon en ignition, ils obtenaient une utilisation beaucoup plus grande du combustible, et c'est ici le lieu de remarquer qu'ils se sont étrangement trompés en attribuant à la vapeur d'eau une puissance calorifique quelconque.

S'il est vrai que par cette injection on puisse décomposer, en ses éléments, une petite partie de la vapeur d'eau, dont l'oxygène se combinerait avec le carbone, et qu'ainsi on mette en liberté de l'hydrogène qui forme réellement un nouveau combustible, il ne faut pas oublier que la décomposition de l'eau, en ses éléments, a nécessairement absorbé une quantité de chaleur, précisément égale à celle qui peut résulter de cette dernière combustion, qui ramène absolument les éléments de cette eau dans leur état primitif.

Au point de vue de la quantité de la chaleur développée,

l'emploi de la vapeur ne saurait donc avoir aucun avantage, et nous ne pourrions trop insister sur ce point.

Cependant, il est hors de doute que l'activité du foyer se trouve singulièrement augmentée par une injection de vapeur : la flamme devient beaucoup plus longue, plus persistante, moins fuligineuse, et ce sont sans doute ces différences qui ont fait attribuer à la vapeur une action qui ne saurait lui appartenir. Elles s'expliquent d'ailleurs facilement, soit parce que l'entraînement de l'air serait mécaniquement facilité par l'injection, soit parce que le gaz hydrogène, momentanément mis en liberté par le contact de la vapeur avec le carbone, ne se brûlerait que successivement et jusqu'à une distance assez considérable du foyer.

La pratique qui consisterait à injecter de la vapeur est donc favorable à la combustion ; elle donne une flamme longue aux combustibles qui n'en fournissent que très-peu, mais elle ne saurait en aucun cas permettre de considérer la vapeur d'eau comme apportant par elle-même une production quelconque de chaleur.

217. *Emploi des hydrocarbures liquides pour le chauffage des chaudières à vapeur.* — La découverte récente, faite en Amérique, de gisements énormes d'huile de pétrole, a donné la pensée d'utiliser cette matière au chauffage des chaudières à vapeur. On a fait à cet égard quelques essais, en Amérique, en faisant arriver l'hydrocarbure liquide dans une sorte de grande soucoupe, au milieu de laquelle on injecte de l'air : l'appareil serait facilement rendu automoteur en faisant agir le modérateur de la machine sur le robinet d'introduction, et pour porter la flamme sur une plus grande étendue de surface de chauffe, le fond de la capsule serait cannelé en forme de rigoles, dans chacune desquelles le liquide s'écoulerait au fur et à mesure de son arrivée.

Cette huile de pétrole ne coûte pas plus de 0^f,006 par kilogramme, et à supposer qu'elle puisse développer 12 000 calories, c'est-à-dire tout autant qu'un kilogramme et demi de

charbon, elle remplacerait, à égalité d'avantage, le combustible minéral, si sur le même point le prix de celui-ci s'élevait à 0^{fr}004; c'est à peu près le prix que nous le payons à Paris.

Ce chiffre de 12 000 calories n'est pas absolument arbitraire; il se rapproche beaucoup de celui que nous avons indiqué au n° 146 pour l'essence de térébenthine, qui n'est elle-même qu'un hydrocarbure liquide.

218. Pouvoir calorifique des gaz. — Le calcul, ainsi que nous l'avons dit, doit conduire à l'égard des gaz à un chiffre certain, par cette raison que les chaleurs latentes ne sont point en jeu : il suffira donc d'appliquer, à chacun des gaz, les chiffres déterminés par MM. Favre et Silbermann. C'est ce que nous avons fait pour les combustibles gazeux que nous avons étudiés précédemment.

Il importe toutefois de rappeler que les expérimentateurs, ayant condensé la vapeur d'eau formée, et cette condensation ne s'effectuant pas dans les foyers de l'industrie, il ne faudra employer pour les gaz qui donnent, par leur combustion, naissance à de l'eau, que les coefficients modifiés par les considérations du n° 145.

219. Pouvoir calorifique de l'oxyde de carbone. — Il nous suffira de rappeler à cet égard le chiffre fourni directement par la table : chaque kilogramme d'oxyde de carbone développe 2402 calories; le poids du mètre cube étant 1,262513, nous calculerons le pouvoir calorifique d'un mètre cube du même gaz par le produit $1,262513 \times 2402 = 3033$ calories.

220. Pouvoir calorifique du gaz d'éclairage. — Puisque nous connaissons, d'après le n° 194, la composition en poids d'un kilogramme de gaz d'éclairage, il suffira d'appliquer à chacun des poids élémentaires le coefficient correspondant :

POUVOIR CALORIFIQUE DE 1 KILOGRAMME DE GAZ D'ÉCLAIRAGE.

Composition.	Poids.	Pouvoir calorifique du kilogramme.	Produits.
Hydrogène protocarboné..	0,702	11798	8282,20
Hydrogène bicarboné.....	0,041	11081	454,32
Oxyde de carbone.....	0,144	2402	345,85
Hydrogène.....	0,031	29003	1099,00
Azote.....	0,082	0	0,00
Total.....			10181,40

Nous compterons habituellement 10 000 calories pour la combustion de 1 kilogramme de gaz d'éclairage. Les mêmes moyens d'évaluation nous permettront d'estimer la chaleur dégagée par un mètre cube du même gaz.

POUVOIR CALORIFIQUE DE 1 MÈTRE CUBE DE GAZ D'ÉCLAIRAGE.

Composition du mètre cube.	Pouvoir calorifique.	Produits.	
Hydrogène protocarboné.....	0 ^k ,429	11798	5061,24
Hydrogène bicarboné.....	0,025	11081	277,02
Oxyde de carbone.....	0,088	2402	211,38
Hydrogène.....	0,019	29003	551,06
Azote.....	0,050	0	0,00
Total.....			6100,70

Nous estimerons dans nos calculs le pouvoir calorifique du mètre cube de gaz d'éclairage à 6000 calories seulement.

221. Pouvoir calorifique du gaz des hauts fourneaux. — Nous n'avons à considérer, dans le calcul, que les seuls gaz combustibles, qui sont ici l'oxyde de carbone et l'hydrogène.

Désignation des gaz.	Proportion par kilogramme de gaz.	Pouvoirs calorifiques partiels.	Produits.
Oxyde de carbone...	0 ^k ,13	2402	312
Hydrogène.....	0 ^k ,02	29003	580
Total.....			892

ou environ 900 calories par kilogramme, et aussi par mètre cube, si nous admettons que le poids du mètre cube diffère peu de 1 kilogramme.

Ce chiffre nous montre que le gaz des hauts fourneaux, avec la composition moyenne que nous avons admise, ne produit que la douzième partie de la chaleur dégagée par la combustion du gaz d'éclairage, à égalité de volume, et un septième à égalité de poids.

222. *Tableau résumé des pouvoirs calorifiques des différents combustibles de l'industrie.* — En tenant convenablement compte des indications qui précèdent, nous pourrions former un tableau général de la puissance calorifique des différents genres de combustibles et de leur valeur comparative. Ces chiffres n'ont aucune signification précise, mais ils suffisent pour fixer les idées d'une manière générale, et nous nous en servirons toutes les fois qu'il sera nécessaire de faire des évaluations comparatives.

TABLEAU DES POUVOIRS CALORIFIQUES DES DIVERSES NATURES
DE COMBUSTIBLES.

Désignation des combustibles.	Pouvoir calorifique déduit de la composition.	Pouvoir calorifique déduit de la vaporisation.	Pouvoir calorifique moyen en nombres ronds.	Valeurs compara- tives.
Anthracites.....	7884	5500	7500	0,95
Houilles.....	8103	5450	8000	1,00
Lignites.....	6996	3614	6500	0,80
Tourbes.....	5796	3523	5000	0,60
Tourbes à 0,20 d'eau....	»	»	4000	0,50
Cokes.....	7380	5278	7000	0,90
Tourbe carbonisée.....	»	4933	5000	0,60
Bois sec.....	4340	3176	4000	0,50
Bois, à 20 pour 100 d'eau	»	»	3000	0,38
Charbon de bois.....	6400	5154	6000	0,75
Carbone pur.....	8000	»	8000	1,00
Hydrogène.....	29003	»	29000	3,60
Oxyde de carbone.....	2402	»	2400	0,30
Gaz d'éclairage.....	10181	»	10000	1,25
Gaz des hauts fourneaux.	892	»	900	0,20

Nous compléterons cette table par les résultats de quelques expériences comparatives.

223. *Valeurs relatives des combustibles.* — Il n'est peut-être pas une usine dans laquelle on n'ait eu à employer successi-

vement plusieurs combustibles, dans le but de déterminer et de choisir les conditions économiques les plus satisfaisantes.

Ces comparaisons, pour être faites dans des conditions identiques, n'en sont pas pour cela plus satisfaisantes. Si l'on dispose, par exemple, d'une grille très-grande, à barreaux très-espacés, cette grille fonctionnera très-bien avec de la houille de gros échantillon ou avec de la houille grasse, mais elle ne conviendrait pas le moins du monde pour du coke, surtout si l'on était limité à ne donner à la couche de combustible qu'une faible hauteur; c'est à peine si l'on pourrait l'entretenir en combustion dans ces circonstances.

Les conditions spéciales à telle ou telle nature de combustible sont rarement aussi marquées que nous venons de le supposer, mais cet exemple suffit pour établir que des comparaisons de ce genre n'ont absolument qu'une valeur relative et seulement applicable au cas particulier dans lequel elles ont été faites.

Déjà, dans les expériences de M. Brix et dans les autres séries dont nous avons indiqué les résultats, les expérimentateurs ont eu soin de se placer à l'abri de ces influences extrêmes, mais à supposer que le fourneau fût également propre à la combustion des deux natures de charbon, successivement essayés, la nature même du combustible et les propriétés inhérentes à son mode de combustion pourraient avoir une influence très-grande sur les résultats observés.

224. Pouvoir rayonnant des combustibles. — On a désigné sous le nom de pouvoir rayonnant des combustibles la quantité de chaleur qu'ils émettent directement dans tous les sens pendant toute la durée de leur combustion, abstraction faite autant que possible de la chaleur enlevée par les gaz chauds, qui ne transportent la chaleur que dans la seule direction de leur mouvement.

Les expériences faites par M. Pécelet pour déterminer le pouvoir rayonnant des principaux combustibles, n'ont pu

résoudre la question d'une manière précise, car il est impossible d'isoler, autrement que par la pensée, la totalité de la chaleur emportée par les gaz de la combustion, qui en se refroidissant, dès qu'ils se sont échauffés, au contact du combustible, transmettent immédiatement une partie plus ou moins considérable de leur chaleur à tous les corps environnants.

On peut même dire d'une manière générale que le pouvoir rayonnant des combustibles est tout à fait relatif aux conditions particulières dans lesquelles la combustion s'effectue, et il vaudrait mieux le définir par la mesure de la quantité de chaleur développée, à partir du moment où toute flamme a cessé de se produire; c'est alors seulement que toute la chaleur se développe dans le foyer même, tandis que dans la période précédente, une certaine quantité de chaleur se produit au dehors, et à des distances souvent assez considérables; la flamme ne persiste que quand il y a combustion gazeuse, et cette combustion est, comme toutes les autres, une source de chaleur à la place même où elle se produit.

Cette propriété que possèdent tous les corps d'émettre de la chaleur dans toutes les directions, n'en est pas moins une propriété fondamentale qui est utilisée dans un très-grand nombre de procédés des arts; en ce qui concerne l'utilisation des combustibles, par exemple, l'une de ses applications les plus directes consiste dans la place que l'on fait occuper à une pièce de fer que l'on veut porter au rouge soudant, au milieu même du combustible, sur lequel on injecte, par un soufflet, une grande quantité d'air: si le métal était en contact avec le charbon, dont la totalité n'est jamais en combustion, il pourrait se refroidir à ce contact et il n'acquerrait pas une température aussi élevée que lorsqu'il est placé au centre d'une voûte incandescente, qui rayonne sur lui de tous les points de sa surface intérieure.

Il faut, dans ces circonstances et dans toutes les circonstances analogues, employer un combustible ayant un grand

pouvoir rayonnant, et il ne paraîtra pas inutile que nous fassions connaître les chiffres qui résument à cet égard les appréciations de M. Pécelet ; le pouvoir calorifique total de chaque combustible étant représenté par 1, les pouvoirs rayonnants seraient, d'après ces expériences, exprimés par les fractions suivantes :

Houille.....	0,55
Coke.....	0,55
Bois.....	0,29
Charbon de bois.....	0,55
Tourbe crue.....	0,25
Charbon de tourbe.....	0,48

Les nombres relatifs à la houille et au coke n'ont pas été déterminés directement, mais seulement par comparaison avec le charbon de bois, auquel on attribue un pouvoir rayonnant un peu plus faible.

225. Valeurs comparatives de diverses qualités de houille. —

Nous n'avons rien à ajouter, sous ce rapport, aux indications déjà données sur les expériences de M. Brix et de M. Johnston ; les dispositions de la grille, du fourneau, du générateur lui-même, peuvent exercer une grande influence sur les résultats comparatifs que l'on obtiendra successivement, dans le même foyer, avec deux combustibles différents ; par exemple, si les interstices de la grille sont larges, le même charbon, particulièrement la houille maigre, ne pourra y être utilisée que très-imparfaitement ; si au contraire, les interstices de la grille sont étroits et si, pour obtenir une production déterminée de vapeur, on est obligé de la charger fortement de combustible, la houille grasse ne fournira qu'un effet utile très-peu considérable. Avec le charbon à longue flamme, la chaudière doit se prolonger assez loin pour utiliser la chaleur des gaz, dans toute la longueur, et même au delà de la longueur de cette flamme ; cette houille donnerait donc, toutes circonstances égales d'ailleurs, une moins bonne utilisation qu'un combustible de qualité inférieure, mais à

courte flamme, si l'un et l'autre étaient successivement appliqués au chauffage d'une chaudière trop courte.

Nous pourrions multiplier ces exemples à l'infini; mais ceux qui précèdent suffisent pour faire comprendre déjà tous les soins que réclame une bonne utilisation des combustibles dans les foyers des chaudières à vapeur; par cela même que les différentes espèces de houille diffèrent beaucoup entre elles, par les caractères de leur combustion, il est très-difficile de leur assigner une valeur comparative autre que celle résultant d'expériences calorimétriques directes. Nous nous abstenons donc de toute indication d'expériences, cependant nombreuses, faites dans les ateliers de la plupart des industriels, qui cherchent à se rendre compte des meilleures conditions de marche de leurs appareils.

Depuis les expériences, à grande échelle, faites sur le *Napoléon*, on admet dans la marine impériale que la houille de Cardiff possède un pouvoir de vaporisation supérieur de 12 à 15 pour 100 à celle de Newcastle.

226. *Valeur comparative de la houille et du coke.* — Lorsque la combustion est très-active, les différences dont nous venons de parler, dans le numéro précédent, disparaissent en partie, et qu'ils soient ou non à l'état de flammes, les courants gazeux portent toujours au loin l'action de leur température élevée. C'est en particulier ce qui arrive pour le coke, qui ne brûle avec l'activité convenable qu'au moyen d'un passage très-rapide de l'air nécessaire à sa combustion et qui est toujours disposé en couches plus épaisses sur les grilles. On a fait de nombreuses expériences sur l'emploi comparatif de la houille et du coke, dans les foyers des chaudières à vapeur, et l'on a souvent discuté sur la question de savoir si l'un des combustibles est plus avantageux que l'autre pour cette application.

A la suite d'une communication par laquelle M. Pellatt avait cherché à établir devant la Société des Arts de Londres (1857) que, au point de vue pratique, le petit charbon de

Newcastle n'avait pas un effet calorifique plus grand que celui du coke qui en proviendrait, malgré la perte de poids résultant de la carbonisation, une longue discussion a mis en présence des chiffres d'un grand intérêt et qu'il est bon de faire connaître.

Des expériences ont été faites sur les chaudières de deux machines employées à alimenter des réservoirs hydrauliques, dans lesquels la pression était constante, et où par conséquent le volume d'eau débité pouvait donner une estimation exacte du travail dépensé; les combustibles étaient du Wylam et du Newcastle, tel qu'il est ordinairement employé à Londres pour le service des chaudières à vapeur, et du coke, tel qu'il est habituellement fourni par les usines à gaz de cette capitale. Le premier coûte 19 schellings (23 fr. 75) par tonne, et le coke 10 schellings par chaldron, ce qui, d'après la contenance de cette mesure, qui revient à 12 quintaux, représente 16 schellings 8 deniers (20 fr. 80) par tonne. Voici les résultats de ces expériences, traduits en mesures françaises :

	Charbon.	Coke.
Durée des expériences.....	90 heures.	90 heures.
Nombre de tours des machines.	239027 tours.	184484 tours.
Combustible brûlé.....	14688 kilogr.	12887 kilogr.
Travail en eau élevée.....	829703700 km.	641975600 km.
Travail par kilogramme de combustible.....	56488 km.	49767 km.

Il résulte de ces chiffres, qu'à égalité de poids, le pouvoir calorifique du charbon est à celui du coke dans le rapport de 113 à 100, et qu'à égalité de dépense, le travail produit varie dans le rapport de 100 à 100,90; c'est-à-dire que pour la même dépense, on obtient presque exactement la même quantité de travail. La valeur comparative du coke aurait été plus grande, sans aucun doute, pour du coke de four de bonne qualité; mais il est à remarquer que celle que nous venons de déduire des expériences faites en Angleterre revient précisément au chiffre de 0,89, qui résulte également de la comparaison entre les pouvoirs calorifiques moyens, auxquels nous nous sommes arrêtés pour le coke et pour la houille.

En parlant des combustibles employés pour le service des machines locomotives, nous aurons soin d'indiquer les circonstances par suite desquelles on a successivement recommandé, d'abord le coke, ensuite la houille crue, comme fournissant les résultats les plus économiques.

Le doute n'est plus permis aujourd'hui : les compagnies ne substitueraient pas, d'une manière si générale, la houille au coke, si elles n'y trouvaient un avantage considérable, alors surtout que cette substitution entraîne pour elles l'obligation d'employer certaines précautions, et certains appareils nécessaires pour supprimer les fumées si abondantes de la plupart des combustibles crus.

Si cette question a été si difficile à résoudre d'une manière décisive, il ne faut pas s'étonner de toutes les incertitudes qui existent encore sur la valeur relative des différentes espèces de houille.

227. Valeurs comparatives du bois et de la houille. — Nous avons fait, en juillet 1857, quelques expériences de comparaison sur une locomobile de MM. Cail et Cie; ces expériences ont donné les résultats suivants :

	Consommation par heure et force de cheval.	Rapport des consomma- tions.	Rapport des pouvoirs calorifiques.	Eau vaporisée par kilogr.	Rapport.
Houille de Charleroi.	3,46	0,352	1,000	8,05	1,000
Bois de chêne.....	9,84	1,000	0,352	3,06	0,368

Le bois de chêne, d'après ces expériences, aurait une puissance calorifique égale à 0,368 de celle de la houille. Ce chiffre est inférieur à celui que nous avons admis pour le bois sec; il se rapproche beaucoup de celui qui est relatif aux bois ordinaires, renfermant encore 20 pour 100 d'eau.

228. Résumé des données générales relatives aux combustibles de l'industrie. — Pour compléter les diverses indications que nous avons données sur le pouvoir calorifique des combustibles, nous les accompagnerons du tableau suivant :

TABLEAU GÉNÉRAL DES DONNÉES RELATIVES AUX COMBUSTIBLES DE L'INDUSTRIE.

Désignation des combustibles.	Composition.				Pouvoir calorifique.	Poids d'oxygène nécessaires à la combustion.	Poids d'air nécessaires à la combustion.	Volumes d'air correspondant.	Volumes des gaz brûlés.
	C	H	Matières volatiles.	Cendres.					
Carbone pur.....	1,00				8000	2,66	11,29	8,59	8,59
Anthracite.....	0,90	0,03	0,03	0,04	7500	2,64	11,21	8,67	8,50
Houille.....	0,85	0,05	0,06	0,06	8000	2,66	11,29	8,72	8,75
Lignite.....	0,70	0,05	0,20	0,05	6500	2,26	9,69	7,50	7,26
Tourbe.....	0,55	0,05	0,30	0,10	5000	1,86	7,90	6,11	6,37
Tourbe à 0,20 d'eau.....	0,39	0,04	0,50	0,07	4000	1,49	6,32	4,89	5,09
Coke.....	0,85	0,05	»	0,10	7000	2,26	9,69	7,50	7,30
Tourbe carbonisée.....	0,82	»	»	0,18	5000	2,18	9,25	7,15	7,04
Bois sec.....	0,48	0,06	0,05	0,01	4000	1,75	7,43	5,74	5,57
Bois à 0,20 d'eau.....	0,40	0,05	0,25	0,01	3000	1,40	5,94	4,59	4,48
Charbon de bois.....	0,80	»	0,04	0,07	6000	1,86	7,90	6,11	6,01
Hydrogène.....	»	1,00		»	29000	8,00	33,97	26,26	29,68
Oxyde de carbone.....	0,43	»	0,57	»	2400	0,57	2,42	1,87	2,22
Gaz d'éclairage....	0,62	0,21	0,17	»	10000	2,64	11,22	8,51	11,03
Gaz des hauts fourneaux..	0,06	0,02	0,92	»	900	0,23	0,99	0,76	1,89

ET DE LEUR POUVOIR CALORIFIQUE.

Pour chacun des combustibles de l'industrie, nous avons indiqué tout à la fois leur composition, leur pouvoir calorifique, le volume d'air nécessaire à la combustion, et le volume des gaz brûlés. Ces deux derniers éléments se déduisent de la composition moyenne que nous avons admise, au moyen des tableaux des numéros **158** et **159** relatifs à la combustion des combustibles élémentaires.

Ce tableau devra être consulté dans toutes les questions relatives à la meilleure utilisation des combustibles de l'industrie, dans les foyers des chaudières à vapeur.

CHAPITRE III.

DESCRIPTION GÉNÉRALE DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE CHAUDIÈRES A VAPEUR.

I. Considérations générales.

229. Des chaudières à vapeur. — L'emploi de la vapeur d'eau dans les arts, tant pour le chauffage que pour le service des machines à vapeur, devient chaque jour plus général, et les appareils dans lesquels cette vapeur se produit reçoivent incessamment de nouveaux perfectionnements. Ces appareils sont désignés sous le nom de chaudières à vapeur, et avant de déterminer les meilleures conditions auxquelles elles satisfont aujourd'hui, il est nécessaire de passer sommairement en revue les principaux systèmes, que nous pourrions comparer plus utilement lorsque nous connaîtrons l'ensemble de leurs dispositions.

Dans la revue que nous nous proposons de faire des différents systèmes de chaudières à vapeur, nous ne séparerons pas le vase dans lequel la vapeur doit se former, du foyer dans lequel brûle le combustible qui doit produire la vaporisation, sauf à revenir, avec les détails convenables, sur les éléments les plus importants de la construction de chacune de ces parties, prise individuellement.

La chaudière est toujours un vase métallique, fermé de toutes parts, dans lequel on fait arriver peu à peu l'eau froide qu'il s'agit d'échauffer et de vaporiser, et duquel s'échappe, lorsqu'on en a besoin, la vapeur qui résulte de l'action du feu.

La capacité de la chaudière se trouve entièrement remplie, par une certaine quantité d'eau, à la partie inférieure, et à la partie supérieure par de la vapeur à une pression plus ou moins considérable. Cette portion du volume total réservé à la vapeur est désignée le plus habituellement sous le nom de chambre de vapeur, bien qu'elle ne forme pas pour cela une

chambre spéciale, et qu'elle soit en quelque sorte la continuation de la capacité occupée par l'eau.

Il résulte de cette division que l'eau d'alimentation arrive toujours par la partie inférieure, et que la prise de vapeur est toujours placée à une certaine hauteur au-dessus du niveau du liquide.

Le vase dont il vient d'être question pourra varier de mille manières dans sa forme, mais il devra toujours être placé à proximité d'un foyer; et comme d'ailleurs on a pour objet de convertir l'eau froide en vapeur, c'est vers l'espace occupé par cette eau que l'action du feu devra être dirigée.

La flamme et les produits gazeux se refroidiront à sa surface, les parties les plus voisines du foyer absorberont par radiation une partie de la chaleur développée par le combustible; en un mot, la chaudière absorbera de la chaleur par tous les points de sa surface, qui seront exposés à l'action directe du foyer, ou à celle des gaz de la combustion. Toute la surface ainsi utilisée est ce que l'on appelle la surface de chauffe, que l'on distingue souvent en surface de chauffe directe, ou placée de manière à être directement soumise à l'action du foyer, et en surface indirecte, celle qui est seulement en contact avec les gaz chauds. La surface de chauffe directe est toujours limitée par les dimensions du foyer, et l'on cherche, dans chaque cas, les dispositions les plus convenables pour augmenter la surface de chauffe indirecte, en faisant passer les gaz dans des conduits ou *carneaux* formés, partiellement ou en totalité, avec les parois mêmes de la chaudière, avant de les laisser pénétrer dans la cheminée destinée à les conduire à une certaine hauteur au-dessus du sol.

Le combustible est placé sur une grille dont les interstices laissent passer l'air nécessaire à la combustion; cet air arrive sous la grille en traversant le cendrier; il circule entre les barreaux dont la grille se compose, puis dans les intervalles laissés libres entre les parcelles de combustible; il s'échauffe, entretient et active la combustion, pour agir ensuite, comme nous l'avons vu, sur toute l'étendue de la surface de chauffe.

Il est de règle que les carnaux doivent toujours rester en contre-bas du niveau du liquide dans la chaudière : on n'a pas à craindre alors que la paroi puisse être portée au rouge ou brûlée, accident dont le moindre inconvénient serait une diminution dans la résistance du métal, mais qui exposerait à de terribles dangers : si, par suite de négligences dans l'alimentation, l'eau venait ensuite toucher ces parties rouges, il pourrait se former à ce contact assez de vapeur pour que la chaudière ne résistât pas à sa pression. C'est à cette cause que l'on attribue le plus grand nombre des explosions de chaudières à vapeur.

Les grilles des chaudières à vapeur sont ordinairement horizontales ou un peu inclinées vers l'arrière : de l'étendue de leur surface dépend, pour chaque chaudière, la quantité de combustible brûlé, et nous aurons souvent à rapporter à cette surface la plupart des éléments à considérer dans la construction des chaudières à vapeur.

Nous désignerons par l'expression, *surface libre de la grille*, la superficie, en mètres carrés, qui n'est point occupée par les barreaux, dans l'espace rectangulaire ou circulaire où ces barreaux sont placés.

Le service des chaudières à vapeur se fait en général par des portes dont le seuil est au niveau de la grille. C'est par ces portes que l'on introduit le combustible, qu'on le distribue uniformément dans le foyer, et qu'on retire, quand il en est temps, les scories vitreuses et agglutinées connues sous le nom de *mâchefer*, qui, dans leur état de demi-fusion, se moulent entre les barreaux, en obstruent les intervalles, et doivent être enlevées fréquemment.

Ces indications générales sur le fonctionnement des chaudières à vapeur seront suffisantes pour la description succincte que nous nous proposons de faire des différents systèmes.

250. *Distinction en chaudières à foyer extérieur et chaudières à foyer intérieur.* — La première idée, lorsqu'il s'est agi de produire de la vapeur, a consisté à placer sur le feu le vase con-

tenant l'eau à vaporiser ; mais tout d'abord on a cherché à donner à ce vase et au fourneau la forme la plus convenable pour que la chaleur dégagée par le combustible fût facilement absorbée par le liquide, et pour que les gaz brûlés en emportassent le moins possible.

C'est en cherchant à perfectionner les appareils, sous ce rapport, qu'on s'est trouvé conduit, non plus à mettre la chaudière sur le feu, mais à mettre le feu dans la chaudière, condition évidemment meilleure au point de vue de la bonne utilisation du combustible.

Nous distinguerons les chaudières en chaudières à foyer extérieur et en chaudières à foyer intérieur, cette position du foyer, à l'extérieur ou à l'intérieur, pouvant être considérée comme la circonstance dominante dans l'établissement de ces appareils.

II. Chaudières à foyer extérieur.

251. Chaudières à foyer extérieur. — Pour les chaudières à foyer extérieur, le fourneau est généralement en maçonnerie : les barreaux de la grille reposent sur des cornières scellées entre les briques, et lorsque la chaudière proprement dite est en place on bâtit autour d'elle le reste du fourneau, en utilisant autant que possible ses parois pour former les carnaux de circulation d'air chaud. Dans ces constructions, on doit toujours craindre les passages d'air qui peuvent s'ouvrir soit d'un carneau à l'autre, soit de l'extérieur à l'intérieur, car ces passages peuvent notablement modifier le parcours des gaz et rendre inefficaces certaines portions de la surface de chauffe, qui sans ces détériorations auraient été utilisées ; les rentrées d'air par les fissures ont aussi l'inconvénient de nuire au tirage et de refroidir en pure perte les gaz de la combustion.

Quoi qu'il en soit, les chaudières à foyer extérieur sont de beaucoup les plus répandues dans l'industrie : elles sont d'un entretien et d'une réparation facile : elles durent longtemps, et lorsqu'elles sont convenablement établies et sur-

veillées, elles sont certainement aussi avantageuses qu'aucune autre.

Les premières chaudières étaient hémisphériques, mais elles furent bientôt abandonnées pour les chaudières de Watt, dites en tombeau.

252. Chaudière de Watt. — Cette chaudière est appelée en Angleterre Waggon Shaped boiler. On la désigne en France sous le nom de chaudière en forme de chariot ou en tombeau; elle est représentée en coupe transversale (pl. I, fig. 1). L'eau s'élève dans le corps de chaudière A jusqu'au niveau *aa*. La grille, chargée de combustible, est représentée en B; et les gaz de la combustion, après avoir atteint l'extrémité opposée de la chaudière, étaient généralement ramenés en avant par les deux carneaux latéraux CC ménagés dans la maçonnerie du fourneau. Présentant à la fois une grande surface et un grand volume, elle était parfaitement appropriée à sa destination, alors qu'il suffisait de produire de la vapeur à basse pression; mais elle n'est plus employée dans aucune construction récente, et elle est surtout défectueuse en ce qu'elle ne peut résister à une pression un peu considérable, ni du dedans en dehors, ni du dehors en dedans. Il est à remarquer que le plus grand nombre des explosions a eu lieu sur des chaudières de Watt.

Cette chaudière, avec addition d'un carneau intérieur, est la première qui ait été employée à la navigation.

Dans le relevé fourni récemment par la Société industrielle de Mulhouse, on trouve une indication curieuse sur le remplacement successif de ces chaudières : en janvier 1859, 3 seulement fonctionnaient encore sur les 499 qui ont été établies, à diverses époques, dans le département du Haut-Rhin.

Dans ce système, la chaleur du foyer agissait directement sur le fond concave de la chaudière, et les gaz, après avoir parcouru toute la face inférieure, venaient au contact des parois latérales, dans deux carneaux qui régnaient sur toute la lon-

gueur de la chaudière. Le parcours total des gaz était ainsi de 3 fois la longueur de la chaudière ; mais, dans la plupart des cas, ils ne passaient que dans celui de ces carneaux qui les conduisait le plus directement à la cheminée et leur parcours réel se trouvait réduit au double de la longueur seulement. Les grandes faces planes qui formaient les deux extrémités étaient surtout sujettes à se déformer par la pression, malgré les armatures de fer qui les reliaient, dans certaines circonstances, l'une à l'autre ; les parties concaves du fond et des faces latérales résistaient difficilement aux mêmes actions ; enfin, lorsque après l'arrêt du travail la chaudière se refroidissait et que, par suite de ce refroidissement, la vapeur se condensait à l'intérieur, il arrivait fréquemment que les parois se rapprochaient sous l'action de la pression atmosphérique.

Un grand nombre de ces chaudières ont été construites en fonte ; mais ce mode de construction est complètement abandonné aujourd'hui.

Si, dans ces chaudières, on désigne, par A et par B, la largeur et la hauteur moyenne, l'aire de la section transversale sera AB, et si l'on multiplie cette surface par la longueur L, on aura, pour l'expression du volume V, $V = ABL$.

La surface de chauffe sera, pour le fond, AL, pour les deux demi-faces latérales, BL, et au total $S = (A + B)L$. Dès lors le rapport entre le volume et la surface de chauffe sera exprimé par

$$\frac{V}{S} = \frac{ABL}{(A+B)L} = \frac{AB}{A+B}$$

expression qui, pour une somme donnée $A + B$, aura sa valeur minima lorsque A sera égal à B. Cette proportion est à peu près celle de la pratique et elle correspond à $\frac{V}{S} = \frac{1}{2} A$.

La chaudière n'est remplie d'eau que jusqu'à une certaine hauteur, environ les trois quarts de la hauteur totale ; la capacité de la chaudière est alors occupée, pour plus des trois quarts, par le liquide, et pour un quart seulement par la

vapeur. Cette capacité de la chambre de vapeur serait maintenant tout à fait insuffisante ; il est nécessaire de l'augmenter à mesure que l'on veut obtenir une plus grande régularité de pression dans la chaudière.

255. Chaudière cylindrique de Woolf. — Lorsque Woolf, dans les quinze premières années de ce siècle, introduisit l'usage des machines à deux cylindres, à pression comparativement plus grande, il fut conduit à une forme mieux disposée pour résister aux grands efforts, et il adopta, pour les chaudières, un cylindre horizontal, terminé par deux calottes hémisphériques.

Le feu se plaçait sous le cylindre, et, dans les meilleures dispositions, les gaz étaient dirigés sur l'un des côtés de la chaudière, par une cloison qu'ils contournaient ensuite pour venir chauffer le côté opposé. La surface de chauffe, pour une même largeur de foyer, se trouvait ainsi moindre que dans les chaudières de Watt, dont la forme concave, au sommet des carneaux, était d'ailleurs mieux disposée pour subir l'influence de la radiation.

Cette forme cylindrique est encore celle qui est employée pour les chaudières chauffées par les gaz perdus des hauts fourneaux, dans les usines à fer, et c'est peut-être celle qu'il convient de recommander pour les petits générateurs, destinés aux machines de 3 à 4 chevaux.

Les fonds hémisphériques étaient construits, soit en fonte, soit en quatre segments de tôle réunis à une rondelle centrale. Lorsque le diamètre le permet, on emploie maintenant des fonds emboutis, d'une seule pièce, qui, tout en étant moins convexes, présentent cependant une résistance suffisante pour les plus fortes pressions intérieures, sans qu'il soit nécessaire de les consolider par des armatures spéciales.

Si l'on désigne par D le diamètre de ces chaudières cylindriques, le volume total du cylindre sera

$$\frac{1}{4} \pi D^2 l$$

et celui des deux fonds hémisphériques

$$\frac{1}{6} \pi D^3.$$

On aura donc

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 l + \frac{1}{6} \pi D^3.$$

Dans cette expression l représente la longueur de la partie cylindrique ; et, si l'on désigne par L la longueur totale de la chaudière, avec ses fonds, on aura

$$l = L - D$$

et par suite

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 (L - D) + \frac{1}{6} \pi D^3,$$

et en réduisant les termes semblables,

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L - \frac{1}{12} \pi D^3 = \frac{1}{4} \pi D^2 \left(L - \frac{1}{3} D \right).$$

Sous cette forme on voit que, le dernier facteur $\frac{1}{3} D$ étant toujours très-petit par rapport à L , nous pourrions, dans nos premières évaluations, le négliger et écrire simplement

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L,$$

la surface de chauffe est rigoureusement égale à

$$S = \frac{1}{2} \pi D L,$$

c'est-à-dire à la moitié de celle d'un cylindre de diamètre D et de longueur L .

On a par suite

$$\frac{V}{S} = \frac{1}{2} D,$$

c'est-à-dire le même rapport que pour la chaudière en tombeau, lorsque $A = B$.

En général, dans les chaudières cylindriques, les carneaux s'élèvent jusqu'à la hauteur de l'axe de la chaudière; afin que la paroi qui est en contact avec eux ne soit pas exposée à être brûlée, on exige que l'eau soit toujours maintenue dans la chaudière à 0^m,15 au-dessus des carneaux, et le volume total de la chaudière se trouve alors occupé, pour les deux tiers, c'est-à-dire pour $\frac{1}{6} \pi D^2 L$, par le liquide, et seulement pour $\frac{1}{12} \pi D^2 L$, par la vapeur. Cette proportion est plus favorable que celle de Watt, sous le rapport du volume de la chambre de vapeur.

254. *Chaudières horizontales à deux étages superposés.* — Le principal inconvénient des chaudières cylindriques est de ne pouvoir présenter ni une surface de chauffe suffisante, ni un parcours assez long aux gaz pour qu'ils se dépouillent autant que possible de leur température élevée; d'un autre côté les avantages que les formes cylindriques présentent, au point de vue de la résistance, à une pression intérieure ou à une pression extérieure, ont fait chercher les moyens d'utiliser ces formes, comme annexes d'un corps principal cylindrique. On a, pour les petits appareils, employé avec succès, et l'on établit même encore, des chaudières composées de deux corps cylindriques superposés; le cylindre inférieur A' (Pl. I, fig. 2) est complètement plongé dans la flamme; il est entièrement rempli d'eau, et a une libre communication avec le corps supérieur A, autour duquel circulent les gaz, dans des carneaux C convenablement disposés.

Le parcours total des gaz est $2l$ ou $3l$, selon que les gaz doivent nécessairement circuler tout autour du corps principal supérieur, ou qu'ils l'enveloppent dans un même trajet. Dans les deux cas la surface de chauffe se compose de la surface tout entière du cylindre inférieur, qui sera exprimée par

$2\pi rL$, si r est son rayon et L sa longueur, et la moitié seulement πRL de la surface du cylindre supérieur. On aura donc

$$S = (2\pi r + \pi R)L,$$

ou, en se contentant de remplacer π par le nombre 3,

$$S = (6r + 3R)L.$$

Le cylindre inférieur, dans cette disposition, peut être à peu près de même diamètre que le cylindre supérieur; et, si l'on fait $r = R$, il vient

$$S = 9RL,$$

tandis que, pour un cylindre seul, on aurait $S = 3RL$ de surface de chauffe.

On voit donc combien l'emploi de deux corps de chaudière superposés est favorable sous le rapport de la surface de chauffe.

Le volume total des deux corps de la chaudière est alors

$$V = \frac{1}{2} \pi D^2 L = 6R^2 L,$$

et il vient

$$\frac{V}{S} = \frac{6R^2 L}{9RL} = \frac{2R}{3} = \frac{D}{3}.$$

Pour le même volume V on a donc une surface de chauffe S plus grande qu'avec les chaudières à un seul cylindre. En admettant que le niveau de l'eau soit maintenu à la hauteur de l'axe du cylindre supérieur, les trois quarts du volume total seront occupés par l'eau et un quart seulement, comme dans les chaudières de Watt, par la vapeur.

Souvent on désigne le cylindre inférieur, généralement d'un plus petit diamètre, sous le nom de bouilleur, et nous retrouverons cette dénomination toutes les fois que nous aurons à considérer des cylindres de moindre diamètre que le corps principal, en communication constante avec lui, et destinés à augmenter sa surface de chauffe.

253. *Chaudière cylindrique à bouilleurs inférieurs.* — La surface de chauffe serait encore augmentée si l'on substituait au bouilleur unique, dont il vient d'être parlé, un plus grand nombre de ces tubes annexes qui, placés au même niveau, pourraient recevoir l'action directe du foyer d'une manière avantageuse.

Dans le dispositif qui est représenté planche I, figure 3, la réunion des bouilleurs A' et A'', avec le corps principal de chaudière A, se fait de telle façon que ces bouilleurs puissent être réparés et même changés, sans faire subir au corps de chaudière ni réparations ni déplacements.

Deux bouilleurs forment une disposition très-commode : la flamme lèche leur surface inférieure et revient en s'étalant à la fois et sur leur surface supérieure et sur la partie inférieure du corps de chaudière.

Il est bon que chaque bouilleur soit relié à la chaudière par deux tubulures, afin de faciliter la circulation de l'eau et de la vapeur.

C'est dans les bouilleurs que se forme la plus grande partie des dépôts : on les nettoie par les ouvertures pratiquées à leur extrémité antérieure; les couvercles elliptiques qui ferment ces extrémités sont pressés fortement sur leurs sièges au moyen d'un serrage à boulons, dont nous aurons soin d'indiquer ailleurs la disposition.

Dans les appareils de ce genre, et ils sont de beaucoup les plus répandus pour les chaudières des machines fixes, la surface de chauffe est exprimée par $(4\pi r + \pi R)l$, ou en supposant $r = \frac{R}{2}$, ce qui se rapproche des conditions ordinaires de la pratique, par $3\pi Rl = 9Rl$. Cette surface est la même que celle de la disposition précédente, pour la même longueur et le même rayon; mais on remarquera qu'elle est ici mieux utilisée, en ce qu'elle permet d'employer des carneaux plus petits et qui épousent mieux la forme des parois métalliques de la chaudière.

Le volume total V étant alors $V = \pi R^2 l + 2\pi r^2 l = \frac{9}{2}R^2 l$,

on a $\frac{V}{S} = \frac{9}{18} R = \frac{D}{4}$; à égalité de volume, la surface de chauffe est un peu moindre que dans les dispositions précédentes, mais la partie qui est directement exposée à la radiation est beaucoup plus grande.

Le volume de chaque bouilleur étant ici le quart de celui du corps principal, si l'on admet que l'eau ne s'élève que jusqu'à l'axe de la chaudière, le tiers du volume total serait occupé par la vapeur, les deux autres tiers par le liquide.

Le parcours des gaz est égal à $3l$, si l'on admet, comme précédemment, l'existence de deux carneaux supérieurs successivement parcourus.

Lorsqu'on emploie ainsi plusieurs bouilleurs, il faut avoir soin d'alimenter également dans chacun d'eux, au moyen d'un tuyau bifurqué, comme il est indiqué sur la figure qui représente d'ailleurs un des modes d'assemblage à l'aide desquels on peut isoler chaque bouilleur du corps principal, en cas de réparation. Généralement les tubulures qui réunissent le corps principal aux bouilleurs sont moins longues, les deux bouilleurs sont juxtaposés, et les gaz, dans leur premier parcours, ne touchent que leur surface inférieure : les carneaux de retour de flamme desservent alors tout à la fois la surface de chauffe du corps principal et la partie supérieure des bouilleurs.

Dans l'une et l'autre de ces dispositions, la largeur de la grille diffère peu du diamètre du corps principal, et nous verrons ultérieurement que, pour la facilité du service, sa longueur ne doit pas dépasser $1^m,20$, ou, dans les cas extrêmes, $1^m,50$.

256. *Chaudière cylindrique à trois bouilleurs inférieurs.* — Le diamètre des corps principaux dépasse rarement $1^m,25$ pour les chaudières actuelles, qui fonctionnent toutes à pression élevée, et pour lesquelles l'épaisseur de la tôle deviendrait trop grande si l'on augmentait encore le diamètre.

Avec la disposition à trois bouilleurs, représentée plan-

che I, figure 4, on peut élargir, d'une manière utile, la grille, et par conséquent obtenir des chaudières d'une plus grande puissance, sans trop exagérer leur longueur.

Les chaudières à trois bouilleurs ne sont cependant d'un usage général que dans quelques localités, par exemple, dans le département du Haut-Rhin. Nous aurons à parler fréquemment des essais qui ont été dernièrement faits, sur une chaudière de ce genre, par la Société industrielle de Mulhouse, dans les ateliers de M. Dolfus Mieg et C^{ie}. On peut voir, d'après la figure, que la surface de chauffe totale serait donnée par la formule $S = (6\pi r + \pi R)l = (18r + 3R)l$. Si l'on fait $r = \frac{R}{2}$, on trouve $S = 12Rl$, c'est-à-dire une surface de chauffe plus grande qu'avec les autres dispositions, le parcours des gaz étant toujours égal à $3l$.

On aura en même temps

$$V = 3R^2L + 3 \times 3r^2L = \frac{21}{4} R^2L,$$

et par suite

$$\frac{V}{S} = \frac{D}{4,6}.$$

Ce qui montre que la surface de chauffe est un peu diminuée, pour le même volume total, si l'on compare cette disposition à la précédente.

L'eau occupe alors les $\frac{3}{5}$ du volume total, et les $\frac{2}{5}$ restant forment, pour la chambre de vapeur, une capacité très-convenable.

On a singulièrement abusé de la chaudière à trois bouilleurs inférieurs, sans se rendre compte que la largeur de la grille, et par conséquent la quantité de combustible brûlé, augmentait en même temps dans une proportion plus grande, et qu'ainsi la disposition qui nous occupe, tout en augmentant les dimensions absolues de la surface de chauffe, ne fait que la diminuer par rapport à la chaleur dégagée, et

peut, par conséquent, contribuer à rendre cette surface de chauffe insuffisante.

On produira plus de vapeur avec trois bouilleurs qu'avec deux, mais on obtiendra une moins bonne utilisation du combustible. Deux chaudières à deux bouilleurs seraient, dans la plupart des cas, préférables à une seule chaudière ainsi disposée.

257. *Chaudière cylindrique à bouilleurs latéraux.* — Un habile constructeur, M. Farcot, a surtout contribué à répandre l'emploi des bouilleurs suivant une disposition essentiellement différente. Tandis que les bouilleurs que nous avons considérés jusqu'ici sont placés au-dessous de la chaudière et reçoivent directement l'action du feu, ceux de M. Farcot, que nous avons représentés (pl. I, fig. 5), sont placés les uns au-dessus des autres à côté de la chaudière A, formée, à la manière de Woolf, d'un simple cylindre horizontal.

Le bouilleur inférieur est celui dans lequel se fait l'alimentation, et cette eau passe de l'un à l'autre bouilleur, de bas en haut, pour être ensuite déversée dans le corps de cylindre principal, après s'être chauffée par son séjour dans les bouilleurs; afin de rendre cet échauffement considérable, l'eau est obligée de parcourir chacun des bouilleurs d'un bout à l'autre; les gaz cheminent en sens contraire; après avoir agi sur la chaudière, ils passent successivement dans les carneaux qui entourent les bouilleurs et n'arrivent à la cheminée qu'après avoir ainsi parcouru toute la longueur du bouilleur inférieur. On voit, par cette disposition systématique, que les gaz les plus chauds sont en contact avec les parois des vases qui contiennent l'eau la plus chaude, et qu'aussi l'eau la plus froide est placée de manière à compléter le refroidissement des gaz chauds.

Cette disposition est excellente, et elle permet d'augmenter de beaucoup la surface de chauffe. M. Farcot a commencé par employer quatre de ces bouilleurs, auquel cas

surface de chauffe totale était donnée par la formule $S = (4 \times 2\pi r + \pi R)l$, qui, dans le cas de $r = \frac{1}{2}R$, devient $S = 15Rl$, avec un parcours égal à $5l$.

L'expérience a conduit à diminuer le nombre des bouilleurs; et, dans la plupart des constructions actuelles, on se borne à en employer deux, auquel cas la surface de chauffe ne s'élève plus, quand on la calcule de la même manière que précédemment, qu'à $9Rl$ comme dans les chaudières à bouilleurs inférieurs.

Nous aurons à indiquer ultérieurement quelques-uns des résultats d'expériences obtenus avec des chaudières de ce genre, soit à trois bouilleurs, comme celles du Conservatoire impérial des Arts et Métiers, soit à deux bouilleurs seulement, comme celle qui a été plus récemment installée à l'atelier de la Capsulerie de guerre.

L'emploi des bouilleurs latéraux se généralise : le remplacement et le nettoyage de ces bouilleurs peuvent se faire facilement, et ils présentent, au point de vue des incrustations, des avantages incontestables. La presque totalité des dépôts se fait dans les bouilleurs, sous des états et avec une composition particulière pour chacun d'eux, et la chaudière, en restant propre, est moins sujette aux coups de feu. Quant à la construction du foyer, on voit, par la coupe longitudinale de notre figure 5, qu'elle est extrêmement simple.

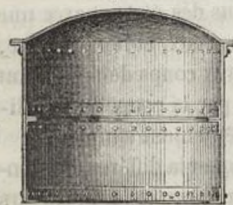
Il importe, dès à présent, de remarquer la différence essentielle qui existe entre ces bouilleurs latéraux et les bouilleurs ordinaires; dans ceux-ci l'eau d'alimentation est injectée dans une capacité qui fait partie de la chaudière même : elle refroidit la masse d'eau qui y est déjà contenue; dans les bouilleurs latéraux, au contraire, l'eau conserve dans chacune des parties de son parcours une température qui lui est pour ainsi dire propre, et tout à fait indépendante de celle de la chaudière. Ce caractère est celui qui appartient aux appareils accessoires que l'on désigne habituellement sous le nom de réchauffeurs, et qui sont destinés à utiliser les

chaleurs perdues des gaz brûlés ou de la vapeur, après son action, pour échauffer, dans une certaine mesure, l'eau d'alimentation, avant son introduction dans la chaudière même.

Ces derniers appareils ont repris faveur depuis les dernières expériences de la Société industrielle de Mulhouse, et il est bon de remarquer que les bouilleurs latéraux sont de véritables réchauffeurs.

238. Chaudières verticales. — Les chaudières cylindriques horizontales ne sont pas seules employées à la production de la vapeur, mais celles qui sont formées d'un cylindre vertical n'ont jamais été employées qu'en très-petites dimensions. Elles présentent cependant une facilité d'installation qui doit les faire rechercher dans les conditions où l'on tient plus à la simplicité de l'appareil qu'à l'économie du combustible, bien qu'avec les combustibles à longue flamme, comme le bois, on puisse cependant obtenir une vaporisation très-avantageuse. Elles seraient, sous cette forme, très-convenables pour les travaux d'exploitation des forêts.

Fig. 15.



Plusieurs chaudières, disposées comme l'indique la figure 15 ci-jointe, ont été, avec avantage, transportées, pour être installées dans des lieux d'un accès difficile, et pour lesquels il était nécessaire que l'appareil tout entier pût se fractionner en parties ne pesant

pas plus de 60 kilogrammes.

Le corps cylindrique était formé de tronçons de 0^m,40 ou 0^m,50 de hauteur, assemblés par des cornières. Les cornières intérieures étaient protégées contre l'action du feu par l'eau qui les baignait, et les joints ont parfaitement résisté, tandis qu'avec des cornières extérieures ils auraient été mis immédiatement hors de service.

M. Flaud a profité dernièrement de la simplicité de la chaudière verticale, pour l'appliquer à ses petites machines

locomobiles, mais dans des conditions tout à fait différentes ; les mêmes dispositions sont d'ailleurs communes à un grand nombre de constructeurs, pour les machines locomobiles de 1 à 6 chevaux.

259. *Chaudières à bouilleurs verticaux de M. Beslay.* — Pour pouvoir employer, dans les chaudières de machines fixes, le coke, qui ne dégage pas de fumée, et qui ne peut se brûler convenablement qu'en couches très-épaisses, M. Beslay a construit des chaudières à bouilleurs verticaux (pl. I, fig. 6), dont les extrémités inférieures étaient pour ainsi dire engagées jusque dans la masse du combustible en ignition. Ces bouilleurs étaient en cuivre ; et, pour faciliter le nettoyage et la réparation des extrémités les plus exposées au feu, ce constructeur avait été conduit à rendre le bout des bouilleurs indépendant de la partie supérieure, et à l'y fixer par un système analogue à celui qui est adopté pour l'assemblage des bouilleurs horizontaux ordinaires.

La face du joint *m* était rodée, et s'appliquait contre son siège, également rodé, au moyen d'un grand boulon *n* dont le point d'appui se prenait sur une douille *p*, soutenue par deux petites jambes de force *q*, dans l'intérieur du bouilleur. Ce mode d'assemblage très-ingénieux résistait très-bien à l'action du feu, et l'on a construit un grand nombre de ces chaudières, quelques-unes portant jusqu'à 30 de ces bouilleurs, disposés sur deux rangs parallèles à l'axe du cylindre, sur lequel tous les bouilleurs étaient assemblés.

Les portes des foyers étaient alors aux deux bouts du fourneau et à une hauteur suffisante, au-dessus des grilles, pour employer soit du coke, soit de l'anthracite.

La chaudière de M. Beslay a fait, en 1839, l'objet d'un rapport de M. Savary à l'Académie des sciences, rapport dans lequel on peut lire que, dans une expérience de quelques heures, chaque kilogramme de coke a vaporisé 7^k,1 d'eau, dont la température initiale était de 8°.

Si l'administration, dans le but de supprimer la fumée,

avait, comme on l'a proposé à une certaine époque, imposé aux propriétaires de machines à vapeur de ne brûler que du coke, la chaudière à bouilleurs verticaux aurait facilité le nettoyage, que l'emploi d'un condenseur à surface rendait d'ailleurs très-rarement nécessaire dans les appareils de M. Beslay. Aujourd'hui l'on ne s'occupe plus de ces chaudières, et l'on a trouvé un grand nombre de moyens moins exclusifs pour brûler, sans fumée, la houille ordinaire.

240. *Chaudières mixtes, à foyer extérieur et à carneaux intérieurs.* — Nous avons vu qu'il était difficile, avec les différentes dispositions décrites jusqu'ici, d'obtenir une grande surface de chauffe, sans augmenter démesurément la longueur des chaudières, et cependant cette surface est nécessaire pour refroidir suffisamment les gaz de la combustion, qui sans cela entraîneraient dans la cheminée, et en pure perte, des quantités de chaleur considérables.

Afin d'arriver aussi complètement que possible à leur refroidissement, on a fréquemment fait passer ces gaz dans des canaux plus ou moins nombreux ménagés dans l'intérieur du corps de la chaudière même. Les appareils de ce genre ne peuvent être réellement utiles qu'à la condition d'apporter une augmentation notable de surface de chauffe, et l'on n'y parvient qu'avec des corps cylindriques traversés par de nombreux tubes de fumée.

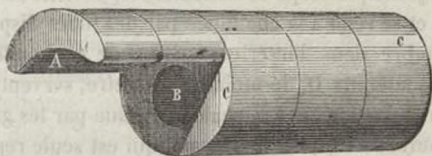
Voici quelques exemples de ces dispositions auxquelles cependant il ne conviendra d'avoir recours que dans des circonstances exceptionnelles.

241. *Chaudière de Butterley.* — La figure 16 ci-jointe représente un type de chaudière très-employé en Angleterre et qui fournit d'assez bons résultats : la flamme, après avoir rayonné sur l'avant-corps A de cette chaudière, passe dans un carneau intérieur B, du corps cylindrique C, pour circuler ensuite dans des carneaux extérieurs analogues à ceux des chaudières à bouilleurs.

En France cette disposition n'a été appliquée que très-rare-

ment, et il faut reconnaître que cette indifférence est bien justifiée : l'avant-corps est une véritable chaudière de Watt, qui présente les mêmes inconvénients tout en n'offrant pas, à cause de ses dimensions restreintes, les mêmes dangers ; la

Fig. 16.



réunion de cet avant-corps avec le corps principal n'offre pas non plus la sécurité nécessaire, et le peu de surface que l'on gagne par le carneau intérieur n'est pas une compensation suffisante pour détruire ces objections. En effet, cette surface supplémentaire est mesurée par $2\pi r l = 3 R l$, si l'on suppose que le rayon moyen du carneau intérieur soit égal à la moitié du rayon du cylindre principal, et le moindre bouilleur permettrait d'augmenter davantage la surface de chauffe totale.

242. Chaudières Farcot à bouilleurs de retour de flamme. —

M. Farcot a construit en 1856 des chaudières de bateau, qui devaient fonctionner à six atmosphères et qui étaient formées de trois cylindres parallèles. La planche I, figure 7, représente une coupe transversale de ces trois cylindres : le cylindre principal était à la partie supérieure ; les deux autres étaient placés latéralement, à un niveau un peu inférieur, et ils étaient traversés par de nombreux tubes chargés de refroidir la fumée, après son action sur les surfaces extérieures. Nous reviendrons ultérieurement, avec les détails convenables, sur l'emploi des tubes de petit diamètre dans les chaudières à vapeur, et nous ne l'indiquons ici que comme formant une annexe d'un corps principal de forme cylindrique, avec foyer extérieur.

245. Chaudière à bouilleurs de retour de flamme de M. Prou-

vost. — La chaudière de M. Prouvost présente des dispositions analogues : nous la représentons avec détails (pl. I, fig. 8), parce qu'elle a figuré au concours de la Société de Mulhouse et qu'elle nous donnera lieu de faire quelques observations importantes. La flamme, après avoir agi sur le principal corps de chaudière A, revient autour du bouilleur, et se rend à la cheminée par des tubes disposés en grand nombre dans l'intérieur même de ce bouilleur A. Deux tubes latéraux D, de moindre diamètre, servent à l'alimentation et participent à la chaleur perdue par les gaz dans leur parcours. La coupe transversale, qui est seule représentée par la figure, permet de comprendre ce mode de fonctionnement. La surface de chauffe peut, dans toutes les dispositions analogues, être élevée autant qu'on le désire, mais la complication de ces appareils ne laisse pas que d'être un grand obstacle à leur emploi.

244. *Chaudières à bouilleurs de retour de fumée de MM. Holcroft et Joyle.* — La disposition représentée (pl. I, fig. 9) est certainement préférable à celle de M. Prouvost, en ce que le rayonnement du foyer est complètement utilisé et en ce que les tubes des bouilleurs suffiront toujours pour donner une surface de chauffe surabondante.

La chaleur qui se dégage du combustible rayonne directement sur les parois de trois corps cylindriques, et son action est la plus efficace sur le cylindre supérieur : la fumée, déjà refroidie dans son premier trajet, revient par l'intérieur des tubes, distribués dans les deux cylindres latéraux, avant de se perdre dans la cheminée.

L'eau est entretenue au même niveau *aa* dans les trois cylindres, et l'on voit que les tubes de retour de fumée n'existent que jusqu'à une certaine hauteur au-dessous de ce niveau.

L'eau arrive dans chacun des corps par un tuyau commun placé à la partie inférieure qui communique, par trois tubulures spéciales, avec les trois corps de chaudières. Les cylindres latéraux sont surmontés chacun d'un dôme de vapeur

qui communique avec la chambre de vapeur du corps principal, et qui en augmente un peu la capacité. La complication de la construction est encore plus grande que pour la chaudière précédente, et nous verrons que, lorsqu'on emploie des tubes de fumée, on arrive facilement à des dispositions plus simples et tout aussi efficaces.

245. *Chaudière fixe de MM. Molinos et Pronnier.* — MM. Molinos et Pronnier, pour le concours de la Société industrielle de Mulhouse, ont adopté une disposition moins complexe, mais dont l'agencement est peut-être d'une réalisation plus difficile.

Leur chaudière cylindrique A, pl. II, fig. 1, est reliée par une large tubulure à une chaudière inférieure tubulaire A', présentant une grande surface de chauffe, et destinée à refroidir autant que possible les gaz de la combustion.

On sait d'ailleurs que ces habiles ingénieurs insufflent dans le foyer un certain volume d'air qui, en se mélangeant avec les premiers produits de la distillation de la houille, aident beaucoup à une utilisation plus complète du combustible; c'est là l'objet des douze tubes R qui débouchent latéralement dans la flamme et en augmentent le développement. Le mur en briques, élevé derrière la grille, oblige les gaz mélangés à aller frapper les parois de la chaudière principale, avant de redescendre pour pénétrer dans les tubes.

C'est avec cette disposition que MM. Molinos et Pronnier sont parvenus à prévenir, d'une manière complète, la fumée, tout en obtenant une vaporisation convenable, par chaque kilogramme de combustible. L'emploi du ventilateur insufflant fait, de cet appareil, un système tout particulier, et dont nous aurons à indiquer les effets avec plus de détails.

III. Chaudières à foyer intérieur.

246. *Chaudières à foyer intérieur.* — En plaçant le foyer dans l'intérieur même de la chaudière, on évite d'échauffer

inutilement une maçonnerie qui absorbe nécessairement une certaine quantité de chaleur, et l'on obtient encore cet avantage que toutes les parois étant métalliques, il suffit de les faire doubles et de placer entre elles de l'eau toujours renouvelée, pour remplacer la surface absorbante des briques par une surface de chauffe vraiment utile. Il n'est pas jusqu'à la chaleur, habituellement perdue, des cendres et des escarbilles qui ne serve, dans une certaine mesure, à l'effet général, si l'on a de même placé une lame d'eau sous le cendrier.

On risque cependant, dans des dispositions semblables, de ne pas donner à la chambre de combustion et aux cendriers des dimensions suffisantes pour la libre circulation de l'air; on doit craindre que les portions de la chaudière qui sont immédiatement en contact avec la grille, particulièrement sur les deux côtés du foyer, ne soient rapidement mises hors de service, si une accumulation de cendres à l'extérieur, et des incrustations au dedans réunissent à la fois cette double circonstance d'un défaut de courant d'air en ces points du foyer, et d'un défaut de transmission de la chaleur au travers des dépôts déjà formés à l'intérieur. Des accidents dus à cette cause se sont fréquemment rencontrés dans les anciennes chaudières de bateaux; et, au point de vue de la bonne utilisation du combustible, on ne saurait trop veiller à ce que l'espace libre au-dessus du foyer, cet espace que nous avons désigné sous le nom de chambre de combustion, soit assez vaste pour que la flamme puisse s'y développer, sans s'éteindre au contact des parois relativement froides qui la limitent. C'est souvent par cette cause que les feux fument outre mesure et qu'une portion des gaz combustibles, non brûlés, peut s'échapper dans l'atmosphère, sans produire aucun effet utile.

247. *Chaudière cylindrique à foyer intérieur.* — On a dès longtemps employé des chaudières cylindriques dans lesquelles le foyer se compose d'un tube intérieur qui forme

en même temps la surface de chauffe; mais cette surface serait insuffisante si l'on n'utilisait, par des carneaux extérieurs, l'enveloppe de la chaudière, et c'est avec cette dernière disposition que la plupart des chaudières cylindriques sont employées en Angleterre.

Pour obtenir une bonne utilisation de ces chaudières, on est donc obligé de construire des fourneaux en maçonnerie, et leurs avantages sont alors très-contestables; le tube intérieur, qui est nécessairement excentré par rapport à l'enveloppe, pour qu'aucune partie de sa paroi ne puisse être découverte, est forcément d'un petit diamètre: le foyer est très-rétréci et l'on ne saurait recommander cette disposition, à l'égal de celle des chaudières à bouilleurs que l'on préfère en France.

Les extrémités de la chaudière cylindrique à foyer extérieur, sont nécessairement planes, mais le tube qui contient le foyer et qui est solidement relié aux deux fonds, forme une armature suffisante pour donner à ce système toute la résistance nécessaire, à laquelle on ajoute d'ailleurs par des équerres qui relient, à la partie supérieure, les fonds au fût cylindrique.

Nous verrons bientôt que la surface de chauffe nécessaire est quelquefois obtenue en Angleterre par une série de tubes placés dans le même cylindre que le foyer, et à l'extrémité opposée de ce cylindre. C'est cette disposition que l'on désigne le plus ordinairement sous le nom de chaudières tubulaires. Pour pouvoir donner à ce cylindre un diamètre suffisant, on le construit maintenant, pl. II, fig. 2, par tronçons de cinquante centimètres de longueur, assemblés entre eux par des boulons, avec interposition de rondelles et de brides, qui donnent au système une grande rigidité.

MM. Adamson et C^e, de Manchester, construisent ces chaudières en tôle d'acier, et le choix de cette matière ajoute encore à leur résistance. Dans les chaudières de M. Adamson, la tôle est d'ailleurs repliée, aux extrémités de chaque tronçon, de manière à former elle-même les brides nécessaires à

l'assemblage : on ne saurait obtenir ce résultat qu'avec des tôles d'excellente qualité.

On peut donner au tube intérieur un diamètre maximum de 0,7 du diamètre extérieur : la surface de chauffe est alors $2\pi rl = 1,4 \pi Rl$, ce qui fait voir dans quelle proportion elle est inférieure, même à celle d'une simple chaudière cylindrique à foyer extérieur, de même rayon R.

Quant au volume total de la chaudière il se réduit à $\pi R^2 l - \pi r^2 l = 3l(R^2 - 0,49 R^2) = 1,50 R^2 l$; ce volume total est à peine égal au seul volume de l'eau dans la chaudière cylindrique simple.

243. Chaudières cylindriques à deux foyers intérieurs. — M. Fairbairn, à l'égard d'une autre disposition, qui dérive de la précédente et qui est représentée, pl. II, fig. 3, s'exprime ainsi page 36, de ses *Useful informations for Engineers* : « Dans ces dernières années, une amélioration beaucoup plus grande a été introduite dans la construction des chaudières, par l'emploi des deux tubes BB, de la chaudière cylindrique à double foyer, qui est maintenant d'un usage général et qui s'est substituée à tous les autres systèmes. Cette chaudière consiste en un cylindre de 1^m,50 à 2^m de diamètre, avec deux tubes intérieurs de même longueur; ils sont parfaitement cylindriques et assez grands pour contenir chacun un foyer. Cette chaudière est la plus simple et peut-être la meilleure de toutes celles qui ont été construites jusqu'ici. Elle présente une grande surface de chauffe et les tubes, qui sont rivés aux deux fonds plats de la chaudière, augmentent considérablement la résistance de ces faces et donnent une complète sécurité. » M. Fairbairn ajoute : « Cette disposition permet d'employer le procédé des chargements alternatifs, dans les deux foyers, si essentiel pour obtenir une combustion parfaite et la suppression de la fumée. »

Ce système de générateurs n'est pas employé en France, et nous ne saurions partager l'opinion favorable qu'émet M. Fairbairn à son égard : nous pensons que cet éminent

ingénieur attache trop d'importance à la faculté d'activer successivement le feu dans les deux foyers, et cette méthode fût-elle entièrement efficace, nous ne trouverions encore, dans ce système, qu'un seul parcours de la fumée, et qu'une surface de chauffe insuffisante pour la bonne utilisation du combustible.

Si l'on désigne par r le rayon de l'un des tubes, leur surface réunie sera $2 \times 2\pi r l = 4 \pi r l$; il est impossible de donner à r plus du quart de R , ce qui réduit cette expression à $\frac{12 R l}{4} = 3 R l$, c'est-à-dire le double de ce que l'on obtient

avec une chaudière simplement cylindrique, mais moitié moins que pour la chaudière à bouilleur de même rayon.

Le volume d'eau est plus grand que dans la chaudière à un foyer intérieur, mais beaucoup moindre que dans celles à bouilleurs. La disposition de M. Fairbairn conduit d'ailleurs à des diamètres qui accroissent notablement les chances d'accidents, puisqu'en réduisant r à $0^m,25$ on arrive nécessairement à un diamètre $R = 2 \times 4r = 2$ mètres. Les prescriptions, qui sont réglementaires en France pour la construction des chaudières à vapeur, ne permettent d'atteindre ces dimensions qu'avec de grandes épaisseurs de tôle, toujours nuisibles à la transmission de la chaleur.

249. *Chaudières mixtes à foyer intérieur et à carneaux extérieurs.* — Les mêmes objections ne sauraient s'appliquer aux divers systèmes de chaudières à foyers intérieurs, lorsqu'elles sont enfermées dans une maçonnerie, car on parvient de cette façon à utiliser la surface des tubes intérieurs et la surface extérieure de la chaudière.

Si nous désignons toujours par R le rayon du cylindre extérieur et par r celui des tubes, la surface de chauffe totale sera comme précédemment $S = (4\pi r + \pi R) l$.

Mais ici r ne peut guère être plus grand que $\frac{R}{4}$ ce qui donne $S = (4\pi \frac{R}{4} + \pi R) l = (3 R + 3 R) l = 6 R l$: elle est

encore moindre que dans les chaudières à deux bouilleurs, mais en même temps la largeur de la grille est réduite dans la proportion de $2R$ à $4r = \frac{4R}{4}$, on a la moitié de sa largeur ordinaire.

Il en résulte donc que la surface de chauffe est réduite dans une moindre proportion que la surface de grille, et qu'ainsi le système auquel M. Fairbairn accorde la préférence est avec cette modification réellement satisfaisant.

On remarquera d'ailleurs que les gaz brûlés passent sous la chaudière, et que les gaz les plus chauds tendant toujours à s'élever, ce sont eux qui seront le plus en contact avec la surface extérieure, qui sera par cela même d'autant mieux utilisée.

Malgré ces avantages nous ne saurions toutefois nous prononcer encore en faveur du système anglais, qui doit nécessairement donner lieu à de plus fréquentes et à de plus importantes réparations que nos vieilles chaudières à bouilleurs, dans lesquelles les tubes seuls fatiguent, et peuvent être si rapidement remplacés. La forme anglaise de son côté est moins volumineuse et peut être plus commodément installée, dans des localités où il serait difficile de trouver la place nécessaire pour la construction d'un fourneau de chaudière à bouilleurs.

250. Chaudières verticales à foyer intérieur. — On a souvent cherché à construire des chaudières verticales à foyer intérieur; elles ont toutes la forme d'un cylindre creux dans l'axe duquel se trouve le centre de la grille. Ce sont la plupart du temps les seules surfaces intérieures qui agissent comme surfaces de chauffe; et, afin de leur donner une étendue suffisante, il est nécessaire que la chaudière ait une très-grande hauteur et que la circulation de la fumée soit gênée par des obstacles transversaux.

La planche II (fig. 4) représente une des chaudières les plus simples de ce genre, telles que les construisait M. Beslay, pour brûler de la houille.

Le foyer B est tout entier contenu dans l'intérieur du cylindre, et l'introduction du combustible se fait au moyen d'une porte *b* pratiquée dans les deux parois, au travers de la lame d'eau qui enveloppe la capacité intérieure. Afin d'augmenter la surface de chauffe, les gaz brûlés, après avoir parcouru, jusqu'à une certaine hauteur, l'intérieur du cylindre, rencontrent une paroi formant plafond, qui est percée de six orifices, donnant naissance à autant de tuyaux *l*, qui traversent l'eau jusqu'au sommet de la chaudière; celle-ci est surélevée au centre par un dôme de vapeur.

Pour rendre le système plus rigide, plutôt encore que pour augmenter la surface de chauffe, des tubes *m*, formant entre-toises, sont disposés à diverses hauteurs, suivant des diamètres perpendiculaires à l'axe, et suffisent pour rendre le système parfaitement résistant.

A l'extérieur, le cylindre est garni d'une enveloppe en bois *p*, destinée à éviter le refroidissement par le contact de l'air : l'appareil se suffit à lui-même et forme un générateur tout installé, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à aucune maçonnerie.

Pour des vaporisations plus considérables, on était obligé de multiplier les lames d'eau et par conséquent les cylindres concentriques, et la fumée se subdivisait entre tous les carreaux ainsi formés.

Fort bien entendus au point de vue de la construction, ces appareils ne pourraient convenir que pour des eaux non incrustantes, telles que M. Beslay les employait avec ses condenseurs par surface, qui lui permettaient de se servir de l'eau distillée provenant de la condensation de la vapeur; des regards de nettoyage étaient d'ailleurs disposés, dans le haut et dans le bas de l'enveloppe extérieure, dans les positions les plus convenables.

Ces mêmes tubes bouilleurs, transversaux, sont maintenant employés, au nombre de quatre, dans les chaudières à foyer intérieur d'Adamson, dont nous avons parlé précédemment,

pl. II, fig. 2, et où cependant leur présence n'est pas aussi nécessaire à la consolidation générale.

251. *Chaudières à foyer intérieur et à galeries de fumée.* —

Il est si vrai que toutes ces dispositions sont insuffisantes pour fournir la surface de chauffe nécessaire, que dans les premières chaudières de bateaux, Watt n'a pu éviter l'emploi des carnaux extérieurs.

Cette nécessité de carnaux de retour de flamme s'est traduite partout, sous des formes différentes, et nous voyons que là où elle s'est davantage fait sentir, parce que l'on avait à brûler des combustibles à longue flamme, du bois, comme en Amérique, on s'est trouvé conduit à employer de longues canalisations de fumée, séparées par des lames d'eau de faible épaisseur, pour diminuer autant que possible le poids mort de l'appareil.

La chaudière de l'Oseola, pl. II, fig. 5, décrite par M. Michel Chevalier, dans son bel ouvrage sur les machines de navigation en Amérique, indique bien quel était le problème à résoudre et elle explique d'ailleurs la construction qui a été, pendant longtemps, adoptée dans les chaudières de bateaux, sous le nom de chaudières à galeries.

252. *Chaudière à bouilleurs supérieurs servant de retour de flamme.* — Les mêmes motifs ont donné naissance à la disposition qui est représentée, pl. II, fig. 6, également empruntée au même ouvrage; c'est celle d'un ancien bateau qui s'appelait le *Merrimack*.

On y voit, sur une même ligne, un certain nombre de foyers BB, placés dans des chaudières en tôle; la fumée revient en avant par des tubes elliptiques, placés dans l'intérieur d'un certain nombre de bouilleurs horizontaux, et qui fournissent ainsi un supplément de surface de chauffe considérable.

Cette chaudière peut être considérée comme un des premiers types de celles que l'on désigne aujourd'hui sous le nom de chaudières à retour de flamme

235. Chaudières dites à galeries. — Dès les premiers développements de la navigation à vapeur, on a reconnu qu'il était nécessaire d'avoir recours aux chaudières à foyer intérieur, et l'on a réuni plusieurs foyers sur une même ligne, en les séparant les uns des autres par des cloisons creuses en tôle, qui formaient comme des appendices de la chaudière; et, afin de multiplier la surface de chauffe, sous un volume donné, les constructeurs se sont à l'envi appliqués à construire les labyrinthes les plus compliqués, dans les chaudières dites à galeries, où la fumée faisait mille évolutions avant d'arriver à une cheminée centrale de grand diamètre.

Les carneaux, dans ces dispositions, étaient beaucoup plus larges que les murs d'eau compris entre leurs sinuosités; les coudes nombreux nuisaient d'une part au tirage, les courants de gaz s'entrecoupaient les uns les autres, et les angles de la caisse à eau se couvraient si rapidement d'abondants dépôts que la chaudière était bientôt hors de service.

La chaudière du *Sphinx*, représentée en plan et en coupe verticale par les figures 7 et 8, planche II, peut être considérée comme un type simple de ce mode de construction, abandonné en France, longtemps après l'avoir été en Angleterre et en Amérique.

Les chaudières à galeries participent d'ailleurs à tous les défauts de celle de Watt, au point de vue de l'absence de résistance et des dangers d'explosion.

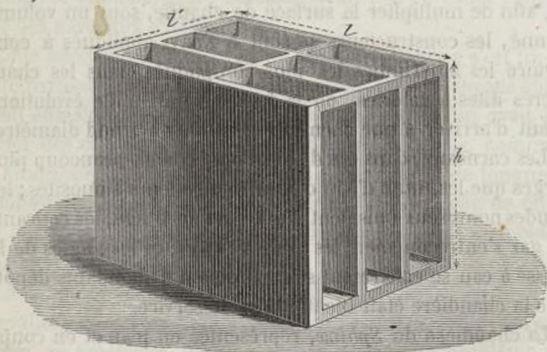
Il est assez difficile de déterminer d'une manière générale les surfaces de chauffe des chaudières à galeries, mais la figure 17, ci-jointe, peut cependant indiquer comment cette surface se trouve augmentée, par le nombre des compartiments entre lesquels se décompose le parallépipède formé par chaque corps de chaudière.

Aucune partie de la surface de chauffe ne peut s'élever jusqu'au niveau d'eau de la chaudière, et si nous désignons la hauteur par h , l et l' étant les deux autres dimensions, en profondeur et en largeur, on voit que la surface totale sera $2ll'$ pour les plafonds du haut et du bas, $2hl'$ pour les faces

d'avant et d'arrière, enfin $2hl$ pour les faces latérales; la surface totale de la capacité extérieure serait toujours inférieure à

$$S = 2l'l' + 2hl' + 2hl.$$

Fig. 47.



Cette surface extérieure peut être augmentée par les murs d'eau qui forment les parois des compartiments, et dans les chaudières les plus compliquées on n'a jamais compté que 2 murs longitudinaux, formant 4 parois, dont la surface totale est $4hl$, et un mur parallèle aux faces, dont les deux parois représentent une surface $2hl'$, en telle sorte que la surface primitive peut, à la limite, être augmentée de $4hl + 2hl'$, auquel cas la surface totale serait :

$$S' = 2l'l' + 4hl + 6hl.$$

Dans la plupart de ces chaudières, comme dans celle du *Sphinx* par exemple, on avait approximativement

$$l' = \frac{l}{2},$$

en telle sorte que l'on aurait

$$S = 2l \times \frac{l}{2} + 2h \times \frac{l}{2} + 2hl = l^2 + 3hl = (l + 3h)l$$

$$S' = 2l \times \frac{l}{2} + 4h \times \frac{l}{2} + 6hl = l^2 + 8hl = (l + 8h)l.$$

Ces chiffres expriment, à peu près, l'étendue de la surface de chauffe, pour une surface de grille inférieure à

$$l' \times \frac{l}{2} = \frac{l}{4} \times l.$$

Le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille est donc mesuré par l'expression

$$\frac{4(l + 8h)}{l},$$

et, si l'on suppose $h = \frac{l}{2}$,

par le nombre 20, qui, comme nous le verrons plus loin, est précisément la valeur de ce même rapport, calculé pour la plupart des chaudières existantes.

En appliquant cette même valeur de h , à la valeur S' de la surface de chauffe, que nous avons trouvée ci-dessus, on aurait

$$S' = (l + 4l)l = 5l^2,$$

que nous devons comparer à la surface de chauffe des nouvelles chaudières tubulaires.

Nous donnons dans les figures 1 et 2 de la planche III, un aperçu de la disposition d'une de ces chaudières en galeries, dans lesquelles la flamme fait retour jusque sur le devant de la chaudière, avant de rejoindre la cheminée commune à un certain nombre de foyers.

IV. Chaudières tubulaires.

254. Chaudières tubulaires. — On désigne particulièrement, sous ce nom, les chaudières dans lesquelles la fumée est obligée de passer par un grand nombre de tubes de petit diamètre, qui présentent une grande surface de chauffe et qui ont permis de réduire, dans une proportion considérable, le volume des anciens appareils de vaporisation.

Certaines chaudières de locomotive atteignent et dépassent même 100 mètres carrés de surface de chauffe, et constituent certainement les plus puissants appareils que l'on puisse obtenir sous un aussi petit volume.

Les métaux employés pour la construction des tubes sont le fer, le cuivre rouge et le laiton. Les tubes de cuivre sont certainement les meilleurs, en ce qu'ils peuvent plus facilement être réparés en cas de détérioration; mais leur prix élevé leur fait souvent préférer les tubes de laiton et les tubes de fer.

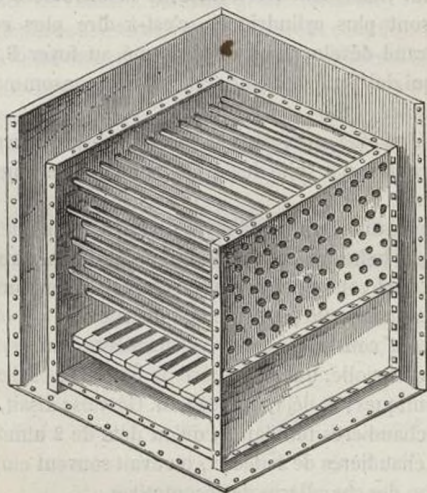
Un établissement important exécute, depuis plusieurs années déjà, des tubes de cuivre rouge, sans soudure, et d'une longueur suffisante pour toutes les dispositions de chaudières tubulaires.

255. Chaudière tubulaire de Joël Barlow. — Au point de vue historique, la chaudière pour laquelle un brevet d'invention a été pris en France le 24 août 1793, présente un véritable intérêt.

Joël Barlow, l'auteur de cette chaudière, dit, avec une grande simplicité, dans sa description, que, « en exposant à la chaleur ou à l'action du feu la plus grande étendue possible de surface, à côté de laquelle se trouve l'eau ou la vapeur, particulièrement en faisant le feu dans l'intérieur du fourneau et en faisant passer l'eau dans des tuyaux, des cylindres, à travers du feu ou de toute autre manière possible, par laquelle l'eau se répand en petites portions dans la partie du fourneau à travers laquelle le feu passe, ou en faisant passer

le feu à travers de petits tuyaux ou espaces étroits dans l'eau, ces fourneaux peuvent être variés à l'infini dans leur forme et dans la manière de les employer. »

Fig. 18.



La forme qu'il adopte dans son dessin original, que nous reproduisons dans la figure 18, avec son caractère primitif, est certainement peu acceptable, mais elle s'est bien modifiée depuis lors, et nous verrons combien le principe de Joël Barlow a reçu d'applications importantes, surtout en faisant passer la fumée, et non pas l'eau, dans les tubes. Lorsque cependant cette eau n'afflue qu'en petite quantité à la fois, pour être immédiatement vaporisée, on arrive aux chaudières à circulation, dont nous nous occuperons un peu plus loin.

236. Chaudières de locomotives. — Malgré l'antériorité incontestable des idées de Joël Barlow, Seguin en France, Stephenson en Angleterre, sont considérés comme les inven-

teurs de la chaudière tubulaire appliquée aux locomotives, et en fait, les générateurs de ces puissantes machines n'ont pas cessé d'être construits, depuis lors, sur le système tubulaire, qui est également appliqué maintenant aux machines de bateau. Seulement les formes de la chaudière de locomotive sont plus cylindriques, c'est-à-dire plus robustes, et un grand développement est donné au foyer B, pl. III, fig. 3, qui doit suffire à une très-grande consommation de combustible.

On sait, en effet, que, dans les locomotives, le courant d'air est très-rapide, par suite de l'échappement de la vapeur dans la cheminée.

Cette nécessité d'un grand foyer oblige à augmenter la largeur de la boîte à feu B', conduit à des formes rectangulaires et, par conséquent, exige l'emploi d'armatures très-puissantes dans cette partie de la construction.

M. Cavé a construit, dans ces dernières années, pour la compagnie Oriolle, une chaudière de bateau dans des conditions identiques; et déjà, en 1843, M. Gervaise disait, en parlant des chaudières tubulaires, qu'au delà de 2 atmosphères pour les chaudières de bateaux, on avait souvent employé la disposition des chaudières de locomotives.

Le foyer, disposé pour brûler du coke, peut recevoir un chargement très-épais de combustible; aussi la porte P est-elle très-élevée, ce qui rend le nettoyage de la grille presque impossible. Le parcours affecté à une même machine est toujours assez court pour que la grille ne puisse entièrement être engorgée, et, lorsqu'elle a terminé son service, le chauffeur n'a généralement d'autre moyen de nettoyage que l'enlèvement complet de la grille. La substitution de machine qu'exige cet état de choses, se fait dans les trains les plus directs, avec une telle rapidité que c'est à peine si les voyageurs s'en aperçoivent. Elle est du reste, pour eux, une garantie d'autant plus grande que la machine est toujours visitée, et réparée s'il y a lieu, avant cette mise en service, qui dure à peine quelques heures.

Si nous considérons les chaudières de locomotives, dans lesquelles les gaz brûlés se rendent directement dans la cheminée par les tubes, nous voyons qu'aucune autre disposition non tubulaire ne saurait présenter, au point de vue de la surface de chauffe, un aussi grand résultat.

En effet, si nous estimons cette surface de chauffe, sans compter celle de la boîte à feu, nous voyons que, pour une longueur l , la surface de chauffe des tubes sera représentée par $S = 2\pi rnl$, en conservant les mêmes notations que précédemment et en désignant par n le nombre des tubes. Ces tubes existent sur la moitié seulement de la section du cylindre que forme l'enveloppe extérieure, c'est-à-dire sur une superficie $\frac{\pi R^2}{2}$; la distance entre les axes de deux tubes voisins est en général égale à $3r$, en telle sorte que chaque carré dont le côté serait $3r$, et par conséquent la surface $9r^2$, peut être considéré comme contenant un tube; on aura donc approximativement

$$9r^2 \times n = \frac{\pi R^2}{2}$$

ou simplement

$$n = \frac{\pi R^2}{18r^2}$$

Connaissant ainsi le nombre total n des tubes et le substituant dans la valeur de S , il vient

$$S = 2\pi r \times \frac{\pi R^2}{18r^2} \times l = \frac{\pi^2 R^2}{9r} l$$

et en faisant $\pi = 3$,

$$S = \frac{R^2 l}{r}$$

Pour une chaudière cylindrique sans bouilleur, nous avons trouvé $S' = 3Rl$; et, dans les circonstances les plus favorables, la surface de chauffe des chaudières à bouilleurs a été donnée par la formule $S'' = 9Rl$, avec trois parcours. On voit donc que, pour une même longueur l , la surface de chauffe est augmentée dans le rapport de S à S'' ou de $\frac{R^2 l}{r}$ à $9Rl$, ce qui donne

$$\frac{S}{S''} = \frac{R^2 l}{9Rr l} = \frac{R}{9r}$$

Il est facile de voir que ce rapport est d'autant plus grand que r sera plus petit; et, si l'on fait par exemple $R = 0.50$, $r = 0.02$, ainsi qu'on l'observe dans un grand nombre de chaudières existantes, il vient

$$\frac{S}{S''} = \frac{0.50}{9 \times 0.02} = \frac{0.50}{0.18} = 3.$$

De ces considérations géométriques on doit donc conclure que l'emploi des tubes permet, avec un seul parcours des gaz de la combustion, de trouver, dans une chaudière cylindrique, une surface de chauffe triple de celle que l'on obtient avec trois parcours et une chaudière à deux bouilleurs. On aurait pu penser *à priori* que l'augmentation de surface de chauffe devait être bien plus considérable.

Quant à cette surface, considérée d'une manière absolue, si nous remplaçons, dans l'expression de S , le rapport $\frac{R^2}{r}$, par sa valeur, nous trouvons

$$S = \frac{0.25l}{0.02} = 12.50l$$

c'est-à-dire 12,5 mètres carrés par mètre de longueur; mais cette limite peut être dépassée facilement en augmentant un peu le diamètre extérieur de l'enveloppe. On ne pourrait obtenir une aussi grande surface de chauffe avec des tubes d'un plus gros diamètre; et pour que le tirage soit suffisant,

avec des tubes de 4 centimètres et en brûlant du coke, il est nécessaire de l'activer, par l'échappement, dans la cheminée, d'une grande quantité de vapeur.

La petitesse des tubes et leur rapprochement les uns des autres rendent les incrustations fort à craindre autour de leur surface extérieure, entourée d'eau de tous côtés ; de là des réparations fréquentes et des frais d'entretien considérables.

Il est d'ailleurs indispensable que ces tubes soient toujours couverts d'eau. Si quelques-uns d'entre eux viennent à être émergés, ils rougissent sous l'action des gaz de la combustion et le métal dont ils se composent n'offre plus alors la résistance nécessaire à l'action de la pression considérable à laquelle ces chaudières fonctionnent ; ils s'écrasent et se fendillent fréquemment dans le sens de la longueur.

257. *Application des chaudières tubulaires aux machines locomobiles.* — Le type des chaudières de locomotive a servi pour ainsi dire de modèle à la plupart des chaudières locomobiles de toutes dimensions. Seulement les tubes sont d'un plus grand diamètre, et si l'on fait $r = 0^m,03$, les valeurs de $\frac{S}{S'}$ et de S deviennent les suivantes :

$$\frac{S}{S'} = \frac{R}{9r} = \frac{0,50}{0,27} = 2, \quad S = \frac{R^2 l}{r} = \frac{0,25 l}{0,03} = 8 l,$$

c'est-à-dire 8 mètres carrés de surface de chauffe par mètre de longueur de tubes seulement, pour un diamètre extérieur de 1 mètre, donné au corps cylindrique, ce qui est une limite extrême que l'on dépasse rarement, dans la construction des chaudières des machines locomobiles.

Dans ces estimations approximatives, sur lesquelles nous reviendrons d'ailleurs en détail, on sait que nous n'avons pas compris la surface, toujours assez considérable, de la boîte à feu, ni celle de la boîte à fumée.

Une bonne disposition pour les chaudières de locomobiles consiste à former l'enveloppe extérieure de deux cylindres,

l'un horizontal A', pl. III, fig. 4, contenant les tubes, l'autre vertical A, renfermant la boîte à feu et le foyer : ce dernier cylindre est fermé à la partie supérieure par une calotte sphérique E, qui forme dôme de vapeur.

258. Chaudières tubulaires pour bateaux. — Quoique les chaudières tubulaires aient été proposées par Joel Barlow, dès 1793, on doit cependant considérer les constructeurs américains comme étant les premiers qui les aient réellement mises en pratique dans la navigation.

L'emploi de tubes dans lesquels la fumée circule a seul permis la construction de ces gigantesques transatlantiques, dont on exagère chaque jour la puissance, comme elle a permis de condenser, dans les dimensions d'une locomotive, un générateur qui peut être comparé à celui d'une machine de 150 chevaux.

La chaudière de l'*Indépendance*, dessinée par M. Michel Chevalier dans son ouvrage de 1842 : *des Machines à vapeur aux États-Unis d'Amérique*, est une des premières réalisations de ce principe.

Cette chaudière était destinée à brûler de l'anthracite, et nous y distinguons particulièrement la boîte à feu B, pl. III, fig. 5, contenant la grille et l'autel, et la boîte à fumée B', à l'autre extrémité des tubes.

259. Chaudière à retour de flamme par des tubes. — Afin de multiplier les surfaces refroidissantes, au delà de ce que les dispositions des galeries pouvaient permettre d'obtenir, on a construit des chaudières de bateaux dans lesquelles les gaz de la combustion sont ramenés en avant, par des tubes.

Le dessin des chaudières du *New-York* que l'on peut consulter dans l'ouvrage déjà cité de M. Michel Chevalier, donnera une idée des premières dispositions de ce genre, qui ont successivement conduit aux chaudières marines actuelles, exclusivement construites avec des retours de flammes tubulaires. On peut même dire que ces premières dispositions

n'ont reçu que des modifications de détail, particulièrement relatives à la suppression des angles vifs et à la répartition des armatures.

On voit déjà la chaudière se rapprocher de la forme cylindrique, qui seule est convenable lorsqu'il s'agit de résister à de fortes pressions intérieures.

Les foyers étaient d'ailleurs rectangulaires, et un mur d'eau existait à l'extrémité de la grille, dans cette partie que l'on désigne généralement sous le nom d'autel : par suite de cette disposition le bas de la boîte à feu ressemblait beaucoup aux dispositions de la boîte à feu des chaudières de nos locomotives.

260. Chaudières marines à retour de flamme.—La chaudière qui vient d'être décrite occupait dans le bâtiment une longueur considérable, et occasionnait un grand encombrement. C'est par cette raison, plutôt que pour obtenir une utilisation meilleure du combustible, que l'on a d'abord reporté le faisceau de tubes au-dessus du foyer : il sert alors de retour à la flamme, qui se trouve ramenée vers la face d'avant. Afin d'utiliser davantage la chaleur des gaz brûlés la cheminée tout entière passe dans la chaudière même, mais on comprend tous les inconvénients de cette disposition qui oblige à recourir à un système compliqué d'armatures pour consolider les assemblages, et pour empêcher l'écrasement d'un tube cylindrique d'une si grande dimension.

Les chaudières de l'*Isly* et du *Danube*, pl. III, fig. 6 et 7, peuvent être considérées comme des types de ce mode de construction.

261. Chaudières marines actuelles.—Les chaudières marines actuelles sont pour ainsi dire construites sur le même modèle. Chaque corps de chaudière, pl. III, fig. 8, contient un certain nombre de foyers qui se prolongent jusqu'à la boîte à fumée, dans laquelle prennent naissance les tubes chargés de ramener les gaz, en sens contraire, dans une seconde boîte à fumée communiquant avec la cheminée.

Ces chaudières sont surtout remarquables en ce que tous les courants se meuvent parallèlement, tandis qu'ils s'entrecroisaient fréquemment dans les chaudières à galeries, au grand préjudice du tirage.

La plupart du temps, une même cheminée est commune à plusieurs corps et ses dimensions sont alors déterminées par le volume total des gaz qui doivent la parcourir. Les formes générales se sont successivement modifiées et chaque corps de chaudière peut être maintenant considéré comme un cube ou un parallépipède rectangle A, dont les arêtes et les sommets ont été arrondis dans tous les sens, et dont la face d'avant se trouve percée d'un certain nombre de trous presque elliptiques B, pour les foyers. La consolidation se complète au moyen de tirants E, agrafés aux cornières sur lesquelles se font les assemblages de la tôle.

La boîte à fumée F et la cheminée G sont en quelque sorte des appendices du corps de chaudière, et ces parties de l'appareil ne participent pas à la consolidation générale. La cloison d'eau qui enveloppe la boîte à fumée est étré sillonnée comme le sont les parois des boîtes à feu des locomotives, et il est toujours facile de donner à des capacités d'aussi faible épaisseur la résistance nécessaire.

Au bas de la cheminée, et par conséquent au-dessus des portes du foyer, se trouvent pratiquées de nombreuses ouvertures ou trous d'homme *g*, pour le nettoyage des parois accessibles et des tubes : le grand volume des chaudières rend cette disposition facile et constitue, par rapport aux chaudières de locomotives, un avantage considérable : au moindre arrêt on vide les chaudières et l'on s'occupe avec activité d'enlever les dépôts et les incrustations, dont la présence exposerait les parois et les tubes à être rapidement brûlés et mis hors de service.

Il est facile d'évaluer la surface de chauffe que les tubes fournissent dans les chaudières marines actuelles : en effet si *l'* est la largeur de la chaudière et *n* le nombre des tubes, de rayon *r*, qui composent un rang, on aura, en admettant

que les tubes soient écartés entre eux d'une longueur de rayon,

$$l' = n(2r + r) = 3nr,$$

d'où l'on tire

$$n = \frac{l'}{3r}.$$

La surface intérieure des tubes sera alors

$$s' = 2\pi r \times n \times l = 2\pi r \times \frac{l'}{3r} \times l = 2ll';$$

et si l'on désigne par n' le nombre des rangs de tubes, leur surface totale sera

$$S' = 2ll'n'.$$

D'un autre côté la surface totale de la grille est sensiblement égale à ll' ; par conséquent $\frac{S'}{G} = 2n'$, c'est-à-dire à deux fois le nombre de rangées de tubes.

Avec six rangées on aura déjà une surface de chauffe égale à douze fois la surface de grille, quel que soit d'ailleurs le diamètre de ces tubes.

Ce résultat est extrêmement intéressant et il démontre que l'on peut facilement obtenir, par les tubes de retour de flamme, un rapport suffisamment grand entre la surface de chauffe et la surface de grille, alors surtout qu'il faut, en outre, tenir compte de la surface de chauffe directe formée par les parois des foyers.

Si ces foyers sont au nombre de trois, et s'ils sont séparés par des murs d'eau, on pourra, en les considérant comme contenus dans un espace rectangulaire, évaluer cette surface de chauffe directe à

$$s = 2ll' + 6h'l,$$

en désignant par h' la hauteur de chaque boîte à feu. La surface totale sera donc

$$S = 2ll' + 6h'l + 2ll'n'.$$

Pour obtenir la même surface que dans les chaudières à

galeries on pourra facilement réduire la longueur l à moitié, pourvu que l'on emploie 6 à 8 rangs de tubes; on obtiendra ainsi des chaudières aussi puissantes, d'une profondeur moitié moindre, et d'une surface de chauffe considérable. C'est cette raison toute pratique qui a assuré sans conteste la prééminence aux chaudières tubulaires à retour de flamme, pour les machines de bateaux.

262. *Application des chaudières à retour de flamme aux machines locomobiles.* — Le système tubulaire présentant de notables avantages, quant au poids et au volume des appareils, il a été généralement appliqué aux machines locomobiles, mais presque partout on a imité la chaudière de locomotive avec un seul parcours des gaz dans les tubes, et nous aurions à rechercher pourquoi l'application des chaudières à retour de flamme ne s'est pas davantage propagée dans ces appareils, dont la première condition est d'être légers, pour être facilement transportables, si, dans ces derniers temps, la disposition désignée maintenant sous le nom de chaudières à foyers amovibles n'avait ramené les constructeurs les plus habiles à l'emploi des retours de flammes.

263. *Chaudière de la locomobile Tuxford.* — M. Tuxford avait présenté à l'exposition de Londres, en 1851, une machine locomobile, dont le Conservatoire des arts et métiers a fait l'acquisition et dont la chaudière était à retour de flamme par des tubes.

La boîte à feu, pl. IV, fig. 1 et 2, est rectangulaire comme celle des locomotives, mais beaucoup moins profonde; les gaz de la combustion s'infléchissent en sortant du foyer dans un carneau C, de grande dimension, qui règne sur toute la longueur de la chaudière, et ils reviennent, en sens contraire, par 16 tubes de 6 centimètres de diamètre.

Cette chaudière est très-bien construite, mais elle serait d'une réparation difficile. Bien que le corps de la chaudière ait 0^m,80 de diamètre et que la longueur totale soit de 2 mètres, la surface de chauffe est limitée à 5^m,50, ce qui conduit

à un rapport de 12 seulement entre la surface de chauffe et la surface de grille.

Ce rapport est, suivant nous, insuffisant, et l'on comprend que le corps de la chaudière étant en partie occupé par un large carneau, le nombre total des tubes soit nécessairement beaucoup moindre, à égalité de diamètre de l'enveloppe, et qu'ainsi la surface de chauffe n'atteigne pas les chiffres que nous avons indiqués précédemment. Cette disposition a d'ailleurs l'inconvénient de ne pas permettre d'utiliser pour les tubes, toute la longueur de la chaudière et c'est à cette cause qu'il faut attribuer le faible rapport qui vient d'être indiqué. Il est vrai que la grille est proportionnellement très-grande et que cette circonstance exagère encore, dans la chaudière dont nous parlons, ce résultat désavantageux.

264. Chaudières elliptiques. — M. Mazeline a construit au Havre un modèle de chaudière tubulaire d'une disposition très-simple et d'un petit volume. Le foyer, pl. IV, fig. 3 et 4, est placé dans un cylindre horizontal entouré d'eau, la flamme passe par l'extrémité postérieure du cylindre et revient en avant, par une série de tubes horizontaux, qui aboutissent à la cheminée, et qui sont contenus dans une seconde enveloppe cylindrique, de même dimension que celle qui correspond au foyer, et qui forme avec celle-ci un contour extérieur cylindrique en forme de 8.

Dans la chaudière du dock flottant du Havre, qui est établie sur ce système, les dimensions principales sont les suivantes:

Grille: longueur 1,00; largeur 1,00; surface 1,00.

Surface de chauffe: 57 tubes de 8 centimètres de diamètre et de 1,42 de longueur..... 20,33

Cylindre du foyer: diamètre 0,80; longueur 1,84. 4,62

24,95

La partie supérieure de ce cylindre peut seule être considérée comme surface de chauffe directe, soit..... 2,31

Le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille est de 25 environ.

265. *Chaudières à double retour de flamme.* — L'emploi des tubes, si avantageux qu'il soit, lorsque ces tubes ont un parcours et un diamètre convenables, demande à être restreint dans de justes limites. Il ne faudrait pas croire qu'en augmentant indéfiniment la surface de chauffe par des tubes, on ne créerait pas plus d'inconvénients que d'avantages : c'est ce qui a été démontré en fait par une grande chaudière marine, construite en Angleterre avec double retour de flamme, pl. III, fig. 5.

Les résultats donnés par cette chaudière ont été très-peu satisfaisants, et aucune incertitude ne peut subsister à cet égard, alors que la marche du navire a été beaucoup moins bonne qu'elle ne l'avait été avec la chaudière que celle à double retour de flamme remplaçait.

Il faut observer d'ailleurs que cette disposition reproduit en partie les inconvénients que présentaient les chaudières à galeries ; la construction des chaudières marines actuelles est parfaitement satisfaisante, et la deuxième série de tubes ne saurait être recommandée.

266. *Chaudière verticale de M. Zambeaux.* — Comme exemple de chaudière tubulaire verticale, nous citerons encore l'appareil que M. Zambeaux avait exposé en 1855, et qui depuis lors a été soumis à une série d'épreuves très-favorables dans le concours ouvert par la Société industrielle de Mulhouse. Les tubes E, pl. V, fig. 7, sont verticaux ; la vapeur formée, après s'être élevée verticalement, est obligée, par la présence des cloisons disposées à cet effet, de descendre, avant de pouvoir se rendre dans la prise de vapeur menant à la machine : cette disposition a pour but de la débarrasser de l'eau qu'elle pourrait entraîner, et en effet la vapeur qu'elle fournit paraît très-bien séchée.

Nous indiquerons ultérieurement les résultats obtenus par la Société industrielle de Mulhouse sur une chaudière de ce genre, de dimensions considérables. Celle de l'exposition contenait 60 tubes dont la surface totale était de $8^m.7,74$; en ajoutant à ce chiffre le chiffre correspondant du foyer on arrivait à une surface de chauffe totale de $9^m.7,526$.

Pendant les expériences officielles que nous avons faites au nom du jury international, et qui ont duré 40 heures, la consommation de charbon s'est élevée à $761^k,50$, sur une grille de $0^m.7,1075$; on a vaporisé pendant ce même temps 6310 kilog. d'eau.

Chaque kilogramme de houille aurait donc produit une vaporisation de $8^k,30$.

On jugera des circonstances dans lesquelles cet appareil peut rendre des services, lorsqu'on saura qu'il suffit de 15 minutes pour l'amener à être en pression.

Les essais faits par la marine paraissent n'avoir pas réussi; mais en réalité, le plus grand reproche que l'on puisse faire à toutes les dispositions analogues, c'est qu'elles n'ont pas reçu la sanction d'une pratique suffisamment prolongée. On ne voit pas cependant pourquoi la chaudière de M. Zambeaux ne fonctionnerait pas avec la même sûreté que les chaudières de locomotives, au point de vue des incrustations et de la production de la vapeur.

IV. Chaudières à tubes accessibles.

267. Chaudières à foyer amovible. — La facilité que présentent les chaudières tubulaires pour obtenir, sous un faible volume, une grande étendue de surface de chauffe, les bons services que rendent ces chaudières sur les locomotives et sur les bateaux, tels sont sans doute les principaux motifs de la préférence qu'on a voulu, dans ces dernières années, étendre jusqu'aux machines fixes, sans tenir, à notre avis du moins,

un compte suffisant des inconvénients inséparables du système tubulaire.

Le principal de ces inconvénients consiste dans la formation des dépôts autour des tubes, alors surtout que le nettoyage de ces tubes est rendu presque impossible par leur rapprochement, et par la difficulté d'accès dans l'intérieur de l'appareil.

Ces difficultés ont donné naissance, dans ces dernières années, à plusieurs systèmes de construction, d'un démontage facile, et plus récemment à des chaudières, dites à foyer amovible, dont les dispositions ont pour objet l'enlèvement, en entier, du foyer et de tout l'appareil tubulaire, dont le nettoyage devient alors plus facile.

263. Chaudière à tronçons tubulaires de M. Durenne. — A l'exposition de 1855, M. Durenne avait réalisé une combinaison qui lui permettait, au moyen d'un démontage facile, de nettoyer librement les tubes, toutes les fois qu'on le croyait nécessaire.

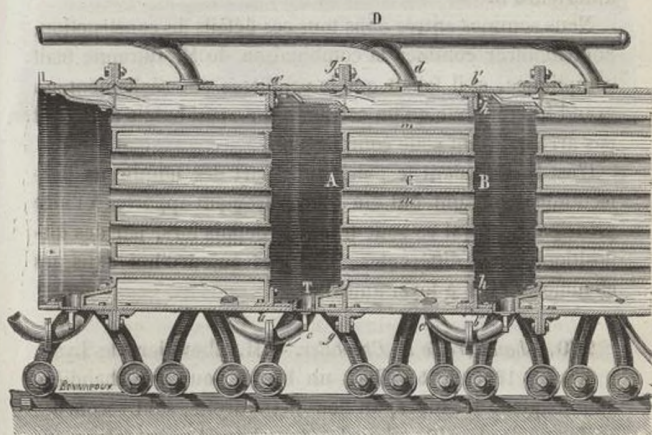
Sa chaudière, représentée par notre figure 19 et brevetée sous la date du 16 novembre 1854, se composait d'une suite de tronçons cylindriques, supportés chacun par deux paires de roues, et disposés de manière à se réunir facilement, les uns au bout des autres, au moyen des dispositions particulières que nous allons indiquer.

Le tronçon AB était, comme chacun des autres, formé d'une enveloppe cylindrique, dans laquelle étaient assemblées deux plaques A et B percées de trous et recevant à la manière ordinaire un certain nombre de tubes *m*, au travers desquels la fumée devait circuler pour passer de la boîte à fumée B dans la boîte à fumée A.

Ce tronçon AB se fixait au tronçon suivant au moyen d'un raccordement fait suivant la ligne *bb'* par trois ou quatre pattes distribuées au pourtour de la circonférence; pour l'isoler complètement en cas de nettoyage, il suffisait donc de démonter les boulons des pattes distribuées autour des lignes

de joints, en aa' et en bb' ; cet assemblage était facilité par la présence des cornières destinées à recevoir les plaques des tubes, en ce que par leur saillie au dehors de la circonférence aa' , ces cornières formaient une sorte de guide lors de l'approche des pièces à réunir: il n'était pas nécessaire que le joint fût parfaitement étanche, les moindres fissures étant facilement obstruées par la fumée, lors de la première mise en feu. Des regards T de ramonage étaient d'ailleurs ménagés au bas de chaque chambre.

Fig. 19.



L'eau était renfermée, comme à l'ordinaire, autour des tubes, dans la chambre C, comprise entre les deux plaques, et pour assurer son arrivée dans chaque compartiment, M. Durrenne avait fixé, sur le fond de chacun d'eux, deux tubes cc' , munis de brides et disposés de manière à se trouver respectivement en face de ceux des tronçons voisins, lors de la mise en place de toutes les parties de l'appareil: l'eau ne circulait d'un tronçon à l'autre que par les conduits demi-circulaires

ainsi formés. Quant à la vapeur, elle se rendait par des tubulures spéciales d dans un conduit unique D placé à la partie supérieure.

Pour compléter la description de cette chaudière, il ne nous reste plus qu'à indiquer comment les tubes pouvaient être absolument mis à nu pour le nettoyage : à cet effet un troisième joint intermédiaire gg' , rendu étanche par des brides continues, permettait de retirer toute la partie de l'enveloppe cylindrique comprise entre bb' et gg' , lorsque les boulons h étaient enlevés : l'enveloppe entraînait avec elle la cornière hh et les tubes restaient à découvert avec leur plaque antérieure B .

Nous sommes entrés dans tous ces détails de construction, pour montrer combien la combinaison de M. Durenne était compliquée, et il fallait que le problème eût réellement un grand intérêt pour qu'un constructeur aussi habile ne se soit pas arrêté devant cette complication.

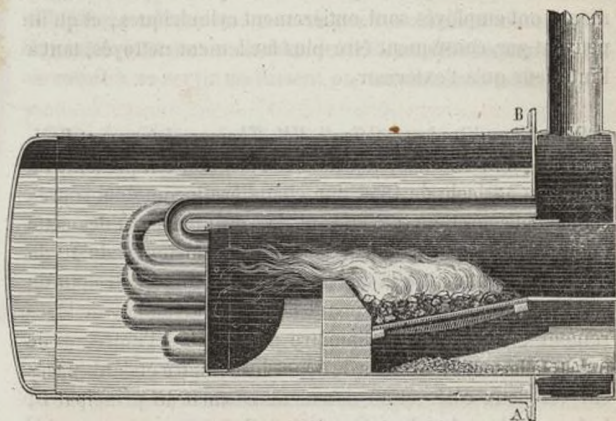
C'est là cependant le point de départ des nombreux perfectionnements qui ont été successivement apportés à l'idée principale, et qui se sont traduits, depuis lors, par des dispositions bien différentes, réalisées aujourd'hui dans les chaudières dites à foyer amovible.

269. Chaudière de M. Chevalier. — M. Chevalier, de Lyon, a pris en 1855, le 5 juillet, un brevet pour une chaudière dans laquelle les tubes, au lieu d'être droits, sont recourbés en forme de pincettes, dont les deux branches inégales viennent s'assembler, l'une sur une plaque verticale disposée à l'avant du foyer, l'autre à une seconde plaque également verticale, formant le fond de la boîte à feu.

D'après les termes de sa spécification, l'auteur s'était proposé de ne gêner en rien la dilatation de ces tubes, et il supposait que leur partie courbe se prêterait facilement à tous les allongements, cependant inégaux, qui devraient nécessairement se produire dans la longue branche et dans la petite branche de ces tubes, par suite des différences de dilatation.

Nous reproduisons, dans la figure 20, le dessin original de M. Chevalier; on voit bien en AB une bride, formée par des

Fig. 20.



cornières, qui pourrait servir à enlever d'une seule pièce le foyer avec le carneau qui le renferme, tous les tubes et même la cheminée; si ce joint circulaire était fait avec des boulons, et s'il pouvait, par conséquent, se défaire facilement, la chaudière de M. Chevalier constituerait bien certainement la première chaudière horizontale à foyer amovible; mais en l'absence de toute explication dans le texte, il nous semble plus juste de n'y ajouter aucun commentaire et de nous borner à la reproduction du dessin.

270. *Chaudières à foyer amovible de M. Perignon.* — A peu près à la même époque M. Perignon s'est fait breveter (29 septembre 1855) pour des perfectionnements apportés aux chaudières des machines à vapeur et principalement aux chaudières des machines locomobiles. Un certificat d'addition

du 1^{er} février 1856 a complété ce brevet, et a suffisamment défini le but que s'était proposé l'inventeur.

Les brevets de M. Perignon ont depuis lors été réalisés par lui, conjointement avec MM. Thomas et Laurens : et ils ont cela de remarquable que les tubes que ces habiles ingénieurs ont employés sont entièrement cylindriques, et qu'ils peuvent par conséquent être plus facilement nettoyés, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur.

271. *Chaudière locomobile de MM. Thomas, Laurens et Perignon.* — MM. Thomas, Laurens et Perignon ont présenté au concours agricole de 1856 une chaudière locomobile représentée dans nos figures 6 et 7, pl. IV, et qui a paru dès cette époque très-remarquable. Le corps cylindrique, de 1^m de diamètre, contenait à la fois le foyer et les tubes de retour de flammes; le carneau contenant le foyer était de forme légèrement conique, d'un diamètre de 0^m,515 à l'entrée et de 0^m,415 à la sortie; 12 tubes de 0^m,06 de diamètre étaient placés sur les deux côtés et au-dessus de ce carneau principal B; le foyer et les tubes de retour étaient fixés sur une même plaque D, recouverte d'un fond embouti, formant boîte à fumée, en telle sorte que cette boîte à fumée elle-même était renfermée tout entière dans l'axe du corps principal A.

A l'avant de la chaudière la plaque des tubes et le foyer sont aussi rivés ensemble, et réunis à la chaudière principale, dont ils forment le fond, par une bride EE. En démontant cette bride, tout l'appareil intérieur peut être enlevé, de manière à être réparé aussi fréquemment qu'on le voudra, pourvu toutefois qu'il ne se soit pas formé d'incrustations trop adhérentes, qui puissent s'opposer à la sortie.

En profitant de la grande dimension du cylindre extérieur, et en limitant la longueur totale à 2^m,60, MM. Thomas et Laurens ont pu obtenir dans cette chaudière une surface de chauffe de près de 9 mètres carrés, tout en conservant à la chambre de vapeur un volume convenable : le foyer est de petite dimension, et ce système, si intéressant par la facilité

de nettoyage qu'il présente, aurait surtout sa raison d'être pour des corps de chaudière d'un diamètre plus grand.

Comme chaudière de machine locomobile il nous paraît se prêter médiocrement à un bon développement de la flamme, et nous lui préférons, dans certains cas, les chaudières tubulaires ordinaires, pourvu que leur surface de chauffe fût portée à 25 fois la surface de grille, et que les eaux dont on aurait à se servir ne fussent pas trop incrustantes.

+ **272.** *Application des chaudières à foyer amovible aux machines fixes.* — Les difficultés que présente le nettoyage des chaudières tubulaires étant le principal obstacle à leur emploi plus général, pour les machines fixes, on comprend que la disposition réalisée par MM. Thomas, Laurens et Perignon pour retirer facilement les tubes et le foyer, puisse présenter un grand intérêt toutes les fois que cette disposition permettra de donner un développement suffisant à la chambre de combustion.

MM. Thomas et Laurens satisfont à peu près à cette condition en donnant à leur grille un mètre de longueur, et en laissant un grand espace libre B, planche IV, fig. 8, entre l'autel et le couvercle de la boîte à fumée, qui recouvre, en même temps, l'ouverture d'arrière des tubes de retour de flamme.

Après être revenus, par les tubes, à l'avant de la chaudière, les gaz de la combustion parcourent encore la surface extérieure F de l'enveloppe, avant d'atteindre la cheminée placée en contre-bas : cette disposition a pour objet de mettre les gaz en contact avec cette surface métallique supplémentaire, dans les meilleures conditions possibles de refroidissement.

Nous avons dit en parlant des chaudières locomobiles du même système que si les incrustations étaient adhérentes, il serait peut-être difficile de retirer le foyer, mais, dans les applications qu'ils ont faites aux chaudières fixes, MM. Thomas et Laurens ont eu soin de laisser derrière le couvercle de la boîte à fumée un espace suffisant G pour qu'un ouvrier

puisse opérer le nettoyage dans l'intérieur même de la chaudière.

Le générateur que représente la figure contient 24 tubes de 8 centimètres fort bien disposés. La surface de chauffe totale est de 21,00 mètres carrés, tandis que si ce générateur était plongé dans la flamme, par sa surface extérieure tout entière, il ne présenterait au refroidissement des gaz que 9 mètres carrés environ.

La grille ayant une largeur de 0^m,55 sur 1 mètre de longueur, le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille est de 38 environ.

Cette chaudière est donc dans les conditions les plus satisfaisantes, et elle présente en outre cet avantage, qui lui est du reste commun avec les chaudières à foyer extérieur, que rien ne s'oppose aux dilatations libres de la boîte à feu non plus qu'à celles des tubes, dont la durée sera certainement prolongée de beaucoup par cette circonstance.

Nous regrettons de n'avoir pu constater par nous-mêmes l'efficacité de cet appareil, qui est construit pour vaporiser 300 kilog. d'eau par heure.

275. *Chaudière fixe à foyer amovible de MM. Farcot et fils.*

— De leur côté MM. Farcot et fils construisent maintenant un système de chaudières à vapeur, à foyer amovible, qui diffère notablement de celui que nous venons d'indiquer. La planche IV, fig. 9 et 10, représente une chaudière fixe de ce système; elle se compose de deux corps cylindriques superposés, mais à l'inverse de ce qui a lieu ordinairement, le cylindre supérieur, qui forme une sorte de bouilleur, est le plus petit. Ce bouilleur ne contient pas de tubes, mais seulement un tuyau unique dans lequel la vapeur est obligée de s'introduire avant de se rendre dans le dôme G, disposition qui a pour objet d'enlever à cette vapeur une partie de l'eau qu'elle entraînerait en plus grande quantité si elle n'était pas aussi gênée dans son mouvement. Ce cylindre est en communication avec le corps principal par les deux tu-

bulures LL, et c'est à l'intérieur de ce corps principal que se trouve le faisceau tubulaire, qui porte avec lui, comme dans le système Thomas et Laurens, la grille et le foyer; mais cette disposition diffère de la précédente en ce que les gaz brûlés, après avoir circulé dans les tubes, aboutissent à une grande boîte à fumée O, qui peut être facilement ouverte de l'extérieur; ils agissent ensuite sur la partie inférieure du bouilleur, avant de se dégager dans la cheminée, qui descend ici dans le sol, et dont l'ouverture peut être réglée par une vanne représentée sur la figure 10 et desservie par un levier à crémaillère; avant d'atteindre la cheminée, les gaz échauffent encore la lame d'eau qui entoure le foyer, sous une épaisseur d'ailleurs assez faible. Le joint se fait en E, à l'avant de la boîte à feu, et MM. Farcot se trouvent bien d'employer pour cet objet un cercle en cuivre rouge, comme l'ont proposé MM. Laforest et Boudeville; ce métal est assez mou pour s'écraser sous l'action des boulons qui forment le joint et pour assurer alors une obturation parfaite.

Lorsque ce joint est défait, on tire la partie mobile en avant, en la faisant glisser au moyen de galets, que l'on voit en coupe et qui sont fixés à l'enveloppe cylindrique des tubes; des cornières rivées sur l'enveloppe concentrique extérieure, servent de rails à ces galets, et en soutenant la chaudière à l'avant, au fur et à mesure de sa sortie, l'opération se fait avec une très-grande facilité. Cette position des cornières, bien au-dessus du fond de la chaudière, les met, autant que possible, à l'abri des incrustations, et assure leur bonne conservation, en état de service.

Quant au nettoyage des tubes eux-mêmes, il s'opère rapidement en introduisant, dans les intervalles qui les séparent, une lame très-flexible d'acier qui est représentée fig. 11, et dont les dents mordent très-facilement sur toutes les natures de dépôts; pour introduire cette lame de scie très-mince, on enlève d'abord l'une des poignées, que l'on replace ensuite pour la facilité du travail.

La chaudière que nous avons représentée a une surface de chauffe totale de 80 mètres carrés ainsi répartis :

Surface de la boîte à feu.....	m.q 9,62
Surface des tubes, au nombre de 109.....	51,68
Surface de la boîte à fumée.....	1,56
Surface de retour du corps principal.....	10,00
Surface de retour du corps supérieur.....	7,14
	<hr/> 80,00

La grille ne comporte que 1,60 mètre carré, de sorte que le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille n'est pas moindre que 50.

La section totale des tubes représente 0^m^q,35, c'est-à-dire 0,219 de la surface de grille.

Nous donnons encore, pl. VI, fig. 1 et 2, le dessin complet d'une chaudière de MM. Farcot et fils, telle qu'ils les construisent aujourd'hui; elle est établie pour une surface de chauffe de 45 mètres carrés, avec 64 tubes seulement; l'accès de toutes les parties de l'appareil est extrêmement facile, bien que la surface de chauffe soit augmentée de toute la paroi extérieure du corps principal, les gaz dans leur mouvement de retour, passant, en partie seulement, autour du cylindre supérieur.

Le démontage de cette chaudière est grandement facilité par le dégagement des collerettes d'assemblage E, qui permettent d'agir à la fois sur les deux têtes de chaque boulon et écrou.

Ce qui, du reste, caractérise plus spécialement cette nouvelle disposition, c'est la construction des parois qui enveloppent tout le système; elles sont composées, pour chaque côté, d'un nombre plus ou moins grand de panneaux distincts; ces panneaux *m* sont assemblés avec le réservoir supérieur par des pattes *n*, et avec le corps de chaudière par des pattes *p*; ils sont maintenus dans le bas par une cornière *q*, formant socle, qui peut être en fonte ou en fer, et cerclés par des couvre-joints *r*. Chacun de ces panneaux est composé de deux

enveloppes concentriques en tôle, boulonnées ou rivées ensemble, et munies d'entretoises; l'intervalle qui les sépare est rempli de matières non conductrices; un mélange d'argile, de sciure de bois et de poils en bourre, compose une première couche qui doit être appliquée sur la tôle intérieure, qui est la plus exposée à l'action du feu; ce premier enduit est complété par une épaisseur variable de bourre, que l'on met en place avant d'appliquer la tôle extérieure. Les panneaux ainsi construits sont très-peu perméables à la chaleur, et la première couche mélangée est combinée de telle façon qu'elle isole suffisamment la bourre de remplissage pour l'empêcher de brûler.

La partie supérieure du petit corps cylindrique n'est recouverte que de bourre, et, à l'extérieur, d'une feuille de tôle, la température ne pouvant jamais s'élever à sa surface qu'à la température même de la vapeur.

Les portes d'avant et d'arrière sont construites de la même façon et l'expérience prouve que cette disposition est parfaitement satisfaisante, à tel point que les parois extérieures ne s'élèvent jamais qu'à une température très-faible; les pertes par rayonnement sont donc réduites au minimum, en même temps que l'étendue de la surface de chauffe assure une très-bonne utilisation de la chaleur.

Rien n'a été négligé pour faire de cet appareil un vaporisateur vraiment pratique et qui sera certainement d'un emploi avantageux sous le rapport de l'économie du combustible.

274. Chaudière locomobile à foyer amovible de MM. Farcot et fils. — La machine locomobile que MM. Farcot et fils avaient présentée au concours général d'agriculture, en 1860, n'était pas encore modifiée suivant les indications que nous avons données dans l'article précédent; la disposition générale était seule la même, et malgré l'absence d'enveloppes aussi bien disposées, elle a cependant fourni des résultats très-remarquables.

Cette chaudière est représentée pl. V, fig. 1 et 2, avec ses quatre roues; pour des dimensions aussi restreintes l'emploi des galets n'a pas semblé nécessaire; les tubulures L qui réunissent les deux corps sont surbaissées autant que possible; les roues principales étaient montées sur un essieu courbe, qui enveloppait la paroi extérieure du principal corps cylindrique. Malgré la forme un peu anormale de cet appareil on peut déjà le considérer, à l'égal des chaudières de MM. Thomas et Laurens, comme un des meilleurs types de chaudières; c'est surtout pour les machines locomobiles, auxquelles le système tubulaire est presque exclusivement applicable, que l'emploi des foyers amovibles est destiné à un grand avenir.

V. Chaudières à circulation rapide.

275. *Chaudières à circulation d'eau.* — Dans tous les systèmes de chaudières à vapeur que nous avons examinés jusqu'ici, le volume de l'eau est toujours considérable et l'appareil pourrait fonctionner pendant un certain temps sans qu'il fût indispensable d'y introduire une nouvelle quantité de liquide : en un mot ces appareils contiennent une quantité d'eau assez grande pour suffire à une vaporisation de quelque durée.

Il n'en est pas ainsi dans les chaudières à circulation, qui sont principalement composées de tubes, dans lesquels on introduit continuellement l'eau qu'il s'agit de vaporiser, et qui se vaporise en effet presque aussitôt son introduction dans les nombreux circuits qu'elle parcourt.

Les tubes de Joel Barlow, qui plongeaient dans l'eau du corps de chaudière, auraient donné lieu à un dégagement de vapeur irrégulier, par cela même que l'eau, qui pouvait, de toutes parts, s'y introduire, aurait gêné cet écoulement; et pour ne laisser échapper que de la vapeur, les appareils qui vont nous occuper maintenant doivent offrir une surface de chauffe suffisante pour que toute l'eau introduite y soit constamment et presque immédiatement vaporisée.

On remarquera dans ces appareils l'absence complète de réservoir de vapeur : si l'alimentation cesse, tout écoulement de vapeur cesse en même temps ; la pompe alimentaire est le régulateur suprême de la quantité de vapeur produite, et le moindre dérangement dans le fonctionnement de cette pompe doit nécessairement se traduire par une irrégularité plus ou moins marquée dans la production de la vapeur.

Les irrégularités du foyer sont aussi à craindre, au même titre ; si en effet, l'alimentation restant parfaitement régulière, le feu devient plus actif, la vapeur acquerra une haute température ; elle sera plus froide, au contraire, si le feu se ralentit, et ces causes de variations sont telles que l'on s'étonne de voir des machines à vapeur fonctionner, avec régularité cependant, bien que desservies par des générateurs à circulation.

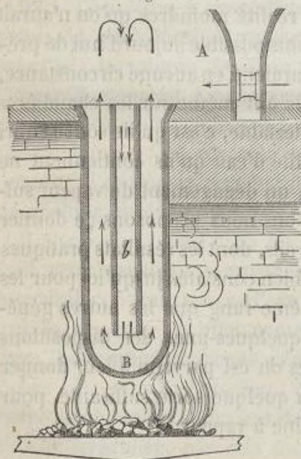
Les inconvénients sont en réalité moindres qu'on n'aurait dû le craindre, et il ne serait plus possible aujourd'hui de prétendre que ces appareils ne sauraient, en aucune circonstance, être employés avec succès. Ils ont même sur les chaudières ordinaires un avantage incontestable, c'est qu'ils sont à l'abri de toute explosion, la quantité d'eau qu'ils contiennent ne pouvant jamais donner lieu à un dégagement de vapeur suffisant pour être à craindre. Nous nous proposons de donner quelques détails sur ces appareils, dont les résultats pratiques ne nous paraissent pas assez bien constatés jusqu'ici pour les placer à beaucoup près au même rang que les autres générateurs : nous indiquerons quelques-unes des dispositions ingénieuses à l'aide desquelles on est parvenu à leur donner une régularité de marche, en quelque sorte suffisante, pour les besoins d'une petite machine à vapeur.

276. *Chaudière à circulation de Jacob Perkins.* — En 1831, Jacob Perkins prit une patente en Angleterre pour des perfectionnements dans les procédés de vaporisation (*Improvements in generating steam*). Dans cette patente il insiste à plusieurs reprises sur les avantages qu'il y aurait à faire

circuler rapidement de l'eau contre des surfaces de chauffe exposées à l'action directe du feu, et il obtient ce résultat en armant les divers systèmes de chaudières d'une sorte de poche cylindrique divisée, sur la plus grande partie de sa hauteur, en deux capacités distinctes, par un tube central, et d'ailleurs en communication avec l'eau de la chaudière par la section tout entière de cette poche : l'eau renfermée entre les deux parois s'échauffe rapidement, s'élève par suite de l'augmentation de sa température et de son mélange avec la vapeur formée; elle est à chaque instant remplacée par de l'eau plus froide affluant par l'orifice central, et le courant ainsi produit paraît à l'inventeur éminemment propre à déterminer une rapide production de vapeur.

Ce même principe est ailleurs mis plus complètement en

Fig. 21.



évidence par la disposition de la figure 21, que l'auteur reproduit un grand nombre de fois sur le fond d'une chaudière hémisphérique A. Chacune des poches B ainsi formées est soumise à l'action directe du feu : l'eau s'échauffe au contact de la flamme; elle s'élève entre les deux surfaces concentriques et se trouve incessamment remplacée par celle qui afflue de la chaudière par le tube central b. La circulation rapide de l'eau à vaporiser, voilà

bien l'idée dominante de la patente de Perkins; mais la circulation employée seule pour produire une abondante vaporisation ne se trouve pour la première fois indiquée que dans la patente de 1839, au nom de Angier March Perkins, qui porte pour titre : *Apparatus for transmitting heat by*

circulating water (appareils pour transmettre la chaleur par la circulation de l'eau). Après avoir indiqué plusieurs dispositions de grilles, composées de tubes à circulation de 1 pouce (0^m,025) de diamètre extérieur, et de 1 demi-pouce seulement de diamètre intérieur, offrant un développement total de 800 pieds, et une surface de chauffe de 200 pieds carrés, Angier Perkins figure un tube en hélice destiné au même usage, et ressemblant beaucoup aux hélices des dispositions plus modernes.

L'eau est introduite d'une manière continue par une pompe spéciale, et pour prévenir toute pression anormale dans les tubes, il munit ceux-ci d'une soupape, dont il donne la description, mais pour l'objet de laquelle on pourra employer la soupape ordinaire de sûreté*.

Les appareils à circulation jouirent à ce moment d'une certaine vogue, mais soit que l'alimentation ne fût pas suffisamment régulière, soit que la vapeur fût portée à une température trop élevée, soit enfin que les dépôts formés par les eaux, pendant leur parcours, eussent mis rapidement ces appareils hors de service, ils furent bientôt abandonnés, et c'est seulement à une époque beaucoup plus rapprochée de nous que les chaudières à circulation ont été de nouveau employées en France.

277. Chaudière Isoard. — Le brevet de M. Isoard date du 10 juillet 1849. Un des premiers, il a fait usage des chaudières à circulation et il a définitivement adopté un serpentín contourné suivant la forme extérieure d'un cône; le feu était placé au-dessous de ce cône, dont toutes les parois intérieures recevaient, dans de bonnes conditions, l'action directe du feu.

C'est avec une chaudière ainsi disposée que nous avons eu occasion de faire, sur la machine de M. Isoard, à Sèvres,

* C'est dans ce même brevet de Perkins que l'on trouve l'indication de son canon à vapeur.

des expériences, sous la pression de 32 à 36 atmosphères, avec une entière sécurité. Les fuites du serpentin en fer étaient très-nombreuses, et le résultat final n'a pas été plus favorable, sous le rapport du travail et de la consommation, que celui des machines ordinaires, quoique M. Isoard eût imaginé des dispositions fort ingénieuses pour la garniture de son piston et des tiges, que la haute température de la vapeur aurait bientôt endommagés sans ces précautions.

La vaporisation obtenue par la combustion de 1 kilog. de houille n'a pas dépassé, avec cet appareil, 7 kilog.; mais si les fuites n'avaient été aussi nombreuses il est certain que, eu égard à leur pression élevée, ces 7 kilog. auraient fourni une quantité considérable de travail.

278. *Chaudières à circulation et à réservoir de vapeur.* — Dans la première chaudière de Perkins, la vapeur produite par les différents tubes était rassemblée dans le corps principal de la chaudière : dans l'appareil qui vient d'être décrit, ce corps de chaudière est entièrement supprimé, et la vapeur se trouve employée au fur et à mesure de sa production. M. Belleville, qui s'est beaucoup occupé de ces sortes d'appareils, avait d'abord pensé que par suite de l'étendue surabondante de la surface de chauffe, la-vapeur se produirait toujours suivant les besoins de la machine.

Il a bientôt reconnu qu'il n'en était pas ainsi, et l'on ne fait plus aujourd'hui de chaudières à circulation sans les munir d'un réservoir de vapeur, qui est tantôt formé par les tubes eux-mêmes, tantôt disposé à leur suite de manière à former une sorte de régulateur.

279. *Chaudière de M. Belleville.* — Quoique certainement postérieur à M. Isoard, M. Belleville, dont le brevet date du 28 août 1850 seulement, est cependant de tous les constructeurs celui qui a le plus fait pour rendre pratiques les chaudières à circulation.

Le premier appareil, qu'il avait établi chez M. Gandillot, à la Briche, fonctionnait avec une certaine régularité, mais on

s'était trop pressé d'annoncer une solution complète de cette question : les variations de la pression, les effets des incrustations, en un mot les diverses exigences de la pratique, ont obligé M. Belleville à beaucoup modifier son appareil primitif, et c'est ainsi qu'il a été amené à son mode actuel de construction, que nous pensons devoir décrire avec d'autant plus de détails que nous n'aurons plus à y revenir, dans la suite de nos études sur les chaudières à vapeur.

Plusieurs imprimeurs de Paris se servirent du générateur de M. Belleville, et nous avons vu un de ces générateurs au sixième étage d'une maison de la rue de Saint-Denis, où il fonctionne depuis plusieurs années déjà.

L'appareil que nous représentons, pl. V, fig. 3, d'après un dessin qu'a bien voulu nous remettre M. Belleville, a une largeur de 1^m,30, une profondeur de 1^m,60, une hauteur de 1^m,80. Sous le volume de 3,74 mètres cubes, il vaporise 200 kilogrammes d'eau par heure; la surface de chauffe totale dépasse 10 mètres carrés.

Au lieu d'employer l'eau, comme il l'avait fait dans les premières dispositions, par simple circulation, M. Belleville remplit tous les tubes verticaux F jusqu'à une certaine hauteur, la même pour tous, parce qu'ils communiquent librement avec deux tubes horizontaux E, par lesquels arrive l'eau d'alimentation. Ces tubes verticaux sont placés dans le foyer, dont ils forment les parois, et l'on comprend que, suivant la rapidité de l'alimentation, l'eau qui s'élève puisse passer à l'état de vapeur quand elle a parcouru dans ces tubes une certaine hauteur. Chacun des tubes forme ainsi une petite chaudière à demi remplie d'eau et de vapeur : s'il arrive exactement dans chaque tube une quantité d'eau égale à celle qui se vaporise, le niveau restera constant, et toute la difficulté consistait à ne faire arriver exactement que la quantité d'eau convenable ; c'est ce que l'on obtient au moyen d'un organe particulier que M. Belleville appelle régulateur d'alimentation.

La vapeur formée dans chaque tube se rend, après un par-

cours où elle se surchauffe, dans le tuyau général de prise de vapeur G, dont la pression est réglée à volonté par le fonctionnement de la soupape d'alimentation et de pression, disposée en amont de l'appareil, sur le tuyau d'alimentation.

Cette soupape est tellement disposée, qu'elle n'ouvre la communication avec l'appareil que quand la pression est égale ou inférieure à la pression normale, et que dans le cas contraire toute l'eau soit envoyée au dehors. Il n'arrive donc d'eau dans la chaudière que si la pression est inférieure à une limite fixée d'avance, et suivant la volonté de l'opérateur : tout excès d'eau sera complètement évité, car quelques gouttes de trop seront suffisantes pour augmenter la pression, de la quantité nécessaire pour faire cesser l'alimentation. En même temps que cette soupape régulatrice de l'alimentation, M. Belleville emploie encore un appareil accessoire, qu'il désigne sous le nom de régulateur supplémentaire à flotteur H, et qui se compose en effet d'un tube dans lequel se meut un flotteur.

L'eau de ce tube, qui est en communication constante avec l'eau de la chaudière, se maintient au même niveau qu'elle ; le flotteur indique au dehors les petites variations de niveau qui peuvent se produire, et par le moyen d'une tige intermédiaire il fait ouvrir ou fermer un robinet placé sur le tuyau d'alimentation. L'objet de ce flotteur paraît bien secondaire : il ajoute cependant à la sûreté du fonctionnement de l'appareil et il a pour effet de donner des indications sur le niveau général, dont il assure le maintien, entre des limites très-rapprochées.

Dans la figure, E est l'un des tuyaux horizontaux communiquant d'une part avec l'alimentation, d'autre part avec tous les tubes ou tuyaux verticaux, qui sont ici au nombre de onze ; ces tubes verticaux se recourbent à la partie supérieure, de manière à former une sorte de plafond, dans les interstices duquel passe la fumée, avant de circuler autour des tubes de surchauffe ;

F, sont les tuyaux verticaux placés à droite et à gauche du foyer ;

K, sont les tuyaux de surchauffe, aboutissant tous au tuyau général de vapeur G ;

L, est le tuyau du flotteur H, dans lequel se trouve en B la naissance du tuyau de prise de vapeur ;

P, est le tuyau de communication entre le boîte du flotteur et les tuyaux inférieurs E ;

Q, est la naissance de la cheminée.

L'appareil est très-bien construit : plusieurs des industriels qui l'emploient en sont maintenant satisfaits, bien que l'on doive toujours craindre que la vapeur n'acquière une température suffisante pour nuire aux organes de la machine dans laquelle elle doit être admise.

Les tubes sont en fer ; ils ont 0^m,05 de diamètre extérieur ; les assemblages sont solidement faits avec des manchons à vis, que l'on peut démonter de temps en temps et qui permettent jusqu'à un certain point le nettoyage intérieur des tuyaux.

Dans les premiers appareils les incrustations ont été quelquefois considérables ; dans les nouveaux, on les enlève en faisant passer dans les tubes de l'acide chlorhydrique très-étendu d'eau : si sûr que soit ce procédé de nettoyage, il ne saurait être sans inconvénient pour la durée des tubes.

Au reste, la mise en vapeur est pour ainsi dire immédiate, et c'est là un caractère tout spécial des chaudières à circulation ; il pourra dans certains cas avoir une telle importance, que l'emploi de ces sortes de chaudières soit réellement indiqué.

Nous verrons, en parlant des règlements des chaudières à vapeur, que les dimensions de ces appareils servent de bases aux conditions d'après lesquelles les autorisations sont accordées : les chaudières à circulation sont les seules qui puissent être autorisées dans les maisons habitées, au delà d'une vaporisation par heure de 100 à 200 kilog.

Tout en appréciant, comme elles le méritent, la persévérance et l'habileté de M. Belleville, il nous est impossible

de ne pas dire que les essais qu'il a faits à Cherbourg ont été l'objet d'un rapport défavorable au ministère de la marine.

La réalisation d'une chaudière peu pesante et d'une prompte mise en feu serait cependant, si son emploi était à l'abri de tout inconvénient, de nature à être vivement appréciée par les ingénieurs des constructions navales.

280. *Chaudière Belleville employée avec l'eau de mer.* — Nous avons eu l'occasion de voir à Dunkerque une chaudière du système que nous venons d'indiquer, fonctionnant depuis plus de six mois avec l'eau de mer. Elle vaporisait plus de 200 kilog. à l'heure, et l'on évitait les incrustations au moyen d'un lavage fréquent.

Dans cette chaudière la vaporisation tout entière était produite par les tubes horizontaux, les tubes verticaux étant en partie supprimés.

Les essais n'ont pas été suffisamment prolongés pour qu'il soit possible de certifier que cette chaudière conserverait une régularité de marche plus assurée qu'avec les autres appareils du même genre; nous apprenons que depuis quelque temps déjà elle a été remplacée.

281. *Chaudière de M. Clavières.* — Les promoteurs les plus ardents des chaudières à simple circulation se rapprochent, ainsi qu'on peut le voir par la chaudière de M. Belleville, de la disposition générale de Perkins, au point de vue d'un volume d'eau plus ou moins considérable contenu dans l'appareil. La chaudière Clavières, que nous avons expérimentée à l'exposition de 1855, où elle a pendant longtemps fonctionné, est un autre exemple de cette condition, qui semble d'autant plus indispensable que l'on veut obtenir plus de régularité dans la production.

Au reste, la chaudière de M. Clavières ressemble beaucoup à celle de M. Belleville. Elle se compose, pl. V, fig. 4, de tubes droits, assemblés, à l'aide de manchons, dans des directions rectangulaires, les unes par rapport aux autres : à la partie supérieure, la vapeur formée est surchauffée, pendant

son dernier parcours, dans les tuyaux qui se trouvent en contact avec la fumée, jusqu'au moment où elle s'échappe dans la cheminée.

Cette chaudière a fonctionné pendant longtemps dans la salle des générateurs de l'exposition de 1855, et visitée par nous au moment du démontage, elle n'a présenté aucune trace d'incrustation : il est vrai qu'elle avait été constamment alimentée avec de l'eau de Seine, et par conséquent dans des conditions exceptionnellement favorables.

N'ayant pas l'intention de revenir sur cet appareil, nous en indiquerons dès à présent les dimensions principales :

Surface de la grille.....	0 ^m 9,90
Quantité d'eau contenue dans l'appareil.....	175 kilog.
Surface de chauffe en contact avec l'eau.....	7 ^m 9,47
Surface de chauffe en contact avec la vapeur..	17 ^m 9,86

Les expériences officielles ont duré 51 heures, pendant lesquelles on a consommé 4850 kilog. de houille et vaporisé 39 126 kilog. d'eau. On a donc obtenu, pour chaque kilogramme de combustible, une vaporisation de 8^k,10, résultat certainement très-satisfaisant.

Les tubes n'étaient pas brûlés au moment du démontage, les stries de la filière étaient encore apparentes à l'intérieur, et cette expérience semble démontrer que des appareils de cette espèce peuvent, lorsqu'ils sont bien conduits, fonctionner convenablement avec de l'eau peu incrustante. Ces mêmes avantages ont été signalés dans la plupart des expériences, mais ils paraissent être peu durables, car partout où l'on a été, pendant quelque temps, satisfait de ces appareils, on a fini par les démonter.

282. *Chaudière à circulation de M. Joly d'Argenteuil.* — La chaudière de M. Joly d'Argenteuil, pl. V, fig. 5, ne diffère de celle de M. Belleville que par des détails et par la présence d'un grand réservoir de vapeur.

Des tubes transversaux sont placés au-dessus de la grille,

au delà de laquelle la flamme est complètement entourée d'un système de tubes horizontaux et verticaux, entre lesquels elle est obligée de faire plusieurs circuits : dans leur dernier parcours, les gaz brûlés réchauffent encore la vapeur contenue dans les tubes supérieurs, avant qu'elle se rende dans le réservoir R. Un tuyau général d'alimentation amène l'eau simultanément dans tous les bouilleurs transversaux qui, plongés dans la flamme, déterminent, par mètre carré de surface de chauffe, une vaporisation considérable.

Cet appareil produit beaucoup eu égard à ses dimensions, mais il partage avec les autres chaudières à circulation tous les inconvénients résultant des incrustations, et on a lieu de craindre qu'il ne soit, comme elles, d'un entretien dispendieux.

285. Chaudière de M. Hédiard et Joly. — La présence d'une certaine quantité d'eau est tellement nécessaire à la régularité de la production, que les partisans les plus absolus des chaudières à circulation, ont été conduits, par l'expérience même, à ajouter à leurs appareils à tubes des capacités plus ou moins grandes, où l'eau est toujours en excès

C'est ainsi que dans la chaudière de MM. Hédiard et Joly, qui est représentée planche III, figure 9, on a substitué aux petits tubes bouilleurs qui sont indiqués dans les figures du numéro précédent, trois bouilleurs S, de plus grandes dimensions, et inclinés de la façon la plus favorable à la meilleure utilisation de la flamme.

Après ce premier parcours les gaz brûlés viennent entourer, comme le montre la figure, une série de vingt-quatre tubes U, dans lesquels circule la vapeur qui se dégage des bouilleurs et qui est séchée à ce contact, d'autant plus prolongé, que bien que réunis en faisceau, ces tubes sont disposés de manière que toute la vapeur soit obligée de les parcourir tous, les uns après les autres, avant d'entrer dans le régulateur d'alimentation R, formant réservoir de vapeur.

Ce régulateur est fait de deux cylindres superposés dont

l'un recueille l'eau entraînée, tandis que l'autre, sur lequel les soupapes de sûreté sont placées, porte également le tuyau de prise de vapeur.

La grande division de l'eau, et par suite la rapidité de la mise en marche, sont encore les caractères principaux de cette disposition, très-bien entendue d'ailleurs, quant au mode de construction.

284. Chaudières à circulation et à réservoirs d'eau et de vapeur. — Les insuccès multipliés des chaudières à tubes de circulation d'eau ont, ainsi que nous venons de le voir, successivement amené à des dispositions mixtes, sur le mérite desquelles l'expérience n'a pas encore prononcé d'une manière complète, et qui diffèrent des précédentes par un plus grand volume d'eau et une plus grande chambre de vapeur.

Ces appareils, en quelque sorte intermédiaires entre les chaudières ordinaires et les chaudières à circulation, présentent l'avantage d'une grande surface de chauffe directe, mais ils empruntent en même temps aux appareils à simple circulation les inconvénients que ceux-ci présentent, quant aux difficultés d'entretien, de nettoyage et de réparations.

Nous examinerons sous ce titre quelques systèmes qui ne pourraient être, ailleurs, classés d'une manière plus convenable.

285. Chaudière Larmanjat. — Le système de chaudière que M. Larmanjat a installé dans un assez grand nombre d'usines, se compose, pl. V, fig. 6, d'un serpentin unique, en fer, communiquant par ses deux extrémités avec un corps de chaudière, qui le recouvre à la partie supérieure. Ce corps de chaudière est rempli d'eau jusqu'à une certaine hauteur, ainsi que le serpentin lui-même, par suite de la communication libre établie au-dessous du niveau de l'eau par un tube vertical, spécialement disposé à cet effet : le foyer B est placé au-dessous de ce serpentin, dont les spires sont serrées de manière à former un véritable mur ; les gaz de la combustion sont obligés de monter entre l'enveloppe cylindrique ainsi

formée; ils viennent frapper le fond de la chaudière A, puis redescendent à l'extérieur des spires pour aboutir à la cheminée. L'eau échauffée par les gaz et par la chaleur du foyer tend à s'élever, en parcourant toutes les spires, et se rend ainsi dans le réservoir de vapeur qu'elle alimente, tandis que l'eau surabondante rejoint celle qui n'est pas encore vaporisée. La chaudière de M. Larmanjat réalise le principe de Perkins sous une forme très-rationnelle, et bien que nos propres expériences, qui remontent déjà à quelques années, ne nous aient signalé aucune économie de consommation, nous avons pu voir plusieurs générateurs de ce système en pleine activité dans les ateliers. Les manufacturiers qui s'en servent nous ont assuré qu'ils en étaient satisfaits. Le caractère particulier de cet appareil est d'être d'une installation très-simple, d'occuper peu de place, et d'être mis en feu très-prompement.

On purge cette chaudière comme les chaudières ordinaires, mais il paraîtrait que le refroidissement de l'appareil étant très-prompt après l'extinction du feu, les dépôts, s'il s'en est formé, s'écaillent par la contraction du métal, avec lequel ils sont en contact, et sont, dès les premiers moments de la circulation produite le lendemain, ramenés dans le corps de chaudière.

S'il nous était possible de conseiller l'emploi des chaudières à circulation, la disposition que M. Larmanjat a adoptée serait peut-être celle que nous recommanderions avec le moins de crainte, mais seulement avec des eaux de bonne qualité. Une expérience prolongée peut seule dire si les réparations du serpentín ne seront pas, après quelque temps d'usage, très-fréquentes.

286. Chaudière anglaise de Scott.— Nous ferons remarquer que les chaudières à circulation ne sont pas, seulement en France, l'objet de recherches analogues à celles que nous venons d'indiquer. On s'occupe beaucoup en Angleterre d'un appareil de M. Scott, qui se compose d'un ou de plusieurs serpentins placés concentriquement au-dessus d'un foyer; la

vapeur produite par ces serpentins, alimentés par une injection continue, se réunit dans une chambre, où elle se débarrasse de l'eau qu'elle aurait pu entraîner, et d'où, après s'être brusquement infléchie, elle se rend, comme à l'ordinaire, à la machine.

Il est vrai que M. Scott se propose des avantages particuliers en faisant circuler, dans ses tubes, de l'air destiné à agir sur les pistons des cylindres, en même temps que la vapeur qui sort avec lui : nous n'avons pas à apprécier ici cette disposition, à laquelle nous ne saurions toutefois attacher une grande importance, et nous nous bornons à signaler l'appareil de M. Scott, en parallèle avec quelques-uns de ceux qui fonctionnent chez nous d'une manière analogue.

237. *Chaudière de M. Boutigny.* — M. Boutigny, qui a fait une étude spéciale de tous les phénomènes que l'eau présente à l'état sphéroïdal, a construit une chaudière verticale dans laquelle il attribue au rayonnement de la chaleur, à l'intérieur de l'appareil, la vaporisation relativement considérable qu'il obtient.

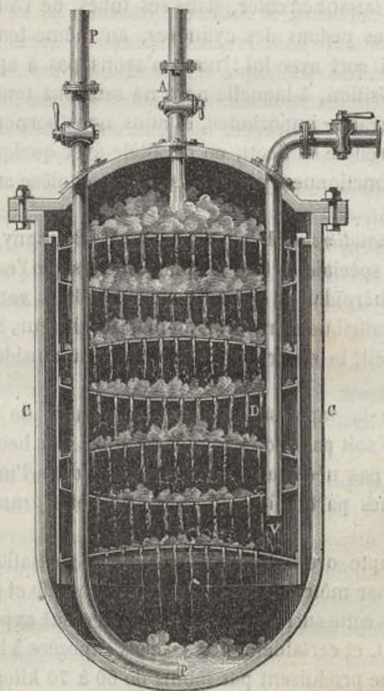
Quoique la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe ne soit pas moindre que 80 kilog. par heure, il n'est peut-être pas nécessaire de rechercher dans l'influence de phénomènes particuliers la cause de cette grande vaporisation.

On compte ordinairement sur une vaporisation de 20 à 25 kilog. par mètre carré de surface de chauffe et par heure, mais toute cette surface n'est pas directement exposée à l'action du feu, et certainement les parois exposées à la radiation du foyer ne produisent pas moins de 60 à 70 kilog. dans les conditions ordinaires.

La partie la plus intéressante de la chaudière de M. Boutigny est la cascade des diaphragmes, qui reçoivent toutes les incrustations, au grand avantage du corps de chaudière qui, chez lui, est en cuivre, métal qui jouit d'un pouvoir conducteur plus favorable que la tôle de fer.

L'eau arrivée (fig. 22) par le centre du couvercle, se répand successivement, en passant de l'une à l'autre, sur une série de plaques percées, au contact desquelles elle se vaporise en partie, et sur lesquelles elle dépose les éléments d'inscrusta-

Fig. 22.



tion qu'elle contenait. Dans un rapport que M. Callon a fait sur cet appareil, à la Société d'encouragement, il rend très-nettement compte des avantages que présente la chaudière de M. Bouligny quant au nettoyage : « En enlevant le couvercle et les diaphragmes, on peut atteindre facilement tout l'inté-

rieur du cylindre. D'ailleurs, chose remarquable et qui montre bien le rôle utile que jouent les diaphragmes comme agents de vaporisation, c'est sur ces diaphragmes et surtout sur celui du haut que se font les dépôts terreux, tandis que le cylindre reste parfaitement propre. Rien n'est donc plus facile que d'opérer un nettoyage, puisqu'il suffit d'ôter le couvercle, d'enlever le diaphragme, qu'on nettoiera à loisir, d'en mettre un de rechange et de refermer. Cela peut se faire au besoin, même les jours où la chaudière fonctionne, car comme elle ne renferme presque pas d'eau, on peut, une fois le couvercle rajusté, remettre en marche en quelques instants. »

La figure que nous donnons de cette chaudière est la figure originale qu'a publiée M. Boutigny, en 1857, dans ses *Études sur les corps à l'état sphéroïdal*. On remarquera la forme alternativement convexe et concave des diaphragmes, disposition par suite de laquelle l'eau se déplace alternativement du centre à la circonférence, et de la circonférence au centre.

Bien que la chaudière de M. Boutigny soit construite en tôle de cuivre, nous ne pensons pas qu'elle puisse présenter de danger d'explosion, par cette raison surtout qu'elle contient peu d'eau et qu'elle est peu volumineuse.

Des expériences ont été faites sur cette chaudière par M. Callon et par nous-mêmes : elles ont démontré que quand le combustible brûlait lentement, la vaporisation par kilogramme de houille était considérable, mais que si l'activité de la combustion devenait trop grande par rapport à la surface de chauffe, l'utilisation diminuait dans une proportion notable. Au reste, la question pratique à cet égard ne pourra être considérée comme complètement résolue qu'autant qu'il sera démontré expérimentalement que les gaz en quittant la chaudière ne conservent qu'une température peu élevée.

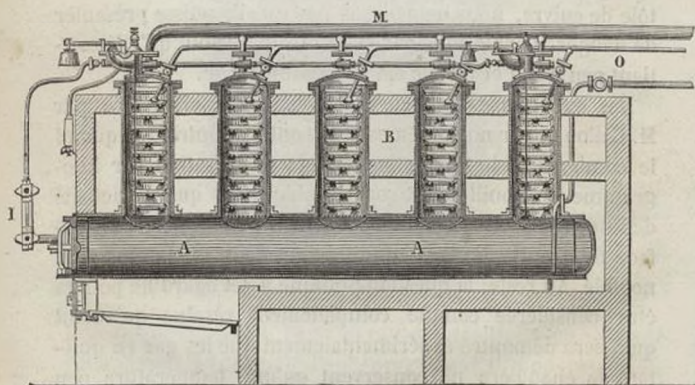
Nous sommes d'ailleurs entièrement de l'avis de M. Callon quand il dit qu'avec une chaudière de M. Boutigny et une

machine à grande vitesse de M. Flaud, on peut obtenir, sous un volume très-restreint et à un prix de premier établissement très-réduit (considération qui a bien aussi sa valeur), la fraction de cheval ou les quelques chevaux de force qui suffisent à la plupart des petits ateliers parisiens.

M. Boutigny a proposé d'employer son système de diaphragmes à des chaudières de plus grandes dimensions, mais il n'est pas à notre connaissance qu'il ait jusqu'ici réalisé cette application, qu'il regarde comme le complément de ses curieuses recherches sur l'état sphéroïdal des liquides.

L'application des diaphragmes étant maintenant un fait accompli et reconnu pour très-favorable, au point de vue de l'absence des incrustations, soit aux chaudières fixes, soit même aux chaudières des locomotives, en Allemagne, il nous a paru convenable de reproduire exactement la disposition que M. Boutigny, le premier, a proposée dès 1857 pour obtenir ce résultat.

Fig. 23.



La chaudière A (fig. 23) était surmontée de cinq dômes cylindriques, dans chacun desquels étaient placés dix plateaux,

percés alternativement près du bord ou vers le centre. Nous retrouverons une disposition très-analogue, lorsque nous nous occuperons des appareils proposés par M. Wagner et par M. Shaü pour recueillir les incrustations des chaudières à vapeur.

Quant aux chaudières de locomotives, M. Boutigny avait également pensé à leur appliquer le même principe des diaphragmes, lorsqu'il dit, page 137 : « Ces chaudières horizontales à foyer intérieur, et sur lesquelles seraient implantées un certain nombre de chaudières verticales à diaphragmes, seraient aussi très-convenables pour les locomotives qui ne donnent que difficilement de la vapeur sèche. » Il est juste de lui réserver l'idée première de cette application.

233. *Comparaison entre les chaudières à circulation et les chaudières ordinaires.* — En nous attachant à décrire les différents systèmes de chaudières à vapeur, nous avons pensé qu'il ne nous était pas permis de passer sous silence les recherches, certainement fort intéressantes, qui ont été faites pendant ces dernières années dans le but de substituer aux anciennes chaudières à vapeur, de grand poids et de grand volume, des appareils incomparablement moins volumineux.

Les résultats réalisés par ces appareils sont déjà très-remarquables, mais nous ne saurions pour cela les considérer comme ayant complètement résolu le problème d'une production de vapeur économique. Il ne peut y avoir pour nous économie de combustible qu'à la condition de refroidir, à l'avantage de la quantité de vapeur formée, les gaz de la combustion, au-dessous de la température à laquelle ils s'échappent dans les cheminées de nos chaudières ordinaires.

Il ne nous paraît pas qu'en diminuant le volume d'eau de la chaudière on puisse raisonnablement espérer que ce résultat sera atteint, et nous n'avons jusqu'ici été témoins d'aucun fait qui soit de nature à modifier à cet égard notre opinion.

Nous ne croyons donc pas aux avantages des chaudières à

circulation, au point de vue de l'économie du combustible, mais par cela même que nous serions disposés à les condamner sous ce rapport, nous nous croyons d'autant plus obligés de résumer, en quelques mots, les avantages qu'elles présentent par rapport aux autres chaudières.

Elles sont moins encombrantes.

Elles coûtent moins cher d'installation.

Elles peuvent être mises en vapeur beaucoup plus promptement.

Elles sont pour la plupart moins sujettes aux explosions.

Ce sont là certainement des propriétés remarquables et l'attention publique est justement préoccupée de quelques-uns de ces avantages, réalisés dès aujourd'hui d'une manière assez pratique, pour que plusieurs industriels, plus intéressés que d'autres à quelques-unes de ces conditions, aient pu les obtenir, sinon pendant un temps très-considérable, au moins d'une manière suivie.

D'un autre côté, les chaudières à grand volume ont la sanction d'une longue expérience.

Elles donnent certainement, avec plus de facilité et moins de soins, une production de vapeur parfaitement régulière.

Elles sont sujettes à moins de frais d'entretien.

Elles sont devenues d'une manœuvre journalière plus simple et plus commode.

On peut y combattre les effets des incrustations, soit par les moyens indiqués par M. Boutigny, soit par d'autres moyens analogues.

Nous ne voudrions pas certainement repousser la pensée de progrès ultérieurs, mais nous sommes disposés à craindre que les industriels ne s'engagent avec trop de précipitation dans une voie nouvelle. Beaucoup de dispositions fort ingénieuses ont été proposées, plusieurs fonctionnent d'une manière remarquable. C'est déjà beaucoup d'avoir fait entrer, en quelques années, l'idée des chaudières à circulation dans la pratique, avec quelques espérances de succès pour l'avenir.

VI. Chaudières chauffées au gaz.

289. Dispositions diverses de ces chaudières. — La nature du combustible doit toujours être prise en considération dans le choix à faire entre les différents systèmes de chaudières à vapeur; mais c'est surtout lorsque ce combustible est gazeux qu'il est nécessaire d'adopter certaines dispositions spéciales; c'est pour cette raison que nous ajouterons aux indications précédentes quelques données sur les chaudières plus spécialement destinées à être chauffées par des gaz.

Tantôt ces gaz, puisés le plus ordinairement au sortir des hauts fourneaux, sont amenés au contact d'une couche de houille en ignition, et alors la disposition diffère peu de celle des chaudières horizontales, telles que nous les avons décrites; tantôt au contraire les gaz doivent brûler seuls, et la grille est alors entièrement supprimée.

290. Chaudière horizontale pour combustible mixte. — Comme exemple de chaudières horizontales alimentées avec les gaz d'un haut fourneau, nous citerons celles de Montluçon, dans lesquelles, pl. VI, fig. 3 et 4, le combustible gazeux arrive par une conduite générale E qui le distribue à deux canaux FF, placés latéralement, à côté de la grille de chaque foyer, et conduisant eux-mêmes à une série d'ouvertures *f, f, f*, régnant à environ 50 centimètres au-dessus de la grille sur laquelle est distribuée, en petite quantité, la houille destinée à assurer la continuité du feu.

Le corps de chaudière, dans cette disposition, a généralement 1 mètre de diamètre et sa longueur se prolonge jusqu'à 10 mètres. La chambre H placée au delà de l'autel, conserve la même hauteur, dans toute la longueur de la chaudière, et les gaz achèvent de s'y brûler en utilisant, dans d'excellentes conditions, la surface de chauffe tout entière.

291. Emploi des flammes des fours à puddler et à réchauffer. — Les gaz des hauts fourneaux étant formés en grande partie d'oxyde de carbone, constituent par eux-mêmes un véritable

combustible, et ils agissent à la fois en développant de la chaleur par leur combustion, et en utilisant en partie celle qu'ils retenaient en sortant du gueulard; dans les autres fourneaux métallurgiques la proportion de l'oxyde de carbone est beaucoup moindre, et c'est surtout en raison de leur température que les gaz agissent; aussi n'est-il plus nécessaire de leur fournir de l'oxygène en aussi grande proportion; et la construction des fourneaux dans lesquels cette température doit être utilisée pour produire de la vapeur est alors de beaucoup simplifiée. La chaudière se place dans une sorte de prolongement de la cheminée, tantôt au-dessus, tantôt sur le côté, et dans le plus grand nombre des circonstances on dispose les choses de manière à faire arriver sous la même chaudière les gaz de plusieurs fours; on obtient alors plus de régularité dans la production de la vapeur et la température des gaz se trouve, par cela même, mieux utilisée.

292. *Chaudière verticale de MM. Cail et C^{ie}.* — Pour l'utilisation des chaleurs perdues des fours à puddler et des fours à réchauffer, MM. Cail et C^{ie} emploient maintenant des chaudières cylindriques, verticales, avec lesquelles ils obtiennent jusqu'à 6 kilogrammes de vapeur, par chaque kilogramme de combustible brûlé dans les fourneaux métallurgiques qui les desservent. Ces chaudières, qui ont été déjà installées, en grand nombre, dans des établissements métallurgiques importants, particulièrement au Creusot, où elles paraissent avoir pris naissance, et à Oullins, ont un diamètre de 1^m,20 et une hauteur qui peut atteindre jusqu'à 15 mètres. L'une de ces chaudières est représentée planche VI, fig. 5 et 6; les gaz arrivent par la partie inférieure et circulent au pourtour du corps cylindrique, dans une cheminée en briques réfractaires qui s'élève jusqu'aux deux tiers de la hauteur; cette cheminée se prolonge d'ailleurs par deux tuyaux en tôle M, M, que l'on ouvre ou que l'on ferme à volonté pour modifier le tirage. La partie supérieure de la chaudière forme réservoir de vapeur, et ce réservoir est abrité, contre les refroidis-

sements, par une enveloppe en maçonnerie, retenue par des cercles assez rapprochés. Le corps cylindrique A est, à la partie inférieure, muni d'un trou d'homme A, au moyen duquel le nettoyage peut se faire, et quant aux détails relatifs à l'alimentation de l'eau et à la sortie de la vapeur, ils n'offrent, par rapport aux chaudières ordinaires, aucune particularité.

293. *Chaudières anglaises chauffées par les flammes perdues des fours à puddler.* — Les figures 7 et 8 de la planche VI représentent une installation de ce genre, telle que nous l'avons vue dans les ateliers de MM. Brown et C^{ie}, à Scheffield; le grand diamètre de la chaudière a permis de ménager à l'intérieur de larges carnaux C qui assurent plus complètement la bonne utilisation de la surface de chauffe; des registres R très-bien disposés permettent d'ailleurs de rendre la circulation plus ou moins active.

Chacune de ces chaudières est ordinairement alimentée par quatre fours à puddler qui peuvent être placés sur une seule ligne ou sur deux lignes parallèles; la figure 8 indique la disposition la plus convenable pour le premier cas, qui est le plus général. Celle de la figure 9 est empruntée à une chaudière française alimentée seulement avec deux fours.

En Angleterre, les chaudières verticales sont employées dans la plupart des usines à fer, mais on leur donne en général des diamètres trop considérables, et elles ont déjà éprouvé de terribles explosions qu'on peut, à bon droit, attribuer à cette cause.

294. *Chaudière horizontale et verticale de MM. Claparède et Commartin.* — MM. Claparède et Commartin construisent depuis quelque temps pour le même objet des chaudières verticales qui sont munies d'un corps cylindrique horizontal, disposé comme ceux des chaudières tubulaires. Ces appareils, représentés planche VI, fig. 10, fournissent, à l'égal des précédents, de très-bons résultats, et la faveur dont ils jouissent est bien faite pour mettre en lumière l'importance

que nos fabricants attachent à utiliser, autant que possible, toute la chaleur dont ils disposent; on pouvait en perdre, sans aucun inconvénient, une partie lorsqu'elle était produite en trop grande abondance, pour le développement de la puissance motrice nécessaire à un outillage moins considérable que celui que les usines possèdent aujourd'hui.

On remarquera dans cette disposition la forme de la pièce de tôle qui forme le foyer; cette pièce, d'une exécution très-difficile et qui exige des tôles d'excellente qualité, est employée par ces habiles constructeurs dans tous leurs foyers de machines locomobiles; elle est d'un très-bon usage et elle constitue une véritable amélioration par rapport à toutes les dispositions antérieures.

VII. Résumé.

293. Observation sur le volume des chaudières à vapeur. — Les auteurs anglais se préoccupent beaucoup du volume à donner aux chaudières à vapeur, et bien que cet élément n'ait plus aujourd'hui l'importance qu'on lui accordait autrefois, il ne sera pas inutile de caractériser les différents systèmes, sous le rapport du volume correspondant à chaque mètre carré de surface de chauffe. C'est ce qu'on pourrait appeler la surface de chauffe par mètre cube de capacité.

Nous suivrons en cela l'exemple de M. Fairbairn, auquel nous empruntons la plupart des chiffres déduits d'exemples pratiques et qui constituent le tableau suivant :

	Volume total.	Surface de chauffe.	Rapport.
Vieille chaudière hémisphérique. Fairbairn....	9,88	11,99	1,21
Chaudière à tombeau, sans carneau intérieur. F..	29,54	29,72	1,01
Chaudière à tombeau, avec carneau intérieur. F..	25,29	40,13	1,58
Chaudière cylindrique sans carneau intérieur. F.	22,32	20,90	0,94
Chaudière cylindrique avec carneau intérieur. F..	16,38	33,44	2,00
Chaudière cylindrique avec 2 foyers intérieurs. F, et carneaux au-dessous.	16,21	50,91	3,14
Chaudière cylindrique avec 5 tubes de 0,25. F..	17,12	82,67	3,08
Chaudière cylindrique avec 2 bouilleurs infé- rieurs.	3,96	7,80	2,00
Chaudière cylindrique avec 2 bouilleurs latéraux.	4,50	9,00	2,00
Chaudière de locomobile.	1,00	10,00	10,00
Chaudière de locomotive.	4,18	96,65	23,15
Chaudière de bateau.	0,23	1,40	6,00
Chaudière Zambeaux.	0,30	9,53	31,70
Chaudière à circulation (système Clavières).	0,20	25,33	125,00

Ces chiffres démontrent que les chaudières des locomotives se suffisent avec un volume d'eau beaucoup moindre que celui qu'on exige des chaudières fixes, mais ils font voir aussi que les chaudières à circulation ne présentent qu'un volume très-restreint, par rapport à celui de tous les systèmes de générateurs qui sont devenus d'un emploi général.

En ce qui concerne les chaudières marines, la nécessité d'extraire l'eau, à mesure qu'elle est saturée de sel, exige que le volume soit relativement plus considérable.

296. *Emploi des divers systèmes de chaudières à vapeur, suivant leur destination.* — Abstraction faite des particularités relatives à certains systèmes qui ne sont pas entrés jusqu'ici d'une manière suffisante dans la pratique, nous chercherons à indiquer d'une manière générale le rôle que les différentes dispositions remplissent dans l'état actuel des choses; malgré le nombre toujours croissant des systèmes proposés, l'industrie se trouve conduite à adopter :

- 1° Pour les machines fixes, les chaudières cylindriques, à bouilleurs inférieurs ou à bouilleurs latéraux; les chaudières tubulaires, qui produisent une bonne utilisation du combustible, étant d'un nettoyage trop difficile pour les employer, sans nécessité absolue, à un travail continu;
- 2° Pour les machines de bateaux, les chaudières à foyer intérieur et à retour de flamme par des tubes, avec les formes arrondies que nous avons rencontrées dans les constructions les plus récentes;
- 3° Pour les machines locomotives, la chaudière tubulaire à corps cylindrique et boîte à feu rectangulaire, avec échappement de la vapeur dans la cheminée;
- 4° Pour les machines locomobiles, les chaudières tubulaires à corps cylindrique, avec ou sans retour de flamme, mais en ayant, dans tous les cas, l'attention de donner à la chambre de combustion une dimension suffisante, et aux

tubes un diamètre de 6 centimètres : l'échappement dans la cheminée sera toujours employé pour activer la combustion.

C'est surtout sur ces quatre types que porteront les indications que nous aurons maintenant à donner sur l'établissement des différentes parties des chaudières à vapeur et de leurs fourneaux. Nous devons ajouter, comme essentielle, cette observation que, dans tous les appareils tubulaires, le plus grand progrès à réaliser consiste dans l'emploi général des chaudières à foyers amovibles, dont nous avons indiqué avec soin les dispositions principales.

CHAPITRE IV.

DÉVELOPPEMENT ET UTILISATION DE LA CHALEUR DANS LES FOURNEAUX DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

I. Production de la chaleur.

297. *Développement de la chaleur par la combustion.* — Nous avons vu comment la combinaison de l'oxygène avec les différents combustibles pouvait développer un nombre de calories plus ou moins considérable, suivant que variait la quantité d'oxygène entrée en combinaison. La combustion du carbone, lorsqu'elle donne naissance à de l'acide carbonique, développe plus de chaleur que quand elle ne produit que de l'oxyde de carbone. En réalité, dans les fourneaux des chaudières à vapeur les produits de la combustion sont différents sur les divers points de la grille, et les moindres variations dans les courants d'air suffisent pour modifier la nature de ces produits.

Pour étudier avec fruit un phénomène aussi complexe que celui de la combustion sur la grille, dans la chambre de combustion et dans les carneaux, il est indispensable d'examiner isolément les diverses combinaisons que peuvent former chacun des éléments qui entrent dans la composition des combustibles.

298. *Combustion du carbone dans les foyers des chaudières à vapeur.* — Lorsque le carbone est mis, à une température suffisamment élevée, en contact avec l'oxygène de l'air, en excès, il brûle en augmentant encore cette température et passe presque entièrement à l'état d'acide carbonique, qui s'échappe, à l'état gazeux, avec l'azote, non altéré, de l'air qui a servi à la combustion. Si une portion de l'air n'a pas été modifiée dans sa composition, elle s'échauffe aux dépens du calorique dégagé par le phénomène de la combustion, et tous les gaz s'échappent ensemble à une température moins élevée.

La combustion sera d'autant plus complète que le volume de l'air dépensé sera plus grand par rapport au combustible brûlé, toutes circonstances de température et de tirage restant d'ailleurs identiquement les mêmes.

299. *Formation et combustion de l'oxyde de carbone.* — Mais l'air n'est pas toujours en excès sur tous les points, et il se forme aussi de l'oxyde de carbone qui brûlera plus tard et seulement, s'il est placé, pendant son parcours, dans des conditions convenables, c'est-à-dire si, pendant qu'il est encore à une température suffisamment élevée, il rencontre quelque courant chargé d'oxygène.

La combustion du carbone se fera sur la grille, celle de l'oxyde de carbone dans la chambre de combustion et dans les carneaux, et une certaine partie de cet oxyde de carbone pourra atteindre la cheminée sans avoir brûlé, par conséquent sans avoir développé la quantité de chaleur qui correspond à la transformation de l'oxyde de carbone en acide carbonique. Certaines parties du carbone pourront aussi échapper à toute combustion, soit parce qu'elles passeront à travers les barreaux, à l'état d'escarbilles, soit parce qu'elles se trouveront enveloppées et empâtées dans les masses scoriformes, auxquelles on donne le nom de mâchefer, et qui s'accumulent sur les grilles.

500. *Formation de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone.* — La condition principale qui détermine la formation de l'acide carbonique étant évidemment la présence de l'air en excès et à une température élevée, il semblerait que l'oxyde de carbone devrait se former toutes les fois que cette condition n'est pas remplie, dans toute son étendue. Cependant il serait plus juste de dire que l'acide carbonique se produit exclusivement dans les combustions lentes, et qu'au contraire l'oxyde de carbone est généralement le résultat d'une combustion trop vive. M. Gérondeau, qui s'est occupé de cette question, a cherché, de la manière suivante, à démon-

trer que l'oxyde de carbone peut se former ainsi, même lorsque le combustible n'a qu'une très-faible épaisseur :

- 1° Dans la nature vivante et dans la nature morte, la combustion lente du carbone ne donne lieu qu'à de l'acide carbonique. Exemples : La pourriture du bois, la respiration des animaux, etc. ;
- 2° Dans le procédé de carbonisation du bois, que l'on désigne habituellement sous le nom de nouvelle méthode des forêts, l'expérience prouve que la carbonisation se produit au centre de la meule ; le charbon y occupe la position d'un tronc de cône renversé, et les gaz qui s'échappent des événements ne contiennent pas d'oxyde de carbone, bien qu'ils aient été en contact avec du charbon pendant un long parcours ;
- 3° Dans les hauts fourneaux la combustion est extrêmement vive, et M. Ebelmen a constaté cependant qu'à 0^m,30 de hauteur au-dessus de la tuyère, tout l'acide carbonique est transformé en oxyde de carbone.

On comprend d'ailleurs que, si la quantité d'air est trop considérable, la température des produits gazeux ne puisse être aussi élevée, quoique les points en ignition conservent un éclat très-vif.

Il paraîtrait donc que pour diminuer autant que possible la formation de l'oxyde de carbone, il conviendrait de ne pas donner à la combustion une trop grande vivacité.

501. Entraînement mécanique de parcelles charbonneuses. —

Nous ne saurions, en aucune façon, admettre que des parcelles de carbone soient entraînées en nature, en quantité notable et de manière à donner aux gaz de la combustion cette apparence noire qui constitue la fumée : si des parcelles de charbon sont effectivement emportées avec les cendres les plus fines, elles se déposent avec elles dans les premiers carnaux, mais en quantités très-faibles.

Mais, soit qu'une certaine quantité de carbone existe dans la houille à l'état d'hydrocarbure, en combinaison avec l'hydrogène, soit que des produits de cette nature résultent des premières atteintes de la chaleur sur le combustible, hypothèse qui doit être la plus exacte dans la presque généralité des cas, il est certain qu'une certaine quantité de carbone s'échappe encore à l'état gazeux, combiné à l'hydrogène, et que, si nous ne trouvons pas cet hydrogène carboné dans les produits de la combustion, c'est que ces produits eux-mêmes auront été transformés, sous l'action oxydante de l'air atmosphérique et de l'oxygène qu'il renferme. Nous verrons bientôt à quelles causes il convient d'attribuer la formation de la fumée noire qui se dégage principalement de certains combustibles, surtout au moment où on vient de les introduire dans le foyer.

302. *Combustion de l'hydrogène dans les foyers des chaudières à vapeur.* — L'hydrogène que contiennent les différents combustibles peut y exister, ainsi que nous l'avons vu, sous forme de combinaisons très-différentes : à l'état d'eau hygrométrique ; à l'état d'hydrogène pur ; à l'état de carbures plus ou moins hydrogénés, qui préexistent, ou qui se forment comme premiers produits de la distillation.

L'hydrogène pur se brûle au contact de l'air en excès, à une température suffisamment élevée, et l'eau ainsi formée se dégage à l'état de vapeur avec l'eau hygrométrique préexistante.

Il est possible cependant que certaines portions d'hydrogène échappent à la combustion sur la grille : elles brûleront plus loin, si elles se trouvent placées dans des conditions favorables, mais si ces circonstances ne se présentent pas, on retrouvera de l'hydrogène gazeux dans la cheminée, comme on y trouve de l'oxyde de carbone non transformé en acide carbonique. Cet hydrogène devra, dans ce cas, être considéré comme du combustible perdu, sans production d'aucun effet utile.

303. *Combustion des hydrocarbures gazeux.* — Quant aux vapeurs d'hydrocarbures liquides ou aux hydrocarbures gazeux qui prennent naissance sous l'action de la chaleur, ils pourront être brûlés en totalité, au moment de leur dégagement, ou plus tard, et alors ils formeront aussi de la vapeur d'eau, de l'acide carbonique, et de l'oxyde de carbone seulement, si les conditions dans lesquelles la combustion se produit sont moins favorables; on pourra même avoir pour résultat un dépôt de charbon fuligineux, comme celui qu'on obtient dans certaines lampes à huile de schiste, lorsque le double courant d'air n'est pas suffisant et que la mèche fume, ou même dans la flamme du gaz d'éclairage. Ce qui démontre d'ailleurs que ces réactions successives constituent l'unique cause de la fumée, c'est que, dans un cas comme dans l'autre, le produit est absolument le même: du charbon non pas pulvérulent, mais fuligineux, qui s'attache à tous les corps qu'il rencontre, et dont l'extrême division permet le transport à grandes distances par les courants gazeux: l'odeur empyreumatique de cette fumée est encore une raison démonstrative à l'appui de cette opinion.

La comparaison que nous avons faite entre la fumée de la lampe à hydrocarbure liquide, et celle des foyers de machines à vapeur, suffit d'ailleurs pour établir qu'un grand excès d'air est nécessaire, et que la moindre modification dans le tirage pourra se faire sentir à l'instant par la production d'une épaisse fumée. Si les hydrocarbures ne sont pas brûlés en totalité, au-dessus de la grille et dans le voisinage du foyer, il ne sera plus possible de se débarrasser, ni dans les carneaux, ni dans la cheminée, de la fumée qui aura été la conséquence d'une première combustion incomplète.

304. *Formation de la fumée.* — L'explication que nous venons de donner est d'autant plus importante qu'elle nous permettra d'examiner, au point de vue le plus convenable et le plus utile, les appareils à l'aide desquels on cherche à supprimer la fumée. Si l'on admet avec nous que cette suppres-

sion ne peut avoir lieu qu'en consommant une grande quantité d'air, on sera moins porté à croire qu'une combustion plus parfaite soit le gage assuré d'une meilleure utilisation du combustible.

Nous assurerions presque le contraire, et, le plus souvent, par cela même que la présence d'une certaine quantité de fumée indique que l'air n'est pas en excès, nous admettrions volontiers que le foyer fonctionne dans des conditions d'économie convenables.

505. Phases successives de la combustion après chaque chargement. — On voit par ce qui précède qu'il pourra se former sur la grille de l'acide carbonique, de l'oxyde de carbone, de la vapeur d'eau, des hydrocarbures volatiles ou gazeux et de la fumée, suivant les conditions plus ou moins favorables dans lesquelles se trouveront placés les différents éléments qui concourent au développement de la chaleur.

On comprend d'ailleurs que ces différentes actions ne se produisent pas d'une manière régulière, et qu'elles doivent varier, pour le même combustible, suivant qu'il est dans le foyer depuis un temps plus ou moins long.

L'ouverture de la porte du foyer exerce aussi une très-grande influence sur le phénomène, et les irrégularités qui en sont la conséquence, portent à conclure que les chaudières doivent avoir un grand volume d'eau, qui leur permette, malgré ces irrégularités, de fournir toujours, aux dépens de la vapeur déjà formée, un courant constant de vapeur.

Tout le monde sait que la fumée se produit avec le plus d'intensité un peu après le chargement, qu'à ce moment la température du foyer est relativement très-basse, et que cette température ne devient uniforme que quand la fumée a disparu et que l'influence de l'ouverture de la porte a cessé.

Mais le phénomène a été observé d'une manière plus exacte, tant sous le rapport des variations de température, que sous le rapport de la longueur de la flamme, circonstances qui sont évidemment les plus importantes à constater.

306. Température des corps en ignition.— Les températures inférieures au point d'ébullition du mercure peuvent être observées avec facilité avec le thermomètre ordinaire, mais il n'en est pas de même des hautes températures, que l'on n'estime en général qu'à la simple vue ou par des moyens qui peuvent bien indiquer que les résultats sont relativement plus grands ou plus petits, mais non pas fournir des chiffres exacts.

M. Pouillet, cependant, est parvenu, au moyen d'un thermomètre à air, à réservoir en platine, à former le tableau suivant des températures qui correspondent aux divers aspects que présente ce métal, lorsqu'il est porté à la température rouge.

TABLEAU DES TEMPÉRATURES CORRESPONDANT AUX DIVERS

ASPECTS DU PLATINE.

Couleurs du platine.	Température en degrés centigrades.
Rouge naissant.....	525
Rouge sombre.....	700
Cerise naissant.....	800
Cerise.....	900
Cerise clair.....	1000
Orangé foncé.....	1100
Orangé clair.....	1200
Blanc.....	1300
Blanc soudant.....	1400
Blanc éblouissant.....	1500

Ce mode de détermination est peu applicable aux besoins de l'industrie, mais nous pouvons, par le raisonnement, avoir, avec une certaine approximation, une estimation de la température des gaz de la combustion.

Si 1 kilogramme de charbon fournit 8000 calories, et si ces calories sont employés à chauffer les produits provenant de 1 kilogramme de combustible, et ceux provenant de 18 kilogrammes d'air avec lequel nous pouvons supposer que la combustion est alimentée*; chaque kilogramme de gaz aura

* Nous indiquerons ultérieurement quel est en réalité le poids de l'air qui correspond à la combustion d'un kilogramme de houille.

à sa disposition $\frac{8000}{19}$ ou 400 calories environ. Si donc les gaz de la combustion avaient la même capacité que l'eau pour la chaleur, la température de ces gaz serait de 400°.

Mais les gaz ont une capacité moindre, et par conséquent cette température est plus élevée.

Nous avons donné au n° 98 la table de la capacité des différents gaz pour la chaleur; elle est pour tous les gaz inférieure à 0,30, et, si nous admettons ce chiffre comme une moyenne, la température calculée des gaz, au moment de la combustion, sera modifiée dans le même rapport.

$$\frac{400}{0,30} = 1300^{\circ};$$

et, en effet, on obtient facilement la température blanche dans les fourneaux des chaudières à vapeur, particulièrement dans les fourneaux en maçonnerie, surtout s'ils sont chauffés avec du coke, sur lequel l'action frigorifique des produits gazeux n'a pas la même influence que dans les fourneaux à houille.

Cette vérification est plus curieuse que réellement utile en ce que nous savons parfaitement que les gaz sont considérablement refroidis, après l'accomplissement du phénomène de la combustion, et que c'est même dans ce prompt refroidissement que réside le moyen d'utiliser la chaleur produite.

507. Expériences de M. Wye Williams. — Nous n'avons pas d'ailleurs de mesure plus directe de cette température, les moyens que la physique peut mettre à la disposition de la science pratique étant à cet égard très-limités.

Mais si la température initiale est difficile à observer dans le lieu de la combustion, il n'en est pas de même à une certaine distance; il suffit, pour pouvoir se servir d'un thermomètre à mercure, de le placer assez loin du foyer et par conséquent dans un courant assez refroidi, pour que le mercure ne soit jamais volatilisé.

C'est ce qu'a fait M. Williams qui a pu, en outre, par la fusion d'un certain nombre d'alliages métalliques, recon-

naître que la température allait rapidement en décroissant à mesure qu'on s'éloignait de la grille : dans ses expériences, la température était encore supérieure à 400°, bien au delà de la grille, et à 0^m,30 centimètres seulement de distance en amont de la cheminée.

Cet habile physicien, auquel on doit des travaux très-remarquables sur l'étude pratique des phénomènes de la combustion, a déterminé avec soin les modifications qui surviennent dans le foyer, après chaque charge nouvelle de combustible ; les chargements étaient faits à 40 minutes de distance les uns des autres et les indications du thermomètre ont été observées de 2 en 2 minutes.

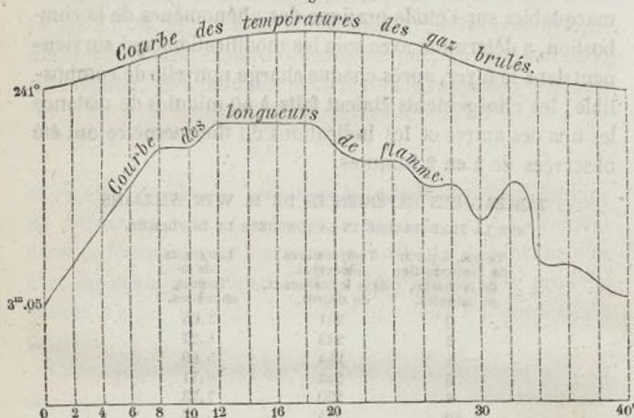
TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE M. WYE WILLIAMS
SUR LA TEMPÉRATURE ET LA LONGUEUR DE LA FLAMME.

Temps, à partir de l'introduction de la charge, en minutes.	Températures observées dans les carneaux, en degrés.	Longueurs de la flamme, en mètres.
0	241	3,05
2	243	4,27
4	254	5,49
6	262	6,71
8	270	7,93
10	274	7,93
12	276	8,54
14	279	8,54
16	282	8,54
18	282	8,54
20	282	7,93
22	280	7,32
24	274	7,32
26	262	6,71
28	256	6,71
30	252	5,49
32	246	6,71
34	242	4,27
36	244	4,27
38	236	3,66
40	236	3,05

On voit, par ce tableau, que les variations dans la température des gaz de la combustion ne sont pas aussi grandes qu'on aurait pu le croire, mais il est important de remarquer que la grille était toujours uniformément garnie, que le foyer de M. Wye Williams était parfaitement entretenu, que le combus-

tible était divisé en fragments, autant que possible de grosseur uniforme, toutes circonstances qui doivent influer d'une manière notable sur les résultats. Les variations ainsi constatées doivent être considérées comme réduites au minimum ; elles sont souvent beaucoup plus grandes.

Fig. 24.



Nous avons représenté par une courbe (fig. 24) les résultats de M. Williams, en prenant les températures pour ordonnées et pour abscisses les temps écoulés depuis le dernier chargement. Cette courbe montre bien, par sa forme, que la température va en augmentant d'une manière régulière jusqu'à la seizième minute ; elle reste, après cela, pendant 4 et 5 minutes stationnaire et baisse ensuite lors du nouveau chargement.

Le fourneau est nécessairement refroidi par le courant d'air froid qui passe par les portes, pendant qu'elles sont ouvertes, et par le combustible froid que l'on répand sur la grille ; mais bientôt le nouveau chargement s'allume, il donne naissance à des gaz enflammés qui circulent dans les carneaux et qui les échauffent jusqu'à une grande distance, puis le coke brûle seul, et la température des carneaux devient moindre.

La température des gaz est d'ailleurs d'autant plus grande que l'on s'approche davantage du foyer, ainsi qu'on a pu s'en assurer par la fusion d'une série d'alliages métalliques préparés spécialement pour cet objet par sir Robert Kane. On s'est assuré, par ce moyen, que même à 0^m,30 de la cheminée la température était encore supérieure à 400°.

508. Longueur de la flamme.— En même temps M. Wye Williams a déterminé, au moyen de regards convenablement disposés, la longueur de la flamme ; et l'une des courbes de la figure précédente représente les variations de cette longueur, dont le maximum n'était pas moindre que 8^m,53 et dont le minimum n'est pas descendu, dans ces expériences, au-dessous de 3^m,05.

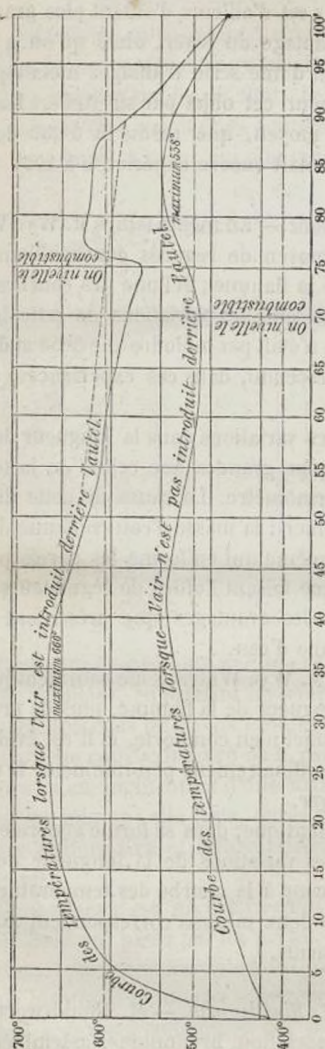
On remarquera que les variations dans la longueur de la flamme sont beaucoup plus grandes que celles de la température mesurée au thermomètre. La cause de cette différence est facile à déterminer : la masse d'eau contenue dans la chaudière et le métal même qui en forme les parois peuvent être regardés comme faisant l'office de régulateurs, et c'est encore là un indice des avantages que présentent les chaudières à grand volume d'eau.

Les déterminations de M. Wye Williams ne sauraient présenter, à l'égard de la longueur de la flamme, plus de précision que la nature du sujet n'en comporte, et il est évident que le courant d'air est ordinairement peu lumineux à une si grande distance du foyer.

On remarquera cependant que, dans sa forme générale, la courbe qui représente les variations de la longueur de la flamme ressemble beaucoup à la courbe des températures ; les deux maxima et les deux minima correspondent exactement aux mêmes moments.

509. Expériences de M. Houldsworth.— M. Houldsworth a fait, en 1842, pour l'Association britannique, assemblée à Manchester, une série d'expériences sur le même sujet, en

Fig. 25.



opérant avec un pyromètre particulier dont la description ne nous paraît pas d'un grand intérêt.

Ces expériences, bien qu'antérieures à celles de M. Wye Williams, sont d'accord avec les résultats précédents, au point de vue de la variation des températures, mais elles nous apprennent quelque chose de plus sur trois questions importantes :

1° Sur la nature de la flamme ;

2° Sur l'influence d'un bon nivellement du combustible ;

3° Sur l'influence d'un accès d'air au-dessus de la grille.

Les données des observations de M. Houldsworth sont rapportées dans le tableau suivant : on remarquera que les chargements n'étaient renouvelés qu'après 100 minutes, et qu'on se bornait à niveler le combustible sur la grille, lorsqu'il s'était

écoulé 70 ou 75 minutes après le chargement.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE M. HOULDSWORTH, SUR LA TEMPÉRATURE DES GAZ BRÛLÉS.

Temps écoulé
depuis
le
chargement.Observations
faites sans introduction d'air derrière l'autel.

	Apparence de l'air brûlé.	Température dans les carneaux.
5'	Gaz noir, beaucoup de fumée.....	432°
10'	Idem	450
15'	Idem	460
20'	Idem	478
25'	Idem	493
30'	Gaz d'un rouge obscur.....	510
35'	Rouge sombre.....	520
40'	Rouge sombre, sans flamme.....	528
45'	Idem	522
50'	Rouge obscur.....	515
55'	Obscur.....	500
60'	Obscur.....	457
65'	Obscur.....	490
70'	Obscur.....	480
75'	Obscur.....	510
80'	Rouge obscur.....	530
85'	Obscur.....	535
90'	Obscur.....	515
95'	Obscur.....	490
100'	Obscur.....	457

Observations
faites avec introduction d'air derrière l'autel.

	Apparence de l'air brûlé.	Température dans les carneaux.
	Flamme claire de 4 ^m , 27.....	595°
	.....	620
	.....	635
	Flamme claire de 4 ^m , 57.....	650
	.....	655
	Flamme claire de 5 ^m , 18.....	658
	Flamme claire de 4 ^m , 57.....	665
	Flamme claire de 4 ^m , 25.....	650
	Flamme claire de 3 ^m , 96.....	635
	.....	620
	.....	605
	.....	600
	Flamme claire de 3 ^m , 96.....	588
	.....	572
	Flamme claire de 4 ^m , 57.....	560
	Flamme violette d'oxyde de carbone.....	620
	.....	615
	.....	565
	.....	515
	.....	457

Ces observations se trouvent, quant aux températures, résumées dans les diagrammes que représente la figure 25.

Les deux courbes atteignent leurs maxima, l'une à 40 minutes, l'autre à 35 minutes; mais, dans le cas d'introduction de l'air derrière l'autel, l'élévation de température est beaucoup plus rapide, l'inflammation des gaz étant ainsi rendue plus prompte.

Dans les deux cas aussi le nivellement du charbon sur la grille donne lieu à des ressauts très-marqués, dans lesquels se trouve même le maximum absolu de la température, pour le cas où il n'y a aucune introduction supplémentaire derrière la grille.

Les températures observées n'ont pas été supérieures, respectivement à 538° et 666° centigrades.

On peut d'ailleurs résumer, en modifiant un peu les conclusions de l'auteur, les résultats généraux de ces expériences, ainsi qu'il suit :

1° L'irrégularité de la distribution du charbon sur la grille, en donnant passage à l'air par certains points, fait tomber rapidement la température.

2° L'égälisation de la couche de combustible fait rapidement remonter la température.

3° L'introduction de l'air derrière l'autel donne lieu à une flamme longue et persistante, et à la suppression presque totale de la fumée.

4° Cette introduction produit une augmentation considérable dans la température des carneaux.

5° La température atteint, dans tous les cas, son maximum 40 minutes après le chargement.

Il ne faudrait pas cependant déduire de cette dernière conclusion que les chargements ne doivent être renouvelés qu'à longs intervalles : la fréquence des charges paraît au contraire favorable à une grande uniformité de température,

parce qu'alors on introduit moins de combustible à la fois, et qu'ainsi le fourneau se trouve moins refroidi. L'exagération de ce principe conduirait aussi à une pratique très-mauvaise, en ce que le refroidissement, par l'air introduit pendant l'ouverture de la porte, pourrait devenir très-nuisible à une bonne combustion. Nous reviendrons d'ailleurs, au point de vue pratique, sur cette question importante des avantages et des inconvénients de la fréquence des charges.

II. Air consommé et gaz produits.

310. Détermination de la quantité d'air consommée. — Cette détermination est, dans la plupart des circonstances, très-difficile, en ce qu'elle est fréquemment contrariée par l'ouverture des portes des foyers, lorsqu'on veut opérer avec un anémomètre placé sur un tuyau de conduite disposé en amont de la grille; lorsqu'au contraire on veut opérer en aval ou même dans la cheminée, on se met à l'abri de ces intermittences, mais on ne peut tenir compte avec exactitude ni de la pression, ni de la température, ni de l'augmentation de volume des gaz après leur combustion.

Ces derniers inconvénients sont tels qu'il est toujours préférable d'opérer comme nous l'avons indiqué en premier lieu, sauf à ne considérer les chiffres obtenus que comme représentant une dépense minima, qui peut en réalité être augmentée de tout ce qui arrive par d'autres voies.

Il faut, en tout cas, que les expériences soient suffisamment prolongées pour embrasser toutes les variations dues aux circonstances diverses de la combustion et du tirage.

Pour ramener le volume indiqué par l'anémomètre à ce qu'il deviendrait à 0 et à la pression normale P , il suffira d'employer la formule

$$V = \frac{V'P'}{(1 + 0,00367t')P}$$

dans laquelle V' , t' et P' représentent le volume observé, la

température du gaz affluent et la pression extérieure au moment de l'observation.

311. Résultats d'expériences sur les quantités d'air fournies à la combustion. — Nous avons vu (n° 159) qu'il faut environ 9 mètres cubes pour que la combustion de 1 kilogramme de houille puisse être faite intégralement.

Les anciennes expériences avaient conduit M. Peclet à admettre que la consommation réelle s'élève souvent à 18 mètres cubes; on conservait quelques doutes à cet égard et l'on comptait généralement sur une consommation de 15 mètres cubes seulement.

Les résultats des expériences que vient de faire la société de Mulhouse ont donné une sanction pratique à cette dernière appréciation, en démontrant, par des observations suffisamment prolongées, que ce chiffre de 15 mètres est lui-même exagéré.

Les chiffres obtenus dans ces belles recherches et ramenés, par le calcul, à la température 0 et à la pression 0^m,76 sont les suivants :

	m. c.
Chaudière Molinos et Pronnier....	17,25
Chaudière Prouvost.....	16,36
Chaudière Dollfus Mieg et C ^{ie}	8,58
Chaudière Zambeaux.....	7,60

Nous ferons remarquer que, malgré ces différences considérables dans les volumes d'air, la quantité d'eau vaporisée par chaque kilogramme de combustible a été sensiblement la même pour trois de ces chaudières.

A l'exception de la chaudière Dollfus Mieg et C^{ie}, qui fonctionnait dans des conditions ordinaires et avec le seul tirage de la cheminée, les autres appareils étaient, quant à la consommation de l'air, dans des conditions un peu différentes de celles de la pratique.

MM. Molinos et Pronnier ont, ainsi que M. Prouvost, dépensé beaucoup d'air pour produire moins de fumée; mais l'exemple de la chaudière de M. Dollfus montre que l'on

peut encore suffire à la combustion avec 10 mètres cubes seulement par kilogramme de houille.

Nous aurons à vérifier indirectement ces premiers chiffres par l'étude de la composition des gaz brûlés.

512. Expériences de M. Combes. — M. Combes a publié dans les *Annales des mines*, tome II, année 1847, un rapport fait à la Commission centrale des machines à vapeur, concernant une série d'expériences faites sur les moyens de brûler et de prévenir la fumée des foyers alimentés à la houille.

Dans cet important travail, que nous examinerons ultérieurement dans tous ses détails, M. Combes a indiqué les résultats des analyses des gaz brûlés recueillis dans les foyers des chaudières à vapeur; ces analyses ont été faites, sous la direction de M. Combes, par M. Debette, et quelques-uns de ces résultats doivent trouver leur place, dès à présent, dans nos études sur les chaudières à vapeur.

515. Analyses de M. Debette. — Les quatre premières analyses sont relatives à des gaz recueillis dans le fourneau d'une chaudière établie au dépôt des marbres à Paris. Avant toute détermination de son volume, le gaz avait toujours été desséché par son double passage dans des tubes contenant du chlorure de calcium. Les principaux résultats de ces analyses sont consignés dans le tableau suivant.

TABLEAU DES ANALYSES DE M. DEBETTE,
SUR UN FOURNEAU ORDINAIRE.

	Immédiatement après la charge.		Après le fourgonnage.		Moyennes.
	1	2	3	4	
Numéros des expériences...					
Acide carbonique.....	8,49	12,97	11,54	10,86	10,97
Oxyde de carbone.....	2,70	0,75	1,21	»	1,16
Oxygène.....	7,51	6,30	7,72	11,48	8,25
Hydrogène.....	»	0,58	0,58	0,33	0,37
Azote (par différence).....	81,30	79,40	78,95	77,33	79,25

Lors des trois premières expériences, le fourneau dégageait un peu de fumée, mais cette fumée avait cessé lors de la dernière prise des gaz, qui correspond à une plus grande

admission d'oxygène, et par conséquent d'air atmosphérique. Dans le dernier cas seulement, tout l'oxyde de carbone est converti en acide carbonique, mais une petite proportion d'hydrogène échappe encore à la combustion.

Nous avons inscrit dans une cinquième colonne les résultats moyens : la teneur en azote est précisément égale, dans les gaz brûlés, à ce qu'elle est habituellement dans l'air atmosphérique.

La proportion moyenne de l'oxygène libre est de 8,25 pour 100; ce qui indique que, même avec cet excès considérable, la combustion n'est pas ordinairement complète.

Pour étudier les circonstances qui déterminent l'absence de la fumée, M. Combes avait disposé, derrière la grille, des ouvertures spéciales, qu'il désigne sous le nom d'ouvreaux, et par lesquelles il pouvait, à volonté, faire arriver une quantité d'air supplémentaire, plus ou moins considérable.

M. Debette a fait comparativement l'analyse des gaz recueillis lorsque les ouvreaux étaient seulement entr'ouverts ou entièrement libres : dans l'un et l'autre cas, les gaz ont été recueillis immédiatement après le chargement du combustible, et l'on est arrivé dans ces circonstances aux chiffres suivants :

TABLEAU DES ANALYSES DE M. DEBETTE,

SUR LES GAZ RECUEILLIS DANS UN FOURNEAU A OUVREAUX.

	Ouvreaux à demi ouverts.	Ouvreaux entièrement ouverts.		Moyennes.
	5	6	7	
Numéros des expériences...	5	6	7	
Acide carbonique.....	7,72	8,61	7,73	8,17
Oxyde de carbone.....	0,05	0,47	0,01	0,24
Oxygène.....	10,76	13,80	14,27	14,04
Hydrogène.....	0,02	1,14	1,63	1,38
Azote (par différence).....	81,45	75,98	76,36	76,17

Ce tableau montre que la proportion d'oxygène s'élève, lors de l'ouverture des ouvreaux à 10,76 et même à 14,04, et que dans ces circonstances extrêmes la quantité d'oxyde de carbone se trouve seule réduite, la teneur en hydrogène non

brûlé paraissant au contraire plus grande que quand les ouvreaux sont fermés.

L'hydrogène paraît être, d'après ces indications, celui des gaz dont la combustion s'opère avec le moins de facilité.

514. Expériences de MM. Foucou et Amiguis. — Les données relatives à la composition des gaz de la combustion sont peu nombreuses. Nous venons de faire connaître les résultats des analyses de M. Debette; les travaux d'Ebellen à ce sujet n'ont pas été publiés, si ce n'est en ce qui concerne les gaz des usines métallurgiques; mais MM. Foucou et Amiguis viennent de faire connaître la composition de ceux qu'ils ont recueillis dans un foyer de locomotive, à différentes vitesses : ces analyses ont été faites par M. de Luca.

Le charbon qui alimentait le foyer avait la composition suivante :

CHARBON BELGE.

Carbone.....	89,1
Hydrogène.....	4,2
Oxygène et azote.....	3,0
Cendres.....	2,6
Eau, à 110°.....	1,1
	<u>100,0</u>

Voici la composition des gaz :

COMPOSITION DES GAZ DE LA COMBUSTION,

D'APRÈS LES ANALYSES DE M. DE LUCA.

	Repos.	Chemin parcouru par heure.				
		10 k.	20 k.	50 k.	25 k.*	60 à 70 k.**
Acide carbonique..	11,15	13,65	14,25	17,45	12,25	16,10
Oxyde de carbone..	7,24	4,36	5,03	1,80	5,45	2,46
Hydrogène.....	1,35	0,10	0,55	0,40	0,15	0,03
Oxygène.....	4,20	0,85	3,60	2,70	2,00	1,75
Azote.....	74,00	81,04	76,54	77,65	80,10	79,18
Hydrogène carboné	2,06	0,00	Traces	0,00	Traces	Traces
	<u>100,00</u>	<u>100,00</u>	<u>99,97</u>	<u>100,00</u>	<u>99,95</u>	<u>99,52</u>

Les quatre premières analyses, ainsi que l'indiquent les auteurs, démontrent que la combustion a été plus complète

* Echappement serré, sur une rampe de 0,10.

** En pente.

pour les grandes vitesses, et nous pouvons expliquer ce résultat par deux raisons bien distinctes :

1° L'admission d'air est plus considérable, puisque les gaz brûlés sont plus riches en azote, à mesure que la vitesse augmente, ce qui tient à l'activité plus grande du tirage;

2° Cet air est moins longtemps en contact avec le coke, ce qui doit déterminer une moindre production d'oxyde de carbone.

Les recherches de cette nature sont extrêmement intéressantes, et elles doivent, à la fois, conduire à la connaissance pratique de la meilleure épaisseur de combustible et du tirage le plus favorable; mais il faudrait qu'elles fussent accompagnées d'une détermination exacte du volume d'air introduit et du volume d'air expulsé.

La présence de l'oxygène libre dans les produits de la combustion vient à l'appui de ce que nous avons dit sur l'extinction de la flamme dans les tubes d'un trop petit diamètre.

515. *Comparaison avec les gaz des hauts fourneaux.* — Il n'est peut-être pas inutile d'indiquer ici, comme point de comparaison, la composition des gaz des hauts fourneaux, telle qu'elle a été déterminée par Ebelsen à l'usine de Clerval :

Acide carbonique...	12,88	12,59
Oxyde de carbone...	23,51	25,24
Hydrogène.....	5,82	6,55
Azote.....	57,79	55,62

On remarquera que, bien que tout l'oxygène amené par les tuyères soit entré en combinaison, l'hydrogène n'a pas été brûlé, et que la combustion du carbone n'a pu être que très-incomplète, parce que la proportion d'air était à dessein insuffisante.

On voit, en même temps, quelle est la richesse de ces gaz comme combustibles, et c'est depuis les travaux d'Ebelsen qu'ils sont généralement utilisés.

316. *Proportion du carbone transformé en acide carbonique dans les foyers des locomotives.* — On peut conclure approximativement, des expériences de MM. Foucou et Amiguis, la quantité d'air fournie par kilogramme de combustible, en se reportant aux tableaux que nous avons donnés de la composition de tous les gaz qui peuvent se produire dans la combustion.

1 kil. d'acide carbonique contient $\frac{6}{22} = 0,27$ carbone.

1 kil. d'oxyde de carbone contient $\frac{6}{14} = 0,43$ carbone.

1 kil. d'azote provient de 1,25 air.

Les résultats des analyses conduisent dès lors aux chiffres suivants :

TABLEAU DES PRODUITS DE LA COMBUSTION,

D'APRÈS M. FOUCOU ET AMIGUIS.

	Repos.	10 kilom.	20 kilom.	50 kilom.
Charbon transformé en acide carbonique..	3,01	3,69	3,85	4,71
Charbon transformé en oxyde de carbone.	3,11	1,87	2,16	0,77
Total du charbon brûlé pour 100 de gaz..	6,12	5,56	6,01	5,48
Poids de l'air introduit pour la combustion	92,50	101,30	95,67	97,06
Rapport entre le poids de l'air et celui du charbon.....	15,11	18,22	15,92	17,71

Nous voyons que, dans les circonstances les plus favorables,

$$\frac{0,77}{5,48} = 0,14$$

du charbon se transforment en oxyde de carbone, et dans les circonstances les plus défavorables

$$\frac{3,11}{6,12} = 0,51$$

du carbone se transforment en oxyde de carbone.

Cette circonstance est évidemment due à ce que l'épaisseur du combustible est trop grande par rapport à l'activité du tirage, inconvénient inévitable alors que l'on veut brûler beaucoup de combustible dans une boîte à feu de petite dimension.

517. *Expériences de Johnston.* — Les analyses que Johnston a publiées, dans son grand travail sur les combustibles américains, sont surtout intéressantes en ce qu'elles conduisent nécessairement, à cause de leur nombre, à une composition moyenne des gaz de la combustion. C'est pour cette raison que nous reproduisons ici tous les chiffres de cet habile expérimentateur.

EXPÉRIENCES DE JOHNSTON,
ANALYSE DES GAZ DE LA COMBUSTION.

Désignation du combustible.	Composition des gaz brûlés en volume.		
	Acide carbonique.	Oxygène.	Azote.
Beaver Meadow slope n° 3.....	8,755	13,824	77,421
Idem	11,077	7,657	81,266
Idem	10,747	11,496	77,758
Forest improvement.....	8,451	13,220	78,329
Idem	10,757	8,945	80,297
Idem	10,092	10,490	79,418
Peach Mountain.....	9,490	12,174	78,336
Idem	13,445	8,920	77,635
Idem	9,724	12,202	78,084
Beaver Meadow slope n° 5.....	9,457	12,561	77,982
Idem	9,922	13,007	77,071
Idem	6,862	15,265	77,873
Idem	5,134	18,110	76,756
Lehigh.....	4,571	16,700	78,729
Lackawanna.....	10,599	10,835	78,566
Coke naturel.....	8,918	10,119	80,963
Idem	8,843	11,641	79,516
Idem	8,798	13,881	77,821
Idem	9,660	10,959	79,381
Idem	8,430	13,224	78,346
Idem	10,659	12,901	76,440
Coke de Midlothian.....	13,357	7,943	78,700
Atkinson et Templeman.....	9,081	12,792	78,127
Compagnie minière de New-York et Maryland.	11,777	9,731	78,492
Idem.....	11,517	8,357	80,126
Idem.....	10,128	11,483	78,389
Idem.....	12,536	8,929	78,535
Charbon d'Easby en provision.....	9,489	10,743	79,768
Idem	7,682	10,857	81,461
Easby et Smith.....	16,019	8,398	75,583
Neff.....	11,201	9,008	79,791
Idem	8,751	12,547	78,702
Dauphin et Susquehanna.....	9,694	11,035	79,271
Idem	10,555	9,937	78,525
Idem	10,471	8,124	81,894

Désignation du combustible.	Composition des gaz brûlés en volume.		
	Acide carbonique.	Oxygène.	Azote.
Blossburg..	10,187	11,148	78,655
Idem	9,348	10,823	79,600
Lycoming Creek..	7,119	14,071	81,083
Idem	11,494	8,851	80,586
Idem	10,351	10,955	79,345
Quin's Run.....	10,338	10,211	80,864
Barr's Deep Run.....	5,376	16,334	81,113
Idem	9,530	10,743	79,698
Idem	8,771	92,544	79,743
Midlothian average.....	11,427	9,932	78,499
Idem	10,989	9,953	80,654
Creek Coal company.....	6,382	13,472	79,519
Idem	13,000	12,563	78,214
Idem	9,165	13,071	76,350
Idem	11,654	9,321	77,143
Chesterfield mining Company.....	6,724	13,189	79,508
Midlothian.....	9,972	11,503	81,405
Idem	10,662	7,444	78,665
Idem	8,615	12,730	79,829
Idem	9,152	11,248	78,790
Tippecance.....	11,142	7,775	79,655
Midloth (screened).....	10,460	8,954	78,694
Sidney.....	10,921	8,734	79,451
Idem	9,795	9,341	78,290
Pictou.....	10,418	8,469	79,727
Idem	11,645	8,657	78,685
Idem	10,149	10,108	78,641
Liverpool.....	10,287	11,214	79,058
Idem	11,376	7,970	80,146
Idem	11,951	8,530	74,437
Écossais.....	10,613	11,173	77,764
Idem	11,843	11,897	79,025
Idem	11,201	11,656	80,087
Cannelton.....	13,212	4,330	82,458
Idem	13,202	6,690	80,108
Moyenne générale.....	10,049	10,903	79,048

Nous admettrons donc, au point de vue général, que les gaz de la combustion sont formés, pour 100 volumes, de 10 volumes d'acide carbonique, de 11 volumes d'oxygène et de 79 volumes d'azote, ce qui se rapproche beaucoup des premiers résultats de M. Combes.

Il est vivement à regretter que Johnston ne nous ait pas indiqué leur teneur en produits hydrogénés, qui échappent en partie à l'action de l'oxygène, même dans la combustion

du coke, où ils se trouvent nécessairement en moindre proportion. On ne pourra, par suite de cette omission, se servir de ces résultats qu'au seul point de vue de la combustion du carbone.

La conclusion générale a cela de remarquable que l'azote libre représente précisément le même volume d'air que les 10 volumes d'oxygène compris dans les 10 volumes d'acide carbonique, augmentés des 11 volumes non comburés. Cette indication semblerait prouver que l'influence de l'hydrogène n'est pas grande et qu'on peut, jusqu'à un certain point, se dispenser d'en tenir compte dans les évaluations générales.

518. *Composition des gaz de la combustion dans les fourneaux à bois.* — Johnston n'a donné que deux analyses relatives au combustible végétal.

	1	2	Moyennes.
Acide carbonique...	9,250	9,170	9,210
Oxygène.....	11,343	9,083	10,213
Azote.....	79,407	81,747	80,577

Ces chiffres présentent peu de différences par rapport à ceux qui ont été obtenus, par le même auteur, sur les gaz brûlés provenant de la houille.

519. *Composition des gaz de la combustion, dans un fourneau à tourbe.* — Il en est à peu près de même pour les gaz qui proviennent de la combustion de la tourbe. C'est au moins ce qu'il faut conclure des tableaux contenus dans le mémoire déjà cité de M. Combes.

ANALYSES DE M. DEBETTE

SUR LES GAZ PROVENANT DE LA COMBUSTION DE LA TOURBE.

	1	2	3	Moyennes.	4
Acide carbonique.....	9,12	8,03	9,66	8,94	1,31
Oxyde de carbone.....	0,16	0,13	0,04	0,11	0,63
Oxygène.....	9,82	12,06	8,60	10,16	19,65
Hydrogène.....	0,16	0,65	0,10	0,30	0,82
Azote (par différence)..	80,74	79,13	81,59	80,49	77,59

Nous n'avons pas compris la quatrième expérience dans le calcul des moyennes : le feu avait été couvert à dessein, et l'on voit immédiatement combien cette modification a réduit la proportion d'acide carbonique, et augmenté celle de l'oxyde de carbone.

520. *Circonstances qui influent sur la proportion de l'azote dans les gaz brûlés.* — L'air atmosphérique est composé, en volumes, de 0,213 d'oxygène et de 0,787 d'azote, et nous avons déjà fait remarquer que, quant à ce dernier gaz, il se retrouve en proportion presque identique dans les produits de la combustion.

Il est facile de donner la raison de cette permanence, si l'on se rappelle que l'acide carbonique, dont la formule est $\frac{1}{2}C + O$, a précisément le même volume que l'oxygène libre qui est entré en combinaison.

Si donc l'oxygène de l'air n'était employé qu'à former de l'acide carbonique, celui-ci remplaçant dans le mélange un volume égal d'oxygène, la proportion d'azote ne serait pas changée. C'est uniquement parce que la combustion agit, pour la presque totalité, sur du carbone, amené à l'état d'acide carbonique, que cette proportion d'azote varie très-peu.

La formation de l'eau et celle de l'oxyde de carbone ont, l'une et l'autre, pour effet de modifier, dans les gaz brûlés, la proportion de l'azote.

L'eau est toujours condensée et par conséquent éliminée lors des analyses : dès lors l'oxygène entré en combinaison ne se retrouvant pas dans les gaz brûlés, l'azote correspondant doit s'ajouter à celui qui provient de l'oxygène combiné avec le carbone.

L'influence de l'oxyde de carbone est toute différente : chaque volume d'oxygène entré en combinaison, représente deux volumes d'oxyde de carbone; le volume primitif de cet oxygène correspond donc à un volume double de gaz brûlé, et, dans le mélange, la proportion d'azote paraît nécessairement diminuée.

La compensation qui résulte de ces deux effets, tend encore à établir la constance de composition des gaz brûlés, quant à la proportion d'azote qu'ils renferment.

521. Détermination de la quantité d'air introduite, d'après les résultats de l'analyse. — Si l'on n'admettait dans le fourneau que la quantité d'oxygène théoriquement nécessaire à la combustion, et si la totalité du volume de ce gaz était employée à brûler du carbone, il n'existerait aucune proportion d'oxygène libre dans les gaz de la combustion.

Or, chaque volume d'acide carbonique correspond à un volume d'oxygène : le volume total de l'oxygène introduit est donc, dans tous les cas, représenté par la somme du volume de l'oxygène libre, et de celui de l'acide carbonique, pourvu qu'il ne se soit formé ni eau ni oxyde de carbone.

En multipliant cette somme par le coefficient 4,694, indiqué au n° 154, on aurait la valeur du volume d'air, correspondant au poids du carbone contenu dans l'acide carbonique formé; si l'analyse des gaz de la combustion indique qu'ils renferment 1 volume d'acide carbonique pour 0,5 de volume d'oxygène, il faudra multiplier par 1,5 le volume d'oxygène correspondant à la transformation de 1 kil. de carbone en acide carbonique soit $1^{\text{me}},8262 \times 1,5$, pour connaître le volume primitif de l'oxygène dépensé par chaque kilogramme de carbone; et pour connaître le volume d'air dépensé, il suffira de multiplier ce produit par 4,694, ce qui donne

$$1,5 \times 1,8262 \times 4,694 = 12^{\text{me}},868.$$

Les mêmes coefficients serviraient pour toute autre proportion d'oxygène et d'acide carbonique, et c'est d'après ces indications qu'ont été calculés les différents chiffres de la table suivante qui fait connaître immédiatement le volume d'air par kilogramme, lorsque l'on connaît le volume d'oxygène non brûlé par rapport à celui de l'acide carbonique.

Proportion de l'acide carbonique en volume.	Proportion de l'oxygène en volume.	Volume d'oxygène correspondant à 1 k. de carbone.	Volume d'oxygène libre.	Volume total d'oxygène à l'admission.	Volume d'air par kilogramme de carbone.
1	0,0	1,8262	0,000	1,826	8,572
1	0,1	1,8262	0,183	2,009	9,429
1	0,2	1,8262	0,365	2,191	10,287
1	0,3	1,8262	0,548	2,374	11,144
1	0,4	1,8262	0,730	2,557	12,001
1	0,5	1,8262	0,913	2,739	12,858
1	0,6	1,8262	1,096	2,922	13,715
1	0,7	1,8262	1,278	3,104	14,573
1	0,8	1,8262	1,461	3,287	15,430
1	0,9	1,8262	1,644	3,470	16,287
1	1,0	1,8262	1,826	3,652	17,144
1	1,1	1,8262	2,009	3,835	18,002
1	1,2	1,8262	2,191	4,017	18,859
1	1,3	1,8262	2,374	4,200	19,716
1	1,4	1,8262	2,557	4,383	20,573
1	1,5	1,8262	2,739	4,565	21,430

En faisant abstraction de la formation de l'eau et de celle de l'oxyde de carbone, on pourra déduire, de ces chiffres, une valeur approximative du volume d'air dépensé par chaque kilogramme, lorsqu'on connaîtra, dans les gaz brûlés, les proportions relatives d'acide carbonique et d'oxygène.

522. Utilisation de la chaleur produite par la combustion. — Après avoir examiné les conditions dans lesquelles se développe la chaleur par la combustion, il est nécessaire de se rendre compte des moyens à l'aide desquels cette chaleur doit être utilisée, pour produire la vapeur.

La chaleur se transmet en général suivant deux modes essentiellement différents, à distance ou au contact : à distance et par radiation les corps froids s'échauffent lorsqu'ils sont dans le voisinage de corps relativement chauds ; l'équilibre de température tend à s'établir plus rapidement, si les corps sont plus rapprochés et la communication est surtout facile lorsqu'ils arrivent au contact.

Le métal de la chaudière s'échauffe, par l'un et l'autre mode, dans la boîte à feu, et comme on le dit plus généralement pour les fourneaux en maçonnerie, dans la chambre de combustion ; et c'est ce métal qui, par contact, transmet, avec

rapidité ou avec lenteur, une partie de cette chaleur à l'eau qui est contenue dans la chaudière.

On peut donc concevoir dès à présent que, suivant la nature et l'épaisseur de ce métal, et suivant la différence de température entre ses deux parois, il puisse transmettre, en un temps donné, un nombre de calories plus ou moins considérable.

323. *Transmission de la chaleur à la chaudière.* — On a toujours soin de placer les parois de la chaudière à une petite distance du foyer, de manière à utiliser la chaleur développée, le plus immédiatement et avec la moindre perte : cependant elle n'est directement absorbée, que pour une partie seulement, par la surface de chauffe ; le surplus est emporté par les gaz de la combustion, qui se refroidissent pendant leurs parcours, au profit des parois de la chaudière plus éloignées du foyer, et à celui du liquide qu'elles renferment.

La surface exposée directement à l'action du feu et chauffée par radiation, est celle que l'on désigne sous le nom de surface de chauffe directe ; la partie qui n'est échauffée que par le contact des gaz brûlés constitue la surface indirecte de chauffe ; dans les chaudières tubulaires, les tubes forment avec la boîte à fumée, la totalité de cette surface indirecte.

324. *Chauffage par radiation.* — Lorsqu'un corps est chauffé par la radiation d'un centre de chaleur, on admet que la quantité de chaleur transmise, dans un temps donné, varie en raison inverse du carré de la distance. Il n'est pas possible d'appliquer cette loi de physique, lorsque le foyer a une grande étendue, et l'on se borne à dire que la radiation produira d'autant plus d'effet que la température du foyer est plus élevée, et que cet effet est plus grand lorsque la distance est moindre.

La température à laquelle s'opère la combustion a donc une grande importance, au point de vue de l'efficacité de la surface de chauffe directe, et certains combustibles tels que

le coke, la houille, le charbon de bois, qui acquièrent bientôt, en tous leurs points, la température rouge, sont sous ce rapport plus favorables que le bois et la tourbe, qui ne sont jamais incandescents que par une partie seulement de leur surface. De là l'emploi presque exclusif des premiers combustibles, dans certaines opérations des arts, qui doivent s'effectuer à une température élevée.

Dans les chaudières à vapeur, l'étendue de la surface de chauffe indirecte peut toujours suppléer à l'insuffisance de la surface de chauffe exposée à la radiation, et pourvu que les gaz soient suffisamment refroidis, dans leur contact avec les différentes parties des parois de la chaudière, il est vraiment sans intérêt d'établir une distinction entre le chauffage par radiation et le chauffage par contact.

525. Chauffage par contact. — Les gaz, alors même qu'ils sont portés à une température élevée, n'ont qu'un très-faible pouvoir rayonnant : ils n'agissent pour ainsi dire que par contact, et cette condition suffit pour faire comprendre comment les carneaux, dans lesquels les gaz de la combustion circulent, doivent être disposés.

Si ces gaz sont entraînés avec une grande vitesse, il faudra les faire circuler, en lames minces, dans des canaux étroits, qui multiplient les points de contact.

Si, au contraire, on les fait passer dans des conduits d'une grande section, il faudra qu'ils s'y meuvent lentement, de manière que les molécules les plus froides puissent, à mesure que leur refroidissement se produit au profit de la chaudière, être remplacées, dans chaque section, par les molécules plus chaudes et par conséquent moins denses du courant. Cette disposition ne pourra fournir de bons résultats qu'à la condition que cette surface de chauffe sera exclusivement formée par les parois supérieures des carneaux.

Il est important, dans l'un et l'autre cas, de mettre toujours les fumées les plus chaudes en contact avec les portions de la surface qui correspondent à l'eau la plus chaude. De

cette façon l'eau froide, à mesure qu'elle entre dans la chaudière, peut encore prendre aux gaz, déjà refroidis partiellement, une portion de leur chaleur, et cette disposition systématique devrait être utilisée d'une manière plus générale. C'est ce que fait M. Farcot, avec beaucoup de succès, dans ses chaudières à bouilleurs latéraux; mais pour obtenir tous les avantages que cette disposition comporte, il est nécessaire d'ajouter à la chaudière, vers l'arrivée des gaz dans la cheminée, des appareils dits réchauffeurs, dans lesquels circule l'eau d'alimentation avant son admission dans la chaudière proprement dite.

En traitant de la construction des fourneaux, nous dirons comment ces différents principes sont applicables dans la plupart des cas de la pratique.

526. Conductibilité des corps pour la chaleur. — Les corps sont plus ou moins bons conducteurs de la chaleur, ou, en d'autres termes, conduisent très-inégalement la chaleur : les métaux sont les meilleurs conducteurs; les matières terreuses et les pierres laissent passer beaucoup moins facilement le calorique; l'interposition de certaines substances très-divisées, comme la laine cardée, le feutre, forme des écrans presque impénétrables, et cette propriété est souvent mise à profit pour retarder le refroidissement. On juge, en général, de la plus grande conductibilité des divers métaux en les plaçant, dans les mêmes conditions, et en examinant, à une certaine distance d'une même source calorifique, par la fusion d'un enduit fusible qui les recouvre, le temps qui s'écoule jusqu'à ce que la fusion de cet enduit s'opère.

Nous n'aurons, pour ainsi dire, à nous occuper de cette question, quant aux enveloppes des chaudières, que dans le cas où les diverses parois sont à leur température de régime, pendant l'activité du feu, et c'est dans ces circonstances qu'il faut déterminer le nombre des calories transmises dans un temps donné.

Nous pouvons déjà regarder comme certain que la facilité

de la transmission sera de beaucoup diminuée par l'interposition, sur la surface interne du métal, de corps solides mauvais conducteurs, comme le sont ceux qui composent les incrustations et les dépôts, que l'on rencontre si souvent dans les chaudières à vapeur.

527. Lois générales de la conductibilité. — On se contente, en général, d'exprimer, par des chiffres, les distances mesurées à partir d'une même source de chaleur, auxquelles les températures sont égales pour diverses barres de même dimension, et l'on dit que les coefficients de conductibilité des corps sont proportionnels aux carrés de ces distances, suivant la loi que Fourier a déduite du calcul.

La valeur expérimentale de ces coefficients a été déterminée par M. Despretz, par l'observation simultanée des températures de deux sections transversales placées à une certaine distance l'une de l'autre.

C'est ainsi qu'en représentant par 1000 le coefficient de conductibilité de l'or, M. Despretz a déterminé les chiffres suivants :

TABLEAU DE QUELQUES COEFFICIENTS
DE CONDUCTIBILITÉ RELATIVE.

Or.....	1000,0
Cuivre.....	898,2
Fer.....	374,3
Zinc.....	363,0
Marbre.....	23,6
Porcelaine.....	12,2
Terre cuite.....	11,4

On admet d'ailleurs que la quantité de calories qui passe au travers d'un corps solide est proportionnelle à sa surface, proportionnelle au temps, à la différence $T' - T$ des températures, et enfin inversement proportionnelle à l'épaisseur e que la chaleur doit traverser.

Nous verrons que ces indications sont assez bien vérifiées par l'expérience.

528. Quantité de chaleur qui traverse une lame de métal dont

les deux faces sont maintenues respectivement à des températures constantes T et T' . — Si l'on connaissait, pour une lame de métal de 1 mètre carré de surface et de 1 millimètre d'épaisseur, la quantité K de calories qui la traverse en 1", pour une différence de température de 1°, il serait facile d'en déduire, à l'aide des lois précédentes, la quantité de chaleur qui passerait entre les deux faces d'un autre corps de même substance, dont la surface serait S , dont e serait l'épaisseur et pour laquelle la différence de température serait $T' - T$.

La quantité K est ce que l'on appelle le coefficient de conductibilité absolue de la substance, et, si l'on désigne par Q la quantité cherchée, on aura, en partant des lois précédemment indiquées,

$$Q = K \frac{S(T' - T) \times t}{e}.$$

Mais cette constance dans la valeur de $T' - T$ serait difficile à réaliser, et il est facile de voir que l'on peut aussi trouver, en partant des mêmes lois, la quantité de chaleur qui traversera la surface S , alors que la température T s'élèvera pendant l'expérience. On pourra recueillir, dans un liquide, la chaleur qui aura ainsi traversé la lame de métal, et par conséquent en déduire la valeur du coefficient K de conductibilité absolue.

529. *Cas où la température est variable sur la face la plus froide.* — Soit P le poids d'un liquide contenu dans un vase, c la capacité de ce liquide pour la chaleur, T' sa température variable, $Pc dT'$ sera la variation élémentaire de la quantité de chaleur qu'il contient à chaque instant.

Cette variation doit être égale à la quantité de chaleur qui peut passer dans le temps dt à travers le corps, on a donc

$$\frac{KS}{e} dt(T - T') = Pc dT' \text{ d'où } \frac{KS}{Pce} dt = \frac{dT'}{T - T'}$$

et en intégrant

$$\begin{aligned}\frac{KS t}{Pce} &= \int_{T'_0}^{T'_1} \frac{dT'}{T - T'} = \log \text{hyp. } (T - T'_1) + \text{constante} \\ &= -\log \text{hyp. } (T - T'_1) + \log \text{hyp. } (T - T'_0) \\ &= \log \text{hyp. } (T - T'_0) - \log \text{hyp. } (T - T'_1)\end{aligned}$$

En désignant par T'_0 et par T'_1 les températures du liquide au début, et à la fin du temps t .

La quantité de chaleur totale que le liquide a reçu est alors

$$Pc(T'_1 - T'_0)$$

Et l'équation elle-même peut servir à déterminer expérimentalement la valeur de K .

550. Détermination du coefficient de conductibilité absolue.—

C'est en se servant de cette équation que M. Péclet a déterminé, par expérience, la valeur de K , qui se présente algébriquement sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}K &= \frac{Pce}{St} \left\{ \log \text{hyp. } (T - T'_0) - \log \text{hyp. } (T - T'_1) \right\} \\ &= a \frac{Pce}{S}\end{aligned}$$

en désignant par a le rapport

$$\frac{\log \text{hyp. } (T - T'_0) - \log \text{hyp. } (T - T'_1)}{t}$$

qu'il a appelé le coefficient d'échauffement par $1''$.

En opérant sur une lame de plomb, chauffée sur l'une de ses faces, par un courant d'eau, et refroidie sur l'autre par un poids P , continuellement agité, de ce liquide, M. Péclet est arrivé à une détermination numérique intéressante.

Dans les conditions de son expérience, on avait :

$$T - T'_0 = 24^{\circ},04 - 15^{\circ},13 = 8^{\circ},91;$$

$$\text{Log hyp. } (T - T'_0) = 2,38717;$$

$$T - T'_1 = 24,04 - 14,49 = 9,55;$$

$$\text{Log hyp. } T - T'_1 = 2,25654;$$

$$\text{Log hyp. } (T - T'_0) - \text{log hyp. } (T - T'_1) = 0,13063;$$

$$t = 500'';$$

$$a = 0,000294 \text{ (le chiffre exact est } a = 0,0002613);$$

$$P = 3^k,287;$$

$$c = 1, \text{ le liquide étant de l'eau};$$

$$e = 20 \text{ millimètres};$$

$$S = 0^{\text{mm}},005026.$$

On trouve alors :

$$K = \frac{aPce}{S} = \frac{0,000294 \times 3,287 \times 1 \times 20}{0,005026} = \frac{0,0193}{0,005026}$$

ou

$$K = 3,84.$$

Ce chiffre a été trouvé par M. Péclet dans une autre expérience encore, et les coefficients des autres substances ont été calculés, proportionnellement aux chiffres admis pour représenter leurs pouvoirs conducteurs relatifs.

551. Coefficients de conductibilité absolue de quelques corps.

— Nous avons dit que l'on appelait coefficient de conductibilité absolue, la quantité de chaleur qui passe dans l'unité de temps, la seconde, et par mètre carré de surface, à travers un solide de 1 millimètre d'épaisseur, et dont les 2 faces sont entretenues à des températures constantes, différant entre elles de 1^{re}.

M. Péclet, en partant de la détermination spéciale faite sur une feuille de plomb de 20 millimètres d'épaisseur, a trouvé que la conductibilité des autres métaux pouvait être représentée par les chiffres suivants :

Plomb.....	3,84
Cuivre.....	19,11
Fer.....	7,95
Zinc.....	7,74
Étain.....	6,46
Marbre.....	0,48
Porcelaine.....	0,24
Terre cuite.....	0,23

Si l'on admettait que la conductibilité du laiton pût être déterminée par celle du cuivre et du zinc qui composent cet alliage, soit en moyenne 0,65 de cuivre et 0,35 de zinc, on la calculerait par la relation :

$$0,65 \times 19,11 + 0,35 \times 7,74 = 15,13.$$

Et l'on voit qu'elle serait encore double de celle du fer.

532. Limites dans lesquelles ces coefficients pourront être employés. — Les expériences de M. Péclet démontrent que quand on prend soin, au moyen d'une agitation constante auprès des parois, de ne laisser séjourner l'eau sur aucun point des surfaces du corps conducteur, les chiffres qui viennent d'être indiqués peuvent être employés avec sécurité conformément à la théorie, c'est-à-dire conformément à la formule :

$$Q = \frac{KtS}{e} (T' - T).$$

Mais ce nettoyage continu des surfaces n'est jamais utilisé dans la pratique, et l'on obtient alors des valeurs de K essentiellement différentes, en même temps que l'on voit s'amoindrir l'influence de l'épaisseur et de la nature du corps conducteur. Il résulte de ce qui précède, dit M. Péclet, en terminant son mémoire, « ce fait important pour les applications, que dans le chauffage par la vapeur ou par les liquides,

avec les dispositions généralement employées, la nature et l'épaisseur du métal n'ont point ou du moins n'ont que très-peu d'influence sur la quantité de chaleur transmise. » (*Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. II, page 115.)

555. Observations à faire dans les conditions de la pratique.

— La loi relative à l'épaisseur n'étant reconnue vraie que pour des circonstances tout à fait exceptionnelles, il est absolument impossible d'en tirer parti dans le calcul des applications. Il conviendrait peut-être de mettre la formule sous la forme $Q = K'St(T' - T)$ d'où $K' = \frac{Q}{S(T' - T)t}$ et de chercher ainsi la valeur de K' par l'expérience, en prenant soin de noter l'épaisseur et la nature du métal conducteur, ainsi que toutes les autres circonstances de chaque observation. La température T' peut toujours être connue avec facilité, mais celle de la face la plus chaude ne l'est que dans des circonstances spéciales, celles par exemple où le maintien de cette surface à une température élevée s'opère par le contact d'un liquide ou d'un gaz en circulation, dont on peut déterminer la température avec un thermomètre.

Encore les expériences de cette nature sont-elles peu nombreuses et ne pouvons-nous citer que deux résultats, jusqu'à un certain point contradictoires, que nous empruntons au mémoire de M. Pécelet.

	Expérience de M. Clément.	Expérience de MM. Thomas et Laurens.
Nature du métal.....	cuivre	cuivre
Épaisseur en millimètres.....	2 à 3	2 à 3
Source de chaleur de la surface chaude	vapeur à 100°	vapeur à 100°
Cause refroidissante de la surface froide.	eau à 28°	eau à 45°
Différence de température.....	72°	55°
Durée t	3600"	3600"
Surface S	1	1
Nombre de calories transmises, Q	55000	220000
Valeur calculée de K'	0,21	1,36

Dans l'expérience de M. Clément le poids de la vapeur condensée sur la face plane du métal, était de 100 kilogrammes; dans celle de M. Thomas et Laurens le poids de

l'eau vaporisée, par le passage de la vapeur dans un tuyau de faible diamètre, s'est élevé à 400 kilogrammes. Les circonstances étaient entièrement différentes et l'on ne sera pas étonné de ne pas trouver de concordance entre ces deux résultats.

554. *Influence de l'épaisseur des chaudières.* — On saurait encore bien moins appliquer les résultats obtenus par M. Pécelet à la vaporisation dans les chaudières à vapeur, puisque l'on n'a aucun moyen de déterminer la température des parois extérieures. On sait seulement d'une manière générale que l'épaisseur du métal ne paraît pas exercer d'influence, car on vaporise autant, en régime courant, avec une chaudière épaisse qu'avec une chaudière mince.

M. Pécelet explique d'une façon très-ingénieuse ce résultat qui, au premier aperçu, semblerait paradoxal, en ce que l'épaisseur même du métal a nécessairement une influence sur la différence $T' - T$ des températures, et qu'ainsi, dans le cas d'un métal plus épais, la transmission qui devrait diminuer proportionnellement à l'épaisseur, augmenterait, d'un autre côté, proportionnellement à la différence des températures des deux faces : on comprend que l'une des influences puisse compenser l'autre.

Les praticiens savent parfaitement qu'une chaudière épaisse se brûle plus rapidement qu'une chaudière mince, et ce fait suffit pour démontrer que les prémisses du raisonnement qui précède doivent être considérées comme sanctionnées par l'observation.

555. *Différence de température entre les deux parois d'une chaudière à vapeur.* — Si l'on admettait que la transmission se produisit par le métal d'une chaudière, dans des conditions comparables à celles de l'expérience de M. Clément, on pourrait arriver à une estimation de la différence de température entre les deux faces; on sait en effet que la vaporisation par mètre carré de surface directe de chauffe est de 80 kilo-

grammes environ par heure, soit par seconde à $\frac{80}{3600} = 0,022$;

le nombre de calories correspondant à cette vaporisation, par seconde, est égal à $550 \times 0,022 = 12,10$; on peut donc admettre qu'il passe environ 12 calories par seconde par chaque mètre carré de surface directe de chauffe; et, si l'on devait

adopter le coefficient $K' = 0,21$, il viendrait $T' - T = \frac{12}{0,21} = 60^\circ$.

Cette appréciation n'est nullement en contradiction avec les faits, lorsque la chaudière n'est couverte à l'intérieur d'aucun dépôt; mais elle ne doit être considérée cependant que comme un moyen simple de fixer les idées, en l'absence de toute détermination digne de foi.

556. *Refroidissement d'un tuyau alimenté de vapeur et exposé à l'air libre.* — On verra, dans le chapitre suivant, par les expériences de M. Burnat et Royet, que chaque mètre carré de tuyau de fonte donne lieu à une condensation de $2^k,86$ par heure, lorsque la vapeur est maintenue à une pression absolue moyenne de 1,50 atmosphères, et que la température extérieure est de 5° environ.

La différence de température est alors de 110° , et la quantité de chaleur perdue, qui est de $2,86 \times 606,5 = 1735$, correspond à une valeur de K' égale à :

$$\frac{1735}{110 \times 3600} = 0,0044 = K'.$$

On voit que, dans cette circonstance, où le refroidissement n'est pas favorisé par un courant énergique, la valeur de K' est relativement très-faible.

557. *Incertitude des données expérimentales.* — De ce qui précède il faut conclure que nous ne connaissons pas les lois qui président à la formation de la vapeur dans un vase; que de nouvelles expériences seraient nécessaires, et que le phénomène de la vaporisation ne pourra être envisagé par nous que dans son ensemble, sans qu'il nous soit, quant à

présent, donné de faire une véritable analyse des différentes conditions qui en déterminent l'énergie. La vaporisation due à la surface directe sera plus grande quand la température du foyer sera plus élevée; mais la surface indirecte exerce aussi son influence, et nous n'aurons d'autre moyen d'apprécier le résultat final, qu'en recherchant les chiffres de la pratique de chaque jour, pratique qui tend sans cesse à s'améliorer par l'observation.

On peut cependant affirmer que la vaporisation sera, dans une certaine mesure, facilitée, si les bulles de vapeur peuvent librement atteindre la surface du liquide et, par conséquent, la chambre de vapeur, et que l'influence des dépôts pourra être, dans certains cas, considérable.

558. Formule pratique proposée. — Les incertitudes sont si grandes parmi le petit nombre de données que l'on possède, qu'il est vraiment difficile de donner une règle sûre pour la détermination des surfaces de transmission.

M. Péclet et, après lui, M. Thomas se sont arrêtés à la formule $Q = T' - T$ qui revient à supposer $K' = 1$, sans tenir compte de l'épaisseur. Mais, d'après les indications qui précèdent, on doit voir que le passage de la chaleur a besoin d'être facilité par quelque circonstance, telle que la présence d'un liquide stagnant ou d'un gaz en mouvement, pour que l'on puisse employer cette formule avec sécurité.

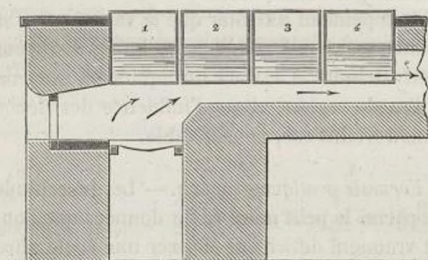
IV. Vaporisation produite par les diverses parties de la surface de chauffe.

559. Influence des diverses parties de la surface de chauffe. — Plusieurs ingénieurs se sont occupés de la question de savoir la part pour laquelle chacune des parties de la surface de chauffe intervient dans la vaporisation générale. Les diverses expériences qui ont été faites sur ce sujet, se résument en quelque sorte dans celles qui ont été poursuivies, avec une remarquable persévérance, par M. John Graham, et qui ont fait l'objet d'un mémoire spécial, inséré dans les transac-

tions de *Literary and philosophical Society of Manchester* (janvier 1858).

540. *Premières expériences de M. John Graham.* — Pour se rendre compte de l'efficacité des diverses parties de la surface de chauffe d'une chaudière, M. Graham a établi (fig. 26),

Fig. 26.



à la suite les unes des autres, quatre caisses cubiques, complètement ouvertes à la partie supérieure, de 0^m,305 et de côté; la première était immédiatement placée au-dessus d'une grille de même dimension que le fond de cette chaudière; les autres à la suite de ce premier appareil; et il a trouvé que les quantités d'eau vaporisées respectivement dans chacune d'elles étaient proportionnelles aux nombres suivants :

1 ^{re} chaudière.....	67,6
2 ^e <i>idem</i>	18,2
3 ^e <i>idem</i>	8,8
4 ^e <i>idem</i>	5,4
	<hr/> 100,00

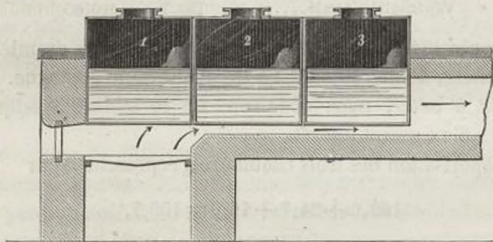
Si l'on divisait une ligne droite en quatre parties égales, si l'on élevait des perpendiculaires en chaque milieu, et si l'on prenait, sur ces perpendiculaires, des ordonnées proportionnelles aux nombres de ce tableau; si enfin, on joignait les points ainsi déterminés par une courbe, on verrait que cette courbe affecterait une forme analogue à celle d'une branche

d'hyperbole se rapprochant de plus en plus de la ligne droite qui aurait servi de base à la construction.

Le pouvoir de vaporisation va rapidement en diminuant, à mesure que la chaudière est plus éloignée du foyer ; pour la quatrième chaudière la quantité d'eau vaporisée n'est plus que la treizième partie de celle qui correspond à la surface de chauffe directe de la première. Ces premières observations avaient été faites sur des appareils fort éloignés, par leurs dimensions et par leur forme, des générateurs de nos ateliers ; mais elles suffisent déjà pour mettre en lumière le rapide décroissement de l'effet utile des diverses parties de la surface.

541. *Expériences de M. Graham sur des chaudières cylindriques juxtaposées.* — D'autres expériences ont été faites sur trois chaudières cylindriques (fig. 27), placées, les unes à la suite des autres, le fond de la première formant, comme dans les expériences précédentes, la totalité de la surface de chauffe directement exposée à la radiation.

Fig. 27.



Il est à regretter que, dans ces expériences, M. Graham n'ait pu employer un plus grand nombre de tronçons cylindriques.

Le tableau suivant contient les éléments essentiels des observations faites isolément sur chacune des chaudières.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE GRAHAM SUR LA VAPORISATION
DANS TROIS CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES JUXTAPOSÉES.

Numéros des expériences.	Durée des expériences.	Charbon brûlé en kilogr.	Évaporation comparative des trois chaudières.			Eau à 16° vaporisée par kilogramme de combustible
			1	2	3	
1	"	"	"	"	"	"
2	6 ^h ,30'	190,26	100	22,8	13,8	5,26
3	10,55	367,38	100	27,8	15,1	5,19
4	6,30	314,38	100	39,4	20,9	4,68
5	9,10	217,44	100	33,5	16,4	3,98
6	6,50	226,50	100	32,9	12,8	4,42
7	8,15	214,27	100	29,0	12,0	4,87
8	9,25	214,49	100	28,6	9,7	3,83
9	5,15	221,74	100	37,0	16,0	4,63
10	7,00	219,25	100	36,0	13,0	4,02
11	5,25	220,15	100	50,7	24,0	4,64
12	7,45	220,61	100	44,4	22,9	4,59
11	83 ^h ,00	2626,47	1100	382,1	176,0	50,11
Moyennes.			100	34,7	16,0	4,55

M. Graham conclut de ces chiffres que les pouvoirs de vaporisation de ces trois chaudières sont comme les chiffres suivants :

1 ^{re} chaudière.....	100,0	ou	66,4
2 ^e <i>idem</i>	34,7		23,0
3 ^e <i>idem</i>	16,0		19,6
Vaporisation totale.....	150,7		100,00

qui, représentés comme nous l'avons fait pour les premières expériences, donneraient lieu à un diagramme analogue.

Quant à nous, nous déduirons de ce tableau quelques données d'un grand intérêt.

La vaporisation des trois chaudières, représentée par

$$100,0 + 34,7 + 16,0 = 150,7,$$

correspond à 4^k,55 par kilogramme de charbon. Or on a brûlé 238^k,73 de houille de Vortley en 7^h,22' = 7^h,37, ou 32^k,39 par heure ; on a donc vaporisé dans le même temps

$$32,39 \times 4,55 = 147^k,37 ;$$

et il est facile de voir, d'après ces éléments, quelle a été la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe.

Chaque chaudière était formée d'un tronçon de cylindre de 0^m,915 de longueur et de 0^m,915 de diamètre : le carneau s'élevait jusqu'au milieu du cylindre ; la surface de chauffe, pour chaque chaudière, était donc mesurée par,

$$\frac{1}{2} \pi \times 0,915 \times 0,915 = 1^{\text{m}^2},31$$

et pour les trois chaudières réunies par 3^m,93.

La vaporisation moyenne a donc été de

$$147,37 : 3,93 = 50^{\text{k}}$$

par mètre carré de surface de chauffe et par heure.

La première chaudière entre dans la vaporisation totale pour

$$100 : 150,7 = 0,664;$$

elle a donc vaporisé

$$0,664 \times 147,37 = 97^{\text{kil}},85,$$

avec une surface de 1^m,31, ou

$$97,85 : 1,31 = 74^{\text{k}},5$$

par mètre carré de surface de chauffe et par heure.

Les chiffres correspondants, pour les 2 autres, sont respectivement

$$74,5 \times 0,347 = 25^{\text{kil}},85 \quad \text{et} \quad 74,5 \times 0,160 = 11^{\text{kil}},92.$$

Le chiffre de 74,5 est surtout intéressant en ce qu'il nous donne une mesure de la vaporisation par mètre carré que l'on peut obtenir de la surface de chauffe directe.

Quant au chiffre de la vaporisation par kilogramme de combustible, il ne faut pas s'étonner qu'il soit aussi faible, attendu que la surface de chauffe totale est absolument insuffisante par rapport à l'étendue de la surface de grille qui, d'après la figure du mémoire original de M. Graham est mesurée par

$$0^{\text{m}},585 \times 0^{\text{m}},915 = 0^{\text{m}^2},535.$$

Le rapport 3,93 : 0,535 ne surpasse pas 7,35, ce qui est extrêmement éloigné des bonnes conditions de la pratique.

542. *Comparaison entre l'effet utile de la surface de chauffe indirecte au-dessus et au-dessous de 100°.* — Dans une des expériences de Graham sur la troisième de ses chaudières, on a trouvé que la quantité de chaleur transmise au liquide, qui était d'abord à 16°, était plus considérable, dans la période qui a précédé l'ébullition, dans le rapport de 24,9 à 16, ce dernier chiffre se rapportant à la quantité de chaleur transmise lorsque l'eau de cette troisième chaudière était déjà parvenue à la température de 100°.

Si la loi de la proportionnalité entre les quantités de chaleur et les différences de température était exacte et si la température des gaz brûlés était, dans les deux cas, de 300°, ces nombres devraient être proportionnels à

$$300 - 48 = 242^{\circ} \quad \text{et} \quad 300 - 100 = 200^{\circ},$$

ce qui se rapproche beaucoup des résultats de l'observation.

545. *Expériences de MM. Dewrance et Woods, sur la vaporisation produite par les différentes parties des tubes.* — MM. Dewrance et Woods, ingénieurs du chemin de fer de Liverpool à Manchester, ont fait, dès 1842, des expériences sur l'efficacité des différentes parties de la surface du chauffe d'un appareil tubulaire.

A cet effet leur chaudière tubulaire était divisée en six compartiments; le premier de ces compartiments n'avait que 0^m,15 de longueur, à partir de la boîte à feu; les cinq autres, de chacun 0^m,30 de longueur, formaient ensemble une longueur de 1^m,50 qui, avec les 0^m,15 du premier compartiment, équivalait à la longueur totale de l'appareil tubulaire.

Dans le premier compartiment, chaque décimètre carré de surface de chauffe vaporisait, à fort peu près, une quantité d'eau égale à celle fournie par une égale surface de la boîte à feu.

Cette vaporisation était réduite au tiers dans le second compartiment, et, dans les divisions suivantes, la vaporisation a été tellement faible qu'on est resté dans le doute sur la question de savoir s'il y avait réellement une production quelconque de vapeur.

MM. Dewrance et Woods ont donc été amenés à conclure que, dans une chaudière tubulaire de locomotive, du modèle de celle qui avait servi à leurs expériences, les quinze premiers centimètres de tube ont un effet évaporatoire supérieur à celui de toute la partie restante du tube, sur une longueur de 1^m,50 environ.

Mais il faut remarquer que l'effet doit être tout autre en service courant, parce que le tirage étant alors rendu beaucoup plus énergique au moyen de l'échappement de la vapeur dans la cheminée, l'action refroidissante de la première partie du tube est moins efficace, et laisse plus d'utilité aux parties suivantes.

544. Expériences de M. Wye Williams. — M. Wye Williams a repris, en 1850, cette question avec plus de méthode, en opérant sur un seul tube, et en mesurant la température des gaz à la sortie.

Dans les expériences de cet habile observateur, il convient de faire remarquer, qu'à l'inverse de ce qui avait eu lieu précédemment, la quantité de chaleur passant par un tube unique était plus considérable que dans les conditions ordinaires de la pratique, et qu'ainsi la vérité doit se trouver probablement entre les résultats constatés dans les deux séries d'observations.

Dans une première expérience, M. Wye Williams a employé un tube de 0^m,075 de diamètre; la vaporisation était fractionnée dans 5 compartiments égaux, de 0^m,30 de longueur, occupant à la suite les uns des autres une longueur totale de 1^m,50, qui était celle du tube tout entier.

Le combustible employé était le coke, et sa flamme, encore brillante à sa sortie, conservait une température de 427°.

TABEAU DES EXPÉRIENCES DE M. WYE WILLIAMS,
SUR LA VAPORISATION PRODUITE PAR LA FLAMME DE COKE.

Numéros des compartiments.....	1.	2.	3.	4.	5.
Température de l'eau après.....	0'	12°	12°	12°	12°
—	20'	100	85	73	64
—	40'	100	98	92	86
—	60'	100	100	100	96
Eau vaporisée en 3 heures.....	3 ^k ,313	2,605	2,207	1,812	1,787
Eau vaporisée par mètre carré de surface et par heure.....	15 ^k ,6	12,3	10,4	8,5	8,4

Le fait le plus remarquable, qui ressort de ces chiffres, consiste en ce que la température de l'eau tend à s'égaliser rapidement dans tout le liquide qui entoure le tube. La vaporisation par mètre carré est peu considérable, au maximum elle est de 15^k,6 à l'entrée du tube ; mais elle s'élève encore à plus de la moitié de ce chiffre à l'autre extrémité de ce tube ; il résulte donc des expériences de M. W. Williams, qu'au delà de 1^m,50, la surface de chauffe des tubes peut encore fournir une vaporisation notable et être pratiquement utilisée.

Les chiffres obtenus avec la flamme du gaz se sont beaucoup plus rapprochés de ceux de MM. Dewrance et Woods ; le tube avait encore un diamètre de 0^m,075, mais sa longueur de 1^m,35 était divisée en un premier compartiment de 0^m,15 seulement et en quatre autres de 0^m,30. La flamme sortait à une température de 250°.

TABEAU DES EXPÉRIENCES DE M. WYE WILLIAMS,
SUR LA VAPORISATION PAR LA FLAMME DE GAZ.

Numéros des compartiments.....	1	2	3	4	5
<i>1^{re} Expérience.</i>					
Eau vaporisée en 4 heures.....	2 ^k ,975	1,246	0,906	0,651	0,481
Eau vaporisée par mètre carré de surface et par heure.....	21,0	4,4	3,2	2,3	1,7
<i>2^e Expérience.</i>					
Eau vaporisée en 4 heures.....	2,719	1,161	0,879	0,538	0,453
Eau vaporisée par mètre carré de surface et par heure.....	19,2	4,1	3,1	1,9	1,9
Vaporisation moyenne.....	20,1	4,2	3,2	2,1	1,8

Les deux expériences sont assez concordantes pour que la

vaporisation moyenne doit inspirer toute confiance ; on y remarque que les chiffres vont en diminuant bien plus rapidement que dans les expériences faites avec la flamme du coke ; mais on ne saurait attribuer ces variations à la nature de la flamme ; elles appartiennent certainement, d'une manière presque exclusive, aux quantités de chaleur qui sont mises en circulation dans les deux cas, et surtout à la température des gaz à leur sortie de l'appareil ; cette température ne s'élevait qu'à 250° pour le dernier tableau, tandis qu'elle était de 457 pour le précédent.

545. *Loi de la décroissance de la vaporisation.* — M. Havrez a publié, dans la *Revue universelle des mines*, tome XXXIX, janvier 1862, un travail dans lequel, après avoir reproduit les chiffres de M. Wye Williams, il cherche à établir, d'une manière rationnelle, la limite de longueur à laquelle il convient de s'arrêter pour se placer dans les conditions les plus favorables d'économie.

Les frais d'établissement des chaudières, et, par conséquent, les intérêts et l'amortissement qui en sont la suite, augmentent avec la longueur des tubes ; la consommation annuelle de combustible diminue au contraire quand les tubes sont plus longs, et dans les limites pour lesquelles l'augmentation de la surface chauffe détermine un surcroît de vaporisation.

M. Havrez a introduit tous ces éléments dans une même formule, mais il nous semble que quelques-uns, au moins, d'entre eux, sont assez incertains pour qu'il ne soit pas vraiment pratique de chercher, d'une manière générale, la solution dans des considérations aussi complexes.

Nous citons cependant ce travail parce qu'il discute, de la manière la plus intéressante, les résultats de M. W. Williams, et qu'il en déduit les deux lois suivantes, qui seront, en quelque sorte, les conclusions des détails dans lesquels nous sommes entrés, quant à l'utilisation des parties successives de la surface de chauffe.

1° Le rapport entre les quantités d'eau vaporisées sur des longueurs consécutives égales est un nombre constant;

2° Ce nombre sera d'autant plus faible que la quantité de gaz qui produit la vaporisation sera plus grande.

La première loi est la plus importante : elle nous montre que, si l'on désigne par q le poids de l'eau vaporisée à une distance r de l'origine, on aura $q = m'q_1$, q_1 étant la quantité d'eau vaporisée à la distance 1, et m la fraction plus ou moins grande dont il est question dans la seconde loi. En d'autres termes, les quantités d'eau vaporisées diminuent suivant les termes d'une progression géométrique, lorsque la distance à l'origine varie en progression arithmétique.

V. Influence des autres circonstances de la pratique des ateliers.

546. *Influence des principales circonstances de la pratique.* — Avant d'énumérer, dans son ensemble, la question de l'utilisation du combustible dans les chaudières à vapeur, il ne sera pas sans intérêt de faire ressortir l'influence de quelques-unes des circonstances prépondérantes ; nous avons réuni, à cet égard, quelques données qui pourront, dans une certaine mesure, suppléer à l'insuffisance de nos connaissances théoriques sur les lois de la transmission de la chaleur.

547. *Influence de la grandeur des grilles.* — Les vieux praticiens disposent leurs grilles pour brûler 100 kilogrammes de houille par mètre carré et par heure. Ils se trouvent assez bien de cette pratique, et les chaudières ainsi établies ne donnent pas, quand elles sont bien conduites, des fumées très-abondantes. Mais, lorsqu'une chaudière à vapeur a été établie dans ces conditions pour une usine, à mesure que cette usine se développe, il lui faut plus de puissance motrice, plus de vapeur, et l'on exige, d'un même foyer, une consommation successivement plus grande de combustible.

Il faut charger davantage la grille, l'air arrive moins riche en oxygène au-dessus du charbon, la combustion des hydro-

carbures se fait d'une manière incomplète, et la fumée devient de plus en plus intense.

Enfin, l'emploi d'une grande grille est un palliatif de la fumée, et nous pouvons à cet égard citer un fait d'une grande importance.

M. Froment, dans ses nouveaux ateliers de construction, situés rue Notre-Dame-des-Champs, a fait établir une chaudière à vapeur, dans laquelle il brûle 14 kilogrammes de houille par heure, sur une grille de $0^m,270 \times 0^m,735 = 0^m,1984$, ce qui revient à $70^{kil},55$ par mètre carré de surface de grille et par heure. La cheminée de cette chaudière n'a jamais donné la plus légère trace de fumée, et le chauffeur ne prend d'autre précaution que celle de charger son feu en avant de la grille, qui est relativement longue, et de pousser le coke vers le fond.

La chaudière de M. Froment ne donne pas trace de fumée, parce que la surface qui donne libre accès à l'air est très-grande, que les vides sont très-rapprochés, et que, par conséquent, l'admission de l'air frais se fait en quantité suffisante, surabondante peut-être, et sur tous les points à la fois.

Le chargement de combustible par petites doses, à l'entrée d'un vaste foyer, évite le refroidissement des gaz distillés, et assure, par cela même, leur complète combustion.

Nous verrons que cette combustion de 70 kilogrammes par mètre carré de grille n'est pas d'ailleurs désavantageuse dans la pratique, si l'on considère seulement la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de combustible.

Dans la grille de M. Froment la surface libre est de $0^m,0794$, et la consommation par mètre carré de surface libre de $176^{kil},48$ par heure.

348. *Influence de la section libre des grilles.* — L'air appelé par la cheminée, pour contribuer à la combustion, passe successivement par les interstices de la grille et par ceux du charbon; et il paraît évident que c'est, dans ce dernier trajet, qu'il éprouve les plus grands obstacles, surtout quand on

emploie une certaine épaisseur de combustible, convenablement concassé, en fragments de grosseur uniforme et distribués régulièrement sur la grille.

On ne doit pas s'étonner, par conséquent, que la section libre de la grille n'ait pas toute l'influence que quelque auteurs lui ont attribuée; la largeur du vide conservé entre deux barreaux devra plutôt être déterminée par la nature du combustible, dont une plus grande partie passera par les intervalles des barreaux, si ces intervalles sont plus larges et si le combustible lui-même est plus menu.

C'est surtout avec les houilles non collantes qu'il importe d'avoir des barreaux rapprochés, qui laissent encore passer une trop grande quantité d'escarbilles. Une largeur de vide de 1 centimètre sera, dans tous les cas, plus que suffisante.

349. *Avantages que présentent les barreaux minces.* — L'épaisseur des barreaux eux-mêmes exerce une influence plus grande, et l'on comprend facilement que si les accès d'air sont mieux répartis sur la grille, la combustion doit être, par cela même, grandement facilitée : les barreaux minces produisent ce résultat, et il ne saurait être indifférent que les orifices d'air soient distants les uns des autres de 1 ou de 3 centimètres.

Lorsque les barreaux sont minces, le nombre des interstices est plus grand; et, comme chacun d'eux compte dans le vide total, il arrive naturellement que la surface libre est notablement plus grande. Nous pensons que cette modification dans la proportion de la surface libre de la grille a été le résultat naturel et non la cause de l'amincissement des barreaux.

Il ne faut pas croire d'ailleurs que les barreaux minces soient plus sujets à brûler que les autres; lorsque la combustion est bien conduite, que le tirage est suffisant, les lames d'air qui s'écoulent constamment entre eux les refroidissent très-énergiquement, et même, lorsqu'ils sont en fonte, ils peuvent durer aussi longtemps que les barreaux épais.

530. *Distance entre la grille et la chaudière.* — M. Graham * a fait, sur une même chaudière cylindrique, plusieurs séries d'expériences, dans lesquelles il a fait varier les distances entre la grille et la chaudière.

La grille avait $1^m,55 \times 2^m,11 = 3^m,27$; le diamètre de la chaudière était de $1^m,83$, sa longueur de $13^m,81$, ce qui correspond à une surface de chauffe de $18^m,15$. Le rapport entre cette surface et celle de la grille était donc seulement de 5,55.

Dans ces expériences, les gaz brûlés se rendaient directement dans la cheminée, en passant, entre l'autel et la chaudière, dans une enveloppe circulaire de $0^m,15$ d'épaisseur; l'utilisation du combustible est indiquée par les chiffres suivants :

Distance entre la grille, et la chaudière.	Kilogrammes d'eau vaporisés par kilogr. de combustible.
$0^m,305$	6,14
$0^m,356$	6,46
$0^m,648$	5,11

La distance de $0^m,356$ a été notablement la plus favorable, mais rien n'assure qu'il en serait de même pour une chaudière placée dans d'autres conditions, quoique cette mesure de la distance soit d'ailleurs conforme à la pratique des constructeurs.

531. *Dimensions des carneaux.* — Cette même chaudière avait été précédemment employée dans des conditions différentes : la grille et l'autel offraient les mêmes dispositions; mais, au lieu d'un intervalle de 15 centimètres seulement entre la chaudière et la maçonnerie, dans tout le carneau qui forme le lit de la flamme, comme disent les Anglais (*flame bed*), on avait disposé une grande chambre occupant toute la longueur de la chaudière et n'ayant pas moins de $1^m,83$ de hauteur.

* *Memoirs of the literary and philosophical Society of Manchester.*

M. Graham n'indique pas en termes exprès la vaporisation par kilogramme de combustible brûlé dans ces circonstances, mais il dit que la disposition ordinaire a réalisé, par rapport à celle-ci une réduction de dépense de 30 pour 100. Cette réduction étant relative au premier chiffre du tableau précédent, on voit que la suppression du *flame bed* aurait conduit seulement à une vaporisation par kilogramme de 4^{kil},72.

Les Anglais disent qu'une telle chaudière est mal assise (*bad setting*).

532. *Importance du fréquent nettoyage des carneaux.* —

M. John Graham s'exprime sur cette question importante ainsi qu'il suit :

« Les carneaux qui entourent la chaudière sont d'un effet très-minime ou même nul, quant à la production de la vapeur, lorsque l'épaisseur de la couche de suie atteint un huitième de pouce (3 millimètres). »

Plus loin, il ajoute :

« Si les côtés et le fond de la chaudière, exposés aux courants d'air brûlé, sont dépouillés, une fois par semaine, de la suie qui les recouvre, l'économie qui en résulte est d'environ 2 pour 100.

« Il est avantageux de convertir les courants latéraux en un large et mince rideau de flamme (toutes les fois que cela est possible), en le disposant de manière à entourer toute la chaudière, jusqu'au niveau de l'eau, et à se rendre directement dans la cheminée; de cette manière la chaudière ne se recouvre de fumée sur aucun point de sa longueur, et la radiation des briques est rendue plus efficace. »

Cette observation n'a pu, jusqu'à présent, être prise en assez sérieuse considération : nous avons observé que plusieurs fourneaux, dont la construction était loin de passer pour irréprochable, fonctionnaient cependant avec une grande régularité, par cela seul que les briques y étaient maintenues à une température élevée. De tous les procédés préconisés pour la suppression de la fumée, il n'en est peut-être pas

de plus sûr que celui qui consiste à faire passer les gaz de la combustion dans une canalisation en poterie, qui se maintienne facilement à une température convenable.

533. Influence du refroidissement par les tubes. — Les expériences de M. Wye Williams nous ont fait voir que la longueur de la flamme est beaucoup plus grande qu'on n'est généralement porté à le croire. Cette flamme s'éteint facilement lorsqu'elle est refroidie, et nous nous sommes assuré que cette extinction est complète dans des tubes de 5 centimètres de diamètre, à moins de 2 mètres de distance du foyer. Cette expérience, faite sur une chaudière de machine locomobile, a en même temps conduit à constater qu'une suie abondante se dépose alors dans les tubes et les obstrue presque complètement en quelques heures.

Nous sommes ainsi confirmés dans cette opinion que les carneaux doivent être larges dans le voisinage du foyer et disposés de manière à former en quelque sorte la continuation de la chambre de combustion; on devra surélever un peu la maçonnerie derrière la grille, à l'endroit de l'autel; et, dans les chaudières tubulaires, on aura soin d'employer des tubes d'un grand diamètre, à moins que la température de la boîte à feu ne soit maintenue très-élevée par un tirage artificiel, et que cette boîte à feu n'ait une hauteur suffisante pour que les produits hydrogénés y soient complètement enflammés.

534. Influences atmosphériques. — Nous empruntons encore à M. Graham les indications suivantes sur l'influence des conditions atmosphériques. Ni l'humidité des charbons, ni le temps écoulé depuis leur extraction, ni les variations de la température extérieure, depuis 5 jusqu'à 20°, ne lui paraissent exercer d'influence sur le résultat de la vaporisation par kilogramme.

Cette conclusion nous paraît un peu trop absolue, en ce sens que les temps humides sont peu favorables au tirage; les

vents, au contraire, à moins qu'ils ne surviennent par rafales, faciliteront presque toujours la combustion.

C'est surtout, pour se mettre à l'abri des rentrées d'air accidentelles, que l'on est obligé de conserver aux gaz de la combustion une certaine vitesse jusqu'au sortir de la cheminée; on estime, en général, que cette vitesse ne doit pas être inférieure à 1^m,50 ou 2 mètres, ainsi qu'on l'observe dans la plupart des cheminées existantes.

535. *Influence de la fréquence des charges.* — Dans la pratique, on ne saurait imposer aux chauffeurs l'obligation de ne renouveler leurs chargements qu'à des intervalles déterminés; chacun d'eux a ses habitudes particulières; mais les plus habiles n'ont, pour ainsi dire, pas besoin d'ouvrir la porte de leur fourneau pour savoir s'il est temps d'introduire du combustible frais.

En Angleterre, on charge en général beaucoup de combustible en une seule fois, et nous avons vu que M. Wye Williams a fait ses expériences avec des intervalles de 40 minutes; M. Wouldsworth les faisait durer 100 minutes, en égalisant une seule fois le combustible entre deux chargements.

En France, on charge plus fréquemment; et, dans les expériences de la société de Mulhouse, les chargements se sont souvent succédé à 4 minutes d'intervalle. Par ce moyen, il est évident que l'intensité de la fumée se trouve réduite au minimum; mais on pourrait craindre que l'ouverture fréquente du fourneau ne fut pas aussi favorable à la bonne utilisation du combustible.

Les expériences de Mulhouse semblent indiquer que cette crainte n'est pas fondée: si nous nous bornons, en effet, à étudier l'influence de la fréquence des charges, pour les deux fourneaux en maçonnerie qui ont été expérimentés, et si nous choisissons, parmi les résultats obtenus, ceux qui proviennent de chargements notablement plus fréquents, nous pouvons les résumer de la manière suivante:

TABLEAU DE L'INFLUENCE DES INTERVALLES
ENTRE LES CHARGEMENTS SUCCESSIFS.

Désignation de la chaudière.	Nombre des expériences comprises dans le tableau.	Nombre des charges.	Poids moyen des charges.	Durée totale des expériences.	Kilogrammes d'eau vaporisés par kilogr. de combustible.	Intervalle moyen des charges.
Chaudière Dollfus,						
Mieg et C ^{ie}	1	53	25,00	12 ^h ,20	6,48	13',95
Idem.....	1	104	15,00	11,25	6,71	6,97
Idem.....	3	388	10,00	34,30	6,99	5,37
Chaudière Prouvost.	2	191	11,45	25,40	7,06	8,00
Idem.....	3	641	5,17	37,45	7,77	3,55

Ces chiffres indiquent, pour la première série d'expériences comme pour la seconde, que la fréquence des charges est favorable à l'utilisation du combustible; l'augmentation de la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de houille est régulière, et il semblerait par conséquent qu'on devrait recommander de faire de nouveaux chargements toutes les 5 minutes; mais il faudrait alors les opérer avec rapidité, et l'on ne peut malheureusement espérer qu'un chauffeur soit toujours assez actif pour refermer la porte aussi vite qu'il est désirable.

On fera donc bien d'espacer les charges un peu plus et de recommander, suivant les circonstances, un intervalle moyen de 6 à 10 minutes entre les chargements successifs.

356. Conduite du feu. — Ces précautions ne sont pas les seules qu'il soit nécessaire de prendre pour entretenir convenablement le feu d'un fourneau de chaudière à vapeur.

M. Wye Williams a donné l'énumération très-complète de conditions à exiger d'un bon chauffeur, dans les lignes suivantes, dont nous nous bornons, quant à présent, à donner une traduction presque littérale :

Lorsque l'alimentation de l'air a lieu d'une manière convenable, tous les soins que doit prendre le chauffeur peuvent être résumés en ces quelques mots :

1° Commencer à charger la grille vers l'autel et maintenir

le feu jusqu'à quelques centimètres seulement de la plaque de seuil du foyer ;

2° Recharger le feu quand il y a encore une épaisseur d'au moins 10 à 12 centimètres de combustible incandescent sur les barreaux ;

3° Tenir les barreaux constamment et uniformément couverts, particulièrement vers l'autel, où la combustion est toujours plus rapide ;

4° Si le combustible brûle inégalement ou par places, il est indispensable de l'égaliser et de recouvrir les vides ;

5° Les gros fragments de charbon doivent être concassés en morceaux de la grosseur du poing ;

6° Lorsque le cendrier a peu de hauteur, il doit être plus fréquemment vidé ; un trop grand amas d'escarbilles chauffe et brûle les barreaux.

Nous ne saurions rien ajouter à ces règles précises, si ce n'est qu'elles sont rarement observées ; le chauffeur qui en fait sa règle de conduite est sûr de réaliser cependant une économie, qui représente chaque année une notable portion de la dépense ordinaire.

CHAPITRE V.

CAUSES DES PERTES DE CHALEUR DANS LES FOURNEAUX DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

557. *Principales causes des pertes de chaleur.* — On ne saurait arriver, ni à développer, ni à utiliser toute la chaleur que le combustible peut fournir; et nous nous proposons de passer en revue les différentes causes de pertes de chaleur, dans les fourneaux des chaudières à vapeur.

Le combustible est imparfaitement brûlé, soit parce que des escarbilles, encore riches en carbone, échappent à la combustion, soit parce que certains produits gazeux ne sont pas amenés à l'état de combinaison le plus favorable; mais les pertes que ce dernier défaut de combustion entraîne sont loin d'être les plus considérables.

La chaleur enlevée par l'échauffement des gaz de la combustion est entièrement perdue pour la vaporisation; et, plus encore que toute matière soumise à une suite de manipulations, la chaleur se perd sous toutes les formes dans chacun des passages auxquels on l'oblige : pertes par radiation des enveloppes du foyer; pertes par les fuites de vapeur; pertes par les condensations et les refroidissements dans les conduits; pertes par l'eau inutilement entraînée; toutes ces pertes s'accumulent de manière à former un déficit considérable, que nous allons examiner dans les divers éléments dont il se compose, en indiquant, autant que possible, les soins à prendre pour le diminuer.

558. *Pertes par les escarbilles et par les cendres.* — La teneur en cendres des divers combustibles, ne saurait donner la mesure de ce qui échappe à la combustion. Une portion du charbon tombe dans le cendrier à l'état d'escarbilles, une autre portion reste enfermée dans les scories, enfin la houille est toujours mélangée de morceaux de schiste, qui provien-

nent de la mine et dont il n'est pas tenu compte, lorsqu'on calcule son pouvoir calorifique d'après les chiffres des analyses.

C'est ainsi que, dans les expériences faites par la Société industrielle de Mulhouse, la houille de Ronchamp qui fournissait à l'analyse seulement 3,40 de matières inertes et de matières siliceuses, a donné, dans la pratique, 13,80 de matières non combustibles, en cendres et scories, sans compter 5,40 d'escarbilles échappant à la combustion.

1 kilogramme de houille, au lieu d'être réduit, comme l'indique l'analyse, à 966 grammes de combustible pur, n'a donc réellement été brûlé, dans les expériences, que pour $1000 - 138 - 54 = 808$ grammes; sa valeur pratique a été réduite aux huit dixièmes environ de la richesse sur laquelle l'analyse aurait permis de compter.

Ces diverses circonstances sont très-variables dans leurs effets : tel charbon se brûle mieux que tel autre; les charbons collants produisent moins d'escarbilles que les charbons maigres; ceux-ci sont plus mélangés de schistes, dont ils se rapprochent davantage par leur aspect et par leur couleur. Parmi ces derniers, les menus traversent plus facilement les interstices des grilles, et les dimensions de ces interstices ont aussi une grande influence sur la perte définitive. On ne saurait donc évaluer ces éléments que par des expériences faites sur le fourneau même, pendant un temps suffisamment prolongé.

Dans les usines le mieux dirigées on a soin d'ailleurs de reporter au fourneau les escarbilles qui ont été recueillies avec les cendres, et c'est la seule manière de se mettre, autant que possible, à l'abri de ces influences.

On comprendra l'importance de cette pratique lorsqu'on saura que certaines cendres contiennent jusqu'à 0,50 de leur poids de coke, dont la perte diminuerait l'utilisation du charbon dans une proportion notable.

359. Perte par défaut de combustion. — La combustion

peut être imparfaite non-seulement par rapport au carbone non brûlé, mais encore par rapport aux produits gazeux.

On comprend qu'il n'est possible de donner à cet égard aucune règle fixe ; mais les expériences de MM. Foucou et Amiguis nous ont déjà appris dans quelle proportion le carbone, dans les conditions spéciales qu'ils ont examinées, se transforme en oxyde de carbone. Cette proportion est indiquée par les chiffres suivants :

Dans les circonstances les plus favorables.....	0,14
Dans les circonstances les plus défavorables....	0,54
Moyenne.....	0,34

Elle s'élèverait en moyenne, dans ces circonstances spéciales, au tiers du poids du combustible.

Pour interpréter ce résultat, il nous suffira de rappeler les chiffres suivants :

1 kilogramme de charbon passant
à l'état d'acide carbonique produit... 8000 unités de chaleur.

1 kilogramme de charbon passant de l'état d'oxyde de carbone à celui d'acide carbonique, produit.....	2400
Différence.....	5600

Ainsi un kilogramme de charbon, passant à l'état d'oxyde de carbone, ne produit que $\frac{5600}{8000} = 0,70$ de ce qu'il pourrait fournir ; la perte serait donc de $0^{\text{kil}},30$ par chaque kilogramme de carbone mal brûlé ; si le tiers du charbon est dans cette condition, la perte est réduite au tiers, et l'effet utile est porté à 0,90.

Nous ne possédons, dans l'état actuel des choses, aucune indication précise sur les pertes résultant de la combustion imparfaite de l'hydrogène. Elle est, d'après les mêmes expériences, très-variable ; mais nous pouvons admettre, sans crainte de l'évaluer trop haut, que l'ensemble de ces pertes

sur les deux combustibles gazeux réduit, dans la plupart des circonstances, le pouvoir calorifique à 0,90 de sa valeur théorique.

560. Perte par les gaz brûlés. — Les gaz brûlés emportent une certaine quantité de chaleur dont il importe de se rendre compte : il est possible de le faire au moyen des chiffres que nous avons indiqués, et en admettant que la capacité des gaz est, en moyenne, de 0,30.

En général on observe que la température, au moment où les gaz cessent d'être en contact avec la chaudière, est peu différente de 300°, et l'on peut voir, par le tableau suivant, l'influence de cette température.

Dans le fourneau de la chaudière Farcot, du Conservatoire, les gaz s'échappent à une température de 260 à 270°; on observe celle de 250° dans la plupart des cheminées de locomotives.

Si nous voulons déterminer l'utilisation du combustible dans le cas d'une houille dont le pouvoir calorifique est exprimé par 8000, lorsque les gaz s'échappent à 300° et lorsque le poids de l'air introduit est, par exemple, de 10 kilogrammes, il suffit de remarquer, que les gaz brûlés pèseront en totalité 11 kilogrammes qui, pour être portés à 300°, exigeront

$$11 \times 300 \times 0,30 = 990 \text{ calories;}$$

et l'utilisation ne pourra plus s'élever qu'à

$$8000 - 990 = 7010$$

calories. La diminution serait bien plus considérable si le volume d'air introduit était plus grand, mais nous avons à dessein, fait nos calculs sur un minimum.

C'est par la même méthode qu'ont été calculés tous les chiffres du tableau suivant, qui donne la mesure de l'utilisation, dans les diverses circonstances de la pratique et pour des introductions d'air de plus en plus grandes.

TABLEAU DE LA CHALEUR EMPORTÉE PAR LES GAZ BRULÉS,

A DIVERSES TEMPÉRATURES.

Poids d'air dépensé par kilogr. de combustible.	Volume correspondant.	Température initiale des gaz brûlés.	Calories		Températures		Calories		Températures		Calories	
			utilisées.	finales.	utilisées.	finales.	utilisées.	finales.	utilisées.	finales.	utilisées.	finales.
kil.	m.c.											
10	7,73	2484	8000	100°	7670	200°	7340	300°	7010	400°	6680	
18	13,92	1408	8000	»	7430	»	6860	»	6290	»	5720	
19	14,70	1333	8000	»	7400	»	6800	»	6200	»	5600	
20	15,47	1369	8000	»	7370	»	6740	»	6110	»	5480	
25	19,34	1064	8000	»	7250	»	6500	»	5750	»	4880	

En résumé, nous voyons donc que, dans les circonstances ordinaires, où les volumes d'air s'élèvent souvent jusqu'à 15 mètres cubes par kilogramme de combustible, les gaz brûlés emportent 1800 calories, et que par conséquent la perte relative est de $\frac{1800}{8000} = 0,23$, et l'utilisation seulement de $\frac{6200}{8000} = 0,77$.

Si cette température finale de 300° n'était pas nécessaire au tirage, on pourrait encore l'utiliser à réchauffer l'eau d'alimentation, à l'aide des appareils que nous nous réservons de décrire ultérieurement.

Dans ce cas la température des gaz ne peut s'abaisser au-dessous de la température de l'eau d'alimentation, et nous verrons que dans certaines circonstances on parvient à élever cette eau jusqu'à 95 et 98°.

561. *Relation entre les pertes par défaut de combustion, et les pertes par les gaz brûlés.* — La combustion est d'autant plus complète, toutes choses égales d'ailleurs, qu'on fournit à chaque kilogramme de combustible un plus grand volume d'air, mais l'augmentation de la quantité d'air entraîne nécessairement une plus grande perte par les gaz de la combustion.

Il y aurait donc à rechercher, entre ces extrêmes, quelle est la limite pratique à laquelle il convient de s'arrêter par rapport au volume d'air.

La perte, par la température des produits de la combustion, peut s'évaluer approximativement au moyen de la capacité des gaz produits, et de leur température.

Il n'en est pas de même pour la perte due au défaut de combustion : elle ne pourrait être établie que par différence entre l'effet utile réel et le pouvoir calorifique du combustible, et nous avons vu que ce dernier élément d'appréciation ne nous est connu que d'une manière très-imparfaite.

La perte, par les gaz, sera d'autant moindre qu'ils auront été mieux refroidis à la sortie ; c'est donc surtout lors de l'em-

ploi d'un grand volume d'air que ce refroidissement est plus utile.

Dans les expériences comparatives, faites par la Société industrielle de Mulhouse avec un même combustible, il est à remarquer que les résultats ont été presque identiques au point de vue de la vaporisation par kilogramme, alors que les autres éléments ont varié dans des rapports considérables.

	Volume d'air.	Poids correspondant.	Tempé- rature.	Vaporisation par kilogr.
Chaudière Zambeaux	7,23	9,35	262	7,68
Chaudière Dollfus.....	8,58	11,09	441	6,71
Chaudière Prouvost.....	16,36	21,15	184	7,69
Chaudière Molinos et Pronnier.	17,25	22,30	257	7,73

On serait tenté de conclure de ces chiffres, qu'il s'établit une sorte de compensation entre les diverses causes de déperdition, et qu'on peut aussi bien utiliser le combustible en dépensant soit 8 mètres cubes, soit 16 mètres cubes par kilogramme de houille.

Dans un travail ultérieur (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1860, page 353), les rapporteurs s'expriment à cet égard d'une manière plus explicite :

« Un autre fait saillant ressortait des études entreprises, avant le concours, par MM. Dollfus Mieg et C^{ie} : c'est que, dans les chaudières, telles que la plupart des établissements les emploient encore aujourd'hui, il y a avantage à opérer une mauvaise combustion sur le foyer, à produire le plus de fumée possible, pour tirer du combustible le plus grand rendement, à introduire, en moyenne, 7 à 8 mètres cubes d'air par kilogramme de houille, au lieu de 16 à 18 mètres cubes, admis jusqu'ici. Or, le chiffre que nous indiquons comme convenable est celui qui ne suffit que théoriquement à la combustion de la houille, et qui résulte, comme nous l'avons montré, de l'analyse chimique et du calcul, en admettant qu'aucune parcelle d'air n'échappe à la combustion. Nous nous étions assurés, qu'entre les limites de 7 à 18 mè-

tres cubes, il y a des différences qui peuvent atteindre 15 à 20 pour 100. »

Nous sommes absolument d'accord avec la Société industrielle de Mulhouse sur ce point, et nous pensons que la question de fumivorité restant hors de cause, il y aurait tout avantage, dans les générateurs ordinaires, à diminuer les quantités d'air introduites; mais cette diminution n'est pas toujours facile à obtenir.

562. *Difficulté de ne consommer qu'une petite quantité d'air.* — Nous trouvons, sur cette question importante, d'excellentes observations dans le même bulletin :

« Il est possible d'obtenir, dans un concours comme celui qui vient d'avoir lieu, que les chauffeurs emploient une faible quantité d'air; mais, en marche ordinaire, votre commission a pu s'assurer que cela est à peu près impossible, surtout lorsque la consommation, par unité de surface de grille, n'est pas très-faible, par le motif que les chauffeurs qui admettent un excès d'air diminuent, sous tous les rapports, leur fatigue dans une proportion très-considérable. Il est moins difficile d'obtenir des ouvriers qu'ils chargent la grille d'une manière parfaitement régulière et qu'ils ne la laissent pas traverser, sur certains points, par un excès d'air; mais c'est là aussi une cause fréquente de pertes pour les chaudières ordinaires. »

Sous ce rapport surtout, les chauffeurs soigneux et robustes peuvent apporter, dans la consommation, une économie considérable.

563. *Appréciation moyenne de la perte par les gaz brûlés.* — En présence des différences que nous avons dû signaler, il serait difficile d'estimer, avec quelque certitude, la perte moyenne de chaleur qui se fait par les gaz brûlés.

Cette perte peut s'amoindrir beaucoup par l'emploi d'un bon système de réchauffeurs; mais, dans la plupart des cas,

nous resterons au-dessous de la vérité, en disant que l'on consomme, généralement, au moins 14 mètres cubes d'air par kilogramme de combustible et que les gaz quittent les carneaux à une température d'au moins 300°. Si l'on se reporte au tableau du n° 539, on verra que ces circonstances se traduisent par une utilisation de 0,77 pour 100. Nous compterons habituellement sur ce chiffre dans tous les cas où l'on n'aura point eu recours aux dispositions particulières que nous nous proposons d'étudier un peu plus loin.

564. Détermination directe de la température des gaz brûlés.

— La facile détermination de la température des gaz brûlés serait, on le voit par les indications qui précèdent, d'une grande importance pour la surveillance de la bonne marche d'un foyer de chaudière à vapeur.

Malheureusement les moyens dont on dispose pour déterminer cette température sont, pour la plupart, ou incomplets ou incommodes.

Jusqu'à 350°, on peut employer des thermomètres à mercure ; mais, à mesure que l'on approche de cette limite extrême, il faut prendre des précautions pour ne pas briser l'instrument : c'est à peine si, par ce moyen, on pourrait s'assurer que la température n'est pas trop élevée à la naissance de la cheminée, après plusieurs parcours de la flamme.

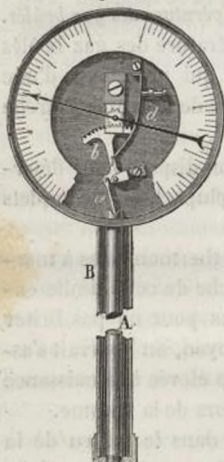
Au lieu de placer un thermomètre dans le milieu de la cheminée, les expérimentateurs de Mulhouse ont été conduits à y introduire des tubes horizontaux en fer, de 4 centimètres de diamètre, recourbés verticalement à l'extérieur. En remplissant ces tubes d'huile, il s'y forme des courants en sens contraires, qui tendent à rendre la température uniforme dans toute la masse, ce qui permet d'observer, avec une approximation suffisante, dans la branche verticale, au moyen d'un thermomètre à mercure. Le diamètre de 4 centimètres est nécessaire pour que les courants contraires puissent s'établir avec permanence.

Dans les expériences que se propose de faire M. Burnat

sur la température des gaz, près des bouilleurs, il emploiera un tube semblable, mais contourné en spirale. Ces différents moyens permettraient, sans aucun doute, d'apprécier s'il y a des différences, en plus ou en moins, à partir d'une certaine température déterminée d'avance ; mais ils seraient insuffisants pour avoir la mesure exacte de ces différences elles-mêmes.

On a proposé, pour le même objet, différents systèmes de pyromètres : celui que représente la figure 28 est fondé sur

Fig. 28.



l'inégale dilatation d'une tige intérieure A en fer, et d'une gaine extérieure B en cuivre. Il constitue une sorte de thermomètre différentiel, en métal, dont les indications sont d'une suffisante exactitude, lorsqu'il s'agit d'apprécier la température des gaz brûlés. L'instrument étant gradué pour le cas où la tige tout entière est amenée à une température plus ou moins élevée, il importe de reproduire cette condition lorsqu'on veut mesurer les températures. On devra toujours avoir le soin d'enfoncer l'appareil dans la cheminée, jusqu'à la naissance du cadran divisé sur lequel les lectures

doivent se faire. La figure fait comprendre la disposition des divers organes : les différences d'allongement sont transmises à la bielle *a*, qui agit sur le petit bras de levier de l'arc divisé *b*, chargé d'amplifier les mouvements qu'il transmet, dans le même but, à un pignon central d'un plus petit diamètre ; un ressort *d*, que l'on peut tendre par une vis, sert d'ailleurs à maintenir toutes les pièces en contact et à les ramener, après chaque expérience, à leurs positions primitives.

Au moyen d'aiguilles folles, entraînées par l'aiguille principale, dans un sens seulement, on obtiendra facilement des

évaluations de la température maximum et de la température minimum.

563. *Détermination de la température des gaz brûlés, par la fusion d'un fil de métal.* — Dans les expériences faites au chemin de fer du Nord, sur les générateurs à bouilleurs, on a employé avec succès des chapelets composés de petites boucles formées avec des fils de différents métaux, fondant à des températures différentes. Le tableau suivant renferme à cet égard les chiffres les plus utiles.

TEMPÉRATURE DE FUSION DE QUELQUES MÉTAUX.

Étain.....	235°
Bismuth.....	260
Plomb.....	322
Zinc.....	412
Antimoine.....	450
Argent.....	1000

On sait d'ailleurs que certains alliages de ces métaux sont beaucoup plus fusibles, et l'on pourra facilement obtenir, par le moyen de ces alliages, une série aussi complète que l'on voudra d'éprouvettes de ce genre, qu'il suffira de réunir par un fil de laiton, avant de les introduire dans le lieu dont on veut connaître la température : on saura, tout au moins, que cette température est comprise entre des limites parfaitement connues.

On a ainsi reconnu que la température des carneaux, près du registre, dépassait 412°, et on l'a estimée à 420. A la naissance de la cheminée, le fil de zinc étant resté intact, on a pu conclure que la température en ce point était inférieure à 412°.

566. *Détermination de la température des gaz brûlés, au moyen d'une masse de métal chauffée.* — On emploie habituellement un moyen qui exige moins de préparatifs, mais qui, s'il est plus commode, est cependant moins sûr. Après avoir maintenu, dans le carneau, une masse de métal, pendant un temps que l'on estime suffisant pour qu'elle en ait pris la

température, on plonge rapidement ce métal dans l'eau. L'élévation de la température de cette eau peut, par ce procédé calorimétrique, faire connaître celle du métal et, par conséquent, celle du carneau dans lequel il s'est échauffé.

Si l'on désigne par P et par x le poids et la température du métal, par p le poids de l'eau, par t et t' les températures de cette eau avant et après l'expérience, et enfin par c la capacité du métal pour la chaleur, on aura, comme dans toutes les opérations analogues, la relation

$$Pc(x - t') = p(t' - t)$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{p(t' - t)}{Pc} + t'.$$

Si l'on voulait tenir compte de la chaleur absorbée par le métal du vase servant de calorimètre, il faudrait introduire, dans l'égalité à établir entre les quantités de chaleur perdues et gagnées, le poids P' du vase et sa capacité c' pour la chaleur, ce qui donnerait

$$Pc(x - t') = (p + P'c')(t' - t)$$

La valeur de x devient alors

$$x = \frac{p + P'c'}{Pc} (t' - t) + t'.$$

En se servant, comme on le fait le plus habituellement, d'un vase de bois, on néglige le terme $P'c'$; mais cette simplification peut conduire à des erreurs assez grandes, à moins que l'on n'emploie une quantité d'eau suffisante pour que sa température ne s'élève pas de plus de 20 ou 30°. M. Regnault a trouvé que la capacité du fer était 0,11379, celle du charbon 0,024111; on peut, sans crainte d'erreur sensible, adopter pour la fonte 0,11.

En employant une plaque de fonte du poids de 2 kilogrammes, si l'on ne veut avoir qu'une augmentation de

température de 15° , et en supposant, *a priori*, que la température du gaz ne dépasse pas 350° , il faudra écrire

$$350 = \frac{p \times 15}{2 \times 0,11} + 15,$$

d'où l'on tire facilement

$$p = \frac{(350 - 15) 0,22}{15} = 22 \times 0,22 = 4^{\text{kil}}, 84.$$

On prendra donc 5 litres d'eau, et, au moyen d'un thermomètre bien gradué, on arrivera facilement à une détermination exacte, pourvu que l'on opère rapidement et de manière à éviter autant que possible les refroidissements.

La fonte est le meilleur métal à employer dans ces circonstances, parce qu'elle ne s'oxyde pas et qu'on l'obtient sous la forme exacte qu'on désire : une épaisseur de 2 centimètres est très-convenable pour cette opération.

Dans les expériences de la *Société industrielle de Mulhouse*, on s'est servi d'un procédé analogue pour déterminer la température des gaz brûlés; on a trouvé, pour quatre chaudières différentes, les chiffres suivants :

TABLEAU DE LA TEMPÉRATURE DES GAZ BRÛLÉS
DANS LES EXPÉRIENCES DE LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DE MULHOUSE.

Chaudière Prouvost.....	185 ^o
Chaudière Molinos et Pronnier	254
Chaudière Zambeaux.....	280
Chaudière Dollfus Mieg et C ^{ie} .	441
Moyenne....	290 ^o

Ces chiffres sont en rapport avec l'étendue des surfaces de chauffe qui, exagérées dans la chaudière de M. Prouvost, étaient au contraire insuffisantes dans la chaudière à bouilleurs, installée, depuis longues années déjà, dans l'usine de M. Dollfus Mieg et C^{ie}.

Toujours est-il démontré, par ces expériences, que le refroidissement jusqu'à 300° est chose facile, et qu'avec des appareils bien construits, on peut amener la température des gaz

bien au-dessous. Les variations de la température ne sont pas accusées par ces résultats, qui ont, sur ceux de M. Wye Williams et Houldword, l'avantage d'indiquer un chiffre moyen, dont nous pourrions nous servir utilement pour calculer la perte de chaleur que l'élévation de température des gaz doit nécessairement entraîner.

On voit aussi que, même avec une température de 200°, conservée par ces gaz, la chaudière de M. Prouvost a pu fonctionner avec un tirage suffisant, ce qui démontre que les cheminées fonctionnent encore convenablement dans ces conditions les plus défavorables.

Nous ajouterons, en terminant, qu'il est essentiel, pour que la fonte soit amenée à la température des gaz, qu'elle ne soit pas recouverte, comme cela a lieu quelquefois, d'une suie épaisse. Il nous est, en outre, arrivé, dans certaines cheminées de machines locomobiles, que la plaque de fonte obstruait assez la section de la cheminée pour gêner le tirage, et, par conséquent, pour modifier, par sa présence et d'une manière fâcheuse, l'élément que nous voulions mesurer.

367. *Pertes dues aux rentrées d'air par la maçonnerie.* — Les rentrées d'air accidentelles, par d'autres orifices que ceux de la grille, sont surtout à craindre dans les fourneaux en maçonnerie, soit parce que les joints n'étaient pas absolument étanches au moment de la construction, soit parce que des fissures se sont produites par le tassement du fourneau ou par l'action de la chaleur.

Ces rentrées d'air nuisent toujours, en ce qu'elles peuvent se produire de manière à gêner l'action du tirage, et en ce qu'elles augmentent, sans aucun profit pour la combustion, le poids de l'air qui s'écoule, à haute température, par la cheminée.

Lorsque l'introduction se fait au delà de la surface de chauffe, le mélange ne produit autre chose qu'un refroidissement qui nuit au tirage. Mais, si ce refroidissement s'effectue avant que la surface de chauffe ait produit tout son effet, il

peut diminuer, dans une notable proportion, l'utilisation du combustible.

C'est surtout par les bouchons des regards que ces infiltrations d'air sont à craindre, et l'on ne saurait apporter trop d'attention à les visiter souvent, et à les regarnir, au besoin, avec de la terre à four, employée sous une très-petite épaisseur; tous les joints épais se fendillent, et les quantités d'air qu'elles laissent passer sont considérables.

Nous verrons bientôt que certaines cheminées correspondent, par mètre carré de section, à une consommation de 500 kilogrammes de combustible par heure, et, par conséquent, au débit de $500 \times 16 = 8000$ kilogrammes d'air.

Si les rentrées d'air se faisaient, avec la même vitesse, par les fissures, chaque mètre carré de fissure, débitant 8000 kilogrammes d'air, ferait perdre, par l'élévation inutile de cet air à 300° , $8000 \times 300 \times 0,30 = 720\,000$ calories; soit environ 0,7 calorie par millimètre carré de fissure.

Mais l'introduction de l'air se fera bien plus facilement dans le voisinage de la grille, où, la section étant contractée par la présence du combustible, l'air prend nécessairement une vitesse bien plus grande; il ne serait pas impossible que la perte par millimètre carré de fissures s'élevât, dans certaines circonstances, jusqu'à 8 et 10 calories par heure.

On comprend dès lors l'importance qu'il convient d'apporter à la confection de tous les joints et au bon entretien de la maçonnerie extérieure du fourneau. Ces pertes seront moins à craindre lorsque le fourneau sera enterré; mais, dans ce cas encore, il faudra toujours ménager des ouvertures de nettoyage, d'un accès facile, et dont le bouchage devra être fait avec soin après chaque visite.

Dans les chaudières locomobiles et locomotives, les rentrées d'air par la boîte à fumée sont fréquemment tolérées, bien qu'elles nuisent notablement au tirage; mais l'injection de la vapeur dans la cheminée s'y traduit presque toujours par un tirage d'une assez grande énergie pour qu'il puisse être modéré sans inconvénient.

368. Pertes par refroidissement. — Le fourneau et la chaudière elle-même, par tous les points qui ne sont pas convenablement abrités, rayonnent de la chaleur dans toutes les directions, et la chaleur ainsi rayonnée est une perte faite sur celle qui est développée dans le phénomène de la combustion. Cette perte n'est pas la plus considérable, et c'est surtout au contact de l'air ambiant que l'on doit attribuer le refroidissement rapide des surfaces chaudes. Quant à la chaleur transmise à travers les matériaux qui entourent les machines, dans les chaudières enterrées, elle ne représente certainement qu'une très-faible partie de la perte totale.

Les belles recherches de MM. Petit et Dulong ont fait connaître les lois physiques du refroidissement dans le vide et dans les gaz; mais nous ne saurions déduire de leurs travaux les coefficients pratiques qui seraient nécessaires pour les applications.

M. Péclet s'est occupé, pendant de longues années, du refroidissement par les enveloppes peu conductrices; mais c'est surtout dans la pratique des ateliers que nous chercherons les éléments de ce que nous avons à dire sur cette question importante, que nous examinerons au point de vue du fourneau lui-même, et au point de vue des tuyaux de vapeur.

369. Refroidissement des fourneaux. — C'est principalement en raison de la différence entre la température d'un corps chaud et celle de l'air qui l'environne, que le refroidissement des fourneaux est plus ou moins rapide. On appelle, en général, vitesse de refroidissement d'un corps, l'abaissement de température de ce corps pendant 1 minute *: cette vitesse va continuellement en diminuant à mesure que la température du corps s'abaisse, et elle devient nulle lorsque l'équilibre de température est établi.

L'observation du refroidissement d'une chaudière à va-

* Il serait bien préférable de rapporter cette vitesse de refroidissement à la seconde unité, à laquelle se rattachent la plupart des autres définitions de même nature.

peur, après la cessation du travail, peut conduire à une évaluation approchée de la perte faite pendant que le fourneau est en feu, car cette perte est certainement plus grande que l'autre.

Si un poids P de matière quelconque, qui était primitivement à la température T , se refroidit, en un nombre t de minutes, d'un nombre de degrés marqué par $T - T'$, la perte totale de chaleur de ce corps, en calories, sera

$$Pc(T - T'),$$

et la perte moyenne pendant 1' par

$$\frac{Pc(T - T')}{t} = PcV,$$

si l'on représente par V la vitesse moyenne du refroidissement, et si l'on remarque que, par définition,

$$V = \frac{T - T'}{t};$$

la température T' pourra se déterminer par l'expérience, et la valeur de V sera d'autant plus rapprochée de la vitesse réelle de refroidissement, à l'origine, que l'on aura pu faire plus tôt cette détermination, après l'extinction des feux.

On observe en général qu'une chaudière à vapeur bien abritée conserve encore une température de 120° , dix heures après l'extinction, alors cependant que la température initiale de la vapeur n'est pas supérieure à 150° ; c'est donc un refroidissement de 30° en 10 heures.

On saurait donc que le refroidissement moyen est de 3° par heure, et que, par conséquent, la perte par heure serait exprimée en moyenne par $3Pc$, celle afférente à la première heure devant toutefois être beaucoup plus grande.

Newton avait admis que la vitesse du refroidissement est proportionnelle à l'excès de la température du corps sur

celle du milieu ambiant. Si nous désignons cet excès par θ , l'abaissement de la température pendant une minute sera

$$V_1 = n\theta,$$

n étant un coefficient particulier aux conditions de l'expérience; l'excès, à la fin de la première minute, ne sera plus que

$$\theta - n\theta = \theta(1 - n),$$

et après la m^{me} minute il sera réduit à

$$\theta(1 - n)^m.$$

Si nous appliquons ce raisonnement à l'exemple qui précède, en supposant que la température extérieure soit de 10° , auquel cas

$$\theta = 150 - 10 = 140,$$

$$\theta(1 - n)^m = 120 - 10 = 110,$$

il vient

$$(1 - n)^m \times 140 = 110,$$

d'où

$$(1 - n)^m = \frac{110}{140};$$

m est égal à 600 minutes, d'où l'on tire

$$(1 - n)^{600} = \frac{110}{140}; \quad 1 - n = \sqrt[600]{\frac{110}{140}}; \quad n = 1 - \sqrt[600]{\frac{110}{140}} = 0,00416;$$

et, comme, par hypothèse,

$$V_1 = n\theta = 140 \times 0,00416,$$

on trouve en définitive

$$V_1 = 0,58.$$

Si la loi de Newton était applicable, on devrait en conclure que, pendant les premières minutes, après l'extinction de toutes les sources de chaleur, la vitesse du refroidissement serait de $0^\circ,60$ par minute, et qu'en service courant on

ne devrait pas compter sur un chiffre moindre, soit sur $0,60 \times 60 = 36^\circ$ par heure. Cette perte de chaleur par le fourneau donnerait la raison de la haute température dont les chauffeurs de la marine ont tant à souffrir dans les chambres des chaudières de la plupart des navires, et qui a nécessité, dans ces derniers temps, de les protéger par de grands écrans en tôle. Cette évaluation, dont la plupart des éléments sont incertains, pourrait, jusqu'à un certain point, se déduire de l'observation du temps employé à mettre un fourneau en vapeur, et de la quantité de combustible brûlé dans cette circonstance; mais les éléments de la question sont si variables, que nous nous bornerons aux indications qui précèdent, et dont il faudrait conclure que la quantité de chaleur perdue par heure, par le refroidissement du fourneau, peut s'exprimer par $36Pc$, P étant le poids total de tous les matériaux qui constituent la chaudière et le fourneau, c la capacité moyenne de ces matériaux pour la chaleur.

La perte serait plus grande pour une chaudière entièrement isolée, et qui serait de toutes parts exposée aux refroidissements par radiation et à ceux que déterminent les gaz ambiants.

570. Revêtement des chaudières. — Malgré l'incertitude des données relatives à la perte de chaleur des fourneaux et des chaudières, il paraîtra évident, pour tout le monde, qu'il importe d'atténuer cette perte autant que possible, en recouvrant ces appareils avec des enveloppes peu conductrices de la chaleur.

Pour les fourneaux en maçonnerie, ce revêtement se borne à celui des portions de la chaudière qui ne sont pas recouvertes de briques; c'est ordinairement la partie supérieure, pour laquelle les règlements n'admettent pas d'ailleurs l'existence d'un briquetage, qui, en cas d'explosion, pourrait, par la projection des matériaux, augmenter les dangers. On se contente, en général, d'encaisser cet emplacement par des parois en briques et de jeter, dans la capacité ainsi formée,

quelque matière pulvérulente, telle que de la cendre ou de la brique pilée, qui n'aurait pas les mêmes inconvénients et qui pourrait être facilement enlevée toutes les fois que l'on voudrait visiter la paroi extérieure.

Quant au dôme de vapeur, il sera défendu contre les refroidissements, comme nous allons le dire pour les chaudières et les fourneaux isolés.

Ces appareils isolés, et particulièrement les chaudières des machines locomobiles, sont recouverts d'une chemise de bois, par elle-même peu conductrice et laissant entre elle et la paroi métallique de la chaudière une épaisseur d'air de 1 à 2 centimètres; l'air, quand il est renfermé dans un espace clos, étant un très-bon préservatif contre la dispersion de la chaleur.

On emploie aussi, dans le même but, des feutres ou des enduits, dans lesquels les matières feutrantes entrent pour une grande part. Depuis quelques années surtout on se sert d'un enduit particulier connu sous le nom d'enduit Pimont, du nom de son inventeur, qui s'est beaucoup occupé de l'utilisation industrielle de la chaleur précédemment perdue dans maintes circonstances.

Les brevets pris par M. Pimont depuis l'année 1845 ont successivement indiqué les préservatifs suivants :

Double enveloppe de drap ou d'un autre corps mauvais conducteur de la chaleur.

Double enveloppe métallique, dont on remplit depuis longtemps l'intervalle par un corps mauvais conducteur.

Mastic composé de terres argileuses, de poils d'animaux et de farine de colza.

C'est surtout cette dernière préparation qui a rendu de grands services : facile à étendre à la truelle, sous le nom de calorifuge plastique, son emploi s'étend chaque jour.

Une commission nommée par M. le ministre de la marine a pu constater les bons résultats de cet enduit sur les tuyaux de vapeur et sur le cylindre de la machine de l'atelier des martinets à Cherbourg.

« Le calorifuge plastique, dit le rapport, adhère parfaitement aux surfaces sur lesquelles il est appliqué, qu'il soit employé seul ou combiné avec le calorifuge feutré; la surface est lisse et polie; elle est recouverte d'une couche de peinture et de vernis. Une épaisseur de 6 centimètres suffit pour arrêter presque complètement le rayonnement de la chaleur. Le mode d'application est très-simple : on mouille le plastique sec de manière à lui donner la consistance d'un mortier; on l'applique sur les surfaces à recouvrir, par couches très-légères d'abord, et ensuite plus épaisses, jusqu'à 6 centimètres, en interposant au milieu de la masse des lattes de bois mince, de un demi centimètre à 1 centimètre; le plastique qui a déjà servi peut être utilisé de nouveau, en le mélangeant avec du plastique neuf.

« Malgré ces propriétés avantageuses, la commission croit qu'avant d'étendre, à un plus grand nombre de machines, l'emploi de l'enduit Pimont, il convient d'attendre les rapports que feront MM. les commandants de *la Sentinelle* et de *l'Impétueuse*. Il pourrait se faire qu'à la mer les vibrations des appareils, les fuites des chaudières, l'eau qui tombe sur les fourneaux, détruisissent l'adhérence du mastic Pimont; une longue expérience pourra faire décider cette question. »

Depuis cette époque l'application des enduits de M. Pimont a été faite sur un grand nombre de navires, notamment sur *l'Impétueuse*, sur *la Foudroyante*, et sur toutes les chaudières du port militaire de Cherbourg.

Un certificat donné par le directeur de la Société des paquebots du Havre à Honfleur, est ainsi conçu :

« Nous avons pu constater les améliorations suivantes depuis l'application du calorifuge plastique de M. Pimont, sur les chaudières, tuyaux de conduite de vapeur et cylindres du steamer *le Français* :

- 1° Économie réalisée dans l'emploi du combustible, environ 10 pour 100.

2° Condensation à peu près nulle dans les tuyaux de vapeur et dans les cylindres.

3° Garantie contre la chaleur, pour les mécaniciens et les chauffeurs, telle que le thermomètre dans la chambre des machines marquait 18 à 22° centigrades lorsque la température au dehors était de 11°.

Nous avons eu nous-même l'occasion d'employer le mastic Pimont sur un fourneau de métal, et nous l'avons trouvé, quoiqu'il ne fut que lissé à la truelle, très-adhérent et d'un très-bon effet. Ces avantages d'ailleurs ne sont pas particuliers au mastic Pimont : nous allons voir que des effets du même ordre peuvent être facilement obtenus avec d'autres modes de revêtement.

371. Influence des enveloppes et revêtements des chaudières.

— Depuis longtemps on s'est occupé de déterminer, autant que possible, l'influence des enveloppes sur l'effet utile des chaudières à vapeur.

C'est ainsi que M. Wicksteed a constaté comparativement, sur une ancienne chaudière, les résultats ci-après indiqués :

État de la chaudière.	Eau vaporisée par kilogr. de combustible.
Chaudière de Watt découverte.....	7 ^h ,57
Chaudière couverte de 3 épaisseurs d'étoffe..	7,85
Chaudière couverte de 5 épaisseurs d'étoffe..	7,95

L'absence des enveloppes réduit donc la proportion de la chaleur utilisée dans le rapport de

$$\frac{7,57}{7,95} = 0,93.$$

« Dans les chaudières de bateaux, il faut compter sur 0,90. »
A cette observation, bien constatée par M. Wicksteed, nous ajouterons celle-ci, qui, bien que ne se traduisant pas en chiffres, n'est pas, pour cela, moins intéressante :

Un industriel de Puteaux avait 5 chaudières établies dans

les mêmes conditions; deux seulement ont été recouvertes de l'enduit Pimont. A la reprise du travail du matin, les manomètres de ces deux chaudières marquaient encore 4 atmosphères, alors que la pression dans les deux autres ne dépassait jamais 2 atmosphères, après le refroidissement de la nuit.

572. Refroidissement des tuyaux de vapeur. — Les refroidissements auxquels sont exposés les tuyaux de vapeur sont plus importants encore que ceux de la chaudière, en ce qu'ils ont pour effet de diminuer la pression intérieure, et par conséquent la source du travail mécanique que cette vapeur doit développer. Des condensations partielles sont aussi le résultat inévitable de ces refroidissements, et chaque kilogramme de vapeur ainsi condensée produit une perte qu'on ne saurait évaluer à moins de 80 grammes de combustible, qui correspondent à peu près aux 650 calories de chaque kilogramme de vapeur.

La condensation peut être plus considérable, car les mécaniciens admettent en général que chaque mètre carré de tuyau correspond à une condensation de 1 kilogramme par heure, lorsque le tuyau est librement exposé à l'air extérieur. Ce chiffre lui-même est peut-être au-dessous de la réalité. M. de Vaux, inspecteur général des mines en Belgique, cite des expériences dans lesquelles les divers éléments de la question ont été déterminés avec une précision suffisante.

CONDENSATION PAR MÈTRE CARRÉ DE SURFACE RAYONNANTE
ET PAR HEURE.

Nature des enveloppes.	Température de l'enveloppe.	Température de l'air ambiant.	Kil. de vapeur condensés par heure.
Fonte brute.....	100°	15°	1,87
Fonte brute.....	135	15	2,60
Fonte peinte.....	100	15	1,70
Fonte peinte.....	135	15	2,40

On voit que la nature de la surface a une grande influence sur les résultats, puisque la peinture seule diminue la condensation dans le rapport de 1 à 0,92 environ.

On comprend, dès lors, toute l'importance des enduits, et l'on ne saurait apporter trop de soins dans leur confection, pour les tuyaux de vapeur, surtout lorsque ceux-ci sont d'un grand diamètre.

Dans le cas de vapeur à 100° , la différence de température est, dans les observations de M. de Vaux, de 85° seulement, et le nombre de calories qui se transmettent par heure est de

$$1,87 \times 550 = 1028,$$

ou, pour chaque degré d'excès de température,

$$\frac{1028}{85} = 12 \text{ par heure,}$$

ce qui correspondrait à un coefficient K'' , pour la perte de chaleur par seconde,

$$K'' = 0,0033.$$

La condensation produite dans ces circonstances est nécessairement bien moindre que celle qui résulte d'un courant d'eau à l'extérieur.

La valeur de K'' reste la même pour la vapeur à 135° .

575. Revêtement des tuyaux de vapeur. — Le revêtement le plus facile à appliquer aux tuyaux de vapeur est celui que l'on fait avec de la paille couchée en long et reliée de distance en distance par des liens circulaires; c'est celui qu'on peut employer surtout lorsqu'on est pris au dépourvu, mais il ne résiste pas à l'action d'une haute température, et la paille se brûle assez rapidement, même à la température qui correspond à une pression de 5 ou 6 atmosphères. Si l'on dispose d'un ouvrier adroit, on pourra lui faire employer la paille, en en formant une sorte de bourrelet très-légèrement tordu et disposé en hélice autour du tuyau; quand ce revêtement est fait avec soin, il résiste mieux que la paille en long, dont l'aspect est d'ailleurs beaucoup moins satisfaisant.

Ce que l'on fait avec des bourrelets de paille, on peut de même l'obtenir avec toute autre matière filamenteuse, et l'on

arrive à de très-bons résultats avec des lisières de drap ou des bandes de gros feutre préparé pour cet usage, et qui ne s'altère pas facilement à la température de la vapeur. Enfin, on peut faire un très-bon revêtement en formant, avec une petite corde de chanvre très-peu tordue, une première couche en hélice, que l'on recouvrira d'une seconde couche semblable, et sur laquelle on pourra de même disposer des bandes de papier fort, auquel une peinture grossière suffira pour donner une apparence très-convenable.

Le mastic Pimont est maintenant une des meilleures préparations à employer pour cet objet : il ne présente d'autre inconvénient qu'une grande épaisseur, dans laquelle il faut avoir soin de ne pas noyer les boulons d'assemblage, afin de pouvoir plus facilement les serrer en cas de fuites.

Les tuyaux enterrés seront revêtus avec autant de soin que les tuyaux exposés à l'air libre. La conductibilité des parois des caniveaux dans lesquels ils sont placés, l'humidité qui y règne presque toujours, en service courant, exigent impérieusement que l'on s'oppose aux fuites par tous les moyens praticables. Les mastics qui s'appliquent à la truelle sont d'un emploi difficile dans ces circonstances, et les lisières de drap sont préférables.

On fabrique maintenant pour le même objet des feutres qui n'ont pas moins de 2 centimètres d'épaisseur et qui sont d'un excellent emploi pour toutes les parties de la surface qui ne sont pas exposées à une température trop élevée.

Ce feutre revient à 9 francs 75 par mètre carré; l'enduit humide de M. Pimont est vendu 22 francs les 100 kilogrammes; ce qui porte, avec la main-d'œuvre, le prix de revient à 28 francs par mètre carré, pour une épaisseur de 6 centimètres; le poids correspondant est de 65 kilogrammes par mètre carré.

574. *Expériences de MM. Burnat et Royet.* — Dans un rapport inséré dans le *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse* (1859, p. 339), MM. Burnat et Royet ont rendu

compte des expériences qu'ils ont faites pour apprécier la quantité de vapeur condensée dans des tuyaux de fonte recouverts de divers enduits.

L'appareil dont ils se sont servis pour cette comparaison se composait de 5 conduites en fonte, formées chacune de 4 tuyaux de 12 centimètres de diamètre; ces conduites étaient placées, parallèlement, à une distance de 1 mètre de l'une à l'autre, et chacune d'elles présentait une surface totale de 5,432 mètres carrés.

Les conduites avaient une inclinaison de 0,05 par mètre; elles recevaient la vapeur à la partie supérieure, et l'eau se recueillait, à l'autre extrémité, dans des caisses spéciales.

Toutes les dispositions étaient prises pour que la condensation se fit dans les mêmes conditions dans les trois conduites, et les écarts entre elles n'ont jamais dépassé la fraction 0,023.

Voici d'abord les chiffres moyens des expériences faites simultanément sur les cinq conduites.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE MM. BURNAT ET ROYET. *

Tuyaux de fonte sans enduit.			
Pression absolue de la vapeur en atmosphères.	Température ambiante. °	Durée des expériences.	Poids d'eau condensée par mètre carré et par heure.
1,125	8,25	52'	2 ^k ,44
2,000	4,25	56	3,09
1,500	4,50	40	2,94
1,250	7,00	61	2,62
1,250	1,00	54	2,74
1,500	4,25	58	2,93
1,750	5,75	55	3,17
2,000	8,25	53	3,21
1,750	5,00	52	3,10
1,125	4,00	56	2,45
1,250	4,25	56	2,86
			2 ^k ,87

On voit que la moyenne générale correspond à une con-

* *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1859, page 347.

densation de $2^{\text{kl}},87$ par mètre carré et par heure, qui, en ne comptant que la chaleur latente de vaporisation, s'élève à

$$2,87 \times 606,5 = 1740 \text{ calories.}$$

Et, en tenant compte du refroidissement de l'eau condensée, on peut estimer la perte à environ 2000 calories.

En évaluant à 114° la différence moyenne de température, le coefficient K'' , de notre formule du n° 555, s'élèverait, d'après le chiffre moyen de ces nouvelles expériences, à

$$K'' = \frac{3600}{3600 \times 115} = 0,0042.$$

Ce chiffre est encore plus grand que celui qui résulte des expériences de M. de Vaux.

La même installation a servi à apprécier l'influence des divers systèmes d'enveloppes.

L'une des conduites a été enveloppée de plastique Pimont, dont la surface a été blanchie avec de la peinture, dans les trois dernières expériences seulement.

La conduite laissée libre a été, dans deux expériences spéciales, entourée d'une couche de feutre provenant d'anciennes *courses* de machines à imprimer.

Une autre conduite a été entourée de déchet de coton, sous une épaisseur de 25 millimètres environ, et recouverte de toiles d'emballage, maintenues au moyen de ficelles.

Le revêtement en paille et en tuiles a été fait au moyen de tuiles creuses, d'un diamètre suffisant pour qu'une couche d'air fût emprisonnée entre elles et le métal. Ces tuiles étaient maintenues au moyen de fils de fer, et elles étaient elles-mêmes recouvertes d'une couche de terre glaise, mêlée de paille hachée, et enfin de tresses de paille.

La garniture de paille était obtenue en plaçant la paille longitudinalement, sur une épaisseur de $0^{\text{m}},025$, et en la recouvrant avec d'autre paille, un peu tordue et enroulée en hélice, d'une manière continue.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE MM. BURNAT ET ROYET SUR DES TUYAUX DE FONTE AVEC ENDUITS.

Pressions absolues de la vapeur en atmosphères.	Température ambiante.	Durée des expériences.	POIDS D'EAU CONDENSÉE PAR MÈTRE CARRÉ ET PAR HEURE.						
			NATURE DES ENDUITS.						
			Fonte nue.	Plastique Pimont.	Feutre.	Plastique Pimont blanchi.	Coton et toile.	Paille et tuiles.	Paille en tresses.
			kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
1,500	+5,25	60'	2,81	1,56	»	»	1,19	1,24	1,20
1,250	+6,50	62	2,71	1,40	»	»	1,12	0,91	0,80
1,750	+6,25	52	3,15	1,90	»	»	1,83	1,47	1,19
2,000	+6,25	45	3,52	1,85	»	»	1,67	1,32	1,23
1,125	+6,25	60	2,42	1,24	»	»	1,06	0,83	0,68
1,500	—1,75	61	2,86	1,69	»	»	1,62	1,29	0,98
2,000	—0,75	63	3,03	1,64	»	»	1,60	1,22	1,10
1,125	+1,00	64	2,37	1,28	»	»	1,00	0,81	0,74
1,250	—2,75	58	2,79	1,68	»	»	1,40	1,29	0,89
1,500	+2,25	58	2,72	»	»	1,30	1,27	0,87	0,79
1,750	+2,50	45	»	»	1,83	1,89	1,80	1,39	1,34
1,500	+2,50	60	»	»	1,23	1,31	1,22	0,77	0,80
			2,84	1,60	1,53	1,50	1,39	1,12	0,98

Les résultats de toutes les expériences sont consignés dans le tableau précédent, dans lequel nous avons suivi, quant aux différents systèmes, l'ordre de la plus grande efficacité des enduits.

L'enduit de paille, qui est de tous le moins dispendieux, a été en même temps le plus favorable. Le mastic Pimont n'occupe que le dernier rang dans la série ; mais il faut remarquer que la facilité avec laquelle il s'applique, et surtout sa durée, même sous l'influence d'une température élevée, suffisent encore pour en faire préférer l'emploi dans beaucoup de circonstances, et particulièrement pour le revêtement des formes irrégulières ou des grandes surfaces planes.

En admettant, comme précédemment, que la différence de température soit de 115° , nous pourrions calculer la valeur de K'' , pour chacune des enveloppes qui ont été employées, et former, de ces valeurs, le tableau suivant.

TABLEAU DE LA VALEUR DU COEFFICIENT DE REFROIDISSEMENT, PAR 1° ET PAR CHAQUE DEGRÉ DE DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE, POUR DIFFÉRENTES NATURES D'ENVELOPPES.

Nature de la surface.	Valeur du coefficient K'' .	Rapports.
Fonte nue.....	0,0042	1,00
Plastique Pimont.....	0,0023	0,55
Feutre.....	0,0022	0,50
Plastique Pimont blanchi	0,0022	0,52
Coton et toile.....	0,0020	0,48
Paille et tuiles.....	0,0016	0,38
Paille en tresses.....	0,0014	0,33

Le mastic Pimont réduit la condensation à 0,55 de ce qu'elle serait, en l'absence de toute enveloppe, mais le revêtement en paille l'abaisse jusqu'à 0,33, et est, par conséquent, bien plus efficace.

373. Perte par les incrustations. — Les incrustations forment une croûte quelquefois très-résistante, qui se trouve interposée entre l'eau et le métal de la chaudière, et dont l'aspect est souvent assez semblable à celui de la brique

tendre, mais qui est parfois aussi dure que la pierre. L'interposition de ce corps, mauvais conducteur, change absolument les conditions de la transmission de la chaleur, nécessaires à la vaporisation.

Il importe donc de ne pas laisser accumuler ces dépôts; et c'est être à la fois bien négligent et bien coupable que de leur laisser acquérir des épaisseurs de plusieurs centimètres. Nous en possédons un échantillon de plus de 7 centimètres d'épaisseur.

Dans de pareilles circonstances, non-seulement la surface directe de chauffe ne produit qu'une vaporisation très-faible, mais elle se détériore et se brûle promptement sous l'action du feu.

Cette cause de perte est très-variable dans ses effets, parce qu'en général il faut beaucoup de temps pour que les dépôts s'accumulent à ce point, de sorte que la comparaison est rarement facile, et qu'on l'attribue volontiers à la nature du combustible.

Cependant on a remarqué que, dans les cuisines distillatoires établies sur les bâtiments de l'État, la même quantité de charbon qui produit 600 kilogrammes de vapeur après le nettoyage, n'en produit bientôt plus que 200, quand les incrustations ont acquis une certaine épaisseur, et que, par conséquent, l'effet utile se trouve rapidement réduit au tiers.

Nous possédons encore une donnée que nous avons lieu de croire exacte, en ce qu'elle porte sur une chaudière du Conservatoire, chauffée avec de la houille de Charleroy, tout venant.

	Eau vaporisée par heure.	houille brûlée. kil. par heure.	kil. de vapeur par kil. de combustible.
Chaudière en bon état...	200	23,5	8,50
Chaudière incrustée....	136	34,7	3,87

Après la formation, longtemps prolongée, des incrustations, l'effet utile s'est trouvé réduit dans la proportion de

$$\frac{3,87}{8,50} = 0,48.$$

M. Graham a fait aussi quelques expériences à ce sujet, mais à des intervalles beaucoup moins éloignés*. Il en conclut que la perte provenant des dépôts de sulfate de chaux sur les parois intérieures de la chaudière, sous une épaisseur qui n'excède pas 1 millimètre $\frac{1}{2}$ d'épaisseur (un seizième de pouce anglais) s'élève à 14,7 pour 100.

Le sulfate de chaux forme les dépôts les plus durs et les plus adhérents : nous indiquerons les procédés à l'aide desquels on parvient maintenant à diminuer les inconvénients qui résultent de sa présence dans les eaux destinées à l'alimentation des chaudières à vapeur.

Les effets des incrustations ne sont pas moins marqués dans les chaudières tubulaires, où ils prennent au contraire un caractère plus grave, par suite de la difficulté du nettoyage.

A un moment où il est presque de mode de préférer ces chaudières aux autres, on voit toute l'importance des dispositions que nous avons décrites sous la désignation de chaudières à foyer amovible.

576. Perte de chaleur par l'extraction. — La quantité de sel contenue dans l'eau de mer exige que l'eau saturée soit fréquemment rejetée au dehors.

Cette opération se fait d'une manière discontinue, par le tuyau d'extraction, ou d'une manière continue, par des pompes, que l'on appelle alors pompes d'extraction.

Les tuyaux d'extraction correspondent au fond des chaudières et servent à évacuer les dépôts qui s'y trouvent; les pompes agissent près de la surface, parce que l'on croit que les dépôts salins s'y réunissent; l'emploi simultané des deux procédés assure l'évacuation de toutes les matières étrangères.

* *Memoirs of the literary and philosophical Society of Manchester*, 1858, page 35.

M. Faraday a observé qu'en évaporant de l'eau de mer, le sulfate de chaux commence à se déposer, quand le volume de liquide est réduit à 0,3; il suffirait d'après cela que l'extraction enlevât le tiers ou 0,33 de l'eau d'alimentation, parce qu'ainsi le sulfate de chaux resterait constamment en dissolution dans un volume d'eau suffisant pour qu'il n'y ait pas précipitation.

La dépense totale serait alors

pour l'eau vaporisée.....	$0,66 \times 650 = 429$	calories
pour l'eau d'extraction.....	$0,33 \times 120 = 40$	
	<hr/>	
	469	calories

et la portion de chaleur utilisée serait réduite, par rapport à la chaleur développée, à

$$\frac{429}{469} = 0,91.$$

C'est cette condition qui est ordinairement réalisée dans la pratique anglaise.

M. Cousté, qui s'est occupé de cette question, dit que, dans les steamers bien *agencés*, notamment dans les bateaux transatlantiques, le *Great-Britain*, le *royal William*, l'*Asia*, le *Franklin*, le *Humboldt*, les machines sont munies de pompes d'évacuation; et, d'après les données prescrites, ces appareils devraient extraire une quantité d'eau chaude égale à la moitié de l'eau injectée. Cependant ces navires sont encore sujets à des incrustations assez notables, sinon aussi abondantes que dans les navires de commerce, dans lesquels l'extraction se fait uniquement par un robinet que l'on ouvre à volonté.

La consommation de chaleur se répartirait alors ainsi qu'il suit :

$$0^k,50 \times 650^c = 325^c, \text{ eau vaporisée}$$

$$0^k,50 \times 120^c = 60^c, \text{ eau extraite}$$

$$\text{Total... } 385 \text{ calories.}$$

L'effet utile est alors réduit à

$$\frac{325}{385} = 0,84.$$

Mais il faut, en outre, tenir compte de la vapeur expulsée avec l'eau; et l'on peut, pour cette cause, réduire l'effet utile jusqu'à 0,80. C'est là, sans doute, une condition d'infériorité notable des chaudières de mer par rapport aux chaudières à eau douce, puisque, par suite de la nécessité de faire les extractions, la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de combustible, doit se trouver, comme la quantité de chaleur correspondante, réduite à 0,80.

577. Perte de travail pour l'extraction. — Les machines de mer consommant environ 25 kilogrammes de vapeur par force de cheval et par heure, le travail correspondant, à dépenser pour l'alimentation de ces 25 kilogrammes, sera théoriquement par heure $0^{\text{m} \cdot 025} \times 2^{\text{at}} \times 10330^{\text{k}} = 516,50$ kilogrammètres, si l'on suppose que l'introduction se fasse à 3 atmosphères, c'est-à-dire à deux atmosphères de plus que la pression extérieure, qui s'exerce sur le réservoir dans lequel l'eau est puisée.

Ce travail équivaut à $516,50 : 3600 = 0,15$ kilogrammètre par cheval et par seconde, ou en doublant, pour tenir compte des résistances passives et des intermittences d'action, à 0,30 kilogrammètre.

Le travail supplémentaire exigé pour l'alimentation sera égal à cette quantité, c'est-à-dire à 0,30 sur 75, ou aux 0,004 de la puissance effective de la machine, si l'extraction se fait à moitié, comme nous l'avons indiqué dans le numéro précédent. On voit donc qu'en sus de la perte de chaleur, l'extraction peut diminuer le travail de la machine motrice de un deux cent cinquantième.

Il était nécessaire que nous fussions, dès à présent, fixés sur ce point qui constitue l'un des principaux avantages de la machine à vapeur; par cela même que l'eau, au moment de

son introduction, n'occupe qu'un très-petit volume par rapport à celui qu'elle développera dans le cylindre, après avoir été réduite en vapeur, le travail dépensé pour l'alimentation est très-peu considérable.

578. Perte par l'eau entraînée. — La vapeur entraîne avec elle une quantité d'eau très-grande, sans doute sous forme de globules fort petits, qui, par cela même qu'ils sont à l'état liquide, ne peuvent exercer par eux-mêmes aucune autre pression que celle résultant de l'action de la pesanteur. Cette eau entraînée emporte un certain nombre de calories qui sont ainsi perdues pour l'effet utile et qui constituent une véritable perte de chaleur.

Encore bien que la détermination de la proportion d'eau entraînée soit souvent très-difficile, nous verrons, en parlant de surchauffage de la vapeur, qu'un kilogramme de vapeur entraîne presque toujours jusqu'à un quart de son poids d'eau non vaporisée.

La température de cette eau ayant été inutilement élevée de 100° on peut calculer l'influence proportionnelle de cette perte ainsi qu'il suit :

1 kilogramme de vapeur dépense 650 calories.....	650
0,25 d'eau chauffée à 100°, dépense $0,25 \times 100 =$	25
Dépense totale.....	675

au lieu de 650 calories que l'on aurait eu à dépenser pour la vapeur seulement. La proportion de chaleur utilisée est donc exprimée par la fraction

$$\frac{650}{675} = 0,92,$$

proportion d'ailleurs variable suivant les circonstances.

579. Détermination de la quantité d'eau entraînée. — Un grand nombre de moyens ont été proposés pour déterminer

la proportion de l'eau entraînée avec la vapeur, mais aucun d'eux n'est parfaitement satisfaisant.

Nous nous bornerons à donner ici une simple énumération de ces procédés :

- 1° Obliger le courant de vapeur à changer brusquement de direction, afin de déterminer, par suite de leur grande densité relative, le dépôt des gouttelettes entraînées.
- 2° Faire passer la vapeur par des trous très-fins, comme ceux d'une pomme d'arrosoir, pour aider à la séparation des deux parties du mélange.
- 3° Faire dissoudre, dans l'eau à vaporiser, une quantité connue de sel, et déterminer par la diminution de la quantité de sel introduite dans la chaudière, la quantité d'eau qui a dû entraîner du sel avec elle.
- 4° Surchauffer la vapeur chargée d'eau et déterminer, par l'augmentation de volume et de pression, la quantité d'eau qui s'est vaporisée dans ce surchauffage.
- 5° Recevoir un certain poids de vapeur dans de l'eau froide et calculer combien de calories ce poids de vapeur a abandonnées. Ce mode d'évaluation est précisément basé sur la différence entre les quantités de chaleur que doivent respectivement abandonner l'eau et la vapeur.

Nous examinerons en détail chacun de ces procédés, parmi lesquels celui du surchauffage et celui de la condensation nous paraissent les plus exacts.

Il est à remarquer que les caractères physiques de la vapeur sèche sont très-différents de ceux de la vapeur chargée d'eau ; celle-ci est moins transparente et elle forme immédiatement une masse blanchâtre et nuageuse, à sa sortie de l'orifice par lequel elle s'échappe ; l'autre, au contraire, ne devient visible qu'à une certaine distance et s'écoule avec un sifflement plus régulier et tout à fait spécial ; ces caractères phy-

siques sont suffisants pour distinguer, dans les cas extrêmes, la vapeur sèche de la vapeur humide : celle-ci donne une sensation plus chaude, que la main ne peut supporter qu'à une grande distance de l'orifice de sortie ; cet effet résulte sans doute de l'eau qui se dépose à une température élevée, car la vapeur sèche, qui reste tout entière à l'état gazeux après sa sortie, produit une sensation très-différente ; à trente centimètres de l'orifice on peut y plonger la main sans danger.

Dans certains cas d'ailleurs la vapeur entraîne des quantités d'eau plus considérables et qui se résolvent en pluie à l'échappement ; on dit alors que la chaudière *crache*, et cette circonstance ne saurait être mieux décrite que dans l'extrait suivant du mémoire sur les essais du *Napoléon* :

« Lorsque la pression a atteint 0^m,70 de mercure, au-dessus d'une atmosphère, des ébullitions tumultueuses se sont encore manifestées dans les chaudières, et les soupapes de sûreté, levées sans doute un peu trop vite, ont laissé échapper par leurs tuyaux des jets de vapeur et d'eau qui retombaient en pluie sur le pont.

« Ces ébullitions ont généralement lieu dans les chaudières tubulaires qui sont neuves et elles recommencent aussi longtemps que les matières grasses employées à la construction des appareils altèrent la pureté de l'eau échauffée. Elles se reproduisent en outre toutes les fois que l'on chauffe lentement et sans alimenter, ou que l'on a conservé de l'eau ayant été mise déjà en ébullition. Elles ont toujours cessé lorsque, après avoir ouvert les portes qui laissent voir l'ensemble des tubes, pour reconnaître si l'abaissement du niveau d'eau n'avait permis à aucun d'eux de rougir, on alimentait en marche. »

Le crachement des chaudières est donc un fait accidentel sur les causes duquel on n'a jusqu'ici aucune donnée positive : on l'évitera en général par l'emploi de grandes surfaces d'eau et d'une grande capacité donnée à la chambre de vapeur, et en évitant autant que possible les eaux impures ou mucilagineuses.

530. *Moyens à employer pour éviter l'entraînement de l'eau.*

— Nous consacrerons un chapitre spécial à la question du séchage et du surchauffage de la vapeur, mais il n'est pas sans intérêt de donner, dès à présent, un aperçu sommaire des dispositions à l'aide desquelles on combat habituellement l'entraînement de l'eau, au delà de certaines limites :

- 1° Disposer la chaudière de manière que la vaporisation ne soit, sur aucun point, trop tumultueuse, et que la vapeur fournie n'ait pas à se faire un passage trop brusque dans des lames d'eau de petite épaisseur.

Les chaudières fixes sont celles qui satisfont le mieux à ces conditions ; et, lorsque celles-ci ne peuvent être réalisées, il importe que les portions dans lesquelles l'action qui vient d'être indiquée est inévitable, soient placées à une grande distance de la prise de vapeur.

- 2° Disposer d'une grande surface de séparation, dans la chaudière, entre l'eau et la vapeur, pour que le dégagement de celle-ci se fasse, sans qu'elle prenne une vitesse trop grande.

- 3° Obtenir, par des dômes ou d'autres dispositions analogues, de grandes chambres de vapeur.

- 4° Continuer, dans la chaudière, le tuyau de prise de vapeur de manière qu'il ait, dans cette chambre même, un grand parcours qui permettra à l'eau entraînée de se vaporiser en partie sous l'action de la vapeur ambiante.

Lorsque la vapeur est sortie de la chaudière on peut encore la rechauffer dans des appareils spéciaux, dont l'emploi ne saurait être trop recommandé, pourvu qu'on ne s'en serve qu'avec une judicieuse réserve.

531. *Pertes par les fuites de vapeur.* — Cette cause de pertes

est trop variable pour que son influence puisse être évaluée d'une manière générale.

Il suffira de dire qu'on a grand tort de n'y pas faire une assez grande attention : peut-être s'en occuperait-on davantage si l'on savait à quel chiffre elle peut s'élever.

La vapeur à 5 atmosphères s'échappe dans l'air, avec une vitesse de près de 600 mètres par seconde, c'est-à-dire avec une vitesse 30 fois plus grande que celle d'une locomotive.

Une ouverture de 1 millimètre carré laissera donc passer

$$600^m \times 0^{m\cdot q},000001 = 0^{m\cdot c},0006 \text{ de vapeur par seconde,}$$

$$\text{ou } 0,0006 \times 3600 = 2,16 \text{ mètres cubes par heure;}$$

et comme la vapeur, à cette pression, pèse $2^{kl},58$ par mètre cube, la perte ne sera pas moindre que 5,60 kilogrammes, c'est-à-dire qu'elle équivaldra à un excès de consommation de combustible de

$$\frac{5^{k},6}{8} = 0^{kl},70 \text{ par heure.}$$

Un chauffeur soigneux devra donc toujours apporter le plus grand soin à tenir ses joints et ses boîtes à étoupes en bon état, s'il veut conduire sa machine avec économie. On évite difficilement les fuites autour de la tige du flotteur, et c'est là ce qui a fait le succès des flotteurs, dont les indications peuvent être transmises au dehors, sans que, pour cela, il soit nécessaire de conserver d'ouverture.

582. Perte par la mise en train et par les temps d'arrêt. — Les indications qui précèdent sont toutes relatives à la marche courante des chaudières, et nous avons encore à tenir compte de l'influence de la mise en train et des temps d'arrêt.

Dans une machine de 6 à 10 chevaux bien conduite, on peut, en couvrant bien le feu, maintenir la pression à 3 atmosphères, du soir au matin, et remonter en pression en 30'.

Pendant les heures de repas, on couvre le feu, et la con-

sommatation de combustible est très-faible : on ne saurait l'estimer à plus de $\frac{1}{10}$ de la consommation normale, bien que l'on soit souvent obligé d'ouvrir les portes, pour refroidir l'intérieur du fourneau, par un courant d'air.

On peut alors répartir les consommations ainsi qu'il suit :

Mise en feu...	$0^h,50 \times 1,00 = 0,50$	} 0,65.
Arrêts.....	$1^h,50 \times 0,10 = 0,15$	
Marche.....	$10^h,00 \times 1,00 = 10,00$	10,00.

L'effet utile est alors réduit dans la proportion de

$$\frac{10}{10,65} = 0,94.$$

Cette évaluation se rapproche beaucoup de celle qui résulte des expériences directes de M. Wicksteed.

Cet habile expérimentateur avait trouvé que la quantité d'eau évaporée par kilogramme de combustible, pendant le travail de jour seulement, était de $7^k,90$.

La même chaudière a fourni 8,09 en travail continu, de jour et de nuit.

L'effet utile est donc réduit dans la proportion de

$$\frac{7,90}{8,09} = 0,97.$$

Il résulte des renseignements donnés sur les locomotives par MM. Gouin et Lechatelier, que, sur les chemins de fer de Belgique, où l'on s'est attaché à déterminer séparément la consommation pendant la marche et la consommation pendant les stationnements et l'allumage, on a trouvé que cette dernière consommation s'élevait à 0,25 de la consommation totale.

L'utilisation du combustible, pour le service même de la traction, est donc réduite à

$$\frac{1,00 - 0,25}{1,00} = 0,75;$$

mais ce chiffre ne saurait être appliqué aux chaudières des machines fixes, dont les temps d'arrêts sont moins nombreux et, d'ailleurs prévus par le chauffeur. Le chiffre de M. Whicstead est celui qu'il conviendra presque toujours d'appliquer pour les machines de nos ateliers.

585. Résumé sur l'utilisation du combustible. — Chacune des causes que nous venons d'énumérer exerce son influence, dans l'ordre même que nous avons adopté. Pour connaître la proportion de la chaleur réellement utilisée, il suffira de multiplier les coefficients les uns par les autres. Si, en effet, on n'utilise, par suite du défaut de combustion que 0,90 de la chaleur que le combustible, complètement brûlé, pourrait fournir, la perte par les gaz brûlés ne peut affecter que la chaleur réellement développée dans la combustion même; c'est-à-dire que la réduction due à cette deuxième cause ne doit être calculée que sur 0,90 seulement. Le même raisonnement s'applique à toutes les autres circonstances, et nous avons indiqué, dans le tableau suivant, les coefficients obtenus en faisant les produits successifs des coefficients élémentaires.

Pour tenir compte des pertes habituelles dans une chaudière fixe, on pourra disposer le calcul ainsi qu'il suit :

Indication des causes de perte.	Coefficients de réduction.	Produits.
Défaut de combustion.....	0,90	0,900
Gaz brûlés.....	0,77	0,693
Rayonnement.....	0,90	0,644
Eau entraînée.....	0,92	0,593
Mise en train et temps d'arrêt	0,94	0,557

Il résulte de là que le combustible ne serait utilisé que dans la proportion de 0,557, dans les conditions ordinaires.

Pour une chaudière marine, dans laquelle il faudrait tenir compte de la perte par l'extraction, on aurait :

Indication des causes de perte.	Coefficients de réduction.	Produits.
Défaut de combustion....	0,90	0,900
Gaz brûlés.....	0,77	0,693
Rayonnement.....	0,90	0,634
Extraction.....	0,80	0,489
Eau entraînée.....	0,92	0,459

L'utilisation du combustible est réduite au-dessous de 0,50.

Ces chiffres nous permettront, dans chaque cas de la pratique, de porter une première appréciation sur la quantité de vapeur qui doit être formée par chaque kilogramme de combustible ; théoriquement chaque kilogramme de houille doit fournir

$$8000 : 650 = 12,30 \text{ kilog. de vapeur ;}$$

et, si nous multiplions ce chiffre par les coefficients de réduction qui viennent d'être obtenus, nous trouvons :

Pour les chaudières fixes,

$$12,30 \times 0,557 = 6,85 \text{ kilogrammes.}$$

Pour les chaudières marines,

$$12,30 \times 0,549 = 5,65 \text{ kilogrammes.}$$

Il est vrai que ces chiffres sont relatifs à la formation de la vapeur sèche ; et, si l'on veut tenir compte de l'eau entraînée, il faudra les multiplier par 1,25, ce qui conduit respectivement aux deux nombres 8,56 et 7,06.

Nous verrons effectivement que les quantités d'eau réellement sorties de la chaudière varient entre ces limites, que l'on peut regarder comme favorables, puisque les différentes natures de pertes n'ont été évaluées qu'à leur minimum, et que quelques-unes, celles dues à la présence des incrustations et celles qui résultent des fuites de vapeur, ne sont pas entrées en déduction de l'effet utile.

584. *Observation sur les économies réalisables.* — Lorsque l'on énumère, comme nous avons essayé de le faire, toutes

les causes de déperdition dans les chaudières à vapeur, on se trouve convaincu de l'imprudence de certaines promesses, qui sont cependant faites tous les jours, de réduire la consommation de 0,50 ou de 0,60 pour 100 de la dépense actuelle.

Alors même que l'on écarterait toutes les causes de pertes, on ne saurait réaliser, en ce qui concerne les chaudières à vapeur, de pareils avantages, qu'en prenant pour points de comparaison des chaudières mal construites ou mal entretenues. Il suffirait, le plus souvent, de les étudier dans leurs différentes parties, pour réaliser à peu de frais, mais avec quelques soins, les résultats que l'on paye souvent fort cher par l'abandon, pendant un certain temps, d'une valeur équivalente à celle du combustible économisé, ainsi que le proposent souvent les auteurs de dispositions plus ou moins nouvelles.

535. *Différences entre les résultats des expériences et ceux de la pratique industrielle.* — Parmi les diverses causes de pertes de chaleur, il en est plusieurs que l'on peut éliminer lors d'une expérience de peu de durée. Telles sont, par exemple, les pertes dues aux incrustations, à la présence des cendres dans les carneaux, aux fuites de vapeur, et, pour partie seulement, celles qui sont relatives au défaut de combustion, ou à la température des gaz brûlés, et même à l'entraînement de l'eau, si l'expérience se fait dans les conditions d'un travail modéré.

La plupart du temps, les expériences de réception se font sans tenir compte de l'allumage, ni des temps d'arrêt.

On voit donc qu'indépendamment du soin exceptionnel qui doit toujours être pris par le chauffeur, pendant les expériences, il existe encore des causes permanentes et inévitables de différence entre les résultats qui seront constatés dans ces conditions et ceux de la pratique courante. Lorsqu'un industriel voudra calculer, à l'avance, la consommation de ses machines, il fera donc bien de faire subir, au

chiffre de consommation auquel le constructeur se sera obligé, une augmentation notable.

Nous ne croyons pas exagérer en disant que cette augmentation ne saurait être estimée à moins de moitié de la consommation promise, ou de celle qui aurait été constatée dans une expérience bien faite.

Les évaluations qui admettraient des bases plus favorables seraient généralement erronées.

CHAPITRE VI.

RÉSULTATS PRATIQUES SUR LES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

I. Des expériences sur les chaudières à vapeur.

586. *Objet des expériences sur les chaudières à vapeur.* — Nous avons décrit les principaux systèmes de générateurs, et nous nous proposons d'étudier maintenant les résultats pratiques qu'ils fournissent. Il importe, en effet, de pouvoir connaître, d'après les faits observés, la quantité de vapeur qui peut être obtenue avec 1 kilogramme de combustible, et d'examiner comment cette quantité varie avec les diverses circonstances de la production.

Ce que nous avons dit des diverses causes de pertes de chaleur, dans les différents systèmes de chaudières, suffit pour faire comprendre que chacune des circonstances de la construction ou de l'emploi apporte son influence particulière dans le résultat général ; il nous faut maintenant connaître ce résultat, et voir dans quelles limites il peut être modifié par telle ou telle cause.

Nous examinerons donc un certain nombre de générateurs bien construits, ou qui puissent passer pour tels, et nous rechercherons s'ils présentent des rendements très-différents entre eux ; mais ces comparaisons ne sont pas aussi simples que l'on serait tenté de le croire au premier aperçu, parce que les occasions sont rares, dans lesquelles on puisse faire varier un seul des différents éléments de la question, pour en apprécier l'influence individuelle.

Nous verrons toutefois que les éléments principaux ne paraissent pas exercer une influence notable sur les résultats : un même générateur peut, entre certaines limites, fournir la même quantité de vapeur par kilogramme de combustible, quoique la pression de cette vapeur soit plus ou moins grande,

quoique la combustion soit plus ou moins rapide. Cette dernière conclusion n'est vraie toutefois que quand les surfaces de chauffe sont proportionnellement assez grandes.

Ces éléments ne sont pas les seuls qu'il soit nécessaire de considérer, et nous ferons d'abord l'énumération des diverses circonstances qu'il conviendra de noter plus particulièrement dans toutes les expériences de cette nature.

537. Éléments à considérer dans les expériences sur les chaudières à vapeur. — Le résultat principal des diverses expériences sur les chaudières à vapeur se traduit toujours par un certain nombre de kilogrammes d'eau vaporisée, par kilogramme de combustible. Mais ce résultat, qui peut suffire à l'industriel, pour établir ses prix de revient, serait, à notre point de vue, sans intérêt, s'il n'était accompagné d'indications précises sur les conditions de fonctionnement de chaque chaudière; et il sera nécessaire de connaître, autant que possible, tous les détails de construction, soit de la chaudière, soit du fourneau, qui peuvent exercer une influence quelconque sur le résultat.

On devra, dans les expériences de cette nature, satisfaire au formulaire suivant :

1° Combustible brûlé par heure;

2° Eau vaporisée par heure.

La nature et la provenance du combustible seront indiquées, et l'on aura soin de mentionner la pression habituelle de la vapeur pendant le fonctionnement.

3° Étendue de la surface totale de la grille, en mètres carrés.

4° Étendue de la surface libre de la grille, en mètres carrés;

5° Sections des différents carneaux;

6° Section de la cheminée;

7° Sa hauteur.

La connaissance de ces éléments permettra de calculer :

- a. Le combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.
- b. Le combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface libre de la grille.
- c. Le combustible brûlé par heure et par mètre carré de section de cheminée ou de carneau.

En ce qui concerne les produits gazeux de la combustion, on cherchera à obtenir des évaluations répondant aux questions suivantes :

- 8° Volume d'air introduit par heure ;
- 9° Volume de gaz sorti par la cheminée ;
- 10° Température des gaz au delà de la surface de chauffe ;
- 11° Température des gaz au sortir de la cheminée.

Ces dernières indications seront, la plupart du temps, très-difficiles à obtenir ; mais celles qui sont relatives au combustible devront toujours être déterminées avec soin ; elles ne consistent d'ailleurs qu'en renseignements sur le mode de combustion et dans la détermination des

- 12° Poids des résidus de la combustion, en scories ou en cendres, qui peut toujours se déterminer avec facilité.

En ce qui concerne l'étendue de la surface de chauffe et sa répartition, on se procurera, dans chaque expérience, les mesures suivantes :

- 13° Étendue de la surface de chauffe directe ;
- 14° Étendue de la surface de chauffe indirecte ;
- 15° Étendue de la surface de chauffe totale.

Ce qui permettra de calculer :

- d. Le rapport entre la surface de chauffe totale et la surface de la grille.
- e. Le nombre de kilogrammes de combustible brûlé, par mètre carré de surface de chauffe et par heure.
- f. Le nombre de kilogrammes d'eau vaporisée, par mètre carré de surface de chauffe.

La détermination de tous ces éléments demande certaines précautions que nous indiquerons en détail dans les paragraphes suivants.

533. Détermination du combustible brûlé. — Rien ne serait plus facile que de déterminer la quantité de combustible brûlée pendant un temps déterminé, par exemple depuis le moment où l'on allume le feu jusqu'au moment où l'on cesse de l'alimenter ; mais la connaissance de ce chiffre ne serait pas d'un grand intérêt, par rapport à celle de la consommation des chaudières à vapeur. Tel système de chaudière demande, pour la mise en vapeur, une dépense décuple de celle qui est nécessaire pour tel autre ; et, cette dépense une fois faite, pourra ne pas se renouveler pour un appareil fonctionnant d'une manière continue. Ce qu'il faut surtout déterminer avec soin, c'est la quantité de combustible consommée pour produire une quantité donnée de vapeur : il est donc nécessaire d'opérer en service courant et de ne commencer à contrôler la dépense du combustible que quand la chaudière est arrivée, pour toutes les circonstances de sa marche, dans son état de régime normal.

A ce moment la grille est chargée d'une certaine quantité de combustible, que l'on pourrait jeter bas sans apporter un trouble bien sensible dans le fonctionnement de la chaudière, surtout dans le cas d'un grand foyer en maçonnerie.

A moins d'employer ce moyen, moins exact peut-être, il faut s'assurer avec soin de l'état du feu : la grille ayant été

bien également couverte, attendre, pour mettre en consommation le charbon pesé à l'avance, que l'intensité du feu commence à diminuer. On devra s'assurer, avec une exactitude suffisante, que les mêmes conditions sont réunies pour mettre fin à l'expérience, et ainsi ne compter ni le combustible placé sur la grille au commencement de l'opération, ni celui dont elle se trouve chargée à la fin.

Lorsqu'on nettoiera la grille, avant de commencer l'expérience de consommation, il faudra faire de même à la fin, et retrancher, de la dépense totale, le poids du combustible recueilli dans cette dernière circonstance ; mais là encore des erreurs inévitables se rencontrent : le chauffeur aura pu laisser le mâchefer s'accumuler sur une partie de la grille ; la plus riche portion du combustible restant aura déjà produit son effet, et l'on n'aura qu'une approximation d'autant plus dangereuse, que l'on pourra croire le résultat des pesées irréprochable de tous points.

Pendant toute la durée de l'expérience, on ne laissera à la disposition du chauffeur, même le plus désintéressé dans la question, d'autre combustible que celui qu'il doit consommer. Outre les erreurs qu'il pourrait commettre involontairement, il ne faut pas perdre de vue que son amour-propre est en jeu, et qu'il sera toujours entraîné par le désir de se montrer habile en dépensant peu.

Il est bon d'établir un contrôle continu, en fractionnant la provision de combustible par portions plus ou moins grandes, de 10 ou de 50 kilogrammes suivant les cas, et en se faisant rendre compte de l'instant précis où chaque lot vient à être entamé : une expérience sera d'autant plus digne de confiance que le temps employé à la consommation de ces approvisionnements partiels aura présenté moins de variations.

Toujours est-il que l'appréciation des conditions du foyer, en commençant et en terminant, donne toujours lieu à quelques incertitudes, et que, pour diminuer les chances d'erreur, il convient que les expériences soient très-prolongées : les causes d'erreur auront d'autant moins d'influence que l'ex-

périence de consommation aura duré plus longtemps, une journée entière s'il est possible : une expérience de 4 heures ne saurait inspirer une confiance absolue ; une moindre durée serait tout à fait insuffisante.

539. Détermination de la quantité de vapeur produite. — Des difficultés analogues se rencontrent pour la détermination de la quantité de vapeur produite.

Si l'observateur peut avoir à sa disposition un réservoir bien jaugé, et suffisant pour toute la dépense d'eau qui se fera pendant l'expérience, il lui sera facile de connaître le volume total d'eau dépensée.

Mais la plupart du temps ce réservoir laissera quelque incertitude dans son jaugeage, et il ne sera pas de dimension suffisante pour satisfaire à une consommation de longue durée ; il faudra le remplir plusieurs fois jusqu'à un repère bien défini et bien visible, et l'alimenter aussitôt que le niveau de l'eau se sera abaissé jusqu'à un autre repère également bien déterminé ; chaque fois que le remplissage aura lieu, il faudra noter, sur le vase même et par un trait, que le nombre des volumes mis à la disposition de l'expérience est augmenté d'une unité.

En fin de compte, il faudra jauger séparément la fraction de volume, dépensée depuis le dernier remplissage.

Enfin, pour convertir le volume dépensé en kilogrammes, il faudrait d'abord le ramener à la température du maximum de densité par la formule

$$V' = \frac{V}{1 + at}$$

et en calculer le poids par la relation

$$P = 1000 V',$$

V et V' étant des volumes exprimés en mètres cubes, P le poids en kilogrammes, t la température moyenne du réservoir pendant l'alimentation, et a le coefficient moyen de dilatation de l'eau ; mais cette correction peut, pour les tempé-

ratures ordinaires, être complètement négligée, et l'on estimera simplement le poids du mètre cube à mille kilogrammes.

Le poids de l'eau introduite pourra donc être estimé avec une exactitude suffisante, sans qu'il soit nécessaire d'employer des appareils compteurs, avec lesquels on risquerait d'introduire de nouveaux éléments d'erreurs. On pourra cependant, quand la pompe alimentaire fonctionnera d'une manière régulière, s'en servir comme d'un moyen de jaugeage; il suffira de s'assurer directement, et par une expérience préalable, de la quantité d'eau qu'elle fournit, à la même pression et à la même température, et de la faire fonctionner ensuite avec la même ouverture de robinet, en comptant les coups de piston, en les enregistrant, par un compteur automatique, ou en les déduisant du nombre des tours de la machine, s'il y a un rapport constant entre chacun des mouvements de piston de la pompe et celui de l'un des organes de cette machine.

Mais il faut encore s'assurer que la quantité d'eau introduite est bien la même que la quantité d'eau vaporisée. Le seul moyen de le vérifier consiste à observer, au commencement de l'expérience, le niveau d'eau de la chaudière, avec une grande attention, et à ramener ce niveau à la même hauteur, au moyen de la pompe alimentaire, lorsque l'expérience est terminée.

On peut aisément commettre des erreurs considérables dans cette évaluation, le niveau dans la chaudière pouvant varier, pour la même quantité d'eau contenue, avec la température, et avec la rapidité plus ou moins grande de l'ébullition. Il faudra donc opérer, au commencement et à la fin, dans des conditions absolument identiques par rapport à l'intensité du feu, et à la vivacité de l'ébullition.

Si l'on voulait observer les niveaux avant la mise en feu et après le refroidissement absolu de la chaudière, on ne saurait tenir compte des pertes faites pendant l'allumage, et l'on devrait attendre très-longtemps et sans contrôle, pour obtenir un abaissement de température suffisant, surtout

dans les fourneaux en briques qui conservent leur chaleur pendant plusieurs jours.

Il vaut donc mieux établir les niveaux à la température de l'ébullition et à une pression déterminée; mais on diminuera les chances d'erreurs en fermant momentanément toute issue à la vapeur, avant de procéder aux vérifications qu'exige la détermination de la quantité d'eau dépensée.

Rarement toutes ces précautions sont prises, et il ne faut considérer la plupart des chiffres résultant des expériences que comme des estimations approchées, et non comme des résultats certains.

On comprend dès lors que les résultats évalués ne seront pas toujours comparables, et l'on ne sera pas étonné si nous y rencontrons quelquefois des éléments contradictoires.

Quoique nous ne puissions conseiller l'emploi des compteurs d'eau dans les expériences spéciales de cette nature, nous dirons cependant que ces appareils seraient d'une grande utilité, comme moyen de contrôle, pour la marche industrielle d'une chaudière à vapeur. Cette pratique est en usage dans quelques villes manufacturières, et nous lisons, dans le *Mémoire* déjà cité de M. Burnat, les observations suivantes sur ce sujet :

« Nous avons vu, en 1855, à Glasgow, dans un des établissements de toiles peintes les plus considérables, qui paye la houille de 5 à 6 francs la tonne, chaque chaudière munie d'un compteur à eau, lequel enregistre soigneusement les quantités d'eau vaporisées par tonne de houille. Des registres tenus depuis plusieurs années accusent des expériences poursuivies, sur une grande échelle, avec beaucoup de persévérance. »

390. Détermination de la surface de grille. — La surface de la grille comprend la totalité de l'espace occupé par les barreaux, en y comptant même celui qui correspond aux supports transversaux sur lesquels viennent reposer les talons qui forment leurs extrémités; en effet, la combustion se

propage sur toute l'étendue de cette surface, l'air pouvant pénétrer jusqu'au charbon, même par les interstices très-étroits qui séparent les talons les uns des autres : on mesurera donc toute l'étendue du rectangle ainsi formé, et l'on en calculera la surface en mètres carrés.

La surface libre de la grille n'a qu'une importance secondaire ; on la détermine ordinairement en mesurant la saillie de chaque talon sur le corps du barreau, et en multipliant cette saillie par la longueur réelle des fentes et par leur nombre.

591. Détermination de la surface de chauffe. — Il y a quelques années encore, la plupart des constructeurs estimaient la surface de chauffe suivant une méthode qui pourrait apporter quelque confusion dans les résultats que nous avons à indiquer, si nous ne prenions la précaution de rappeler comment ils opéraient.

Au lieu de calculer en bloc toute la surface exposée, d'une manière quelconque, à l'action de la chaleur, ils ne comptaient pour sa valeur réelle que la surface de chauffe directe et ils y ajoutaient seulement la moitié de la surface de chauffe indirecte. C'est en partant de cette base qu'on a pu dire, d'une manière générale, qu'il convenait de donner aux chaudières à vapeur 1 mètre carré de surface de chauffe par force de cheval.

Nous avons déjà fait voir combien cette distinction est arbitraire, et l'on admettra que la surface de chauffe indirecte venant suppléer à l'insuffisance de la surface de chauffe directe, il est plus convenable de les compter l'une et l'autre pour leur valeur réelle ; c'est ce que nous avons fait pour tous les résultats d'expériences que nous citons dans ce chapitre.

592. Détermination des dimensions de la cheminée et des carneaux. — Nous verrons, en parlant de la construction des fourneaux, de chaque étranglement, dans les cheminées ou dans les carneaux, détermine une perte de force vive, et forme un obstacle réel au mouvement des gaz et au tirage ; les dimensions à considérer sont donc plus particulièrement celles

qui correspondent aux sections les plus petites. En ce qui concerne les cheminées on indiquera surtout la hauteur et la section à la sortie; c'est cette section, et non pas celle de la base de la cheminée qui entre dans le calcul du pouvoir ascensionnel, et c'est à elle que se rapporteront toutes nos évaluations. Quant à la hauteur, on la mesurera autant que possible à partir du débouché des carneaux, l'efficacité de la cheminée dépendant de toute la capacité remplie de gaz chauds.

593. *Volume et température des gaz introduits et des gaz brûlés.* — Il y a très-peu d'expériences dans lesquelles on ait pris soin de déterminer le volume des gaz, les moyens d'observation exigeant des appareils spéciaux et une installation quelquefois difficile. On se reportera, quant à cet élément, à ce que nous en avons dit au n° 510. La température des gaz brûlés se mesure en général dans la cheminée, et nous avons également indiqué au n° 565 les divers moyens à l'aide desquels on peut obtenir son évaluation avec quelque exactitude.

594. *Expériences sur les chaudières fixes.* — Il faut prendre soin, dans les expériences sur les chaudières fixes, d'attendre que les maçonneries soient échauffées au point convenable, par un travail de plusieurs jours, et c'est sans doute pour n'avoir pas pris cette précaution que certains observateurs ont trouvé une utilisation très-peu favorable. On risquerait certainement de commettre une erreur de même nature si la chaudière était restée sans fonctionner pendant la nuit précédente, car alors on n'aurait aucune donnée sur la chaleur employée pour ramener tout le système à sa température habituelle. Ces précautions sont moins nécessaires pour les chaudières isolées, et d'un poids faible, comme le sont la plupart des chaudières tubulaires ou locomobiles, qui n'exigent en général qu'une petite quantité de chaleur pour que toutes leurs parties soient amenées à leur température normale.

595. Visite de la chaudière et des carneaux. — Lorsqu'on procédera aux essais d'une chaudière à vapeur, il sera toujours convenable de s'assurer, par une visite minutieuse, qu'elle est en bon état d'entretien, quant aux incrustations et à la propreté des carneaux. Les surfaces intérieures seront autant que possible nettoyées, dans toutes les parties qui doivent conduire la chaleur; les carneaux seront examinés et ramonés dans tous leurs parcours, car il arriverait souvent que, faute de ces précautions, l'utilisation du combustible serait réduite dans une proportion considérable.

II. Influence des diverses circonstances de la vaporisation.

596. Influence de la pression. — La pression à laquelle on a fait agir la vapeur, à diverses époques, ayant été l'élément le plus variable, dans les générateurs qui ont été employés depuis le commencement de ce siècle, puisque cette pression s'est élevée successivement depuis 1^{re}, 25, pression habituelle des machines de Watt, jusqu'à celle de 8 atmosphères, que l'on peut regarder aujourd'hui comme normale pour les machines locomotives, il était important de savoir si cette variation exerce une influence plus ou moins grande sur la quantité d'eau vaporisée par chaque kilogramme de combustible.

M. Wicksteed, dans son grand travail sur les machines de Cornouailles, avait été conduit à admettre que cette influence est minime, ainsi qu'on en peut juger par les résultats inscrits au tableau suivant.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE WICKSTEED,

SUR L'INFLUENCE DE LA PRESSION.

Pression de la vapeur.	Eau vaporisée par heure.	Charbon consommé par heure.	Eau vaporisée par kilogr. de combustible.
2,00	172 ^k	21,40	8,05
2,33	179	23,00	7,78
2,67	169	21,40	7,92
2,80	113	14,15	7,97
3,51	274	34,20	8,08
		Moyenne.....	7,96

On voit que les chiffres extrêmes sont presque identiques, et que les chiffres intermédiaires n'en diffèrent eux-mêmes que très-peu.

Nous avons voulu vérifier cette conclusion pour des pressions plus élevées, et nous avons, dans le courant de l'année 1854, entrepris des expériences de vaporisation sur la chaudière d'une machine locomobile que possède le Conservatoire, et qui nous servira quelquefois de point de comparaison.

Le feu étant conduit de la même manière, avec le seul tirage de la cheminée, et l'échappement de vapeur étant complètement fermé, on a mesuré la quantité d'eau vaporisée, à des pressions variables, depuis 1 jusqu'à 6 atmosphères.

Les chiffres suivants font connaître les moyennes des déterminations obtenues dans un grand nombre d'expériences.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES
FAITES SUR LA LOCOMOBILE DU CONSERVATOIRE,
POUR RECONNAÎTRE L'INFLUENCE DE LA PRESSION.

Pression de la vapeur.	Eau vaporisée par heure.	Charbon consommé par heure.	Eau vaporisée par kilogr. de charbon.
1	121,50	11,33	10,63
2	127,13	11,71	10,87
3	128,60	12,25	10,54
4	129,30	12,45	10,51
5	127,45	12,35	10,33
6	137,94	14,45	9,56
Moyenne.....			10,41

Ces expériences indiquent, d'une manière continue, une petite diminution, à mesure que la pression augmente, mais cette diminution est faible, et le serait plus encore pour une chaudière mieux abritée contre toutes les influences de refroidissement.

On doit donc en conclure que la pression n'a pas une influence marquée sur l'utilisation d'un même combustible, et nous admettrons d'autant plus volontiers ce fait que les quantités de chaleur nécessaires pour produire 1 kilogramme

de vapeur, à 1 ou à 6 atmosphères, ne diffèrent pas entre elles de 12 calories, ou de $\frac{1}{50}$ de la dépense totale.

Nous avons vu que les éléments d'erreurs de nos estimations pratiques ne permettent pas de compter sur une approximation aussi grande.

On remarquera d'ailleurs que la vaporisation absolue augmente avec la pression, ainsi que la consommation totale du combustible, par suite sans doute de l'élévation relative de la température du foyer, et de celle de la cheminée.

397. *Influence de la rapidité de la combustion.* — On a, pendant longtemps, prétendu que les foyers à combustion lente devaient mieux utiliser le combustible que les foyers à combustion rapide, mais il semble presque évident que cette distinction ne saurait avoir aucun sens, si elle ne se rapporte pas à une chaudière déterminée.

Si, sur une grille donnée, on vient à brûler une quantité de combustible double, la chaleur dégagée étant double, il faudra, pour utiliser cette chaleur, disposer de surfaces absorbantes plus grandes, et ainsi la question de savoir si une combustion lente est plus favorable qu'une combustion rapide, se lie intimement à l'étude des dimensions à donner aux surfaces de chauffe, et l'on doit croire qu'en établissant, dans chaque cas, ces surfaces dans une proportion favorable, on devra obtenir des résultats également satisfaisants.

Que si, au contraire, on brûle plus de combustible dans un temps donné, pour une même surface absorbante, il ne saurait être douteux que les gaz brûlés seront moins refroidis et que, par conséquent, la chaleur de la combustion sera moins bien utilisée.

On pourrait sans doute se demander si la combustion, sur la grille, est plus ou moins complète, suivant la rapidité de la combustion, si la quantité d'air introduite est plus ou moins grande; mais ces questions n'ont pas été considérées isolément, dans des essais calorimétriques, et, par suite, les expé-

riences pratiques ne sauraient parvenir à les résoudre, alors que l'élément principal, l'étendue de la surface de chauffe, doit apporter, dans ces expériences, son influence prépondérante.

Quoi qu'il en soit, nous indiquerons brièvement quelques-uns des résultats déjà publiés sur cette question.

En opérant sur des chaudières cylindriques à foyers intérieurs, M. Wicksteed a résumé ses observations dans les chiffres suivants :

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE M. WICKSTEED,
SUR L'INFLUENCE DE LA RAPIDITÉ DE LA COMBUSTION.

Circonstances de la combustion.	Charbon brûlé par mètre carré de surface de grille et par heure.	Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure.	Eau vaporisée par kil. de charbon.
Combustion très-lente.....	13,08	24,26	8,42
Combustion lente... ..	22,70	44,76	8,45

Ces chiffres paraîtront très-peu différents, surtout si l'on remarque qu'une vaporisation de 44^{kil},76 par mètre carré de surface de chauffe et par heure est beaucoup trop considérable et ne serait pas aujourd'hui acceptée dans la pratique.

Se livrant à une pareille expérience sur les chaudières de bateaux, M. Wye Williams, dans une lettre insérée dans le *Journal de la Société des arts de Londres* (numéro de décembre 1857), indique les chiffres suivants, comme ayant été obtenus avec le plus grand soin.

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE M. WYE WILLIAMS,
SUR L'INFLUENCE DE LA RAPIDITÉ DE LA COMBUSTION.

Circonstances de la combustion.	Charbon brûlé par heure.	Eau vaporisée par heure.	Charbon brûlé par mètre carré de surface de grille et par heure.	Eau vaporisée par kil. de charbon.	Tempér. dans les carneaux.
Combustion lente, analogue à celles des chaudières de Cornouailles.	67,50	645,52	40 kil. environ	9,56	410°
Combustion analogue à celle des chaudières de bateau.....	118,70	1147,90	70 kil. environ	9,45	650

Les différences sont encore du même ordre que les erreurs

d'observation que nous avons signalées, et il serait impossible d'en conclure d'une manière absolue que, pour des chaudières respectivement appropriées à la nature de la combustion, ce même avantage se serait encore manifesté en faveur de la combustion lente.

598. *Expériences de M. Cavé.* — M. Cavé a exécuté, en 1843 et 1844, des expériences comparatives sur diverses chaudières, alimentées avec le même combustible; les résultats qu'il a obtenus étant consignés dans la plupart des traités de mécanique, il nous paraît nécessaire de les relater, encore bien que ces résultats ne puissent pas, selon nous, conduire à des conséquences absolues, sur les divers points que l'on a cités.

Faites avec grande méthode, et dans un esprit excellent, elles nous semblent plutôt démontrer combien les difficultés sont grandes en cette matière, que fournir des solutions suffisamment nettes aux questions qui doivent préoccuper les ingénieurs à ce sujet.

M. Cavé a employé six dispositions différentes de chaudières, que nous désignerons chacune par un numéro particulier :

N° 1. Chaudière cylindrique, horizontale, de 1 mètre de diamètre et de 8 mètres de longueur, présentant à l'action des gaz de la combustion une surface de chauffe de 12^m^{sq},50; une cloison en briques régnait sur toute la longueur de la chaudière, le long de la génératrice inférieure, de manière que les gaz, après avoir passé du côté gauche, repassaient à droite de la cloison, avant de se rendre au registre, au moyen duquel on pouvait régler le tirage; avant d'atteindre la cheminée, ils circulaient autour d'un tube réchauffeur, de 0^m,30 de diamètre et de 7 mètres de longueur; l'alimentation se faisait tantôt à l'eau froide, tantôt avec le réchauffeur.

N° 3. Même chaudière dans laquelle les gaz se rendaient directement à la cheminée en léchant, dans toute sa largeur, la surface inférieure du corps cylindrique, et par conséquent sans tube réchauffeur.

N° 5. Même chaudière disposée comme au n° 1, à cela près que la cloison en briques ne prenait naissance qu'à deux mètres de la porte du fourneau, au lieu de prendre naissance à un mètre, comme dans la première disposition; emploi constant du tube réchauffeur.

N° 2. Chaudière à 2 bouilleurs, composée du même corps cylindrique que précédemment avec addition de deux tubes inférieurs de 0^m,400 de diamètre et de 8 mètres de longueur.

La flamme, après avoir passé librement entre les bouilleurs, de manière à chauffer la partie inférieure du corps cylindrique, pouvait revenir simultanément par deux carneaux formés, à droite et à gauche, par la maçonnerie, entre la surface latérale du corps cylindrique et la surface supérieure de l'un des bouilleurs.

La surface de chauffe totale se trouvait ainsi portée à 31^{m²},18, sans compter le tube réchauffeur, à l'aide duquel se faisait, dans certains cas, l'alimentation; mais il est indispensable de faire remarquer, dès à présent, que ce chauffage simultané des bouilleurs et de la partie inférieure de la chaudière, par le même courant, avait obligé M. Cavé, non-seulement à écarter beaucoup ses bouilleurs, mais encore à surélever sa chaudière, par rapport au niveau de la grille, pour que le fond des bouilleurs restât encore à 0^m,60 au-dessus des barreaux, comme l'était, pour la chaudière n° 1, la génératrice inférieure du corps cylindrique.

La moitié seulement de la surface des bouilleurs recevait l'action du feu dans les mêmes conditions que la chaudière n° 1, soit 10 mètres carrés environ, sur les 31^{m²},18 de surface totale, et, si l'on y ajoute le tiers environ de la surface de chauffe du corps cylindrique, on ne trouve encore au total que 14 mètres carrés de surface de chauffe directe.

Quant aux carneaux, on sait que la fumée ne suit pas également les divers chemins qui lui sont ouverts; elle se rend toujours par la route la plus courte à la cheminée, et la dis-

position adoptée à cet égard a eu nécessairement pour effet de n'utiliser, pour le chauffage, que le carneau le plus direct, dans lequel la surface de chauffe, tant pour le bouilleur que pour le corps cylindrique, ne dépassait pas 7 mètres carrés; la surface réelle de chauffe ne s'élevait donc qu'à $14 + 7 = 21$ mètres carrés au lieu de $31^{\text{m}},18$, et elle était, quant au corps principal, dans des conditions d'utilisation bien moins favorables que pour la chaudière n° 1, par suite de l'éloignement plus grand de la grille.

N° 4. Chaudière à bouilleurs plus petits; diamètre du corps principal $0^{\text{m}},800$; longueur $5^{\text{m}},88$; diamètre des bouilleurs $0^{\text{m}},400$; longueur $5^{\text{m}},88$.

La fumée entourait immédiatement les bouilleurs et la partie inférieure du corps principal, et se rendait directement à la cheminée: l'éloignement de la grille était le même que pour la chaudière n° 1, et la surface de chauffe totale s'élevait à $21^{\text{m}},36$.

N° 6. Même chaudière que n° 4, mais disposée comme le n° 2; les gaz de la combustion, après avoir chauffé, dans un premier parcours, les surfaces inférieures des bouilleurs et du corps principal, revenaient à l'avant du fourneau, par des carnaux latéraux, dont l'un, celui de gauche, communiquait directement à la cheminée. Dans les expériences faites sur cette chaudière, comparative-ment avec la chaudière n° 5, on utilisait constamment le tube réchauffeur, dont il a été parlé plus haut.

La surface de grille a varié du simple au double dans les expériences, depuis $0^{\text{m}},825$ jusqu'à $1^{\text{m}},650$, la largeur étant de $1^{\text{m}},10$ et la profondeur de $0^{\text{m}},75$ à $1^{\text{m}},50$; cette dernière profondeur était obtenue au moyen de deux séries de barreaux de $0^{\text{m}},75$ placés dans le prolongement l'une de l'autre.

La plupart des essais ont été continués pendant 11 heures consécutives, et les résultats moyens, obtenus dans des cir-

constances identiques, sont consignés, dans leur ensemble, dans les tableaux ci-joints*.

TABLEAU GÉNÉRAL DES EXPÉRIENCES DE M. CAVE,

SUR 6 MODÈLES DE CHAUDIÈRES ET FOURNEAUX.

Désignation des chaudières.	Nombres Kil. d'eau des jours vaporisés de par kil. travail. de charbon.	
	m.q.	
Chaudière n° 1, sans réchauffeur; surface de grille 1,650.	3	8,11
Chaudière n° 1, sans réchauffeur; surface de grille 0,825.	12	6,77
Chaudière n° 1, sans réchauffeur; surface de grille 1,320.	5	7,26
Chaudière n° 1, avec réchauffeur; surface de grille 1,650.	1	6,92
Chaudière n° 1, avec réchauffeur; surface de grille 0,825.	4	7,17
Chaudière n° 2, sans réchauffeur; surface de grille 1,650.	3	7,45
Chaudière n° 2, avec réchauffeur; surface de grille 0,825.	3	6,88
Chaudière n° 3, sans réchauffeur; surface de grille 1,620.	5	6,29
Chaudière n° 3, sans réchauffeur; surface de grille 0,825.	5	5,57
Chaudière n° 4, sans réchauffeur; surface de grille 1,650.	7	6,68
Chaudière n° 4, sans réchauffeur; surface de grille 1,825.	5	6,01
Chaudière n° 5, avec réchauffeur; surface de grille 1,650.	8	6,85
Chaudière n° 6, avec réchauffeur; surface de grille 1,650.	8	6,37

599. *Résultats des expériences de M. Cavé, au point de vue de l'influence de la rapidité de la combustion.* — Si nous nous bornons à comparer, entre eux, les chiffres relatifs aux expériences faites avec des surfaces de grilles différentes, toutes autres circonstances restant les mêmes, nous pourrions en former le tableau ci-joint :

Désignation des chaudières.	Grilles de 1,650.	Grilles de 1,320.	Grilles de 0,825.
Chaudière n° 1, sans réchauffeur...	8,11	7,26	6,77
Chaudière n° 1, avec réchauffeur...	6,92	»	7,17
Chaudière n° 3, sans réchauffeur...	6,29	»	5,57
Chaudière n° 4, sans réchauffeur...	6,68	»	6,01
Moyennes.....	7,00		6,40

Nous reconnaissons, par l'examen de ces chiffres, que la grande grille a été plus favorable que la petite, et que la quantité d'eau vaporisée, par kilogramme de combustible, est alors plus grande de $\frac{1}{10}$ environ.

* Les chiffres qui ont servi à la rédaction de ces tableaux sont, pour la plupart, extraits de la publication industrielle de M. Armengaud, tome IV.

Cette conclusion est plus marquée que celle qui résulte, dans le même sens, des expériences de Wicksteed et de Wye Williams, et nous admettrons, d'une manière générale, que les grandes grilles sont plus favorables que les petites, au moins tant que la quantité de combustible brûlé, par mètre carré de surface de grille et par heure, ne s'abaisse pas au-dessous de 25 kilogrammes.

Il est cependant certain que l'allongement de la grille, en reportant à une plus grande distance, en arrière, une partie de la combustion, ne se prête pas, aussi bien qu'une disposition plus raccourcie, au refroidissement des gaz brûlés. On peut donc considérer cette conclusion comme applicable, *à fortiori*, au cas où les surfaces de chauffe seraient en proportion plus convenable avec les dimensions des grilles.

Nous ferons remarquer, en terminant, que les barreaux employés par M. Cavé ne laissent pénétrer l'air que par des interstices représentant le quart seulement de la surface totale de la grille, et que, par conséquent, les résultats précédents sembleraient acquis pour une consommation de 100 kilogrammes de combustible par mètre carré de surface libre de grille et par heure.

400. Discussion des autres résultats des expériences de M. Cavé.

— En établissant, à d'autres points de vue, des comparaisons entre les résultats qui précèdent, on a été conduit à conclure que les chaudières à bouilleurs étaient moins avantageuses que les chaudières formées seulement d'un corps cylindrique, et que l'influence favorable des réchauffeurs ne laissait pas que d'être importante.

Nous reviendrons ultérieurement sur la question des réchauffeurs, mais nous ne pouvons séparer ce que nous avons à dire de l'influence des bouilleurs, des chiffres qui viennent d'être rappelés et de la description que nous avons donnée des divers générateurs employés par M. Cavé.

401. Influence des bouilleurs. — Si nous réunissons, dans un même tableau, les seuls éléments des expériences précé-

dentes qui puissent être mis en parallèle, pour apprécier les mérites comparatifs des chaudières à bouilleurs et des générateurs cylindriques, nous reconnaissons facilement que nous n'en pouvons déduire que les chiffres suivants :

RÉSUMÉ DES EXPÉRIENCES DE M. CAVÉ

SUR L'INFLUENCE DES BOUILLEURS.

Désignation des chaudières.	Vaporisation par kilogramme de combustible.	
	Chaudières sans bouilleurs.	Chaudières à bouilleurs.
	kil	kil
Chaudières n° 1 et n° 2, sans réchauffeur; surface de grille 1,650.....	8,11	7,45
Chaudières n° 1 et n° 2, avec réchauffeur; surface de grille 0,825.....	7,17	6,88
Chaudières n° 3 et n° 4, sans réchauffeur; surface de grille 1,650.....	6,29	6,68
Chaudières n° 3 et n° 4, sans réchauffeur; surface de grille 0,825.....	5,57	6,01
Chaudières n° 5 et n° 6, avec réchauffeur; surface de grille 1,650.....	6,85	6,37
	6,80	6,70

La différence n'est-elle pas trop minime, pour que l'on puisse en conclure une infériorité quelconque de la chaudière à bouilleurs par rapport à la chaudière cylindrique, alors surtout que nous avons reconnu que la présence des bouilleurs avait éloigné démesurément la chaudière de la grille, et qu'ainsi une portion notable du foyer se trouvait trop écartée des parois de la chaudière pour que la chaleur directe fût aussi favorablement utilisée qu'il est possible.

Les deux figures ci-jointes représentent, l'une, la disposition de l'une des chaudières de M. Cavé, l'autre, celle des chaudières à bouilleurs telles qu'elles sont aujourd'hui employées dans l'industrie. On pourra juger, à leur seule inspection, si l'infériorité générale des chaudières à bouilleurs peut être conclue de la minime différence que nous venons de reconnaître. Dans la première de ces dispositions, fig. 29, le feu est trop éloigné, vers le milieu M de la grille, de la surface de chauffe correspondante; dans la seconde, au contraire, toute cette grille est couverte par les bouilleurs qui sont, en quelque

sorte, baignés dans la flamme, et qui participent, pour une plus grande part, dans l'utilisation totale de la chaudière.

On a pu penser que les nombreux circuits auxquels les chaudières à bouilleurs soumettent les gaz de la combustion ne donnent pas un avantage réel ; mais nous trouvons, au contraire, que les expériences mêmes de M. Cavé mettent en lumière la conséquence opposée. Si ces gaz, en effet, ne pou-

Fig. 29.

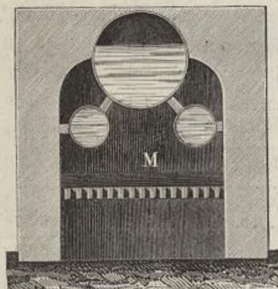
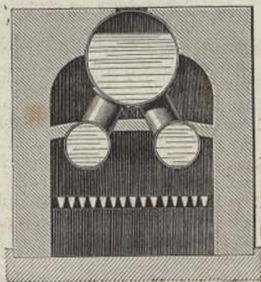


Fig. 30.



vaient rendre aucun service dans les dernières portions de leurs parcours, comment admettre qu'ils pussent encore être bons à quelque chose dans les carneaux du tube réchauffeur ? Et cependant les chiffres précédemment indiqués mettent en évidence leur influence favorable.

Rien donc, dans ces expériences, ne prouve, suivant nous, que les chaudières à bouilleurs soient nécessairement inférieures aux chaudières cylindriques, lorsqu'elles sont bien établies, et surtout lorsque leur surface de chauffe est répartie convenablement. La disposition des bouilleurs a d'ailleurs pour elle la sanction de la pratique ; et, soit que le combustible doive produire un effet plus considérable dans ces sortes de générateurs, soit que ceux-ci présentent, au point de vue de l'entretien et des réparations, de notables avantages, toujours est-il que leur emploi est le plus général en France, et qu'avant l'apparition des chaudières à bouilleurs latéraux, dans lesquels le parcours des gaz est bien plus compliqué

encore, on ne construisait, pour ainsi dire, que la chaudière à deux bouilleurs, pour les machines fixes de quelque importance.

En résumé, nous ne saurions croire que l'augmentation de la surface de chauffe, dans des carneaux successivement parcourus par les gaz de la combustion, puisse, à aucun titre, être considérée autrement que comme éminemment favorable à la bonne utilisation du combustible.

402. *Influence de la température de l'air.* — Si l'air affluent était amené, sous la grille, à une température plus élevée, on pourrait espérer que la combustion s'opérerait d'une manière plus complète. Quelques expériences ont été faites en Alsace pour reconnaître si l'emploi de l'air chaud serait, pour les chaudières à vapeur, d'un résultat aussi avantageux que pour les fourneaux à fer.

Les chiffres de ces expériences, ainsi que les dessins des appareils employés, ont été publiés par M. Albert Schlumberger, dans un rapport fait à la Société industrielle de Mulhouse.

Avant d'arriver sous la grille, l'air appelé par la cheminée était obligé de parcourir, dans la cheminée même, une série de tubes recourbés où il s'échauffait aux dépens de la température des gaz brûlés. Les résultats les plus importants sont ceux qui ont été obtenus, avec cette disposition, chez MM. Dollfus-Mieg et C^e, avec de la houille de Gemonval.

La marche a été observée pendant quatre journées successives, alors que le foyer était alimenté avec de l'air froid; on a, de cette manière, constaté la consommation journalière moyenne; puis, pendant quatre jours encore, on a porté l'air, avant son accès sous la grille, à des températures successivement croissantes. Les consommations sont indiquées dans le tableau suivant :

Température de l'air. ambiante.	Houille brûlée.	Consommations comparatives.
	7072	1,00
50°	5980	0,84
101°	5750	0,81
120°	5636	0,79
130°	5395	0,76

Il résulte, de ce tableau, que la consommation a diminué dans une proportion notable à mesure que la température de l'air augmentait, et que, pour celle de 130° , la consommation se trouvait réduite jusqu'aux $\frac{2}{3}$ de celle observée avec l'air froid.

Dans d'autres expériences faites chez MM. André Kœchlin et C^{ie}, et rapportées également par M. Albert Schlumberger, la substitution de l'air chaud aurait fait baisser la consommation de 1.00 à 0.69; mais, même dans ce dernier cas, on n'aurait encore vaporisé que $5^{\text{kil.}}$ 70 d'eau par kilogramme de combustible. Nous ne savons si les appareils de M. Dollfus-Mieg étaient dans des conditions défectueuses, sous le rapport de la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de combustible; mais il résulterait, tout au moins, de ces indications, que, quand un fourneau est établi dans des conditions telles qu'il donne une faible vaporisation par kilogramme de houille brûlée, on peut espérer, de l'emploi de l'air chaud, une amélioration notable.

Il importe d'ailleurs de faire remarquer qu'il y a toujours moyen d'améliorer le rendement d'un mauvais appareil; et les résultats fournis par une première application ne deviennent vraiment concluants que s'ils se trouvent confirmés sur des appareils donnant déjà, par eux-mêmes, des résultats avantageux. Si la plupart des procédés préconisés par leurs inventeurs étaient plus généralement soumis à cette méthode de contrôle, on reconnaîtrait, bien plus souvent, leur impuissance, dès les premières vérifications auxquelles ils donneraient lieu.

III. Expériences sur les chaudières non tubulaires.

403. *Étude générale des résultats d'expériences sur les chaudières à vapeur.* — Au lieu d'étudier séparément l'influence de telle ou telle circonstance sur l'utilisation du combustible, dans les chaudières à vapeur, étude qui présente de nombreuses difficultés, au point de vue des constatations elles-mêmes, et au point de vue des appréciations à en faire, nous

avons pensé que nous pourrions examiner, avec plus de fruit, la question dans son ensemble, en établissant, pour chaque genre de chaudière, les rapports qui sont admis dans la pratique, entre les dimensions de ses diverses parties, et en constatant, pour chacun d'eux, les résultats auxquels l'expérience directe conduit.

Nous verrons ainsi quel est le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille que la pratique a indiqué comme préférable, et nous enregistrerons en même temps toutes les données que nous pourrions rencontrer sur l'utilisation du combustible, sur la rapidité de la combustion, et sur la circulation des gaz brûlés dans les carneaux et dans les cheminées.

Nous résumerons ensuite les résultats de ces observations générales, de manière à en tirer des règles pratiques, suffisantes pour guider l'ingénieur et le constructeur dans leurs dispositions de détail.

Notre premier examen portera sur les chaudières non tubulaires.

404. *Anciennes expériences de M. Albert Schlumberger.* — On trouve, dans le 10^e volume du *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, l'indication de quelques résultats de vaporisation obtenus, vers 1835, dans divers établissements.

La moyenne de la vaporisation, par kilogramme de combustible, est de 5^{kil},37, ainsi qu'il résulte du tableau suivant; mais les houilles employées donnaient lieu à une abondante formation de scories, et l'on obtiendrait un chiffre supérieur en défalquant ces scories de la consommation réelle : on arriverait ainsi à une puissance moyenne de vaporisation de 6^{kil},40 par kilogramme de combustible réellement brûlé, et les écarts seraient bien moindres; tant il est vrai que les variétés de houille employées dans les foyers des chaudières à vapeur ne diffèrent véritablement entre elles, sous le rapport de leur effet utile, que par la plus ou moins grande proportion des matières inertes qu'elles renferment.

ANCIENNES EXPERIENCES DE M. ALBERT SCHLUMBERGER.

Usines dans lesquelles les essais ont eu lieu.	Désignation des générateurs.	Désignation de la houille.	Pression dans la chaudière.	Combustible brûlé.	Eau vaporisée.	Poids des cendres.	Température de l'eau d'alimen- tation.	Proportion de scories dans la houille.	Eau vaporisée par kilogr. de combustible.
MM. André Kœchlin et C ^{ie}	Chaud. de 20 chevaux à basse pression...	Ronchamp, 0,5 1 ^{re} qual.; 0,5 2 ^e qual.....	1 atmosph.	kil. 362	kil. 1425	kil. 105	° 10	0,29	kil. 3,92
Schlumberger (blan- chisserie).....	Chaudière cylindri- que en cuivre.....	Idem.....	Idem.	300	1600	60	10	0,20	5,33
Kœchlin et C ^{ie}	Chaudière cylindri- que en fonte, avec 2 bouilleurs en tôle	Idem.....	Idem.	362	1738	76	10	0,21	4,80
» »	Idem.....	Sarrebruck, 0,50 menu; 0,50 gros.....	3 atmosph.	3375	20700	440	80	0,13	6,02
» »	Idem.....	Sarrebruck, 0,67 menu; 0,33 gros.....	Idem.	3100	18800	353	80	0,11	6,06
» »	Idem.....	Sarrebruck, 0,50 menu; 0,50 gros.....	Idem.	3950	21300	497	10	0,12	5,39
» »	Idem.....	Saint-Etienne, menu...	Idem.	3400	20500	395	90	0,11	6,03
» »	Idem.....	Saint-Etienne, menu...	Idem.	3900	20300	439	10	0,11	5,20
» »	Idem.....	0,33 Saint-Etienne; 0,67 Ronchamp.....	Idem.	3800	21400	710	Chaude.	0,18	5,55
Moyenne.....									5,37

403. *Expériences de M. Wicksteed sur les chaudières en tombeau.* — M. Wicksteed a résumé, dans le travail que nous avons déjà cité, les dimensions comparatives d'une chaudière en tombeau, qui a été expérimentée à l'établissement des eaux de Londres (*East London water works*), et qui avait été construite par Bolton et Watt; nous rapporterons toutes ces dimensions à ce qu'elles seraient, par rapport au mètre carré de surface de grille, ainsi qu'il suit :

	m.q.
Surface de la grille.....	3,47
Surface libre de la grille.....	0,347
Surface directe de chauffe, exposée à la radiation.....	3,75
Surface totale de chauffe.....	54,70
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille....	15,76
Rapport entre la surface de chauffe et la surface libre de grille.	157,60

On a brûlé, dans le fourneau de cette chaudière, 184^{kg},5 de petit charbon de Newcastle, et on a vaporisé, par heure, 1540 kilogrammes d'eau. Ces résultats peuvent être inscrits de la manière suivante :

	kil
Kilogrammes de charbon par heure.....	184,50
Kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de surface de grille.....	53,80
Kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de surface libre de grille.....	538,00
Kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	3,37
Kilogrammes d'eau vaporisée par heure.....	1540,00
Eau vaporisée par heure et par mètre carré de surface de chauffe	28,15
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	8,35

Ces chiffres donnent une appréciation assez exacte des circonstances de la marche des chaudières en tombeau, lorsque les gaz de la combustion parcourent une longueur totale représentant à peu près trois fois la longueur de ces chaudières : dans cet exemple, la longueur totale des carneaux était de 24 mètres, pour une longueur de chaudière de 7^m,37.

On verra, du reste, par les données suivantes, établies d'après la moyenne prise sur huit autres chaudières du même système, combien peu ces chiffres varient.

Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	13	,13
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille et par heure	51 ^{kg}	,90
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe et par heure.....		3,95
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure.	30	,53
Longueur des circuits parcourus par les gaz.....	21 ^m	,21
Kilogrammes d'eau vaporisée par kilogramme de charbon du Lancashire ou de Newcastle.....	7	,75

Les autres emprunts que nous pourrions faire aux citations de M. Wicksteed nous fourniraient des indications analogues.

On peut résumer les indications qui précèdent en disant que l'emploi de ces sortes de chaudières se trouve, en quelque sorte, caractérisé par les quelques chiffres qui suivent :

Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille et par heure.....	50 à 60 kilogr.
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe et par heure.....	3 à 4 —
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.	15 à 20 —
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure.....	25 à 30 —

Ces chiffres caractéristiques sont ceux que nous cherchons à déterminer pour les différents systèmes de chaudières à vapeur que nous passerons successivement en revue : nous verrons qu'ils ne diffèrent pas, autant qu'on pourrait le supposer, d'un système à l'autre.

406. Expériences de M. Wicksteed sur les chaudières cylindriques à foyer intérieur. — Ce système de générateurs a été très-peu employé en France, où les chaudières à bouilleurs ont prévalu ; on en rencontre encore cependant dans les anciennes installations faites, dans différents établissements, par des constructeurs anglais.

M. Wicksteed a indiqué les dimensions de plusieurs de ces générateurs sur lesquels des expériences ont été faites ; c'est sur eux qu'il a constaté la vaporisation de 8^{kg},3 d'eau par kilogramme de combustible que nous avons citée précédemment.

	m. q	m. q	m. q	m. q
Surface de grille.....	1,705	1,705	1,696	1,819
Surface libre de la grille.....	0,364	0,364	0,363	0,381
Parcours total des carneaux...	25,60	25,50	25,60	24,80
Surface de chauffe.....	74,40	74,20	74,5	73,2
Surface de chauffe directe.....	3,07	2,96	2,94	3,07
Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille.....	43,61	43,51	43,93	40,29
Rapport de la surface de chauffe à la surface libre de la grille.	204,40	203,90	203,55	192,13

La dimension des grilles étant nécessairement limitée par le diamètre du tube à feu, on voit déjà que l'on donnait, dans ces sortes de générateurs, de plus grands vides à la grille. La proportion de ces vides par rapport à la surface totale de la grille s'élève en moyenne à 0,23, tandis qu'elle n'était souvent, dans les chaudières de Watt, que de 0,10; cette proportion a, du reste, toujours été en augmentant depuis lors.

Les résultats généraux observés sur ces chaudières cylindriques sont les suivants :

Kilogrammes de charbon par mètre carré de surface de grille et par heure.....	44,76
Kilogrammes de charbon par mètre carré de surface libre et par heure.....	192,44
Kilogrammes de charbon par mètre carré de surface de chauffe et par heure.....	1,04
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	8,68
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	8,35

Les corps de chaudières avaient environ 8 mètres de longueur, et l'on voit que la surface de chauffe était proportionnellement plus considérable que dans les autres systèmes. Aussi la vaporisation, par mètre carré de surface de chauffe, est-elle très-faible; les surfaces offertes au refroidissement de la fumée étant d'ailleurs très-grandes, le combustible devait être très-bien utilisé.

Nous caractériserons l'emploi de ces chaudières cylindriques à foyers intérieurs par les indications suivantes :

Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	40 à 45
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille et par heure	45 kil.
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe et par heure	1 kil.
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure..	8 kil.

Ce dernier chiffre donne lieu à une observation importante. On est généralement disposé à considérer comme peu favorables les chaudières qui vaporisent peu par mètre carré de surface de chauffe, tandis que l'opinion contraire serait beaucoup mieux motivée : si la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe est faible, cela tient, la plupart du temps, à ce que cette surface est très-grande et, par conséquent, dans les meilleures conditions pour refroidir les gaz de la combustion. C'est donc vers ce résultat qu'il faut tendre, en se limitant toutefois par les conditions de dépenses et de difficulté d'installation qui, dans l'étude d'un projet, doivent être prises aussi en sérieuse considération.

407. Chaudières cylindriques à foyer extérieur. — Ces chaudières ne sont guère utilisées que pour les usines qui ont besoin d'une très-petite quantité de vapeur par heure, 150 à 200 kilogrammes au plus. Les données relatives aux générateurs de ce système sont assez bien représentées par celles qu'a recueillies M. Cavé sur la chaudière n° 1, dont nous avons parlé, en rendant compte des expériences de ce constructeur, avec emploi de la grille la plus petite.

Surface de grille.....	0 ^{m.2} ,825
Surface libre de la grille.....	0,206
Rapport de la surface libre de la grille à la surface totale....	0,25
Surface de chauffe totale.....	12,50
Rapport de la surface de chauffe à la surface de la grille.....	15,15
Kilogrammes de charbon brûlés par mètre carré de surface de grille et par heure.....	50
Kilogrammes de charbon brûlés par mètre carré de surface libre de grille et par heure.....	180
Kilogrammes de charbon par mètre carré de surface de chauffe	4
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	30 ^{lit}

On sait d'ailleurs que, dans ces expériences, la vaporisation produite par kilogramme de combustible, s'est élevée, en moyenne, à 7^{lit},8 environ. Toutes ces données se rapprochent beaucoup de celles qui résultent des expériences de Wicksteed sur les chaudières en tombeau ; et, en effet, la chaudière est placée, de la même façon, dans le foyer, qui agit sur elle dans des conditions à peu près identiques.

Cette disposition de chaudière est particulièrement employée pour l'utilisation des gaz des hauts fourneaux, et pour cette application, on leur donne souvent jusqu'à 15 mètres de longueur.

403. *Expérience sur une chaudière cylindrique à un seul bouilleur inférieur.* — Nous avons eu l'occasion de faire une expérience sur cette disposition de générateur, qui ne s'emploie non plus que pour une production de vapeur limitée à 150 ou 200 kilogrammes par heure; elle offre l'avantage de donner, sous un petit volume, une surface de chauffe beaucoup plus favorable.

Les gaz de la combustion enveloppent d'abord le bouilleur inférieur et font ensuite le tour de la chaudière, avant de se rendre dans la cheminée.

Voici les chiffres que nous avons recueillis sur une de ces chaudières :

Surface de la grille.....	0 ^{m.4} ,320
Surface libre de la grille.....	0 ,114
Rapport de la surface libre de la grille à la surface totale.	0 ,356
Surface de chauffe totale.....	6 ,76
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de la grille	21 ,13
Charbon brûlé par mètre carré de surface de grille.....	54 ^{kil} ,30
Charbon brûlé par mètre carré de surface libre de grille...	139 ,00
Charbon brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	2 ,57
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	22 ,48
Eau vaporisée par kilogramme de charbon.....	8 ,74

Dans cette expérience, on alimentait avec de l'eau chauffée, dans une cuve exposée à l'air libre, par un serpentin dans lequel circulait la vapeur d'échappement de la machine.

En comparant ces chiffres avec les précédents, on reconnaît que le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille est 21 au lieu de 15, et que le charbon brûlé par mètre carré de surface de chauffe n'est plus que 2,57 au lieu de 4.

Nous ajouterons, pour nous en servir par la suite, quelques indications sur les dimensions de la cheminée, par rapport aux autres données de la question.

Hauteur de la cheminée.....	17 ^m ,30
Diamètre de la cheminée à la bouche.....	0 ^m ,265
Section de la cheminée à la bouche.....	0 ^m ,054
Charbon brûlé par mètre carré de section de la cheminée	317 ^{kg} ,94

Ces indications supplémentaires sont importantes à connaître au point de vue des éléments nécessaires au calcul de la dimension des cheminées et des carneaux.

409. Expériences sur diverses chaudières à deux bouilleurs inférieurs. — L'emploi de deux bouilleurs inférieurs a été, pendant plusieurs années, presque exclusif dans l'installation des machines à vapeur. Nous avons rassemblé, sur plusieurs de ces chaudières, des renseignements analogues à ceux que nous avons déjà donnés pour quelques autres systèmes; et, pour établir la comparaison entre eux, nous rappelons, en même temps, les indications relatives à la chaudière à bouilleurs, n° 2, de M. Cavé, avec grille de 0^m,825, et avec réchauffeur.

RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

FAITES SUR PLUSIEURS CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES AVEC DEUX BOUILLEURS INFÉRIEURS.

	Chaudière expérimentée par M. Cavé.	Chaudière de M. Carillion à Paris.	Générateur faisant partie d'un groupe de 3 chaudières à la glacière de Montluçon*.
	m.q.	m.q.	m.q.
Surface de la grille.....	0,825	0,256	1,28
Surface libre de la grille....	0,208	0,102	0,61
Rapport de la surface libre à la surface totale.....	0,25	0,40	0,48
Surface de chauffe totale....	32,18	5,00	34,13
Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille	37,79	19,10	26,67
Combustible brûlé par heure.	46,24	17,00	166,00
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de sur- face de grille.....	56,00	66,35	129,61
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de sur- face libre de grille.....	222,30	167,00	272,13
Charbon brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	1,43	3,40	4,86
Eau vaporisée par heure....	318,00	99,28	980,00
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	21,00	19,80	28,73
Eau vaporisée par kilo- gramme de houille.....	6,88	5,84	5,90

* Ces expériences spéciales ont été faites, à notre demande, par M. Pihet fils, sous-directeur de cet établissement.

Les deux derniers générateurs doivent être considérés comme ayant une surface de chauffe insuffisante, par rapport à la surface de grille, puisque la quantité de vapeur produite dépasse 25 kilogrammes par mètre carré.

Pour la petite chaudière de M. Carillion, la cheminée a 19 mètres de hauteur, sa section au sommet est $0^m,1599$; et, par suite, la quantité de houille brûlée, par heure et par mètre carré de section de cheminée, ne dépasse pas 106,32.

Une expérience intéressante a été faite sur ce générateur : les vides formés par les barreaux avaient primitivement une largeur de 10 millimètres, par suite d'un talon de 5 millimètres, existant de chaque côté de la tête des barreaux, qui avait au total une largeur de $0^m,025$: on avait donc, pour proportion de surface libre, $0,010 : 0,025 = 0,40$. On a plus tard enlevé l'un des talons de chaque barreau, de sorte que le vide entre chaque barreau s'est trouvé réduit à $0^m,005$, et la proportion de vide à $0,005 : 0,020 = 0,25$. La consommation de houille s'est abaissée, par suite de ce changement, dans une proportion notable, ce qui démontre l'avantage des barreaux minces et surtout de l'existence de vides nombreux, répartis uniformément sur la grille : on comprend en effet que l'accès de l'air est alors plus multiplié, et que la combustion doit se faire, sur toute l'étendue de la surface, avec plus de régularité.

410. *Observations sur l'inconvénient de surmener les chaudières.* — Nous avons vu que la vaporisation, par mètre carré de surface de chauffe, était, pour la chaudière de Montluçon, beaucoup trop grande, sans doute parce que le tirage était trop actif. M. Pihet a bien voulu faire la même expérience de consommation sur une autre chaudière entièrement semblable et isolée. Le feu a été conduit de manière à ne brûler que 70 kilogrammes de houille par mètre carré de surface de grille : les résultats ont été notablement différents, et sont résumés dans les chiffres qui suivent, parmi lesquels on n'a pas cru qu'il était nécessaire de reproduire ceux qui ne sont

relatifs qu'aux dimensions, restées les mêmes, de la chaudière et du fourneau.

	kil.
Combustible brûlé par heure.....	91,00
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de grille.....	71,10
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	2,65
Eau vaporisée par heure.....	461,37
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	13,50
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	5,07

411. Chaudière à 2 bouilleurs de M. Durenne, à l'Exposition de 1855. — Au nombre des chaudières que nous avons fait installer à l'Exposition universelle de 1855, se trouvait une ancienne chaudière à 2 bouilleurs, construite par M. Durenne. Quoiqu'elle ne fût pas neuve, elle a donné, dans nos expériences du jury, de très-bons résultats, et ces résultats doivent être signalés, avec le plus grand soin, en faveur de l'opinion générale, qui classe les chaudières à bouilleurs inférieurs parmi les meilleurs appareils de vaporisation.

En outre des deux bouilleurs, cet appareil était muni d'un réchauffeur latéral, amenant l'eau d'alimentation à une température assez élevée, avant son introduction dans le générateur; le combustible employé était du charbon de Mons, de très-bonne qualité.

	m.q.
Surface de grille.....	2,09
Surface libre de grille.....	0,84
Proportion de la surface libre à la surface totale.....	0,40
Surface de chauffe totale.....	47,32
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	22,64
Combustible brûlé par heure.....	133,20
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille et par heure.....	63,50
Combustible brûlé par mètre carré de surface libre de grille et par heure.....	158,57
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	2,81
Eau vaporisée par heure.....	999,00
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	21,07
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	8,10

Ce rendement considérable n'a été atteint par aucune autre des grandes chaudières de l'exposition, fonctionnant dans les conditions ordinaires; nous donnerons ultérieurement les résultats d'expériences plus récentes faites sur la chaudière

Molinos et Pronnier et sur la chaudière Zambeaux, qui, à l'Exposition, avaient produit respectivement $9^{\text{kl}},30$ et $8^{\text{kl}},10$ de vaporisation par kilogramme. La chaudière Durenne de l'Exposition ne contenait pas moins de 3200 litres d'eau.

On doit considérer la vaporisation de $21^{\text{kl}},07$ par mètre carré de surface de chauffe comme tout à fait normale, et beaucoup de chaudières à bouilleurs sont dans des conditions analogues ; il y aurait sans doute avantage à la réduire encore, en augmentant le rapport entre la surface de chauffe et celle de la grille.

412. *Expériences de M. Marozeau sur les chaudières à 3 bouilleurs de Wesserling.* — M. Marozeau a rédigé, en 1849, le précis des expériences qu'il a faites sur les appareils de vaporisation des usines de MM. Gros Odier Roman et C^{ie}, à Wesserling. Ces appareils, comme la plupart de ceux employés en Alsace, étaient des chaudières à 3 bouilleurs, dont les dimensions mêmes se rapprochent beaucoup de celles du générateur qui a servi de point de comparaison dans les expériences faites, 10 ans plus tard, par la Société industrielle de Mulhouse.

Le corps principal de chacune des chaudières expérimentées avait un diamètre de $1^{\text{m}},215$, et une longueur de 6 mètres. Chacun des 3 bouilleurs avait $0^{\text{m}},45$ de diamètre et $6^{\text{m}},70$ de longueur.

Trois tubulures de $0^{\text{m}},195$ de diamètre établissaient la communication entre la chaudière et chacun des bouilleurs correspondants.

La fumée, après avoir passé sous les bouilleurs, et circulé autour de la chaudière, se rendait dans une chambre spéciale, qu'elle traversait de haut en bas, et qui renfermait 4 serpentins en fonte, réunis entre eux par leurs extrémités inférieures et leurs extrémités supérieures, et dans lesquels l'eau d'alimentation s'échauffait à l'aide de la température élevée des gaz brûlés ; les serpentins avaient un diamètre extérieur de $0^{\text{m}},10$ et un développement moyen de 176 mètres ; leur surface de chauffe, y compris celle du réservoir auquel

ils aboutissaient, était de 66 mètres carrés; ils contenaient avec le réservoir 1540 kilogrammes d'eau.

La température moyenne de la fumée, avant et après son passage dans la chambre des serpentins, a été déterminée avec soin par M. Marozeau; de 180° elle tombait à 75°, abandonnant ainsi 105° à l'eau des appareils d'alimentation; la température de cette eau s'élevait de 27 à 93°, soit de 66°. Disons, en passant, que, par la connaissance de ces diverses températures, M. Marozeau a pu calculer approximativement le volume d'air dépensé par chaque kilogramme de houille. Voici donc encore un exemple de refroidissement des gaz par des appareils spéciaux, et cette fois sans tube de fumée.

Les résultats obtenus par M. Marozeau ont été très-satisfaisants sous le rapport de la quantité d'eau vaporisée par chaque kilogramme de combustible, ainsi qu'on peut le voir par les chiffres suivants :

Surface de la grille $1^m,50 \times 1^m,30$	$1^{m^2},95$
Surface libre de la grille	$0^{m^2},65$
Proportion de la surface libre de la grille	0 ,33
Surface de chauffe	$33^{m^2},00$
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille	16 ,92
Combustible brûlé par heure	$53^{kil},20$
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille	$27^{kil},28$
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface libre de grille	$81^{kil},84$
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe	$1^{kil},61$
Eau vaporisée par heure (moyenne générale de 4 séries d'expériences)	$380^{kil},38$
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe	$11^{kil},52$
Eau vaporisée par kilogramme de combustible	$7^{kil},15$
Nature du combustible	Houille de Ronchamp.

Ces chiffres indiquent que les feux étaient peu poussés; la proportion entre la surface de chauffe et la surface de grille, était à peu près la même que pour toutes les chaudières à bouilleurs, un peu plus favorable cependant. Si l'on avait compté, dans cette surface, les 66 mètres carrés des réchauffeurs, on serait arrivé à 3^k,84 pour la vaporisation par mètre carré, c'est-à-dire bien au-dessous de toutes nos autres déterminations; c'est ce qui explique le refroidissement exceptionnel de la fumée dans ces expériences.

Elles démontrent d'ailleurs que la fumée peut être amenée jusqu'à une température très-basse, lorsqu'on dispose de surfaces refroidissantes assez grandes. Le système tubulaire résout le problème, sous le moindre volume; le système des bouilleurs latéraux ne peut y parvenir qu'au moyen d'un très-grand développement donné aux générateurs, et en immobilisant, pour ainsi dire, de très-grands emplacements.

Il est bon d'observer que la cheminée commune desservait deux générateurs et qu'elle avait les dimensions suivantes :

Hauteur de la cheminée.....	32 ^m ,00
Section au sommet.....	1 ^m ,00
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée..	106 ^{kg} ,00

Les dimensions de la cheminée étaient évidemment exagérées, même pour une consommation de 200 kilogrammes, à laquelle on pouvait atteindre, en certaines circonstances.

415. *Chaudières à 3 bouilleurs de MM. Dollfus, Mieg et Cie.* —

Une chaudière du même genre a servi de point de comparaison, dans les essais très-complets que la Société industrielle de Mulhouse vient d'exécuter, pour apprécier les différents systèmes présentés au concours qu'elle avait ouvert.

Il sera souvent question de ce générateur, et il importe par conséquent de le décrire en détail. Il est complètement figuré dans la planche 150 du bulletin de cette société. Le corps principal est d'un très-grand diamètre, 1^m,20, et sa longueur n'est pas en proportion convenable avec cette dimension : en la mesurant, suivant l'axe, d'une calotte à l'autre, elle est de 5^m,450.

Les 3 bouilleurs sont du diamètre de 0^m,40, et leur longueur commune est de 5^m,500. Cette chaudière a été installée par M. Meyer en 1842; elle fonctionne industriellement depuis cette époque, à laquelle on ne donnait pas encore, aux générateurs, une si grande surface de chauffe que celle à laquelle on a recours aujourd'hui. Les carneaux sont d'ailleurs beaucoup trop larges pour une bonne utilisation de la chaleur développée par la combustion, et la plupart des chaudières

à deux bouilleurs sont maintenant établies dans des conditions beaucoup plus favorables sous ce rapport.

Quoi qu'il en soit, voici les éléments principaux des expériences, très-nombreuses et très-prolongées, dont on trouve le détail dans le rapport du concours :

Surface de la grille.....	1 ^m , 32
Surface libre de la grille.....	0 ^m , 29
Proportion de la surface libre à la surface totale.....	0, 22
Surface de chauffe directe.....	2 ^m , 48
Surface de chauffe totale.....	27 ^m , 25
Rapport de la surface de chauffe à la surface de la grille.....	19, 70
Rapport de la surface de chauffe à la surface libre de la grille..	94, 00

En rectifiant quelques-uns des chiffres, qu'un calcul de moyenne avait un peu modifiés dans le rapport, les circonstances du fonctionnement se trouvent définies comme il suit :

Quantité de combustible brûlé par heure.....	117 ^{kil} , 36
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	88 ^{kil} , 10
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface libre de grille.....	404 ^{kil} , 70
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	4 ^{kil} , 31
Eau vaporisée par heure.....	787 ^{kil} , 52
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	28 ^{kil} , 90
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	6 ^{kil} , 71

Le combustible consistait en houille de Ronchamp, dont nous avons indiqué la composition au n° 161.

La vaporisation par mètre carré de surface de chauffe, est encore supérieure à 25 kilogrammes, et l'on aurait, sans aucun doute, obtenu une meilleure utilisation, si ce générateur avait été plus allongé, et si les carreaux avaient épousé davantage les formes mêmes des parois à chauffer.

Nous devons dire d'ailleurs, que les bouilleurs n'étaient réunis au corps principal que par une seule tubulure et que cette disposition nous paraît éminemment vicieuse, au point de vue du dégagement facile de la vapeur formée et peut-être de la sécurité.

414. Avantages relatifs des chaudières à bouilleurs inférieurs.

— Le grand avantage des chaudières à bouilleurs inférieurs

consiste en ce que les bouilleurs seuls peuvent recevoir l'action directe de la flamme et, par conséquent, être *brûlés* par cette action.

Les dépôts se font surtout dans les bouilleurs, qui sont plus résistants, et par conséquent moins sujets à se détériorer. Ces bouilleurs peuvent être ouverts par la partie antérieure, au moyen d'un trou d'homme, et l'on peut facilement voir toute leur surface intérieure, la nettoyer, la *piquer* lorsque les dépôts sont adhérents, et ainsi maintenir l'appareil en bon état d'entretien.

Enfin, la propriété la plus importante de ces chaudières à bouilleurs consiste en ce que ces tubes peuvent facilement se détacher du corps principal, dans le foyer même, être enlevés au dehors par la porte de ce foyer, sans qu'il soit nécessaire de démolir le fourneau, mais en retirant seulement quelques-unes des briques composant les cloisons spéciales aux bouilleurs; le remplacement d'un bouilleur par un autre peut ainsi s'effectuer en très-peu de temps, presque sans chômage, et la durée du corps de chaudière se trouve indéfiniment prolongée.

Lorsqu'on emploie des eaux moyennement incrustantes, la préférence est donc parfaitement justifiée en faveur des chaudières à bouilleurs inférieurs; et, parmi les différents systèmes, nous croyons que l'emploi de deux bouilleurs seulement, doit surtout être recommandé: les carneaux sont alors plus étroits; la chaleur est mieux utilisée, et la surface de chauffe est suffisante, si la longueur totale est assez grande.

Le diamètre des bouilleurs varie de 0^m,40 à 0^m,60; celui du corps cylindrique de 1 mètre à 1^m,20. Le contour d'une section transversale faite dans la surface de chauffe se compose alors

1 ^o De la moitié de la circonférence du cylindre	1 ^m ,57 à 1 ^m ,88
2 ^o De deux circonférences de bouilleurs.....	2 ^m ,51 à 3 ^m ,76
Total.....	4 ^m ,08 à 5 ^m ,64

Et si l'on donne, au système, une longueur totale de 6 à 8 mètres, on a, pour mesure de la surface totale,

$$24^m.9,48 \text{ à } 45^m.9,12,$$

sans compter toutefois les fonds du cylindre et des bouilleurs.

Ces surfaces conviennent parfaitement à des grilles de 1^m,10 à 1^m,30, et des appareils de ces dimensions fourniront, en service courant, à raison de 20 kilogrammes par mètre carré de surface de chauffe, de 500 à 900 kilogrammes de vapeur par heure. On trouve en général que ces dimensions conviennent à la plupart des opérations et on répètera ces types ou des types intermédiaires, un nombre de fois suffisant pour répondre aux besoins de l'usine à établir.

Une autre raison, qui doit engager à limiter les dimensions des chaudières et à en augmenter, de préférence, le nombre, quand on a besoin d'une production considérable de vapeur, c'est qu'il devient plus facile et moins dispendieux d'en arrêter une, alternativement, pour la nettoyer, et qu'alors, avec le chômage d'un moindre appareil et des pertes de chaleur moins considérables, on opère toutes les réparations.

415. Résumé sur les chaudières à bouilleurs inférieurs. — Si nous réunissons, dans un même tableau, les indications les plus importantes que nous ayons recueillies sur les chaudières précédentes, nous en concluons facilement les limites entre lesquelles varient les divers éléments.

	Chaudière Fouché.	Chaudière Cavé.*	Chaudière de Montluçon.	Chaudière Dollfus- Mieg.	Chaudière Durenne.	Chiffres pratiques.
Rapport de la surface de chauffe à la surface de la grille.....	21,13	37,79	26,67	29,70	22,64	25 à 30
Charbon brûlé par mèt. carré de surface de grille.....	54,30	56,00	129,61	88,00	63,50	60 à 70
Charbon brûlé par mèt. carré de surface de chauffe.....	2,57	1,43	4,86	4,31	2,81	2 à 3
Eau vaporisée par mèt. carré de surface de chauffe.....	22,48	21,00	28,73	28,90	21,07	20

* On sait que cette chaudière était placée dans des conditions telles que sa surface de chauffe était mal utilisée.

En écartant ceux de ces résultats qui correspondent à une faible utilisation du combustible, nous sommes conduits à indiquer les chiffres de la dernière colonne comme ceux qui conviennent le mieux aux générateurs à bouilleurs inférieurs. Ces indications suffiront pour calculer immédiatement les dimensions convenables pour un générateur dont le pouvoir de vaporisation aurait été fixé *à priori*.

416. Expériences sur diverses chaudières à bouilleurs latéraux. — L'emploi des bouilleurs latéraux semble se répandre beaucoup, depuis quelques années, et nous verrons en effet, que cette disposition présente de grands avantages quant aux propriétés incrustantes des eaux, dont on est souvent obligé de se servir pour l'alimentation des générateurs.

Nous établissons le parallèle suivant entre quelques chaudières à bouilleurs latéraux.

	Chaudière Farcot du dépôt, à 4 bouilleurs latéraux.	Chaudière Farcot du Conservatoire, à 3 bouilleurs latéraux.	Chaudière Lecointe à Busigny, à 2 bouilleurs latéraux.
Surface de grille.....	0,84	0,387	1,00
Surface libre de la grille.	0,32	0,116	0,35
Surface de chauffe du corps principal.....	10,00	3,04	8,635
Surface de chauffe des bouilleurs.....	29,00	10,86	21,681
Surface de chauffe totale.	39,00	13,84	30,316
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	46,43	35,70	30,32
Combustible brûlé par heure.....	40,39	23,50	35,71
Combustible brûlé par heure et par mètr. carré de surface de grille....	48,00	60,36	35,71
Combustible brûlé par heure et par mètr. carré de surface libre de grille.	125,00	201,58	70,00
Combustible brûlé par mètr. carré de surface de chauffe.....	1,04	1,70	0,90
Eau vaporisée par mètr. carré de surface de chauffe et par heure...	7,64	14,45	9,30
Eau vaporisée par kilogramme de charbon...	7,42	8,51	6,70

Pour compléter ces indications, nous donnerons également les chiffres relatifs aux cheminées de deux de ces générateurs.

Hauteur de la cheminée.....	36 ^m ,26	27 ^m ,00
Section de la cheminée.....	0 ^m ,90	0 ^m ,09
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée.....	44 ^{kil} ,09	261 ^{kil} ,11

Dans les chiffres du tableau qui précède, on doit surtout remarquer que la quantité de combustible brûlé, par heure et par mètre carré de surface de chauffe, varie entre 1 et 2 kilogrammes; elle est beaucoup moindre que pour les chaudières à bouilleurs ordinaires; aussi la quantité d'eau vaporisée, par mètre carré de surface de chauffe, est-elle toujours très-faible, ce qui démontre que les gaz se refroidissent beaucoup dans ces sortes d'appareils. Mais ce qui surtout recommande l'emploi des bouilleurs latéraux, c'est la formation des dépôts dans les bouilleurs, presque à l'exclusion du corps principal. Cette propriété nous permettra de faire des remarques intéressantes au point de vue des moyens à employer pour éviter les incrustations.

417. *Chaudière à 2 bouilleurs latéraux de l'exposition de 1855.* — M. Farcot qui a été le promoteur des chaudières à bouilleurs latéraux, en avait placé jusqu'à 4 dans l'installation du dépotoir, mais la pratique lui a appris que deux bouilleurs étaient suffisants, et il en réduit l'application à ce nombre dans toutes les nouvelles installations dont il est chargé.

L'appareil de ce système, qu'il avait présenté à l'exposition de 1855, a fonctionné parallèlement avec celui de M. Durenne, à bouilleurs inférieurs, et il a donné des résultats identiques, pour des dimensions très-peu différentes, ainsi qu'on en jugera par les chiffres suivants, qui présentent un intérêt d'autant plus grand que la comparaison a été suffisamment prolongée, et qu'elle a été faite dans des con-

ditions absolument semblables, quant au tirage et à la nature du combustible.

Surface de la grille.....	1 ^{m. 4}	,70
Surface libre de la grille.....	0	,64
Proportion de la surface libre par rapport à la surface totale de la grille.....	0	,38
Surface de chauffe totale.....	50 ^{m. 4}	,00
Rapport de la surface de chauffe à la surface de la grille.....	29	,82
Combustible brûlé par heure.....	123 ^{kg}	,00
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	72 ^{kg}	,35
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface libre de grille.....	192	,00
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	2 ^{kg}	,46
Eau vaporisée par heure.....	984	,00
Eau vaporisée par heure et par mètre carré de surface de chauffe	19 ^{kg}	,68
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	8 ^{kg}	,00

La chaudière Durenne avait donné une utilisation de 8^{kg},10, mais il ne serait pas possible d'affirmer que la même différence se reproduirait dans un nouvel essai; il faut admettre que ces deux chaudières ont également bien fonctionné, et que leurs dimensions sont l'expression de la meilleure pratique actuelle pour les chaudières de ce genre.

418. Avantages particuliers des chaudières à bouilleurs latéraux. — Le principal avantage des bouilleurs latéraux consiste, ainsi que nous l'avons dit, en ce que les dépôts se forment dans les tubes, presque à l'exclusion du corps principal, et ce fait est tellement important, qu'il suffit pour qu'on doive recommander la disposition qui nous occupe, toutes les fois que les eaux sont très-incrustantes.

On donne maintenant, à ces bouilleurs, une inclinaison dans le sens inverse du chemin que l'eau doit parcourir, avant d'arriver dans le corps cylindrique. De cette manière, l'eau froide arrive au point le plus bas et elle remonte peu à peu dans le bouilleur inférieur, repoussée qu'elle est par la nouvelle eau affluente, jusqu'à ce qu'elle arrive dans le bouilleur supérieur, incliné en sens inverse; on est alors plus assuré que le remplacement de l'eau se fait d'une manière régulière, et qu'ainsi l'eau et les gaz, cheminant dans des directions

opposées, l'eau la plus froide, puisse encore dépouiller les gaz les plus refroidis d'une portion de leur température.

Il ne paraît pas, cependant, que l'influence de ces deux courants contraires, dans l'eau et dans les gaz, soit bien considérable, puisque l'effet utile est à peu près le même que celui des générateurs à bouilleurs inférieurs d'une bonne construction.

Le corps principal, donnant lieu à des dépôts peu abondants, se trouve, par là-même, mis à l'abri d'une détérioration rapide par les coups de feu, auxquels cependant il reste plus exposé que dans la disposition ordinaire. Quant aux bouilleurs, quand on n'en met pas plus de deux, et que, par conséquent, leur communication est établie près de leur bouche, ils peuvent se séparer facilement l'un de l'autre; l'enlèvement de quelques briques est seulement nécessaire pour le démontage de la tubulure qui établit la communication entre le bouilleur supérieur et le principal corps de chaudière.

Le nettoyage des bouilleurs s'opère facilement par la bouche, comme celui des chaudières ordinaires : celui du corps cylindrique est facilité par un trou d'homme, que l'on dispose à la partie inférieure, disposition qui est évitée dans les générateurs à bouilleurs inférieurs, parce que les fragments d'incrustation sortent facilement par les tubulures de ces bouilleurs, et par les bouilleurs eux-mêmes dans lesquels il suffit de les faire tomber.

419. Résumé sur les chaudières à bouilleurs latéraux. — Les conditions d'établissement de ce genre de chaudières peuvent être résumées en quelques chiffres.

Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille...	25 à 40
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille....	60 kil.
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe...	1 à 2
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	15

En adoptant ces indications, on approchera beaucoup de la pratique des meilleurs constructeurs, et l'on obtiendra toujours une très-bonne utilisation du combustible.

420. *Comparaison entre les chiffres obtenus par divers chauffeurs.* — La Société industrielle de Mulhouse avait offert, en 1860, cinq médailles d'argent et trois sommes de 100, de 50 et de 25 francs, aux chauffeurs qui se montreraient le plus habiles dans la conduite d'un même foyer de chaudière à vapeur, alimenté avec la même houille.

Les résultats de ce concours, dans lequel on doit admettre que les chauffeurs étaient très-expérimentés, fournissent une mesure assez approchée des écarts que l'on peut obtenir dans ces conditions, alors que chacun apportait, dans son service, toutes les précautions et toute l'activité dont il était capable. Nous faisons connaître les principaux éléments de ces expériences dans le tableau suivant :

RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES DU CONCOURS DES CHAUFFEURS
A MULHOUSE EN 1861.

Houille totale brûlée, réduite à 12 heures de marche.	Heures de marche réelle.	Pression moyenne.	Litres d'eau à 0°, vaporisés par kil. de houille.	Rapports.	Air introduit par kil. de houille, de la fumée à 0° et à 0,75.	Température de la fumée au registre.
1115 ^{kil}	11 ^h , 47	4 ^{atm} , 3	7,51	1,000	7 ^m , 8	453 ^{°C} .
1140	12, 02	4, 5	7,50	0,998	6, 9	411
1290	11, 17	4, 2	7,08	0,942	7, 1	466
1358	12, 02	4, 3	6,87	0,914	8, 4	484
1819	11, 17	4, 3	6,79	0,904	10, 4	490
1288	12, 00	4, 3	6,76	0,900	6, 4	452
1345	11, 48	4, 0	6,63	0,882	8, 5	459
1321	12, 20	4, 0	6,57	0,874	9, 3	462

La vaporisation par kilogramme de houille brûlée a varié entre 7^{kil},51 et 6^{kil},57; elle montre une différence de treize pour cent entre les rendements extrêmes, et cette différence paraîtra déjà bien grande pour des conditions dans lesquelles on s'était attaché à rendre tous les éléments aussi exactement semblables.

Si le zèle des chauffeurs n'avait pas été stimulé par leur désir de se montrer habiles, il est bien certain que cette différence eut pu s'élever à un chiffre bien plus considérable; et cette expérience comparative est bien faite pour démontrer qu'un bon chauffeur peut, en bien des circonstances, réduire la consommation de 25 pour 100.

IV. Chaudières tubulaires employées pour les machines fixes.

421. Emploi d'une chaudière tubulaire pour machines fixes, à l'exposition de 1855. — Le nombre des chaudières à bouilleurs, présentées à l'exposition universelle de 1855, n'étant pas suffisant pour la consommation de toutes les machines à faire mouvoir, il fut nécessaire de se procurer d'autres générateurs, et celui d'une locomotive fut mis à notre disposition par la Compagnie du chemin de fer de Lyon.

Il fut servi avec le même combustible et il a fonctionné comme les autres chaudières, à l'aide d'une cheminée ordinaire, à laquelle seulement quelques vapeurs perdues aboutissaient.

Voici les données générales des expériences faites sur ce générateur, dont la surface de chauffe était, de beaucoup, la plus grande.

Surface de grille.....	1 ^{m.2} , 12
Surface libre de grille.....	0, 60
Rapport de la surface libre à la surface totale de la grille.....	0, 53
Surface de chauffe totale.....	81 ^{m.2} , 14
Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille.....	72, 45
Combustible brûlé par heure.....	123 ^{kg} , 00
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	109 ^{kg} , 82
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface libre de grille.....	232, 00
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	1 ^{kg} , 52
Eau vaporisée par heure.....	984 ^{kg} , 00
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe et par heure	12 ^{kg} , 13
Eau vaporisée par kilogramme de combustible (coke).....	8 ^{kg} , 00

Dès la première application des chaudières tubulaires aux machines fixes nous voyons que l'utilisation du combustible est la même que pour les bonnes chaudières à bouilleurs; seulement la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe se trouve notablement amoindrie, par suite de l'augmentation du rapport entre la surface de chauffe et celle de la grille.

La proportion de la surface libre de cette grille est d'ail-

leurs notablement plus grande et l'on brûle par mètre carré de grille plus de 100 kilogrammes de houille.

Toute la fumée devant passer par les tubes, il ne sera pas inutile d'examiner leur section totale qui remplace ici celle des carneaux.

Section des tubes (114 tubes de 0^m,045 de diamètre)..... 0^m,1812
 Combustible brûlé par mètre carré de section des tubes.. 679^{kil}.

422. Chaudière tubulaire de M. Nozo aux ateliers du chemin du Nord. — M. Nozo a fait établir en 1854, aux ateliers de la Chapelle, une grande chaudière tubulaire, dont les résultats ont été très-favorables, et sur lesquels il s'appuie pour préconiser l'emploi général des chaudières tubulaires, comme devant remplacer les chaudières à bouilleurs.

Ayant été appelés à expérimenter la machine horizontale de 80 chevaux, à laquelle cette chaudière devait fournir la vapeur, nous avons, lors des essais de réception de cette machine, admiré l'énorme puissance du générateur de M. Nozo, qui pouvait à lui seul produire près de 2000 kilogrammes de vapeur par heure.

Sous le rapport de la production, ce générateur est le plus puissant appareil que nous ayons vu, et le soin apporté à l'agencement de toutes ses parties est des plus remarquables. Nous ne serons pas indiscrets en donnant avec détails les dimensions des diverses parties dont il se compose; il peut être intéressant de pouvoir, sous un volume relativement réduit, concentrer, dans quelque circonstance spéciale, une aussi grande puissance de vaporisation.

En nous bornant en ce moment à considérer en eux-mêmes les résultats qu'on a obtenus avec cette chaudière, nous nous réservons de revenir, un peu plus loin, sur la comparaison entre ces résultats et ceux que M. Nozo a réalisés avec un générateur ordinaire qui a également été employé, pendant un temps assez long, au service de la même machine.

CHAUDIERE TUBULAIRE FIXE

DES ATELIERS DU CHEMIN DU NORD, A LA CHAPELLE.

Longueur du corps de chaudière.....	5 ^m	,000
Diamètre.....	1 ^m	,474
Volume intérieur de la chaudière.....	10 ^{m³}	,700
Volume de l'eau.....	7 ^{m³}	,575
Volume de la chambre de vapeur.....	3 ^{m³}	,125
Boîte à feu.....	Profondeur.....	0 ^m ,784
	Hauteur.....	1 ^m ,578
	Volume.....	1 ^{m³} ,528
Grille.....	Longueur.....	2 ^m ,300
	Largeur.....	1 ^m ,300
	Surface.....	2 ^{m²} ,99
Barreaux.....	Épaisseur.....	0 ^m ,026
	Écartement.....	0 ^m ,012
	Surface libre totale.....	0 ^{m²} ,6791
Gradins.....	Épaisseur.....	0 ^m ,130
	Écartement.....	0 ^m ,040
	Surface.....	0 ^{m²} ,6791
Tubes.....	Longueur.....	5 ^m ,000
	Diamètre intérieur.....	0 ^m ,050
	Diamètre extérieur.....	0 ^m ,055
	Distance horizontale d'axe en axe..	0 ^m ,079
	Distance verticale d'axe en axe...	0 ^m ,080
	Nombre des tubes.....	116
Cheminée.....	Section totale.....	0 ^{m²} ,2276
	Hauteur au-dessus du seuil du foyer.....	31 ^m ,400
	Section.....	0 ^{m²} ,3423
Surface de chauffe....	en haut.....	1 ^{m²} ,6733
	en bas.....	1 ^{m²} ,6733
	Boîte à feu.....	15 ^{m²} ,40
	Tubes.....	90 ^{m²} ,86
	Boîte à fumée.....	0 ^{m²} ,36
Totale.....	106 ^{m²} ,62	

Après avoir indiqué les dimensions des diverses parties de cet appareil, nous résumerons, dans la même forme que précédemment, les indications qui caractérisent le mieux les conditions du fonctionnement de ce générateur.

Surface de grille.....	2 ^{m²}	,99
Surface libre de la grille.....	8 ^{m²}	,6791
Rapport entre la surface libre de la grille et sa surface totale.....	0	,23
Surface de chauffe totale.....	106 ^{m²}	,62
Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille.....	35	,32
Combustible brûlé par heure.....	204 ^{kg}	,36
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille.....	68 ^{kg}	,63
Combustible brûlé par mètre carré de surface libre de grille.....	300 ^{kg}	,00
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	1 ^{kg}	,92
Eau vaporisée par heure.....	1757 ^{kg}	,00
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	17 ^{kg}	,62
Eau vaporisée par kilogramme de charbon (houille menue).....	8 ^{kg}	,60

Ces résultats se rapprochent beaucoup des précédents.

Quant au passage des gaz brûlés, par les différents conduits dans lesquels ils circulent, le calcul conduit à ces chiffres complémentaires :

Combustible brûlé par mètre carré de section de tubes...	897 ^{kg} ,93
Combustible brûlé par mètre carré de cheminée.....	597 ^{kg} ,00

Depuis l'établissement de ce générateur, la Compagnie du Nord a fait construire un grand nombre de chaudières tubulaires pour machines fixes, et plusieurs constructeurs, imitant en cela l'exemple de M. Nozo, les ont beaucoup préconisées : il est donc nécessaire d'examiner dans quelle mesure cette tendance nous semble motivée, et de dire ce que nous pensons de l'emploi comparé des deux systèmes.

425. Système tubulaire de MM. Molinos et Pronnier. — Ces habiles ingénieurs se sont occupés, surtout au point de vue de la suppression de la fumée, des moyens à employer pour assurer la complète combustion de tous les éléments que renferme la houille ; ils la brûlent en vases clos au moyen de l'insufflation mécanique d'une quantité d'air suffisante, qui afflue sous la grille, au-dessus de la grille et jusque dans les tubes, où la combustion s'achève. Dans leur foyer la flamme est plus longue ; elle pénètre jusqu'à une grande distance, dans les tubes ; elle atteint, d'une manière utile, des parties de la surface, qui ne sont pas exposées à la radiation du foyer, et qui se transforment véritablement en surface de chauffe directe, sous cette influence. L'agitation incessante, produite par l'insufflation dans toutes les parties du foyer, doit évidemment avoir pour résultat de mettre les gaz combustibles en plus fréquent contact avec l'air nécessaire à la combustion.

Une première chaudière de ce système a fonctionné pendant toute la durée de l'exposition de 1855 ; une autre chaudière vient d'être expérimentée par la Société de Mulhouse.

Nous mettons en regard les résultats obtenus dans ces deux essais, suffisamment prolongés.

	Chaudière de l'exposition de 1855.	Chaudière des expériences de Mulhouse.
Surface de grille.....	0 ^m ,65	1 ^m ,23
Surface libre de la grille.....	0 ,37	0 ^m ,63
Rapport entre la surface libre et la surface totale de la grille.....	0 ,50	0 ,51
Surface de chauffe totale.....	24 ^m ,69	49 ^m ,36
Rapport entre la surface de chauffe et la sur- face de la grille.....	30 ,00	40 ,21
Combustible brûlé par heure.....	83 ^{kil} ,00	100 ^{kil} ,40
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	129 ^{kil} ,69	81 ^{kil} ,62
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface libre.....	224 ,00	159 ,37
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	3 ^{kil} ,37	2 ^{kil} ,03
Eau vaporisée par heure.....	750 ^{kil} ,00	736 ^{kil} ,95
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	30 ^{kil} ,37	14 ^{kil} ,90
Eau vaporisée par kilogramme de combustible	9 ^{kil} ,10	7 ^{kil} ,34
Nature de la houille.....	Charleroy.	Ronchamp.

En ce qui concerne le parcours de la fumée, voici les données les plus importantes sur la chaudière de Mulhouse :

Section totale des tubes (132 tubes de 0 ^m ,04 de diamètre).	0 ^m ,1658
Combustible brûlé par mètre carré de section de tubes et par heure.....	605 ^{kil} ,00
Section de la cheminée.....	0 ^m ,1963
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée.	511 ^{kil} ,00

L'appareil de MM. Molinos et Pronnier fonctionne d'une manière fort régulière et leur système serait tout à fait pratique, si l'on n'avait à lui reprocher d'exiger l'emploi d'un ventilateur, qu'il est difficile de faire agir pendant l'allumage, alors cependant que l'on est privé du tirage direct d'une cheminée suffisante. Nous verrons, en parlant des divers moyens de tirage, que la dépense de travail exigée par le ventilateur est assez faible; seulement l'opération du chargement est plus compliquée, en ce qu'il faut arrêter le ventilateur toutes les fois que l'on ouvre la porte du foyer.

Au reste la fumivortité est presque complète, aussitôt que le ventilateur est en fonction, et les résultats sont, sous ce rapport, très-concluants.

A l'exposition, la chaudière Molinos et Pronnier avait fourni

un rendement plus favorable qu'aucune autre ; à Mulhouse elle a fonctionné tout aussi bien que les appareils présentés en concurrence.

Si l'on compare les deux séries d'expériences, on remarque que l'excessive activité donnée à la combustion en 1855, n'a pas été recherchée par ces ingénieurs au concours de 1859 : la quantité de combustible brûlé, par mètre carré de surface de grille, s'est abaissé de 127^{kil},79 à 81^{kil},62, et, par rapport au mètre carré de surface de chauffe, de 3^{kil},37 à 2^{kil},03. Ils se rapprochent ainsi des conditions normales de fonctionnement des générateurs ordinaires, ce qui tendrait à démontrer que l'agitation produite par l'insufflation ne devrait pas prendre une allure plus vive que celle qui résulte du tirage direct des cheminées. Comme appareil tubulaire, la chaudière de MM. Molinos et Pronnier doit d'ailleurs avoir sa part des avantages et des inconvénients de l'emploi des tubes.

424. *Chaudière tubulaire verticale de M. Zambeaux.* — M. Zambeaux a notablement amélioré l'emploi des tubes verticaux, en les entourant, dans sa chaudière, d'une double enveloppe cylindrique qui force les produits de la vaporisation à s'infléchir avant de pénétrer dans le réservoir de vapeur. Une partie de l'eau entraînée retombe alors dans la chaudière, et la vapeur, beaucoup plus sèche, est ainsi d'un meilleur emploi dans le cylindre de la machine.

La chaudière tubulaire verticale est très-simple, d'une installation facile ; les incrustations seules y sont à craindre et nous allons voir, par les résultats, qu'elle fournit une quantité de vapeur satisfaisante.

Nous mettrons en regard les éléments de deux chaudières semblables, présentées par M. Zambeaux, l'une à l'exposition universelle, où nous l'avons expérimentée, l'autre au concours de la Société industrielle de Mulhouse.

	Chaudière de l'exposition de 1855	Chaudière des expériences de Mulhouse.
Surface de la grille.....	0 ^{m²} , 1075	1 ^{m²} , 22
Surface libre de la grille.....	0 ,0430	0 ,37
Rapport entre la surface libre et la surface totale	0 ,40	0 ,30
Surface de chauffe totale.....	9 ,526	89 ,00
Surface de chauffe directe.....	0 ,785	7 ,25
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de la grille.....	78 ,92	72 ,95
Combustible brûlé par heure.....	19 ^{kg} , 00	95 ^{kg} , 36
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	176 ,75	78 ,16
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface libre de grille.....	442 ,00	257 ,57
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	2 ,00	1 ,07
Eau vaporisée par heure.....	157 ,70	720 ,90
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	16 ,55	8 ,10
Eau vaporisée par kilogramme de combustible	8 ,30	7 ,56
Nature de la houille.....	Mons.	Ronchamp.

Ces chiffres nous indiquent d'abord que, pour la chaudière de Mulhouse, M. Zambeaux a employé des surfaces de chauffe plus grandes que celles dont on fait habituellement usage dans les chaudières tubulaires; mais la comparaison établie entre les deux modèles aura pour nous un enseignement plus important. De même que MM. Molinos et Pronnier, M. Zambeaux s'est trouvé conduit à modifier, avec l'expérience, les allures de son fourneau, de manière à ne brûler que 78 kilogrammes par mètre carré de surface de grille. Il s'est ainsi rapproché des allures ordinaires, et son appareil ne deviendra pratique qu'à cette condition.

Cet appareil a du reste fourni, dans l'une et l'autre circonstance, des résultats très-favorables, et il peut être recommandé comme réalisant, dans de bonnes conditions, une application du principe de la chaudière tubulaire, meilleure peut-être que celle des machines locomotives, dans lesquelles une grande hauteur de corps n'est pas praticable.

Les données relatives aux passages de fumée sont intéressantes à constater pour la chaudière de Mulhouse.

Hauteur de la cheminée.....	16 mèt.
Section de la cheminée $\frac{\pi}{4} \times 0,50^2 =$	0 ^m .4,196
Section des 216 tubes.....	0 ^m .4,39
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée	537 ^{kg} ,55
Combustible brûlé par mètre carré de section de tubes..	244,52

De l'ensemble de toutes les indications fournies par les expériences, dont il vient d'être rendu compte, on peut conclure que les proportions des chaudières tubulaires verticales peuvent être calquées sur celles des chaudières tubulaires ordinaires.

On commence à les employer, d'une manière plus fréquente, en Angleterre et en Amérique, pour le service des pompes à incendie; et elles seraient également d'un bon usage, toutes les fois que la mise en vapeur devrait être très-prompte.

423. Chaudière présentée par M. Prouvost au concours de la Société industrielle de Mulhouse.— Cette chaudière, dont il a déjà été question, n'a pu être rangée parmi celles que nous avons étudiées sous différents titres, parce qu'elle tient à la fois des appareils à bouilleurs et des appareils tubulaires. Le corps de chaudière est cylindrique et horizontal; la grille est placée à l'avant de ce corps, comme dans les chaudières horizontales sans bouilleurs; à un niveau inférieur à celui de cette grille se trouve un autre corps cylindrique, de même dimension que le premier, mais garni à l'intérieur de 145 tubes; les gaz de la combustion entourent ce cylindre et reviennent ainsi à l'avant de la chaudière, pour se rendre ensuite à la cheminée en passant par les tubes. On comprend que, par cette disposition, M. Prouvost se soit procuré une surface de chauffe considérable, et qu'il ait dû parvenir à refroidir beaucoup les gaz de la combustion.

Le principal corps de chaudière avait 1 mètre de diamètre et une longueur de 5^m,90; le cylindre à tubes n'avait qu'une longueur de 3^m,40.

Les données relatives à cet appareil se résument dans les chiffres suivants :

Surface totale de la grille.....	1 ^{m. q.}	,80
Surface libre de la grille.....	0	,86
Rapport de la surface libre à la surface totale.....	0	,48
Surface de chauffe directe.....	2	,35
Surface de chauffe totale.....	103	,24
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille	57	,00
Combustible brûlé par heure.....	99 ^{kil.}	,75
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille..	55	,42
Combustible brûlé par mètre carré de surface libre.....	116	,00
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe..	0	,96
Eau vaporisée par heure.....	738	,16
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	7	,15
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	7	,40
Nature du combustible.....	Houille de Ronchamp.	

Voici d'ailleurs les données relatives au mouvement des gaz.

Hauteur de la cheminée.....	20 ^{m.}
Section de la cheminée (diamètre 0 ^{m.60}).....	0 ^{m. q.} ,2827
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée	350 ^{kil.}
Section des tubes (145 tubes de 0 ^{m.05} de diamètre)....	0 ^{m. q.} ,2847
Combustible brûlé par mètre carré de section des tubes.	350 ^{kil.}

On voit qu'au point de vue de la combustion, cette chaudière était placée dans des conditions ordinaires, puisqu'elle a brûlé seulement 55^{kil.},42 par mètre carré de surface de grille; au point de vue de l'étendue de la surface de chauffe, elle se rapproche des chaudières de locomotives, et elle ne vaporise que 7^{kil.},15 par mètre carré; cette surface est donc exagérée, et cependant le rendement a été très-satisfaisant, bien que le passage des gaz dans les tubes, après qu'ils ont agi sur leur enveloppe, ne soit peut-être pas déterminé de la manière la plus rationnelle.

Ces gaz ont été refroidis jusqu'à 185 degrés, et il ne peut être douteux pour personne que ce refroidissement aurait pu être opéré par une augmentation convenable de surface de chauffe sous toute autre forme, sans que pour cela l'utilisation du combustible fut modifiée. Comment admettre, après ce fait, la supériorité absolue des chaudières simplement tubulaires; nous verrons d'ailleurs que ce refroidissement peut effectivement se réaliser par tout autre mode, et cette question paraîtra dès lors hors du domaine de la discussion.

Il est nécessaire de mentionner, pour mémoire, l'existence de deux tubes d'alimentation, placés latéralement et au niveau de la grille; ces tubes supplémentaires avaient un diamètre de 0^m,30 et une longueur de 4^m,50; ils ont été comptés dans l'évaluation de la surface de chauffe; eu égard à leurs dimensions, ils n'entrent que pour une très-faible proportion dans l'effet total.

426. Résumé relatif aux chaudières tubulaires employées pour les machines fixes. — Sous la réserve des observations qui précèdent, nous pouvons maintenant indiquer, d'après l'expérience, les données nécessaires pour construire des chaudières tubulaires à usage de machines fixes, en supposant que le tirage soit presque exclusivement produit par la cheminée: l'étude, que nous nous proposons de faire au même point de vue, sur les générateurs des machines locomobiles, nous indiquera l'influence qu'exerce à cet égard l'échappement de la vapeur dans les cheminées.

Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille...	70	à 80 kil.
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe...	1,5	à 2
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	12	à 20
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.	35	à 50

Quant aux sections des tubes et de la cheminée, elles peuvent être définies par les indications qui suivent :

Combustible brûlé par mètre carré de section de tubes.....	300 à 500 ^{kil.}
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée..	500 ^{kil.}

Connaissant la quantité de vapeur à produire, on en déduira la surface de chauffe, puis successivement la surface de grille, la section totale des tubes et celle de la cheminée.

427. Expériences comparatives de M. Nozo au chemin de fer du Nord. — Dans une note insérée dans les comptes rendus de la Société des ingénieurs civils, séance du 6 octobre 1854, M. Nozo annonce qu'il a fait marcher successivement, avec une chaudière à bouilleurs et une chaudière tubulaire : 1° une machine locomotive, installée à poste fixe dans les ateliers du

chemin de fer du Nord ; 2° une machine fixe ordinaire. Les surfaces de chauffe étaient pour les deux générateurs de 72 mètres carrés environ.

Les consommations, par jour de marche, ont été les suivantes : 2474 kilogrammes de houille pour le système des chaudières à bouilleurs ; 1794,56 de coke pour la chaudière tubulaire ; M. Nozo réduit cette dernière consommation à 1435,65, par suite de cette considération que le coke ne donnerait que 0,8 de la chaleur dégagée par la houille ; il arrive ainsi à une économie de

$$\frac{2474 - 1435,65}{2474} = 0,42.$$

La valeur calorifique du coke comparée à celle de la houille est loin d'être déterminée avec précision, et il faudrait, en même temps, connaître les surfaces de grille et surtout l'état d'entretien des carneaux et des surfaces sur lesquelles la vaporisation se produisait.

Ces résultats ont paru très-remarquables, mais quand on compare une nouvelle disposition avec une ancienne, on obtient fréquemment des résultats relatifs trop favorables, parce qu'on ne tient pas compte de l'influence de la vétusté ; et nous avons vu qu'en ce qui concerne les chaudières à vapeur, la présence des incrustations peut réduire l'effet utile dans une proportion considérable.

L'opinion émise à cette époque par M. Nozo s'est d'ailleurs modifiée chez lui depuis 1854. Dans une note plus récente, datée de 1858, il dit textuellement :

« Il est très-probable que l'économie qu'on retirerait ne serait pas moindre d'un cinquième, en la supposant dans le rapport des chiffres de rendement, en effet utile, des deux espèces de générateurs. »

Il s'exprime ailleurs en ces termes :

« La machine horizontale, à détente variable et sans con-

densation, des ateliers du chemin de fer du Nord, consomme, par cheval de travail effectif, tantôt $3^{\text{kl}},2$ de poussier de charbon de Charleroi, tantôt $1^{\text{kl}},6$ du même poussier, selon qu'elle est alimentée par un système de générateurs à bouilleurs, présentant 80 mètres carrés environ de surface de chauffe, ou par un générateur tubulaire présentant une surface de chauffe de 108 mètres. Mais ici les différences s'expliquent facilement, soit par la différence des surfaces de chauffe, soit parce que le poussier de charbon doit se brûler plus complètement sur une grille de locomotive que sur une grille ordinaire, où elle ne peut être accumulée sous une assez grande épaisseur. »

Les expériences faites par M. Nozo ayant été exécutées avec un grand soin, il ne sera pas sans intérêt d'indiquer ici les dimensions des deux générateurs à bouilleurs qui, considérés comme formant un seul appareil de vaporisation, ont servi à ces expériences.

Grille....	{	Surface totale.....	$4^{\text{m}},16$
		Section de passage d'air.....	1,85
		Rapport de la section du passage d'air à la surface.	0,43
Surface de chauffe...	{	Directe.....	13,33
		Indirecte.....	66,67
		Totale.....	80,00
Diamètre intérieur des corps cylindriques.....			1,00
Capacité totale en eau et vapeur.....			$18^{\text{m}},300$
Volume d'eau au niveau moyen.....			14,174
Volume de vapeur au niveau moyen.....			4,128
Surface d'évaporation au niveau moyen.....			$14^{\text{m}},00$
Nombre de cylindrées disponibles en marche normale.....			31,00
Section d'entrée d'air.....			1,60
Section de passage à travers la grille.....			1,85
Longueur de la chaudière.....			$7^{\text{m}},30$
Section du carneau conduisant à la cheminée.....			$0^{\text{m}},27$
Section inférieure de la cheminée.....			2,13
Section supérieure de la cheminée.....			0,34
Hauteur de la cheminée.....			$27^{\text{m}},00$
Température moyenne des gaz abandonnés.....			420°
Vitesse moyenne des gaz dans la cheminée.....			3,20
Rapport de la section du passage de la grille à celle du carneau			5
Rapport de la section de passage de la grille à celle de la cheminée, en haut.....			0,55
Rapport de la surface de la grille à la surface de chauffe.....			0,052
Rapport de la section de passage à la surface de chauffe.....			0,022

Voici maintenant les résultats détaillés des constatations numériques.

EXPÉRIENCES DE VAPORISATION SUR LES CHAUDIÈRES A BOUILLEURS
DU CHEMIN DE FER DU NORD.

Dates des expériences.	Combustible pesé. *	Combustible corrigé. **	Eau mesurée.	Eau corrigée. ***
Lundi, 25 janvier 1858.	3300 ^{kil}	2720 ^{kil}	13867 ^{lit}	12870 ^{lit}
Mardi, 26.....	2800	2220	15928	14930
Mercredi, 27.....	2750	2170	15611	14610
Jeudi, 28.....	2650	2070	15239	14240
Vendredi, 29.....	2700	2120	15456	14460
Samedi, 30.....	2700	2120	15167	14170
Lundi, 1 ^{er} février 1859.	2950	2370	16611	15610
Mardi, 2.....	2750	2170	16177	15180
Mercredi, 3.....	2750	2170	15889	14890
Jeudi, 4.....	2600	2120	14912	13910
Vendredi, 5.....	2650	2070	14734	13730
Samedi, 6.....	2650	2070	14856	13860
		26390		172460

La moyenne générale de tous ces essais conduit à une vaporisation moyenne de 6^k,53 par kilogramme de combustible; mais de nouvelles expériences ont ensuite conduit à un chiffre plus élevé, ainsi qu'on peut le voir par le tableau suivant, qui est relatif à la même chaudière, légèrement modifiée pour l'installation d'appareils fumivores.

	Kilogrammes de combustible.	Kilogrammes d'eau vaporisée.
22 mars 1858	2700	9750 matin
23.....	2420	»
24.....	2350	9490 matin
25.....	2380	6870 soir
27.....	»	8710 soir
29.....	2520	9290 matin
30.....	2370	6580 soir
31.....	2270	8520 matin
1 ^{er} avril....	2270	8890 soir
2.....	2370	9650 matin
3.....	2070	9040 soir
Moyennes...	2370	17360

* Le charbon employé consistait en gaillette de Mons, contenant beaucoup de poussier et pouvant être considérée comme du bon tout venant.

** Chaque soir, excepté le samedi, on couvrait le charbon avec 400 kil. de poussier. Les résidus du cendrier ont été tantôt rejetés dans le foyer, tantôt estimés à vue, à cause de leur peu d'importance: leur poids, estimé en charbon neuf, ne s'élevait pas à plus de 40 kil. par jour.

On estime que, pendant les 14 heures de repos de la machine, on dépensait inutilement 10 kil. de charbon par mètre carré de grille et par heure.

Par toutes ces raisons on a diminué de 580 kil. la consommation de charbon pesé, dans la troisième colonne des tableaux.

*** On a retranché environ 1000 litres qui représentent le chiffre de vaporisation pendant la nuit.

On trouve ici une vaporisation moyenne de 7,7 kilogrammes d'eau par kilogramme de combustible, et ce chiffre est encore bien différent de celui de 9^{kil},7, qui a été obtenu, à la même époque, avec la chaudière tubulaire que nous avons décrite au n° 422, et surtout de celui de 11 kilogrammes, qui a été atteint dans quelques circonstances.

Toutes ces indications ne provenant que de notes isolées, qui nous ont été communiquées à l'occasion d'expériences que nous avons exécutées, nous-mêmes, sur la machine motrice des ateliers, n'ont pas le caractère de certitude que nous aurions désiré, mais on admet aujourd'hui, d'une manière générale, que, si l'on peut compter, avec les chaudières tubulaires, sur une vaporisation de 9 à 10 kilogrammes d'eau par kilogramme de combustible, la vapeur formée est généralement moins sèche que celle qui provient des grands générateurs à bouilleurs.

La publication récente d'un travail de M. Chavès, dans les Mémoires de la Société des ingénieurs civils, donne, aux résultats principaux, une consécration qui ne nous permet pas de les passer sous silence.

Les expériences de M. Chavès, cependant, tout en étant favorables aux chaudières tubulaires, n'ont donné, dans aucune circonstance, des chiffres de vaporisation aussi considérables que ceux du grand générateur de la Chapelle Saint-Denis.

428. *Expériences de M. Chavès au chemin de fer du Nord.* — M. Chavès a, sous sa direction, sur toute la ligne du Nord, le service de l'eau nécessaire aux diverses stations. Suivant les circonstances, cette eau est fournie à bras d'hommes ou par une machine à vapeur, et le travail, auquel nous nous proposons d'emprunter quelques chiffres, a principalement pour objet d'établir une comparaison entre les divers modes employés. Ce n'est qu'accessoirement, et seulement pour un petit nombre de machines à vapeur, que M. Chavès a fait connaître les chiffres de vaporisation, les seuls que nous ayons ici à considérer.

Nous extrayons, du tableau de ses expériences, tout ce qui se rapporte à cet objet.

TABLEAU DES RESULTATS DES EXPERIENCES DE M. CHAVES,
QUANT A LA VAPORISATION PRODUITE AVEC DIFFERENTS SYSTEMES DE GENERATEURS.

Désignation des générateurs.	Surface de chauffe totale. m. q.	Durée des expériences. h.	Combustible brûlé en kilogr. kil.	Nature du combustible.	Vaporisation par kil. de combustible. kil.	Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe et par heure. kil.
1° Générateurs non tubulaires.						
Corps cylindrique et 2 bouilleurs latéraux.	6,04	9,51'	180	"	6,25	3,33
Idem.	6,04	10, 0	197	Houille de bonne qualité.	5,20	3,26
Idem.	6,04	7, 6	168	Mélange de coke et de poussier.	4,84	3,91
Idem.	6,04	8, 0	140	Idem.	4,40	2,90
Idem.	6,04	8,45	134	Houille ordinaire.	4,35	2,55
Idem.	6,04	8, 0	120	Houille de bonne qualité.	5,00	2,49
Idem.	6,04	9,25	119	Idem.	4,80	2,11
Idem.	6,04	5,25	110	Poussier de houille.	5,10	3,36
Idem.	6,04	4,50	105	Idem.	5,20	3,87
Idem.	6,04	3, 0	80	Houille de bonne qualité.	5,10	4,41
Idem.	6,04	9,45	155	Houille ordinaire.	4,30	2,63
Idem.	6,04	5, 0	120	Mélange de coke et de poussier.	4,30	4,00
Idem.	6,04	4, 0	115	Mélange de houille et de poussier.	4,55	4,76
Corps cylindrique et 1 bouilleur latéral...	4,00	3, 0	75	Houille de bonne qualité.	4,90	6,25
Idem.	4,00	5,54	70	Mélange de coke et de poussier.	5,00	3,00
Idem.	4,00	3,23	59	Idem.	4,95	4,36
Corps cylindrique seul.....	3,90	3,27	27	Houille de bonne qualité.	6,40	2,00
2° Générateurs tubulaires.						
Chaudière tubulaire ordinaire.....	4,64	1,25	10	Poussier de houille.	6,40	1,52
Idem.	4,64	3,30	36	Poussier de houille et coke.	6,67	1,55
Idem.	4,64	4, 5	45	Idem.	6,87	2,38
Chaudière tubulaire à retour de flamme.	3,20	4,40	58	Houille ordinaire.	6,40	3,85
Chaudière tubulaire ordinaire.....	3,20	5,35	48	Poussier de houille et coke.	6,75	2,68
Idem.	4,64	5, 0	58	Houille ordinaire.	6,84	2,50
Idem.	4,64	2,12	26	Houille et poussier.	6,72	2,55
Idem.	4,64	2,30	27	Idem.	6,68	2,32
Idem.	8,60	2,40	40	Coke.	7,00	1,74

Ces expériences sont intéressantes en ce qu'elles sont faites en service courant et qu'elles nous rendent un compte exact de ce qui se passe dans le fonctionnement habituel. Elles nous apprennent que, dans ces conditions, la vaporisation a varié, abstraction faite de la nature des combustibles, ainsi qu'il suit :

Chaudières non tubulaires..... 4^{kil.},98

Chaudières tubulaires..... 6 ,70

Rapport..... 1 ,35

* Prenant ces chiffres dans leur ensemble, il en ressort un avantage en faveur des chaudières tubulaires, dans le rapport de 1,35 à 1,00. On pourrait, il est vrai, attribuer les résultats de cette comparaison à ce que les éléments qui les composent sont, l'un et l'autre, peu favorables, et dire qu'on aurait pu tout aussi bien obtenir un résultat inverse.

Nous avons cherché si cette grande différence ne pourrait pas s'expliquer parce que la consommation du combustible aurait été notablement plus grande par chaque mètre carré de surface de chauffe, dans la première série d'expériences que dans la seconde ; c'est pour cela que nous avons calculé les nombres qui forment la septième colonne du tableau précédent ; les moyennes respectives ne diffèrent entre elles que de 3,47 à 2,34 ; il en résulte cependant que les chaudières non tubulaires étaient moins bien disposées, au point de vue de l'étendue de la surface de chauffe, par rapport à chaque kilogramme de combustible brûlé. C'est là un élément important de la question, et sans doute aussi l'influence des cheminées en maçonnerie, à section généralement trop grande, n'a pas été sans importance, quant à l'infériorité de la vaporisation dans les chaudières non tubulaires.

429. *Expériences de MM. Cail et C^e.* — MM. Cail et C^e, qui ont préconisé l'emploi des chaudières tubulaires, n'ont pas négligé de joindre l'exemple au précepte, et ils ont installé, dans

leurs ateliers du quai de Billy, des générateurs à tubes qui ont une surface de chauffe de 200 mètres carrés environ.

Les renseignements qu'ils ont bien voulu nous donner sur la marche de ces appareils indiquent une vaporisation moyenne de 10 kilogrammes d'eau par kilogramme de combustible, et c'est sur ce chiffre qu'ils s'appuient pour recommander l'emploi des chaudières tubulaires, toutes les fois qu'il est possible de les alimenter avec des eaux non incrustantes, et surtout avec celles que l'on recueille, dans les sucreries et dans les distilleries, par condensation.

Les générateurs que nous avons vus dans leurs ateliers sont alimentés par de l'eau ordinaire, débarrassée préalablement d'une partie de ses sels calcaires par une dissolution de baryte ou de chaux. La baryte se précipite à l'état de sulfate et dépouille l'eau, dans laquelle on l'agite, de tout le sulfate de chaux qu'elle contenait; mais ce procédé se traduit par une dépense trop grande, et l'emploi de la chaux, quoique moins efficace, suffit pour des eaux de qualité médiocre.

Tout en faisant usage de ces procédés, MM. Cail et C^{ie} reconnaissent que, si les chaudières tubulaires sont préférables à toute autre, avec des eaux non incrustantes ou épurées, elles sont aussi les plus mauvaises de toutes lorsqu'on peut craindre la formation des dépôts. A notre avis, ces conditions ne sont pas même suffisantes pour déterminer l'emploi des chaudières tubulaires, et nous pourrions citer l'exemple de certaines installations dans lesquelles on a dû y renoncer, même avec de bonnes eaux, soit parce que l'absence de toute chambre de vapeur et celle d'un grand volume d'eau ne permettaient pas de fournir, à un instant donné, une quantité de vapeur plus grande qu'en marche normale, soit parce que la vapeur est plus humide et que ces sortes de chaudières *crachent* souvent.

Lorsque les eaux ne sont pas absolument pures, ou qu'on ne sait pas les épurer, il est indispensable de gratter fréquemment les tubes, de les laver avec une pompe à incendie et de les tenir dans un état d'entretien permanent. Cela ne

revient-il pas à dire qu'il faut avoir à sa disposition des moyens de réparation et de nettoyage, que les chaudières à bouilleurs n'exigent pas au même degré.

450. Expériences de la Société de Newcastle. — En 1854, une Société formée pour la recherche des meilleures houilles à employer pour le chauffage des chaudières de bateaux, a entrepris une série d'expériences, sur des chaudières de diverses dispositions, comparées à une chaudière tubulaire, disposée pour servir de type.

Cette chaudière contenait deux foyers, ayant chacun 0^m,94 de largeur, avec 135 tubes de 1^m,676 de longueur et de 0^m,0762 de diamètre extérieur ; la surface de chauffe totale était de 69^m,580. On a ajouté, à cette chaudière, un réchauffeur offrant une surface supplémentaire de 30 mètres carrés, mais son action n'a déterminé qu'un refroidissement de 25° environ dans la température des gaz de la combustion.

Dans les expériences préliminaires faites avec cet appareil, on a employé successivement une grille de 2,647 mètres carrés et une grille de 1,788. Dans le premier cas, et en faisant abstraction du réchauffeur, le rapport entre la surface de chauffe et la surface de la grille était déjà exprimé par le nombre

$$69,580 : 2,647 = 29,$$

et dans le second par

$$69,580 : 1,788 = 39.$$

Ces rapports sont, l'un et l'autre, très-grands, et cependant le remplacement de la grande grille par la petite s'est constamment traduit par une augmentation très-notable dans l'utilisation du combustible. Ne doit-on pas conclure de ce fait qu'il y a toujours avantage, au point de vue de la meilleure utilisation du combustible, à employer des grilles relativement petites, ainsi qu'on en peut juger par les chiffres suivants :

TABLEAU DES EXPÉRIENCES DE LA SOCIÉTÉ DE NEWCASTLE
SUR LA CHAUDIÈRE TYPE.

	Grille de 2 ^m x 1,647.		Grille de 1 ^m x 1,788.	
	Résultats moyens.	Résultats les plus favorables.	Résultats moyens.	Résultats les plus favorables.
Kilogrammes de houille brû- lés par mètre carré de sur- face de grille et par heure.	kil. 103,20	kil. 92,70	kil. 102,50	kil. 84,20
Vaporisation totale par heure	2117,88	2240,20	1585,86	1636,00
Kilogrammes d'eau vaporisée par kilogramme de charbon	9,11	11,15	10,06	12,58

Ces résultats sont aussi favorables qu'aucun de ceux qui aient été obtenus avec les chaudières tubulaires, et, cependant, une des chaudières présentées au concours a donné des résultats plus favorables encore, et ce fut précisément celle, de M. Wye Williams, qui n'était pas tubulaire.

Il est vrai que cet habile expérimentateur employait des grilles encore plus petites que le chargement du combustible s'opérait avec grand soin, et que les petites ouvertures ménagées dans les portes ne laissaient entrer que la quantité d'air strictement nécessaire à la suppression de la fumée.

Voici les résultats comparatifs obtenus, avec les grilles de dimensions analogues, sur les deux générateurs :

	Chaudière type.	Chaudière Wye Williams.	Chaudière type.	Chaudière Wye Williams.
Surface de la grille en mè- tres carrés.....	2,648	2,044	1,78	1,672
Combustible brûlé par mè- tre carré de grille et par heure.....	kil. 103,20	kil. 131,70	kil. 102,30	kil. 133,60
Eau vaporisée par heure...	2118	2537	1586	2178
Eau vaporisée par kilo- gramme de combustible.	9,41	10,84	10,06	11,30

La commission et l'inventeur avaient, l'un et l'autre, fait tous leurs efforts pour obtenir le meilleur résultat, et l'avantage est, en définitive, resté à la chaudière non tubulaire.

451. *Discussion des résultats comparatifs.* — On voit, par ce

qui précède, que la question est loin de se présenter avec des éléments certains d'appréciation.

Les chaudières tubulaires se mettent plus vite en feu, et, sous ce rapport, elles sont avantageuses; mais, d'un autre côté, elles sont moins abritées contre l'influence des refroidissements, et la perte de chaleur qui en résulte doit exercer aussi son influence.

On pourrait, jusqu'à un certain point, prétendre que la disposition de la boîte à feu permet, dans les chaudières tubulaires, de mieux utiliser la surface de chauffe directe que dans les chaudières à foyer extérieur. Mais l'expérience faite, dans ces derniers temps, à Mulhouse, sur la chaudière de M. Prouvost, prouve que cette différence ne saurait avoir un tel degré d'importance : cette chaudière, en effet, est à foyer extérieur; seulement les gaz de la combustion viennent, après un long parcours, se diviser dans un faisceau de tubes, qui active leur refroidissement.

La chaudière de M. Prouvost ayant produit d'aussi bons résultats que les chaudières tubulaires, il faut nécessairement en conclure que l'influence favorable de la boîte à feu peut être efficacement remplacée par une augmentation suffisante de surface de chauffe indirecte.

Dans le fonctionnement régulier de ce générateur, la température moyenne des gaz, au bas de la cheminée, était la plus faible de toutes, et, par conséquent, la chaleur produite devait y être mieux utilisée que partout ailleurs.

Nous ajouterons à ces indications que, dans de nouvelles expériences faites par M. Burnat sur des chaudières à bouilleurs, il a été parfaitement reconnu que ces chaudières pouvaient être améliorées, d'une manière notable, par l'addition de réchauffeurs à grandes surfaces. Voici comment s'exprime M. Burnat lui-même à ce sujet :

« Une chaudière, à peu près semblable à celle du concours et de même surface, a été munie de six réchauffeurs, offrant une surface de chauffe additionnelle de 44 mètres carrés. Elle a vaporisé 20 pour 100 d'eau de plus que celle du con-

cours, mais avec une consommation d'air de 15 kilogrammes par kilogramme de combustible *.

Cette particularité de la chaudière, d'être ou de n'être pas tubulaire, ne saurait évidemment avoir aucune influence sur la combustion elle-même, et dès lors que cette combustion est réalisée dans de bonnes conditions, il ne reste plus qu'à savoir à quelle température les gaz échapperont à l'action refroidissante des surfaces avec lesquelles ils seront en contact. Tant qu'il n'aura pas été prouvé que la température de ces gaz est moindre, dans les chaudières tubulaires que dans les autres, nous ne saurions accepter, pour certaines, des conclusions qui seraient entièrement défavorables aux chaudières non tubulaires.

Sous ce dernier rapport, il est certain que l'avantage appartient aux chaudières à grande surface de chauffe; et, pourvu que cette surface soit suffisante, nous pensons que les chaudières à bouilleurs sont aussi favorables que les autres; les expériences que nous avons citées, et les résultats obtenus par M. Nozo lui-même, sur sa grande chaudière tubulaire, ne nous permettent pas de croire à une économie de 50 ou de 30 pour 100; il ne nous paraît pas démontré qu'il y ait même une économie quelconque par rapport à des chaudières en bonne marche, et il nous sera facile d'indiquer les conditions dans lesquelles les chaudières tubulaires doivent être nécessairement rejetées.

Les chaudières du système tubulaire coûtent plus comme acquisition et comme entretien: la différence est assez considérable; mais ce motif n'est pas le plus impérieux, dans le choix à faire entre les deux systèmes.

Dans les chaudières à bouilleurs, le nettoyage des carneaux et des bouilleurs est toujours possible, quelque abondantes que soient les incrustations. Dans le système tubulaire, les incrustations sont inévitables et pour ainsi dire irrépara-

* Dans ces nouvelles expériences, la fumée sortait à une température de 150 à 200 degrés.

bles, puisque l'on n'a pas d'accès autour de chacun des tubes dont le faisceau se compose, et les conditions premières de rendement sont bientôt modifiées par suite de la présence des dépôts.

Le grand avantage des chaudières tubulaires réside dans leurs moindres dimensions ; cet avantage est tel qu'elles ont seules permis les nombreuses applications, aujourd'hui usuelles, de la puissance de la vapeur aux machines locomotives et aux machines locomobiles ; elles devront encore être préférablement employées lorsqu'on ne pourra disposer, sans graves inconvénients, d'un local suffisant ; mais il faut absolument, même dans ces circonstances, ne les alimenter qu'avec des eaux dont la pureté soit assez grande, ou naturellement, ou rendue telle par des opérations que nous aurons occasion de décrire, lorsque nous nous occuperons des incrustations.

Pour le service des ateliers, les chaudières à grand volume offrent encore un avantage considérable, au point de vue de la plus grande facilité de la conduite du feu ; l'introduction du combustible frais n'abaisse pas d'une façon aussi gênante la température des parois en briques, qui sont d'un poids considérable, et qui peuvent être considérées comme de véritables régulateurs du foyer ; les charges peuvent alors être moins fréquentes, et, pour de petites chaudières surtout, il n'est pas nécessaire que le chauffeur soit exclusivement employé à ce service.

D'un autre côté, les chaudières tubulaires se mettent en vapeur avec beaucoup plus de rapidité : cette condition sera quelquefois tout à fait décisive, et l'on voit qu'il serait impossible d'accorder d'une manière générale la prééminence à tel ou tel système.

Nous concluons cependant en disant que l'emploi des chaudières à bouilleurs nous paraît être surtout avantageux dans les grandes installations, et qu'il ne conviendra de recourir aux chaudières tubulaires, pour les ateliers, que quand l'une ou l'autre des conditions que nous avons énumérées

indiqueront nettement que leur emploi pourrait être sûrement avantageux sous quelque rapport.

452. Conclusions sur l'application des chaudières tubulaires aux machines fixes. — Dans toutes les indications, que nous nous sommes efforcés de donner, avec la plus grande impartialité, sur les applications des chaudières tubulaires aux machines fixes, nous remarquerons d'abord que le chiffre de la vaporisation, par kilogramme de combustible, est considérable. S'il était démontré que ces chaudières fonctionnent pendant longtemps dans ces conditions; si l'on était également assuré que la vapeur formée est aussi sèche que celle qui se dégage des grands générateurs non tubulaires, il y aurait lieu, sans aucun doute, de conclure à l'emploi général des tubes, même en tenant compte des résultats fournis, au numéro précédent, par la chaudière de M. Wye Williams.

Cependant l'emploi de ces sortes de chaudières exigerait encore que l'on ménageât des chambres de vapeur beaucoup plus grandes, ainsi que le font MM. Farcot et fils, par exemple, toutes les fois que l'on voudrait assurer le fonctionnement régulier d'une grande machine à vapeur.

La présence de ces grands réservoirs de vapeur aurait en même temps pour objet de diminuer la proportion dans laquelle l'eau est habituellement entraînée dans les chaudières tubulaires, et l'on obvierrait, de cette manière, à deux des défauts les plus grands de ces sortes d'appareils.

Si le surchauffage de la vapeur était, depuis plus longtemps, entré d'une manière sérieuse dans la pratique, son application aux chaudières tubulaires amoindrirait, de beaucoup, les reproches que nous sommes fondés à leur faire, en ce qui concerne l'entraînement de l'eau; ce qui nous paraît être une des conditions forcées de la rapidité de l'ébullition sur toutes les parois, et de la sortie immédiate de la vapeur après sa formation. Jusqu'ici le surchauffage de la vapeur n'a pas réussi dans les ateliers; les essais tentés, dans ces derniers temps, au chemin de fer du Nord et dans la marine impériale,

semblent cependant indiquer que l'on approche d'une bonne solution ; mais, dans l'état actuel des choses, les industriels feront bien de n'y avoir recours qu'avec des précautions infinies.

Enfin, les incrustations sont encore plus à craindre dans les chaudières tubulaires que dans les générateurs ordinaires, et nous avons vu que les partisans les plus exclusifs du système tubulaire se garderaient bien de le préconiser, s'ils n'adoptaient en même temps les moyens les plus propres à empêcher la formation des dépôts. Les dispositions qui permettent de nettoyer les tubes, et que nous avons décrites aux nos 267 à 274, auront, à n'en pas douter, une grande influence sur la substitution que plusieurs constructeurs recommandent déjà depuis quelques années.

En industrie, la bonne marche des appareils, la continuité de leur action, sont encore plus importantes qu'une petite économie de combustible ; et, sauf à modifier plus tard nos conclusions, nous nous permettrons de ne pas céder encore à l'entraînement du moment.

Nous ne comprenons l'emploi exclusif des chaudières tubulaires que pour les appareils dans lesquels on est gêné par les conditions d'espace disponible, ou par la nécessité d'un déplacement plus ou moins fréquent ; c'est-à-dire que nous ne les conseillons que pour les machines locomobiles et pour les machines spéciales qu'il est quelquefois nécessaire de placer momentanément dans un atelier. MM. Thomas et Laurens se sont beaucoup occupés, depuis quelque temps, de machines qu'ils appellent *demi-fixes*, dont la puissance varie entre dix et vingt chevaux. Ces machines, construites de manière à utiliser la vapeur dans d'excellentes conditions de pression et de détente, comporteraient très-bien, pour les générateurs auxquels elles sont adhérentes, l'emploi du système tubulaire, pourvu que les tubes fussent amovibles et pussent être fréquemment nettoyés. C'est là un type de machine économique et d'un déplacement facile qui est destiné à entrer, à l'égal des machines locomobiles, dans la pratique générale des ateliers.

V. Chaudières des machines locomobiles.

453. *Résultat des expériences faites sur diverses chaudières de machines locomobiles.* — Les machines portatives, employées primitivement pour les besoins de l'agriculture, et appliquées maintenant à tous les genres de travaux, ont besoin de chaudières d'un faible volume et d'un grand pouvoir de vaporisation. Elles sont presque toutes tubulaires, et leurs principales dimensions ne varient qu'entre certaines limites. Il n'y a de différence essentielle entre elles qu'au point de vue du parcours de la fumée qui, tantôt se rend directement à la cheminée, par les tubes, comme dans les machines locomotives, tantôt revient, en sens contraire de son mouvement primitif, après avoir parcouru toute la longueur de la chaudière dans sa première direction. Dans le premier cas la cheminée est placée à l'extrémité opposée au foyer, dans le second elle prend naissance au-dessus de lui.

Nous avons eu l'occasion d'expérimenter un grand nombre de machines locomobiles, tant aux expositions qu'au Conservatoire, et nous réunissons, dans les tableaux suivants, les données numériques que nous avons constatées. Par suite du peu de temps pendant lequel il a été possible de faire les observations, les chiffres relatifs au concours agricole de 1856 ont moins de certitude que ceux qui résultent des observations, plus complètes, faites au Conservatoire.

454. *Expériences faites sur les machines locomobiles du concours agricole de 1856.* — Nous avons relevé, avec soin, toutes les dimensions importantes des machines locomobiles exposées en 1856 et, dans les expériences auxquelles elles ont été soumises, nous avons pu faire peser le combustible brûlé par chacune d'elles. Nous résumons dans le tableau suivant toutes ces indications.

La quantité d'eau vaporisée n'ayant pas été constatée, nous nous bornons à relever les valeurs maxima et minima de la consommation du combustible, rapportée à la surface de la grille et à la section des tubes et de la cheminée.

TABLEAU DES DONNÉES RELATIVES AUX CHAUDIÈRES DES MACHINES LOCOMOBILES,

A L'EXPOSITION DE 1856.

Noms des constructeurs.	Dimension des grilles.		Surface de grille.	Nombre des tubes.	Diamètre des tubes.	Section totale des tubes.	Hauteur de la chemin.	Diamètre de la chemin.	Section de la chemin.	Charbon brûlé par heure			
	m. q.	m. q.								En kilo- grammes.	par m. q. de grille.	par m. q. de sect. de tube.	par m. q. de sect. de chem.
Calla.....	0,43	0,60	0,258	21	0,060	0,0593	3,40	0,20	0,0314	25,73	99,73	433,89	819,42
Calla.....	0,35	0,52	0,182	15	0,058	0,0396	2,60	0,16	0,0201	17,28	94,94	436,36	859,70
Flaud.....	0,30	0,30	0,090	0	»	0	3,00	0,15	0,0177	9,91	110,11	»	559,90
Lotz fils aîné....	0,40	0,70	0,280	22	0,045	0,0350	4,00	0,25	0,0491	37,48	133,86	2	761,30
Renaud et Lotz...	0,30	0,60	0,180	12	0,080	0,0603	2,80	0,28	0,0615	31,10	172,77	515,75	505,69
Cumming.....	0,50	0,60	0,300	37	0,050	0,0726	2,80	0,20	0,0314	17,57	58,54	242,01	559,55
Burrell.....	0,46	0,61	0,281	32	0,063	0,0997	2,50	0,23	0,0415	»	»	»	»
Duvoir.....	0,40	0,60	0,240	6	0,070	0,0231	2,50	0,21	0,0346	13,49	56,21	583,98	389,88
Duvoir.....	0,40	0,70	0,280	0	»	»	2,50	0,20	0,0314	19,40	69,39	»	617,83
Pérignon.....	0,45	0,55	0,248	10	0,062	0,0302	4,50	0,20	0,0314	17,66	71,20	584,77	562,42
Frey et C ^{ie}	0,44	0,44	0,194	24	0,047	0,0419	2,60	0,17	0,0227	16,63	85,72	396,89	732,60
Hornsby.....	0,40	0,75	0,300	50	0,060	0,1413	2,50	0,28	0,0615	9,30	31,00	219,38	151,38
Barett Exall et C ^{ie} .	0,46	0,82	0,377	59	0,045	0,0938	3,50	0,21	0,0346	13,49	35,81	143,82	389,88
Garett et Fils....	0,45	0,50	0,225	20	0,063	0,0623	3,10	0,22	0,0380	24,60	109,33	394,86	647,37
Tuxford et Fils...	0,25	0,60	0,150	87	0,051	0,1229	3,00	0,26	0,0531	15,59	103,93	126,85	293,59
Ransomes et Sims.	0,55	0,60	0,330	32	0,050	0,0618	3,20	0,22	0,0380	30,22	91,57	488,99	716,32

	Maximum.	Minimum.
Kilogrammes de combustible brûlés par heure et par mètre carré de surface de grille.....	172	31
Kilogrammes de combustible brûlés par heure et par mètre carré de section de tube.....	584	126
Kilogrammes de combustible brûlés par heure et par mètre carré de section de cheminée.....	859	151

Il est à remarquer que les trois minima appartiennent à des locomotives anglaises, les trois maxima à des machines françaises.

Les différences sont assez importantes pour qu'il soit convenable d'en tenir compte, et la plupart des machines anglaises ont donné lieu à des résultats satisfaisants, quant au travail développé.

Dans les foyers des machines locomobiles, il n'est pas avantageux de maintenir un feu très-actif; et, sans descendre jusqu'au chiffre de l'excellente chaudière de Hornsby, il est bon de ne pas dépasser le chiffre de 60 à 70 kilogrammes par mètre carré de surface de grille.

Quant à la cheminée, on voit que la section est partout plus petite que la section libre de tous les tubes réunis.

Nous ferons remarquer que la section des tubes est, en général, le quart de la section de la grille, et que la cheminée réduit souvent cette section à moitié.

435. *Expériences du concours agricole de 1860.* — Dans les expériences du concours agricole de 1860, nous avons plus particulièrement examiné la vaporisation par kilogramme de combustible, et nous verrons, par le tableau suivant, qui résume toutes ces indications, que cette vaporisation a varié de 4^k,76 à 9^k,78, en laissant de côté l'expérience sur la chaudière de M. Falguière, qui a marché très-péniblement pendant toute la durée des essais.

Les deux résultats les plus favorables ont été ceux fournis par la machine de M. Farcot, et par celle de MM. Barbier et Daubrée. Nous donnons, pour quelques-unes d'entre elles, les indications correspondant à celles du concours de 1856.

EXPÉRIENCES DE VAPORISATION SUR LES MACHINES LOCOMOBILES

EXPOSÉES AU CONCOURS AGRICOLE DE 1860.

Noms des constructeurs.	Durée de l'expérience.	Pression moyenne.	Kilogrammes de houille brûlée par heure.	Eau vaporisée par heure.	Eau vaporisée par kilogramme de houille.	Combustible brûlé par force de cheval et par heure.
		atm.		kil.	kil.	kil.
Artige.....	5 ^h 00 ^m	5,64	16,35	160,00	9,78	4,43
Barbier et Daubrée.....	5,30	6,00	18,20	»	»	2,90
Barrett et C ^{ie}	4,37	»	10,87	97,80	9,00	3,61
Breval.....	4,50	5,00	16,96	»	»	3,36
Cail et C ^{ie}	5,10	5,97	14,89	141,00	9,47	3,76
Calla.....	5,00	5,50	29,88	242,00	8,10	3,88
Idem.....	5,00	4,80	21,30	213,00	»	3,77
Cumming.....	5,45	5,80	25,92	166,40	7,42	3,74
Duvoir.....	5,00	5,50	16,19	107,00	6,61	4,11
Falguière et C ^{ie}	4,57	5,00	21,86	66,70	3,14	3,64
Farcot et fils.....	5,00	6,25	12,38	131,23	10,60	2,04
Idem.....	5,00	6,25	15,34	»	»	2,29
Frey.....	5,00	4,62	18,27	111,45	6,10	3,59
Gargan.....	4,37	4,88	21,64	103,00	4,76	4,00
Renaud et Lotz.....	4,55	4,47	20,32	124,00	6,10	3,41
Rouffet.....	5,00	5,50	21,78	128,50	5,90	3,30

Si l'on compare ces chiffres avec ceux du tableau précédent, on voit que la consommation de combustible, par mètre carré de surface de grille et par heure, reste ordinairement au-dessous de 100 kilogrammes, et que la section totale des tubes se rapproche beaucoup de celle de la grille.

456. Expériences faites au Conservatoire des arts et métiers.

— Les expériences que nous avons eu l'occasion de faire, au Conservatoire impérial des arts et métiers, sur plusieurs machines locomobiles, nous ont permis de constater, sur les éléments de la vaporisation, dans les chaudières de ces machines, un grand nombre de chiffres.

Le but de ces expériences était généralement la détermination de la consommation de combustible par force de cheval et par heure ; mais, en laissant, quant à présent, de côté tout ce qui se rapporte à la machine proprement dite, nous trouverons que les résultats se rapprochent beaucoup de ceux qui résultent de nos expériences dans les concours agricoles de 1856 et de 1860.

Dans un premier tableau, nous entrons dans quelques détails sur la construction même de ces chaudières ; dans le second nous nous attachons plus spécialement à faire connaître le chiffre de la vaporisation ; dans l'un et dans l'autre nous avons suivi l'ordre chronologique des expériences.

On verra, par tous ces résultats, que la vaporisation réelle est, en pratique, de 8 à 9 kilogrammes d'eau par kilogramme de combustible, mais ce chiffre comprend, dans tous les cas, la proportion d'eau, plus ou moins grande, qui peut être mécaniquement entraînée.

Quoique le chiffre de vaporisation le plus faible soit celui de la locomobile de MM. Thomas, Laurens et Pérignon, il est à remarquer que cette machine a été, sous le rapport du travail fourni, l'une des plus économiques.

TABLEAU DES DONNÉES RELATIVES AUX CHAUDIÈRES DE MACHINES LOCOMOBILES

EXPÉRIMENTÉES AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS.

Noms des constructeurs.	Surface	Nombre	Diamètre	Section	Diamètre	Section	Charbon	et par mètre carré		
	de grille.	des tubes.	des tubes.	totale des tubes.	de la cheminée.	de la cheminée.	brûlé par heure.	de grille.	de tubes.	de cheminée.
	m.q.		m.	m.q.	m.	m.q.	kil.	kil.	kil.	kil.
Tuxford (appart. au Conservatoire)	0,4778	12	0,060	0,0339	0,215	0,0708	14,00	29,30	415,34	386,77
Cail et C ^{ie}	0,3524	31	0,040	0,0389	0,26	0,0570	30,53*	86,39	782,52	537,67
Cail et C ^{ie}	0,3524	20	0,060	0,0565	0,27	0,0600	34,29	100,14	537,62	527,62
Thomas Laurens et Pérignon....	0,3375	12	0,065	0,0398	0,25	0,0491	30,75	91,11	772,61	626,27
Cail et C ^{ie} (sans roues).....	0,2250	13	0,050	0,0500	0,20	0,0314	19,10	74,90	382,00	608,00
Nepveu et C ^{ie}	0,1890	28**	0,046	0,0183	0,22	0,0389	34,50	182,53	1889,00	907,89
Gargan et C ^{ie}	0,3970	22	0,060	0,0310	0,20	0,0314	28,33	72,63	913,87	902,00
Gargan et C ^{ie}	0,3970	22	0,060	0,0310	0,20	0,031	29,20	74,90	942,00	930,00

* Les essais qui ont fourni ce chiffre moyen ont été faits sans injection de vapeur dans la cheminée.

** 17 de ces tubes ne servent qu'au retour de la flamme.

TABLEAU DES QUANTITÉS D'EAU VAPORISÉES DANS LES EXPÉRIENCES FAITES AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL
DES ARTS ET MÉTIERS,
SUR DES CHAUDIÈRES DE MACHINES LOCOMOBILES.

	Locomobile Tuxford du Conservatoire*.	Locomobile Cail et C ^{ie} avec tubes de 0 ^m ,04.	Locomobile Cail et C ^{ie} avec tubes de 0 ^m ,06.	Locomobile Thomas Laurens et Pérignon.	Locomobile Cail et C ^{ie} . semi portative.	Locomobile Nepveu et C ^{ie} .	Locomobile Gargan et C ^{ie} .
Surface de grille.....	0,4778	0,3524	0,3524	0,3375	0,2550	0,1890	0,397
Surface de chauffe totale.....	5,50	11,80	11,13	8,82	6,67	7,06	11,872
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	11,52	33,48	31,57	26,12	26,16	37,34	29,90
Combustible brûlé par heure.....	14,00	30,53	35,29	30,75	19,10	39,00	29,20
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	29,30	86,39	100,14	91,11	74,90	206,30	73,55
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	1,22	2,67	3,26	3,49	2,86	5,54	2,46
Eau vaporisée par heure.....	130,00	247,00	333,00	211,50	166,90	290,00	220,00
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe	23,82	20,94	29,92	23,99	25,02	41,09	18,44
Eau vaporisée par kilogramme de combustible...	9,28	8,09	9,44	6,88	8,70	7,44	7,56
Nature de la houille.....	Mons.	Mons.	Mons.	Mons.	Mons.	Mons.	Mons.

* Sans échappement de vapeur dans la cheminée.

Sans entrer dans les mêmes détails, nous indiquerons encore les autres chiffres qui nous ont été fournis dans des conditions analogues. En n'omettant aucun de nos résultats, nous ferons mieux connaître les limites entre lesquelles ils peuvent varier dans la pratique.

Eau vaporisée par kilogramme de combustible.

Locomotive Tuxford exécutée en 1857.....	8 ^k , 61
Locomotive Tuxford de 10 chevaux exécutée en 1858.	8 ,40
Locomotive Nepveu de 4 chevaux.....	8 ,09
La même, chauffée avec du coke.....	7 ,60

457. Influence du diamètre des tubes. — Des expériences spéciales ont pu être faites sur la même chaudière locomobile de MM. Cail et C^{ie}, dans laquelle les premiers tubes avaient été reconnus insuffisants; on les a remplacés par des tubes de 6 centimètres de diamètre.

Tous les autres éléments de la chaudière et de la cheminée étaient, pour ainsi dire, restés les mêmes, et il n'y avait, par conséquent, d'autre différence, entre les deux appareils, qu'en ce que les 31 tubes de 4 centimètres de la première construction avaient été remplacés par 20 tubes de 6 centimètres.

La section des tubes se trouvait ainsi

portée de..... 0^m.1,0389 à 0^m.1,0565

La surface de chauffe de ces tubes. . 9^m.1,5400 à 9^m.1,0432

Malgré cette faible différence les conditions de marche ont présenté, dans les derniers essais, un caractère tout différent: l'allumage, très-difficile dans le premier cas, était très-prompt avec les gros tubes. La conduite du feu était beaucoup plus facile et les chiffres suivants mettent parfaitement en évidence l'avantage que présente l'emploi des gros tubes dans la construction des chaudières des machines locomobiles.

EXPÉRIENCES COMPARATIVES SUR LA MACHINE LOCOMOBILE DE MM. CAIL ET C^{ie}.

476

Chaudière avec tubes de 4 centimètres.

Dates.	Pression.	Combustible par heure.	Eau par heure.	Eau par kilogramme de charbon.	Admission.	Travail en chevaux.	Consommation par cheval.
	atm.	kil.	kil.	kil.			kil.
1857 23 juin.....	6,05	35,00	260,00	7,43	0,6	10,87	3,21
24 juin.....	6,00	33,33	275,00	8,33	0,6	11,92	2,80
27 juin.....	5,89	28,00	229,00	8,18	0,4	6,95	4,03
4 juillet.....	6,15	33,33	270,00	8,09	0,5	11,28	2,95
10 juillet.....	6,10	23,33	192,00	8,29	0,2	5,40	4,32
Moyennes.....		30,59	245,00	8,06		9,28	3,46

Chaudière avec tubes de 6 centimètres.

1857 14 novembre.....	5,8	39,50	426,00	10,81	0,6	13,00	2,95
16 novembre.....	5,8	44,25	375,00	11,20	0,5	13,40	2,50
17 novembre.....	6,4	31,60	320,00	10,10	0,4	12,40	2,54
18 novembre.....	5,8	34,60	275,00	7,90	0,4	12,40	2,80
20 novembre.....	6,5	35,80	300,00	8,30	0,4	11,13	3,20
24 novembre.....	6,2	26,00	300,00	11,30	0,3	10,27	2,03
Moyennes.....		35,29	333,00	9,93		12,05	2,67

RÉSULTATS PRATIQUES

On ne peut attribuer cette différence qu'à ce que les gaz de la combustion étaient assez refroidis, en passant dans des canaux trop étroits, pour que la flamme, étant presque aussitôt éteinte, laissât la combustion incomplète; cette explication est d'ailleurs corroborée par la présence, dans les petits tubes, d'une suie abondante qui les aurait obstrués au bout de quelques heures, si l'on n'avait pas pris soin de les nettoyer pendant la marche.

Une partie de ce fâcheux effet doit être aussi attribuée à ce que la section totale des tubes était, dans le premier cas, notablement inférieure à celle de la cheminée, 0^m.4,0389 au lieu de 0^m.4,0570, ce qui déterminait nécessairement, dans les tubes, un accroissement de vitesse sans doute défavorable à l'achèvement de la combustion.

Cette remarque est de nature à faire éviter, aux constructeurs un écueil vers lequel la tendance actuelle est très-prononcée.

458. Influence du retour de flamme. — L'activité, relativement grande de la combustion, dans les chaudières locomobiles, rend importantes les deux conditions suivantes d'une bonne utilisation du combustible : espace suffisant dans la boîte à feu pour que la combustion soit complète et parcours suffisant des gaz pour que leur refroidissement atteigne les limites convenables. Il est évident que, sous ce rapport, les chaudières à retour de flamme, sont dans des conditions plus favorables; et, si n'était la complication de leur construction, nul doute que ce système ne fût généralement adopté. On comprend cependant, qu'il soit plus simple, au point de vue de l'établissement des chaudières, d'imiter en petit la disposition adoptée pour les locomotives : un seul faisceau de tubes est plus facile à monter et à réparer; le remplacement des tubes se fait commodément, et ce système a, en définitive, prévalu, encore bien que, dans les chaudières à retour de flamme, le foyer soit mieux entouré de toutes parts et que la chaleur soit ainsi utilisée le mieux possible, même celle

des escarbilles enflammées, qui passent à travers les grilles, jusqu'à leur complet refroidissement.

Les chaudières à retour de flamme peuvent toutefois présenter une facilité d'allumage dont nous devons dire un mot. Le tirage dans les chaudières des machines locomobiles ne s'établit franchement que par l'échappement de la vapeur, et l'on n'a cependant d'échappement que quand la chaudière est en pression : il faut donc que l'allumage se fasse avec un tirage très-faible, à travers des tubes horizontaux, froids, dans lesquels la circulation de l'air est encore gênée. Le parcours des gaz étant plus long dans les chaudières à retour de flamme, cette difficulté de l'allumage serait plus grande encore que pour les chaudières à simple faisceau de tubes, si l'on ne mettait à profit la position de la cheminée, pour opérer la mise en feu, par le passage direct des gaz dans cette cheminée; elle se trouve ainsi, en peu d'instants, assez chaude pour produire un tirage efficace. Une simple vanne placée sur la boîte à feu suffit pour établir ou pour fermer à volonté cette communication directe entre la boîte à feu et la cheminée.

459. Avantages de la mobilité du faisceau tubulaire.—Toutes ces chaudières sont d'ailleurs, par cela même qu'elles sont tubulaires, très-sujettes aux incrustations, et MM. Thomas Laurens et Pérignon, ainsi que MM. Farcot et fils, ont rendu un grand service à la construction des petites machines par leurs dispositions de foyers amovibles. Le foyer et les tubes d'aller et de retour de la flamme font partie d'un même ensemble, qui entre, comme dans un fourreau, dans l'enveloppe intérieure de la chaudière, et qui se fixe à la bouche de cette enveloppe par une bride boulonnée. A l'arrière, le foyer se trouve clos par une calotte qui forme le fond des carneaux et qui donne ouverture aux tubes de retour par lesquels les gaz de la combustion doivent aboutir au bas de la cheminée.

A supposer que les incrustations ne soient pas très-abondantes, les tubes pourront sortir facilement avec le foyer; on

les nettoiera avant de les remettre en place, et cette manœuvre sera encore facilitée par une disposition qui permet de dégager autour de la calotte les dépôts qui s'y seraient accumulés.

Cette facilité de nettoyage n'est pas d'ailleurs le seul mérite de cette disposition : dans les chaudières tubulaires ordinaires, les tubes, fixés à la plaque de la boîte à feu et à la plaque de la boîte à fumée, ne peuvent se dilater librement lorsqu'ils se trouvent portés à une haute température, puisque les pièces qui, à l'extérieur, réunissent les deux plaques n'atteignent jamais cette température élevée. La plus grande dilatation du cuivre est encore une cause de fatigue pour ces tubes, qui se déforment et se courbent bientôt sous cette influence incessamment renouvelée. Dans la chaudière de MM. Thomas Laurens et Pérignon, la calotte qui forme la boîte à fumée est entièrement libre dans l'intérieur de la chaudière; rien ne s'oppose à la complète dilatation des tubes, au grand avantage de leur conservation.

La disposition des foyers amovibles est une grande amélioration dans la construction des chaudières tubulaires.

Ces avantages entraînent quelques inconvénients d'un ordre secondaire qu'il est toutefois bon d'indiquer. Lorsqu'un tube se fissure pendant la marche d'une chaudière ordinaire, on le tamponne provisoirement par les deux bouts et l'on peut continuer à marcher; ici cette opération est impossible, et il faut nécessairement enlever tout le faisceau; il est vrai qu'il suffit de moins d'une heure pour le démonter, tamponner, au besoin, le tube et remettre en place toutes les pièces.

440. Chaudières verticales pour machines locomobiles. —

Dans le tableau que nous avons donné des chaudières qui ont figuré au concours agricole de 1856, se trouvent compris deux appareils, l'un de M. Flaud, l'autre de M. Duvoir, dans lesquels on n'avait pas employé le système tubulaire horizontal. La petite chaudière de M. Flaud donne, en pratique, des résultats satisfaisants; mais elle n'est applicable que

pour les machines très-faibles, puisqu'elle ne produit que 10 kilogr. environ de vapeur par heure. On pourrait employer cette disposition jusqu'à 20 kilogr.; mais, au delà, les dimensions seraient trop considérables. La machine est alors fixée verticalement contre la paroi même de la chaudière, et ce système peut être transporté sur roues et déposé à poste fixe avec grande facilité. Ces machines peuvent rendre de grands services dans les ateliers pour remplacer le travail des tourneurs de roues; elles seraient déjà trop grandes pour un travail moteur de trois ou quatre chevaux, et la disposition horizontale nous semble alors bien préférable.

441. Chaudières à circulation rapide. — L'exposition qui vient d'avoir lieu à Londres a d'ailleurs fait voir que, quand la rapidité de la mise en feu est une condition de première nécessité, il est bon d'employer des tubes verticaux concentriques dans le genre de ceux qui avaient été proposés par Perkins. La plupart des chaudières des pompes à incendie à vapeur sont construites avec ces tubes, et la mise en pression s'obtient avec une très-grande rapidité, quelquefois en moins de dix minutes. Nous reviendrons sur ce mode de construction lorsque nous nous occuperons des applications principales des machines à vapeur; mais on peut déjà consulter la note que l'un de nous a publiée sur ce sujet dans les *Annales du Conservatoire*, année 1862, page 701. Dans d'autres circonstances le renouvellement de l'eau, contre les surfaces de chauffe peut être utilement produit par une pompe foulante, comme dans certaines pompes à incendie de construction américaine.

442. Résumé sur les chaudières de locomobiles. — D'après tous les détails dans lesquels nous sommes entrés, on peut voir que la vaporisation, par kilogramme de combustible, varie, dans les chaudières des locomobiles, de 8 à 9 kilogr. On les construit, en général, pour brûler de 70 à 100 kilogr. par mètre carré de surface de grille, et il est bon que leur surface de chauffe, formée, pour la grande partie, par des tube

ayant, au moins, 0^m,06 de diamètre, corresponde à une vaporisation de 3 kilogr., au moins, par mètre carré. Pourvu que l'on évite d'ailleurs, dans la construction, tout étranglement qui réduirait la section de passage des gaz à moins du cinquième de la surface de la grille, on peut être assuré de construire de bons appareils de vaporisation.

VI. Chaudières des machines locomotives.

443. *Chaudières des machines locomotives.*— Pour connaître les proportions généralement adoptées dans la construction des chaudières des machines locomotives, il suffit de relever et de comparer leurs éléments dans les machines en usage sur les différentes lignes.

On connaît aussi, avec une exactitude suffisante, la consommation du combustible, puisqu'elle est un des éléments importants de l'exploitation, et que chacun des chauffeurs est intéressé à la diminution de dépense qu'il réalise.

La quantité d'eau vaporisée ne donne pas lieu à un contrôle de même nature, en telle sorte qu'il faut rechercher, dans certaines expériences spéciales, le chiffre de la vaporisation par kilogramme de combustible.

Notre but étant seulement d'indiquer, d'une manière générale, pour les chaudières des locomotives, les mêmes données que celles recueillies pour les autres chaudières, nous pourrions nous contenter de quelques évaluations moyennes, d'autant plus exactes que toutes les chaudières des locomotives sont, à très-peu de différence près, de même construction, et qu'elles diffèrent même très-peu dans leurs dimensions principales, jusque dans ces derniers temps.

444. *Dimensions principales des chaudières de locomotives.*— Au point de vue du rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille, nous avons extrait, du tableau général, donné par M. J. Gaudry, dans son *Traité des machines à vapeur*, toutes les indications relatives, aux machines à voya-

geurs, qui renferment, à la fois, ces deux éléments de la question.

Pour les machines à marchandises, dont la vaporisation est plus grande, la grille a généralement une surface variable suivant la nature du combustible; la surface de chauffe s'élève à 100 mètres carrés, et le rapport diffère très-peu de 80.

TABLEAU DES SURFACES DE CHAUFFE ET DES SURFACES DE GRILLE DE QUELQUES MACHINES LOCOMOTIVES.

Noms des constructeurs.	Indication des lignes.	Dates.	Surface de grille.	Surface de chauffe.	Rapport.
			m.q	m.q	
Cavé.....	Versailles.....	1838	1,30	49,03	37,72
Stéphenson....	Saint-Germain...	1838	1,05	52,04	49,56
Sharp.....	Versailles.....	1840	0,92	53,03	57,54
Buddicom....	Rouen.....	1840	1,08	64,66	59,86
Hawthorn....	Orléans.....	1842	0,87	49,45	56,84
Shart.....	Orléans.....	1843	1,00	43,62	43,62
Stéphenson...	Orléans.....	1843	0,85	68,40	80,49
Cail.....	Est.....	1847	0,84	79,68	94,85
Cail.....	Lyon.....	1848	0,95	82,15	86,44
Cavé.....	Est.....	1849	1,14	72,18	63,32
Hallette.....	Troyes.....	1849	0,85	59,69	70,22
Polonceau....	Orléans.....	1853	1,10	74,56	67,78
Cail.....	Lyon.....	1854	1,21	86,00	71,06
Polonceau....	Orléans.....	1854	1,05	77,94	74,23
			1,015	65,01	

Le même examen, fait pour les machines à grande vitesse, conduit à des résultats identiques.

Dates.	Surface de grille.	Surface de chauffe.	Rapport.
	m.q	m.q	
1849	1,42	102,34	72,07
1854	1,42	98,50	69,37
1854	1,28	97,65	76,25
1855	1,33	77,94	58,60
1855	1,33	78,19	69,73
1856	1,34	98,80	73,73
1856	1,32	103,16	78,15

Le rapport moyen de 65, entre les deux surfaces de chauffe et de grille, trouve d'ailleurs sa consécration dans l'enquête parlementaire qui a été faite, en Angleterre, sur cette ques-

tion : MM. Brunel et Gocht (*Guide du mécanicien conducteur de locomotives*, page 101) ont déclaré qu'il résultait, d'expériences par eux faites, qu'il n'y aurait aucun avantage à ce que, par l'allongement des tubes, la surface de chauffe de ces tubes surpassât dix fois celle de la boîte à feu.

En supposant que la surface de la boîte à feu fût six fois et demie aussi grande que celle de la grille, ce qui correspond à une hauteur égale à une fois et demie le diamètre, cela reviendrait au rapport 65, que nous avons trouvé, d'après la pratique, entre la surface de chauffe et la surface de grille. On reconnaîtra d'ailleurs, par les tableaux, que ce chiffre a été constamment en augmentant, et que, pour les machines les plus récentes, il s'élève à 75 : c'est celui que nous adopterons dans notre résumé.

445. Consommation des chaudières des machines locomotives en combustible et en eau. — Les expériences faites sur la vaporisation par kilogramme de combustible, dans les chaudières des machines locomotives, sont peu nombreuses, et nous nous bornerons à reproduire les chiffres principaux qui ont été recueillis dans l'ouvrage que nous venons de citer.

Il résulte, d'expériences faites en 1850, sur la ligne du Nord, que l'on a obtenu une vaporisation moyenne de 8 kilogrammes d'eau par kilogramme de coke.

Machines à dôme carré, type Stéphenson.....	7 ¹¹ , 11
Idem.....	8 ,05
Idem.....	8 ,11
Idem.....	8 ,48
Machine Crampton.....	7 ,54
Machine à marchandises à dôme carré.....	8 ,54
Moyenne.....	8 ¹¹ ,00

Le tableau suivant, qui est également emprunté au même ouvrage, indique des chiffres un peu plus élevés, dans des expériences qui ont été suivies pendant longtemps.

TABLEAU DE LA CONSOMMATION EN EAU ET EN COMBUSTIBLE DE QUELQUES MACHINES LOCOMOTIVES.

Désignation des machines.	Noms des expérimentateurs.	Surface de grille.	Surface de chauffe.	Combustible brûlé par heure.	Eau vaporisée par heure.	Eau vaporisée par kilogr. de combustible.	Nature du combustible.
			m.q			kil.	
Le Vauban.....	Lechatelier.....	»	47,02	»	»	9,50	Coke.
La Mulhouse.....	Lechatelier.....	»	72,78	»	»	8,41	Coke.
N° 62 de la compagnie d'Orléans.	Bertera.....	»	»	»	»	9,17	Coke.
N° 154 de la compagnie d'Orléans.	Bertera.....	»	»	»	»	10,05	Coke.
Locomotive à voyageurs du che- min de l'Est.....	Chaudré.....	»	79,00	265	2184	8,24	Coke.
Locomotive à voyageurs du che- min de l'Est.....	Chaudré.....	»	79,00	209	2405	10,30	Houille.
Locomotive mixte du chemin de Lyon.....	Poirée.....	»	89,46	542	4133	7,62	Coke.

La connaissance de la consommation kilométrique conduit à un chiffre analogue. Si nous prenons la moyenne des 5 chiffres suivants, pour les locomotives à grande vitesse,

M. Lechatelier.....	4,96 et 5,24
M. Bertera.....	5,28 et 4,65
M. Chobrzinski.....	6,30

nous trouvons une consommation de 5^{kil},10 de coke par kilomètre, ce qui, à raison de 55 kilomètres par heure, conduit à une consommation totale de 280 kilogrammes de coke, ou, en multipliant par 8,50, à une consommation d'eau de 2384 kilogrammes, qui, répartie sur une surface de chauffe de 65 mètres carrés, donne une vaporisation de 36^{kil},66 par mètre carré de surface de chauffe.

La moyenne de la vaporisation par kilogramme de coke serait 8,85. MM. Gocht et Brunel ont accusé 8 à 9 dans l'enquête anglaise, soit 8,50 en moyenne.

La quantité de coke brûlée par mètre carré de surface de grille varie d'ailleurs de 250 à 300 kilogrammes, et nous pouvons compter sur le chiffre moyen de 280. Quant à la quantité d'eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe, les trois dernières expériences la portent à 36,66, soit environ à 35 kilogrammes, ce qui suffit pour démontrer qu'il y aurait tout avantage à augmenter encore les surfaces.

446. Expériences de M. Noblemaire sur la ligne de Toulon à Marseille. — M. Noblemaire a fait un grand nombre d'expériences sur une locomotive d'essai, munie des boîtes glissantes de M. Roy, destinées à permettre aux essieux de se placer perpendiculairement à la voie, dans des courbes de 100 mètres de rayon et au-dessus.

Dans une de ces expériences, on a noté l'eau et le charbon consommés, ainsi qu'on le voit par les chiffres suivants :

	Eau.	Charbon.	Eau vaporisée par kil. de charbon.
	kil.	kil.	
De Marseille à Toulon....	5465	730	7,48
De Toulon à Marseille....	5867	745	7,48

La concordance absolue de ces chiffres leur donne une grande autorité, et nous admettrons, d'une manière générale, que la vaporisation, par kilogramme de combustible, ne varie généralement, pour les chaudières de locomotives, qu'entre 7,50 et 8,50 kilogrammes.

447. Dimensions des cheminées. — Quant aux cheminées des machines locomotives, leur hauteur est limitée en France à 4^m,25 au-dessus des rails, l'élévation normale des ouvrages d'art étant de 4^m,30. La hauteur effective de la cheminée varie, suivant les dimensions de la chaudière, de 1^m,60 à 2 mètres; son diamètre intérieur est habituellement compris entre 0^m,33 et 0^m,40.

La comparaison des dimensions, relevées sur un grand nombre de machines, donne 0,70 pour le rapport de la section de la cheminée à la section totale des tubes garnis de leur virole.

448. Nouvelles machines locomotives. — Le trafic des chemins de fer ayant beaucoup augmenté sur certaines lignes, et les rampes à franchir étant, sur certains points, beaucoup plus grandes, on a été conduit à construire des machines, et par conséquent, des chaudières beaucoup plus puissantes, dans lesquelles la surface de chauffe a été portée jusqu'à 213 mètres carrés. Les grandes machines à quatre cylindres, dans lesquelles la Compagnie du chemin de fer du Nord a dû placer horizontalement la cheminée, par suite du peu d'espace laissé libre entre le haut de la chaudière et le dessous des ouvrages d'art, sont, avec les locomotives de montagne du Semmering, les types les plus nouveaux de ces puissants appareils. A l'occasion de l'exposition universelle de Londres, les auteurs de ces systèmes ont fait connaître, dans des publications spéciales, tous les détails de construction qui s'y rapportent. Nous avons puisé dans ces documents les chiffres suivants, qui se lient intimement à notre sujet.

TABLEAU DE LA SURFACE DE CHAUFFE
DE DIVERSES MACHINES LOCOMOTIVES.

	Surface de grille.	Surface de chauffe totale.	Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille.	Section libre du système tubulaire.	Rapport de la section des tubes à la surface de grille.
<i>Locomotives à voyageurs du chemin du Nord.</i>					
	m.q.	m.q.		m.q.	
Buddicom.....	0,985	62,58	63,13	0,2140	0,22
Crampton.....	1,305	97,30	74,56	0,2775	0,21
Mixte Engerth.....	1,340	125,50	93,65	0,2991	0,22
Quatre cylindres.....	2,620	166,82	63,67	0,3827	0,15

Locomotives à marchandises du chemin du Nord.

Petites.....	0,880	74,10	84,21	0,2076	0,24
Moyennes.....	1,430	126,60	88,40	0,4152	0,29
Grosses Engerth.....	1,944	196,99	101,33	0,4911	0,25
Fortes rampes.....	2,620	166,82	63,67	0,3827	0,15
Quatre cylindres.....	3,330	213,35	64,07	0,4988	0,15

Locomotives allemandes de l'exposition de 1862.

Locomotive de montagne					
Steierdorf.....	1,400	124,92	89,23	0,3016	0,21
Locomotive à grande vi-					
tesse Duplex.....	1,400	122,91	87,79	0,2978	0,21

Il résulte, de ce tableau, que la surface de chauffe totale, dans laquelle on a compris celle des réchauffeurs employés dans les nouvelles machines du chemin du Nord, s'élève quelquefois jusqu'au centuple de la surface de grille, mais que cependant le rapport s'abaisse quelquefois jusqu'au chiffre soixante.

Quant à la section libre, formée par l'ensemble des tubes, elle est en général inférieure au quart et quelquefois au sixième de la surface de la grille.

Dans les machines allemandes, comprises au tableau précédent, la section de la cheminée est égale aux quatorze centièmes seulement ou à un septième de la section totale de la grille.

449. *Résumé sur les chaudières des machines locomotives.* — En, résumé toutes ces chaudières sont tubulaires, à un seul

faisceau de tubes, conduisant directement à la cheminée; on peut les caractériser par les indications suivantes :

Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	75
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille.....	280 ^{kil}
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe.....	4 ^{kil}
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	35 ^{kil}
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	8 ^{kil} ,50
Quant aux relations entre la dépense de combustible et la canalisation de la fumée, elle se trouve définie comme il suit :	
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de section de cheminée.....	2500 ^{kil} .
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de section de tubes.....	1750 ^{kil} .

Le fonctionnement des chaudières locomotives est surtout remarquable par la rapidité des courants gazeux; et il ne donne une bonne utilisation de la chaleur développée qu'à la faveur d'une surface de chauffe très-grande par rapport à la surface de la grille.

VII. Chaudières de bateaux.

430. Chaudières de bateaux. — Les chaudières de bateaux que l'on établit maintenant sont toutes tubulaires et à retour de flamme; elles sont assez grandes pour que l'on puisse, à chaque chômage, visiter et nettoyer, par des trous d'homme convenablement disposés, les tubes et les surfaces exposées au contact des gaz de la combustion.

Les seules modifications qui aient été apportées, dans ces derniers temps, aux chaudières marines, ont eu pour objet de

leur donner une forme plus arrondie, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des foyers, et de les étançonner avec plus de soin, à mesure que la pression s'est élevée davantage. Mais on sait d'ailleurs que cette pression est toujours faible et qu'elle s'élève rarement à deux atmosphères effectives; nous en verrons les raisons lorsque nous nous occuperons des incrustations des appareils de mer.

431. *Appréciation de la quantité d'eau vaporisée.* — Nous avons vu, en traitant des différents systèmes de chaudières à vapeur, que le système tubulaire avait définitivement prévalu sur le système des chaudières à galeries, et il nous suffirait d'indiquer les dimensions principales d'un certain nombre d'appareils de mer, avec un aperçu sur la vaporisation qu'ils produisent.

Malheureusement les ingénieurs de la marine ont une façon de compter la quantité d'eau vaporisée qui a introduit, dans la question, les appréciations les plus fausses. On s'étonne tout d'abord de cette assertion générale, que les chaudières tubulaires de bateaux ne vaporisent que 4^{kil},50 d'eau par kilogramme de houille de bonne qualité, alors que des chaudières peu différentes, et placées dans des conditions qui ne sont pas beaucoup plus favorables, vaporisent à terre de 7 à 8 kilogr.

On a cherché bien des raisons pour expliquer cette différence de rendement, alors qu'elle réside seulement dans la fausse interprétation que l'on donne à l'expression : kilogramme de vapeur, appliquée aux appareils de mer. On n'a pas, à bord, de réservoir pour jauger l'eau que l'on dépense; on ne peut même déterminer ce volume d'eau au moyen du volume développé par les appareils d'alimentation, puisque l'opération spéciale de l'extraction rejette, au dehors, des proportions variables de l'eau introduite.

Voici comment on opère : au moyen d'un indicateur appliqué à la machine à vapeur, on détermine les conditions de pression à l'admission dans le cylindre, et la longueur de

la course du piston qui correspond à cette admission. D'après les conditions de marche de la machine, on évalue ainsi le volume de vapeur dépensé en un temps donné; puis, à l'aide des tables, on détermine le poids de la vapeur qui correspond à ce volume et à cette pression; on obtient ainsi le poids de la vapeur *sensible* dans le cylindre. Mais ce poids est nécessairement beaucoup moindre que celui de l'eau réellement sortie de la chaudière; il est moindre de tout le poids de l'eau mécaniquement entraînée avec la vapeur; il est moindre du poids de toutes les condensations inévitables, depuis le générateur jusqu'au cylindre; il est moindre enfin de toutes les portions de vapeur qui peuvent être perdues par les fuites, y compris même celles du tiroir. On a donc une évaluation erronée, et la seule différence que les chaudières marines puissent présenter, par rapport aux chaudières de terre, ne doit être que celle qui résulte de la chaleur perdue dans l'extraction, et dans la difficulté plus grande de l'évaporation de l'eau salée, si tant est que cette différence existe.

Nous avons déjà vu que la pression, relativement faible, des chaudières marines ne saurait apporter une modification appréciable dans l'utilisation du combustible. Dans les tableaux qui suivent, nous verrons cependant que le poids de vapeur sensible produite par kilogramme de combustible est plus grand, pour quelques chaudières, que le chiffre généralement admis.

Dans les expériences faites sur *le Napoléon*, ce poids s'est élevé jusqu'à 6^k,53, dans quelques circonstances, et ce rapprochement suffit pour établir que nos appréciations ne sont pas erronées.

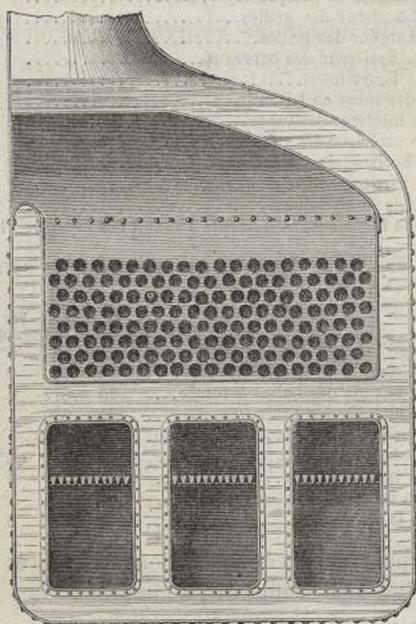
Les machines de mer sont les plus puissantes que l'on construise : on recherche, à la fois, dans leurs générateurs, une grande puissance de vaporisation, une grande légèreté, un volume aussi réduit que possible, car tout espace se compte sur un vaisseau; enfin il est essentiel que la dépense de combustible soit faible, puisque, outre la dépense, toute augmentation dans la consommation se traduit par la nécessité d'un

plus grand approvisionnement, fait aux dépens du tonnage libre du navire.

Les dimensions des chaudières de mer ne varient que dans d'assez faibles limites; seulement on augmente le nombre des foyers si l'on veut desservir une machine plus puissante.

La connaissance de tous les détails de la construction est indispensable, et nous décrirons successivement quelques-uns des appareils de vaporisation construits dans ces derniers temps.

Fig. 31.



452. Générateur du Phénix, de 200 chevaux, construit par M. Nilus. — Le Phénix a fait, en 1850, la traversée de Plymouth à Lisbonne en soixante heures; en 1854, la marine impériale a commandé quatre générateurs semblables.

Ce générateur est entièrement construit en cuivre rouge.

L'appareil tout entier se compose de deux corps de chaudières; l'un d'eux est représenté par le dessin ci-joint, fig. 31; ils renferment chacun trois foyers, et les dimensions principales sont les suivantes :

Nombre des corps de chaudière.....	2
Longueur de chaque corps de chaudière.....	3 ^m ,05
Largeur de chaque corps de chaudière.....	3 ,60
Hauteur au milieu, non compris les coffres de vapeur..	3 ,60
Coffres de vapeur : Longueur 3,05; largeur 1,40; hauteur	1 ,20
Foyers. Nombre par corps de chaudières.....	3
— Longueur de chaque foyer.....	2 ,20
— Largeur de chaque foyer.....	0 ,80
Grilles. Longueur des grilles.....	2 ,60
— Largeur des grilles.....	0 ,80
Barreaux. Épaisseur des barreaux.....	0 ,03
— Écartement.....	0 ,013
Nombre des tubes en laiton.....	720
Diamètre intérieur des tubes.....	0 ^m ,065
Diamètre extérieur des tubes.....	0 ,070
Distance horizontale d'axe en axe.....	0 ,100
Distance verticale d'axe en axe.....	0 ,100
Diamètre de la cheminée.....	1 ,40
Hauteur de la cheminée au-dessus du seuil des foyers..	11 ,00

Avec ces éléments, les dimensions calculées sont les suivantes :

	Chiffres réels.	Par cheval nominal.
Surface de grille (pour chaque grille 2 ^m ×0,08)	12 ^m ×,48	0 ^m ×,0624
Surface de chauffe directe des foyers.....	20 ,70	0 ,1035
Surface de chauffe des boîtes à fumée....	20 ,072	0 ,10036
Surface de chauffe des tubes.....	285 ,086	1 ,4254
Surface de chauffe totale.....	325 ,8589	1 ,6287
Volume d'eau.....	22 ^m ×,30	0 ^m ×,1115
Volume de vapeur.....	15 ,53	0 ,0776
Section des tubes.....	2 ^m ×,385	0 ^m ×,01192
Section de la cheminée.....	1 ,67	0 ,00835

Enfin, au point de vue des indications sommaires que nous avons cherché, dans chaque cas, à mesurer :

Rapport de la surface libre de la grille à la surface totale.	0,302
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.	26,12

Ces indications nous montrent déjà que les proportions de la surface de chauffe sont extrêmement réduites, et qu'elles se trouvent même, avec la surface de grille, dans un rapport peu différent de celui des anciennes chaudières à bouilleurs.

Nous ne possédons pas de chiffres officiels sur la consommation des chaudières qui viennent d'être décrites, mais nous dirons seulement qu'elles alimentaient deux machines à cylindres oscillants, de 1^m,41 de diamètre et de 1^m,30 de course.

435. *Générateur du Duquesne, de 650 chevaux, par M. Mazeline, en 1854.* — Afin de multiplier les exemples, nous donnerons encore quelques indications sommaires sur les chaudières de ce vaisseau, sur lequel les expériences ont été nombreuses. Le système complet des générateurs se composait de six corps de chaudières, trois à la suite l'un de l'autre, à chaque bord, celui du milieu plus étroit.

	Chiffres réels.	Par cheval nominal.
Nombre des corps de chaudières.....	6 ^m	
Longueur des chaudières.....	3,605	
Largeur (2 ^m ,74 seulement pour le corps du milieu).....	3,60	
Hauteur au milieu.....	4,04	
Diamètre des cheminées.....	2,44 et 2,33	
Hauteur.....	15,45	
Hauteur du niveau de l'eau au-dessus des tubes.....	0,16	
Volume de la vapeur.....	69 ^m ,100	0 ^m ,1063
Volume de l'eau.....	90,300	0,1389
Section totale des cheminées.....	8 ^m ,94	0 ^m ,0137

Les dimensions, par cheval nominal, sont un peu plus grandes que pour les navires que nous avons précédemment cités, à l'exception du volume de vapeur qui est moindre. En l'absence de renseignements plus complets, nous pouvons donner des chiffres intéressants sur la production en vapeur et sur le volume d'eau d'extraction de ce bâtiment.

	Poids de la vapeur sensible par heure.	Poids de l'eau d'extraction par heure.
Expériences du 28 janvier 1855.....	17000 ^{kl}	2888 ^{kl}
— du 8 février 1855....	16789	2216
— du 22 février 1855..	22032	3184
Moyennes.....	18607	2763

Le poids de l'eau perdue par l'extraction représente 0,148 du poids de la vapeur sensible; mais cette extraction était inférieure à celle du marché, fixée à 15 kilogr. par heure et par cheval, soit à 9750 litres par heure.

434. *Générateur de l'Algésiras, de 900 chevaux.* — Ce vaisseau, construit en 1856, a donné des résultats exceptionnellement favorables, et est considéré, à juste titre, comme le meilleur bâtiment de la flotte française; l'honneur de cette construction revient à M. Dupuy de Lôme, aujourd'hui directeur des constructions navales. Les chaudières constituent l'appareil évaporatoire le plus considérable que nous possédions, à cette époque.

Nombre des corps de chaudière.....	8	
Nombre de foyers par corps de chaudière.....	3	
Nombre des tubes.....	2284	
Diamètre intérieur des tubes.....	0 ^m ,075	
Diamètre extérieur des tubes.....	0,008	
Diamètre de la cheminée.....	2,90	
		Chiffres réels. Par cheval nominal.
Surface de grille (pour chaque grille 2 ^m ,25)...	54 ^m ,00	0 ^m ,06
Surface de chauffe totale.....	1260 ,00	1 ,40
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	23 ,33	
Volume de l'eau.....	102 ^m ,00	0 ^m ,1133
Volume de la vapeur.....	97 ,645	0 ,108
Section des tubes.....	11 ^m ,49	0 ^m ,0127
Section de la cheminée.....	6 ,60	0 ,0073
Surface du niveau de l'eau dans la chaudière...	78 ,02	0 ,86

Les dernières lignes de ce tableau, comparées avec celles qui se rapportent au *Phénix*, montrent que les rapports sont à peu près les mêmes, sur ces deux bâtiments, et que les corps de chaudière eux-mêmes sont presque identiques.

Voici d'ailleurs quelques indications complémentaires relatives à la construction :

Épaisseur de l'enveloppe du foyer...	0 ^m ,01
Épaisseur des plaques à tubes.....	0 ,015
Largeur des cornières.....	0 ,075
Épaisseur de la tôle de la chaudière.	0 ,005

Lors des expériences d'essai de l'*Algésiras*, fonctionnant avec les huit corps de chaudière, on a constaté une consommation de combustible par heure de 4146^{kil}, produisant une vaporisation, estimée en vapeur sensible, de 27 777^{kil}.

En rapportant ces indications au cheval nominal, dont nous apprécierons la valeur dans l'un des paragraphes qui suivent, la consommation du combustible serait de 4^{kil},65, et la vaporisation de 30^{kil},86 par cheval nominal.

D'après ces données, on trouve, par le calcul :

Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	kil. 76,77
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe..	3,29
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	21,98
Eau vaporisée par kilogramme de combustible.....	6,7
Combustible brûlé par mètre de section de tubes.....	362,58
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée.	628,19

Les allures des fourneaux sont, comme on le voit, plus rapides que celles des chaudières des machines fixes; la vaporisation de 21,98 doit être portée, pour les causes que nous avons dites au n° 449, à 25 kilogr. de vaporisation effective, ce qui, pour des chaudières tubulaires, est très considérable; mais cela résulte, pour les chaudières marines, de ce que le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille ne s'élève pas au-delà de 25.

455. Générateur du Napoléon, de 950 chevaux. — Les indications suivantes, sur le *Napoléon*, rappelleront, d'une manière presque absolue, les principaux chiffres qui précèdent.

Nombre des corps de chaudière.....	8
Nombre des foyers par corps de chaudière.....	5
Longueur de chaque corps.....	2 ^m ,850
Largeur moyenne.....	4,350
Hauteur moyenne.....	4,111
Longueur de chaque foyer.....	2,350
Largeur.....	1,10
Hauteur des premiers tubes au-dessus du seuil des foyers.....	0,22
Longueur des grilles.....	2,10
Largeur.....	0,80
Nombre des tubes.....	2236
Longueur des tubes.....	1 ^m ,90
Diamètre intérieur.....	0,08
Niveau de l'eau au-dessus des tubes.....	0,20
Nombre des cheminées.....	2
Diamètre des cheminées.....	2 ^m ,20
Hauteur au-dessus du seuil des foyers.....	13,80

Dimensions calculées.

	Chiffres réels.	Par cheval nominal.
Surface de grille.....	68,08	0,0709
Surface de chauffe directe des foyers.....	127,8733	0,1332
Surface de chauffe des tubes.....	1066,3484	1,1119
Surface de chauffe totale.....	1436,7776	1,4966
Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille.	21,10	
Volume d'eau.....	124,76	0,1293
Volume de vapeur.....	105,976	0,1106
Et avec les coffres de vapeur placés dans les cheminées.....	118,138	0,1231
Volume total.....	242,314	0,2524
Section des 2236 tubes.....	11,23	0,01182
Section totale des 2 cheminées.....	7,60	0,0080

Résultats des expériences.

Combustible brûlé par heure.....	3635,5	3,89
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	53,40	
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	2,53	
Vapeur sensible par heure.....	24032,00	25,4017
Vapeur sensible par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	16,73	
Vapeur sensible par heure et par kilogramme de combustible.....	6,53	
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de section de tube.....	323 ^{ml} ,73	
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de section de cheminée.....	478,35	

Voici d'ailleurs la description de l'appareil de vaporisation du *Napoléon*, telle qu'elle est donnée par la commission de réception :

L'appareil du *Napoléon* est composé de huit corps de chaudières tubulaires, qui sont égaux et disposés en deux groupes de quatre, l'un à l'avant, l'autre à l'arrière de la machine proprement dite; les quarante foyers, dont la longueur est parallèle à la quille du vaisseau sont desservis par deux chambres de chauffe pour chaque groupe.

Chaque corps de chaudière a cinq foyers, et forme un véritable prisme quadrangulaire, à peine arrondi sur quelques-unes des arêtes; des tirants intérieurs consolident le système et permettent de porter la pression intérieure à 2,05 atmosphères.

Deux cheminées s'élèvent, du centre de chaque groupe, jusqu'à 6^m,80 au-dessus du pont du gaillard; un gros tube bouilleur est placé au milieu des chambres de fumée, à la partie supérieure de l'autel, entre les lames d'eau transversales et le ciel des chambres de fumée. En quittant les chambres de fumée, les gaz chauds traversent, comme à l'ordinaire, les tubes, de faible diamètre, qui sont au-dessus du foyer. On a, en outre, employé la chaleur des gaz à sécher la vapeur, au moment où elle va entrer dans les tuyaux d'admission des cylindres. Pour cela, le bas de la cheminée a été élargi et a reçu centralement, jusqu'à 1^m,35 de hauteur, un coffre à vapeur terminé à sa surface supérieure par une demi-sphère. Il est divisé intérieurement en quatre compartiments, pour les quatre corps du même groupe, et la paroi est entièrement exposée au contact de la fumée.

Il n'y a pas de pompe d'extraction à cet appareil, puisque, dit le rapport, les extractions à la main, quand elles sont bien réglées, suffisent pour entretenir les chaudières dans un état de propreté satisfaisant.

Si nous comparons les conditions dans lesquelles se sont faites les expériences du *Napoléon* et de l'*Algésiras*, nous voyons que, sur ce dernier bâtiment, la quantité de combustible brûlée par mètre carré de surface de grille, s'est élevée, à 76^{kg},77 au lieu de 53^{kg},40 sur le *Napoléon*; que cette même quantité, rapportée au mètre carré de surface de chauffe, est de 3,29 pour l'un, et de 2,53 pour l'autre; les feux ont été moins poussés sur le *Napoléon*, par suite de la puissance comparativement plus grande de ses chaudières, mais l'utilisation du combustible est restée la même: on brûlait d'ailleurs, dans les deux cas, de la houille de Newcastle.

Si le chiffre de la consommation par cheval nominal est plus grand sur l'*Algésiras*, c'est que la puissance effective de ses machines est beaucoup plus grande relativement à cette puissance nominale, qui est pour ainsi dire une unité de convention, que nous ne pourrions définir, d'une manière complète, qu'en traitant des machines à vapeur.

Quant aux proportions relatives des diverses parties des appareils, on voit déjà, par l'examen des dimensions par cheval nominal, que ces dimensions obéissent à une règle commune que nous indiquerons avec soin.

436. Règles pratiques pour les dimensions des chaudières de bateaux. — Nous avons vu, par ce qui précède, que les chaudières marines sont ordinairement groupées ensemble, en nombre suffisant, pour que chaque groupe fasse à peu près le service de 100 chevaux nominaux. Cette pratique est la même en Angleterre, ainsi qu'il résulte d'un rapport sur la marine anglaise de MM. Moll et Mangin, ingénieurs des constructions navales, qui assignent en outre à chaque foyer :

Une largeur de 0^m,90 environ ;

Et aux tubes 0^m,0585 de diamètre intérieur, avec une longueur de 2 mètres.

La pression dans la chaudière est de 2,36 atmosphères, et la surface de chauffe de 1,67 mètre carré par cheval nominal. Ce sont à peu près les mêmes données que celles qui servent de base à la construction des chaudières dans les ateliers français.

Nous mettons en regard quelques-unes des indications relatives à la pratique des ateliers, en prenant pour base cette unité du cheval nominal, dont nous aurons ultérieurement à définir la valeur ; la lettre N désignera le nombre de ces unités.

	Ancienne pratique d'Indret.	Chaudière Mazeline de 150 chevaux.	Chiffres résultant de nos indications.
Surface de grille.....	0,06 N	»	0,06 N
Surface de chauffe directe.....	0,32 N	»	0,15 N
Surface de chauffe indirecte.....	0,90 N	»	1,25 N
Surface de chauffe totale.....	1,22 N	1,625 N	1,40 N
Rapport entre les surfaces de chauffe et de grille.....	20	»	23
Section totale des tubes.....	»	»	0,013 N
Section totale des cheminées.....	0,0075 N	»	0,008 N
Volume d'eau.....	0,20 N	0,134 N	0,120 N
Volume de vapeur.....	0,13 N	0,128 N	0,110 N
Hauteur de l'eau au-dessus des sur- faces chaudes.....	0,18	»	0,18
Poids d'eau vaporisée par heure....	38 N	»	25 à 30 N
Poids d'eau évacuée par heure....	14 N	»	15 N

Nous compléterons ces renseignements en disant, d'une manière générale, que le nombre N correspond à 20 kilog. de vapeur environ, par heure.

437. *Dimensions des anciennes chaudières à galeries.* — Bien que les chaudières à galeries ne soient plus employées dans la marine, on ne lira pas sans intérêt le tableau suivant des dimensions de ces chaudières, telles qu'elles ont été données par M. Campagnac, dont le nom fait autorité en cette matière. La plupart des indications sont conformes à celles que nous avons données sous le nom d'ancienne pratique d'Indret, mais elles inspireront ici plus de confiance, par cela même qu'elles sont relevées sur les bâtiments dont les noms se trouvent en regard et qui représentent la série des constructions de la marine française, antérieure aux transatlantiques de 450 chevaux.

TABLEAU DES DIMENSIONS DE QUELQUES CHAUDIÈRES DE BATEAUX,

D'APRÈS L'OUVRAGE DE M. CAMPAIGNAC.

(Les chiffres principaux ont été extraits du *Dictionnaire de marine à vapeur*, article Chaudière.)

	Surface de grille.		Surface libre de grille.		Section de la cheminée.		Surface de chauffe.		Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.	Rapport entre la surface de chauffe et la surface libre de grille.
	totale.	par cheval.	totale.	par cheval.	totale.	par cheval.	totale.	par cheval.		
Liamone, de 50 chevaux.....	2,702	0,055	0,786	0,016	0,301	0,006	63,166	1,263	25,96	80,36
Castor, de 120 chevaux.....	6,480	0,054	2,310	0,019	0,891	0,007	152,832	1,273	23,58	65,75
Tancrède, de 160 chevaux...	8,401	0,053	2,377	0,015	0,932	0,006	182,959	1,143	21,77	76,97
Ténare, de 180 chevaux.....	8,818	0,049	2,583	0,014	0,891	0,005	169,228	0,940	19,19	65,52
Vélocé, de 220 chevaux.....	14,296	0,065	3,224	0,014	1,472	0,007	240,582	1,094	16,84	74,62
Transatlantiques de 450 chev.	22,040	0,049	7,065	0,015	3,142	0,007	419,442	0,932	19,03	59,35
		0,054		0,016		0,007		1,107*	20,50	70,43

* Dont 0,20 de surface de chauffe directe.

438. *Comparaison entre les chaudières tubulaires et les anciennes chaudières à galeries.* — Une comparaison curieuse a été faite entre les deux systèmes de chaudières qui ont été successivement établies sur le *Great-Western*, dont le nom est resté célèbre dans l'histoire des progrès de la marine à vapeur. Les chiffres qui établissent cette comparaison sont extraits de *Appleton's Dictionary*.

	Anciennes chaudières.		Nouvelles chaudières.	
	A galeries.	Par cheval.	Tubulaires.	Par cheval.
Surface de grille.....	18 ^m ,77	0 ^m ,047	13 ^m ,47	0 ^m ,036
Surface de chauffe totale....	356,75	0,89	664,23	1,66
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille	19,00	"	49,21	"
Volume de vapeur.....	32 ^m ,54	0 ^m ,081	37 ^m ,35	0 ^m ,093
Volume d'eau.....	81,20	0,203	52,78	0,132
Consommation (27 à 28 jours) aller et retour...	1 015 650 ^{kil}	"	706 440 ^{kil}	"
Consommation par heure et par cheval.....	"	3 ^{kil} ,77	"	2 ^{kil} ,54
Poids des chaudières et tuyaux de vapeur.....	20503 ^{kil}	"	5687 ^{kil}	"

La consommation, par le seul fait du remplacement des chaudières, s'est abaissée à 0,70, et le poids des appareils à 0,39 de leurs valeurs primitives.

On remarquera cependant que les nouvelles chaudières, par cela seul qu'elles étaient neuves, se trouvaient dans de bien meilleures conditions que les anciennes, et qu'ainsi la comparaison faite entre elles est quelque peu fautive. Lorsque les chaudières à galeries furent elles-mêmes mises en service, la consommation, par cheval nominal et par heure, ne s'est quelquefois pas élevée au-dessus de 2^{kil},71.

Mais si l'économie de combustible est contestable, il n'en est pas de même de la diminution énorme de poids; et cette raison est une de celles qui ont donné une prééminence incontestée aux chaudières tubulaires pour la marine; d'ailleurs les nombreux angles dans lesquels s'accumulaient les dépôts, et les nombreux rétrécissements que présentaient les anciens appareils les rendaient d'un entretien et d'une conservation très-difficiles.

439. Comparaison entre les poids des chaudières tubulaires et des chaudières à galeries. — Dans un Mémoire que M. Gervaise a publié en 1846, dans les *Annales maritimes*, cet ingénieur s'est occupé de rechercher les poids comparés de ces deux genres d'appareils, et il a résumé son opinion, sur ce point, de la manière suivante :

Poids des chaudières à galeries, par cheval nominal :

Métal de la chaudière.....	320 à 360 kil.
Eau contenue.....	180 à 200
Total.....	500 à 560 kil.

Poids des chaudières tubulaires, par cheval nominal :

Métal de la chaudière, cheminée comprise.....	165 à 220 kil.
Eau contenue.....	95 à 115
Total.....	260 à 335 kil.

Le poids des chaudières tubulaires serait, d'après M. Gervaise, de 0,52 à 0,60 de celui des chaudières à galeries, tant pour les proportions seulement du métal employé que pour le poids des chaudières pleines.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que le poids des chaudières tubulaires du *Great-Western* ne s'élevait qu'à 39 pour 100 du poids des chaudières à galeries qu'elles remplaçaient.

Pour le *Duquesne*, de 650 chevaux, les poids d'eau et de chaudière sont les suivants :

Poids des soutes alimentaires, des chaudières et des tuyaux.....	205 000 kil. et par cheval 315 kil.
Poids de l'eau.....	90 000 — 130
Total.....	295 000 445

Ce chiffre, qui comprend les soutes, est plus considérable que celui donné par M. Gervaise, qui se trouve ainsi modifié dans les constructions les plus récentes.

440. Vaporisation réelle des chaudières marines. — Au moment où se préparait la substitution des chaudières tubulaires aux chaudières à galeries, M. Lemaitre a fait, à terre, des

expériences très-intéressantes sur la vaporisation produite par les divers systèmes. A cette époque, c'est-à-dire en 1844 et 1845, les constructeurs n'étaient pas encore fixés sur les formes à donner aux nouvelles chaudières, et M. Lemaitre proposait d'employer une disposition dans laquelle les tubes étaient placés au-dessous du foyer; ses expériences ont porté, tout à la fois, sur cette disposition et la disposition ordinaire.

Voici les principales dimensions des chaudières de 40 chevaux sur lesquelles a opéré M. Lemaitre.

	Chaudière n° 1 à tubes supérieurs.	Chaudière n° 2 à tubes inférieurs.	Chaudière à galeries.
Surface de grille.....	1 ^m ,60	1 ^m ,60	1 ^m ,80
Surface de chauffe de la boîte à feu...	2,45	2,45	"
Surface de chauffe des tubes.....	29,80	29,00	"
Surface de chauffe totale.....	44,88	44,08	35,40
Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	28,05	27,55	19,67
Diamètre des tubes.....	0 ^m ,095	0 ^m ,095	"
Section totale des 50 tubes.....	0 ^m ,354	0 ^m ,354	"
Hauteur de la cheminée.....	10 ^m ,00	10 ^m ,00 et 8,50	7 ^m ,00
Diamètre de la cheminée.....	0,60	0,60	0,60
Section de la cheminée.....	0,28	20,282	0,282
Combustible brûlé par heure.....	172 ^{kg} ,00	152 ^{kg} ,00	161,00
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.....	107,50	95,00	89,44
Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	3,83	3,45	4,55
Eau vaporisée par heure.....	1237,00	1111,00	1175,00
Eau vaporisée par heure et par mètre carré de surface de chauffe.....	27,56	25,24	32,96
Eau vaporisée par kilogramme de houille	7,12	7,96	7,29
Combustible brûlé par mètre carré de section de tubes.....	486,00	429,00	"
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminée.....	610,00	539,00	578,00

Le fonctionnement du foyer a été un peu rapide dans ces expériences, dont M. Lemaitre avait conclu, en faveur des tubes inférieurs, à une petite supériorité. Cette différence tient probablement à ce que cette disposition a retardé un peu l'activité du foyer et qu'ainsi la surface de chauffe a été mieux utilisée.

Nous devons au contraire en tirer cette conséquence, qu'à égalité d'allure et d'état d'entretien, les trois systèmes doivent

produire le même résultat, ce qui confirme encore nos appréciations sur l'égalité d'effet utile de tous les systèmes, toutes les fois que la surface de chauffe sera dans une proportion convenable.

M. Lemaitre a fait aussi quelques déterminations, soit en bouchant une partie des tubes, soit en plaçant la cheminée à l'arrière, soit enfin en lui substituant un ventilateur et en fermant le foyer; mais les chiffres indiqués par lui sont trop peu nombreux pour que nous cherchions à en tirer quelque conclusion.

Les charbons employés par M. Lemaitre étaient de moindre qualité que les charbons anglais employés dans les essais du *Napoléon* et de l'*Algésiras*, et c'est là ce qui explique l'absence des petites différences de rendement, qui devraient exister entre les essais à la mer et en vapeur sensible, et les essais à terre, en vapeur réelle. Nous admettrons donc que les chaudières marines vaporisent à peu près les mêmes quantités d'eau que les chaudières tubulaires et que les chaudières à bouilleurs bien construites.

461. *Quantité de bois brûlée par mètre carré de surface de grille, dans les bateaux à vapeur.* — On emploie maintenant, sur les lacs de l'Amérique, des chaudières à vapeur au bois, qui ont une forme particulière et que l'on désigne sous le nom de chaudières verticales coniques, dans lesquelles la pression s'élève à 4 ou 5 atmosphères. Voici quelques chiffres de consommation, par mètre carré de surface de grille et par heure, tels qu'ils ont été relevés dans un article de M. Stetson, reproduit dans le bulletin de la Société d'encouragement, septembre 1854.

Noms des bâtiments.	Surfaces des grilles.	Consommation par heure.
Niagara.....	2 ^m ,63	2 st ,72
Westmoreland.....	4 ,09	3 ,62
Prairie state.....	3 ,58	3 ,62
Michigan.....	3 ,58	2 ,72
Ogdensburgh.....	3 ,58	2 ,72
Moyenne.....		3 st ,28

462. Application des chaudières de locomotives aux bateaux.

— Si les chaudières de bateaux fonctionnaient à une pression aussi grande que celle à laquelle fonctionnent les locomotives, il ne serait plus possible d'employer la construction actuelle, qui ne saurait offrir la résistance suffisante, particulièrement sur les faces planes qui constituent la plus grande partie de chaque corps de chaudière.

Dans la navigation fluviale, on peut employer des pressions élevées, et M. Cavé a construit à cet effet, en 1856 et 1857, de véritables chaudières de locomotives, pour le trajet de Paris à Nantes, par la Seine et la mer. Le bateau *la Ville de Nantes*, appartenant à la société Oriolle et C^{ie}, d'une puissance nominale de 90 chevaux, fonctionne très-bien dans ces conditions, et il présente quelques particularités qu'il nous paraît bon d'indiquer.

Nous avons vu que, pour les foyers des locomotives, l'activité du tirage est déterminée par l'injection de la vapeur d'échappement dans la cheminée : cette ressource n'existe pas pour les chaudières de bateaux, où la condensation est toujours facile, et où elle détermine une augmentation considérable dans l'utilisation réelle de la puissance motrice. Dans *la Ville de Nantes* la combustion est activée par un ventilateur puissant faisant 1400 tours par l' : le diamètre des ailettes étant de 0^m,560, la vitesse à la circonférence dépasse 40 mètres par seconde.

Voici les dimensions principales de l'appareil de vaporisation :

	Chiffres réels.	Par cheval nominal.
Surface de la grille.....	1 ^m ^q ,32	0 ^m ^q ,015
Surface libre de la grille.....	0,66	0,007
Surface de chauffe directe.....	10,71	0,12
Surface de chauffe indirecte.....	96,447	1,07
Surface de chauffe totale.....	107,157	1,19
Rapport de la surface de chauffe à la surface de la grille.....	81,17	"
Section totale des tubes.....	0,445	0,005
Section de la cheminée.....	0,1963	0,002

Ces proportions sont les mêmes que dans des chaudières de

locomotive, d'un modèle un peu plus grand que celui des machines à voyageurs.

La chaudière consomme 140 à 150 kilogrammes de houille anglaise, allumage et arrêts compris, ce qui correspond aux indications suivantes :

Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille par heure	106 ^m , 21
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe et par heure.....	1 ,37
Combustible brûlé par mètre carré de section de tubes.....	314 ,00
Combustible brûlé par mètre carré de cheminée.....	713 ,00

Le ventilateur produit un tirage un peu moins énergique que le jet de vapeur.

L'appareil de ce bateau est non-seulement remarquable à ce point de vue, mais encore en ce qu'on a renouvelé, sur lui, l'application des condenseurs à surface, dans des conditions préférables à celles qui ont été depuis longtemps abandonnées; nous ferons connaître ces dispositions en traitant des moyens de réchauffer l'eau d'alimentation. Le problème était d'autant plus difficile à résoudre que c'est surtout à l'embouchure des fleuves, vers la séparation des eaux douces et des eaux de mer que les incrustations sont le plus à craindre.

Rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille.....	Dimensions Par cheval	
	réelles.	nominal.
grille.....	17,01	»
Diamètre des tubes à fumée formant retour de flammes.	0,08	»
Section de 88 tubes horizontaux.....	0,4488	»
Diamètre de la cheminée.....	0,50	»
Section de la cheminée.....	0,7854	0,00196
Section totale des tubes à fumée des 3 corps.....	1,3444	0,00336
Hauteur de la cheminée.....	3,00	»

Ces chaudières peuvent présenter quelque intérêt lorsque l'emplacement dont on dispose est très-restreint. Elles diffèrent des chaudières ordinaires à circulation en ce que le foyer est entouré, à l'intérieur, de parois continues et en ce que l'enveloppe, qui entoure les tubes de retour de flammes, forme réservoir d'eau, comme dans les chaudières ordinaires employées dans la navigation. Ce genre de construction mixte peut rendre des services, surtout avec des eaux peu

incrustantes comme celles de la plupart des rivières et des canaux.

465. Application des tubes à circulation d'eau aux chaudières de bateaux. — Bien que les chaudières à circulation ne soient encore employées qu'en très-petit nombre, les bons résultats obtenus, quant à la vaporisation, sur la chaudière que M. Clavières a fait fonctionner pendant toute la durée de l'exposition de 1855, nous engagent à donner quelques détails sur les chaudières, de cette espèce, qu'il a établies sur plusieurs bateaux porteurs faisant le service de Paris au Havre.

Ces chaudières fonctionnaient à la pression de 5 atmosphères : elles étaient presque entièrement composées de tubes horizontaux et verticaux dans lesquels l'eau circulait avec grande rapidité.

Les machines avaient une puissance nominale de 40 chevaux, et l'on peut admettre qu'elles ne dépensaient pas plus de 4 kilogrammes par cheval et par heure.

Voici les dimensions principales de ces chaudières :

	Par cheval.	
Surface de grille $3 \times 1^{\text{m}},40 \times 0,52$	2 ^m ,28	0 ^m ,0550
Surface de chauffe totale	38 ,86	0 ,9715

La surface de chauffe se décomposait ainsi qu'il suit :

Chaque foyer	3 ^m ,42
Les trois foyers réunis	10 ,26
88 tubes	22 ,09
Boîtes à fumée	4 ,33
2 faces planes	2 ,18

Si la consommation, par cheval nominal, était de 3 kilogrammes, ce qu'il ne nous a pas été donné de vérifier, le combustible brûlé, par mètre carré de surface de grille et par heure, s'élèverait à 52^{kil},54, et l'on vaporiserait 900 kilogrammes d'eau, soit 23^{kil},16 par mètre carré de surface de chauffe et par heure.

L'absence de réservoirs de vapeur, de dimensions suffisantes, a été l'une des causes principales de l'abandon dans lequel ces chaudières sont tombées.

464. *Résumé sur les chaudières marines.* — A mesure que les améliorations se sont produites dans la construction des machines de bateaux, on a conservé les mêmes dimensions de grilles, et l'on a légèrement augmenté la surface de chauffe, par suite de l'adoption générale du système tubulaire à retour de flammes, tout en ne cherchant à produire que 20 à 24 kilogrammes de vapeur par mètre carré de surface de chauffe, tandis que l'on produisait autrefois $\frac{0,38}{1,22} = 31$ kilogrammes. Quant aux conditions générales de la conduite des appareils de cette nature, nous pouvons, en la forme ordinaire, les résumer de la manière suivante :

Rapport de la surface de chauffe à la surface de la grille....	23
Combustible brûlé par mètre carré de surface de grille.....	50 à 70 ^{kil} *
Combustible brûlé par mètre carré de surface de chauffe...	3 à 4
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	25
Combustible brûlé par mètre carré de section de tubes.....	400
Combustible brûlé par mètre carré de section de cheminées.	650

Ce sont à peu près les mêmes allures que celles de nos chaudières à bouilleurs.

La marine impériale a du reste adopté, depuis quelque temps, d'une manière exclusive, pour tous ses bâtiments, deux types dits de 22 et de 30 chevaux. On les reproduit, toujours les mêmes, et en nombre suffisant pour développer la quantité de vapeur dont on a besoin. Dans les navires pourvus de machines de 1250 chevaux, le nombre de ces chaudières s'élève jusqu'à quarante.

Il importe d'ailleurs de rappeler que ces évaluations en chevaux-vapeur se rapportent à ce que l'on désigne habituellement sous le nom de cheval nominal, et nous verrons

* L'examen du livre de loch du *Lucifer* a donné, pour la consommation par heure et par mètre carré de surface de grille :

	kil.
Houille bitumineuse du Cumberland.....	64,20
Anthracite de Pensylvanie.....	74,45
Anthracite du pays de Galles.....	62,86
Moyenne.....	67,17

ultérieurement que cette unité correspond à plus du double du cheval-vapeur de 75 kilogrammes ; elle équivaut aujourd'hui à environ 200 kilogrammètres par seconde, développés par l'action de la vapeur sur les pistons.

VIII. Résumé des conditions relatives à l'établissement des chaudières à vapeur.

463. Résumé des résultats d'expériences sur les chaudières à vapeur. — Ayant ainsi passé en revue les éléments principaux à considérer dans le fonctionnement des chaudières à vapeur, nous pouvons plus utilement examiner chacun de ces éléments en particulier, et déterminer en quelles proportions ils doivent être introduits dans l'établissement d'un générateur déterminé.

A l'exception des appareils de bateaux, pour lesquels nous aurons à nous servir de cette expression de cheval nominal, qui, pour nous, n'est pas encore déterminée d'une manière suffisamment nette, nous rapporterons tous ces éléments au mètre et au kilogramme. Les règles suivantes serviront, en conséquence, à calculer tous les éléments d'un générateur devant consommer un nombre donné de kilogrammes de combustible, ou produire telle quantité déterminée de vapeur.

466. Tableau des conditions relatives à l'établissement des chaudières à vapeur. — Pour rendre cette étude plus facile, nous la ferons précéder d'un tableau général dans lequel nous avons réuni les divers éléments qui doivent servir au calcul des chaudières à vapeur, en rapportant, dans tous les exemples, les diverses évaluations au mètre carré de surface de grille considéré comme unité ; celles de ces indications qui caractérisent les différents genres de chaudières seront surtout d'un grand intérêt.

TABLEAU GÉNÉRAL DES PRINCIPALES DIMENSIONS DES CHAUDIÈRES A VAPEUR,
RAPPORTÉES A LA SURFACE DE LA GRILLE PRISE POUR UNITÉ.

	Chaudière du dépotoir.	Chaudière Farcot du Conservatoire.	Chaudière des ateliers du Nord.	Chaudières de Montluçon.	Locomobile Tuxford sans échappem. de vapeur.	Locomobile Thomas et Laurens avec échappem.	Locomobile Gall.		Chaudières de locomotives.	Chaudières de bateaux	
							Petits tubes, avec échappem.	Gros tubes, avec échappem.		à galeries, d'après Campaiguac.	à tubes de retour, d'après Sochet et Paris.
Surface de grille.....	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Surface libre de grille.....	0,19	0,30	0,23	0,48	0,29	0,40	0,40	0,40	0,50	0,29	0,30
Section des carneaux.....	»	0,37	»	»	0,10	0,47	»	»	»	»	»
Section des tubes.....	»	»	0,076	»	0,17	0,12	0,09	0,16	0,14	»	0,11
Section de la cheminée....	1,07	0,23	0,12	0,73	0,15	0,14	0,14	0,16	0,10	0,13	0,13
Hauteur de la cheminée...	36,26	»	»	55,00	»	»	»	»	»	»	»
Surface de chauffe directe..	11,20	7,80	5,15	5,47	2,19	4,15	5,32	5,08	6,50	3,69	2,70
Surface de chauffe indirecte.	35,23	27,90	30,17	21,19	9,33	24,38	28,16	26,49	69,50	16,81	15,30
Surface de chauffe totale...	46,43	35,70	35,32	26,66	11,52	26,12	33,48	31,57	75,00	20,50	19,00
Combustible par mètre carré de surface de grille.....	48,09	60,36	68,23	135,81	29,30	91,11	86,39	100,14	280,00	(74,00)	(74,00)
Combustible par mètre carré de surface libre de grille..	253,00	201,20	300,00	283,45	101,08	229,48	215,47	250,35	560,00	(258,00)	(243,00)
Combustible par mètre carré de surface de chauffe....	1,03	1,69	1,93	5,09	2,55	3,48	2,58	3,17	3,73	3,61	3,89
Eau vaporisée par mètre carré de surface de chauffe.....	7,64	14,45	17,42	26,14	23,82	23,99	20,94	29,92	35,00	(27,10)	(29,00)
Eau vaporisée par kilogr. de combustible.....	7,42	8,51	8,60	5,52	9,28	6,88	8,09	9,44	8,50	(7,50)	(7,50)
Combustible par mètre carré de cheminée.....	44,94	262,44	568,58	186,04	195,33	650,78	617,07	627,87	2800	492,31	492,31
Combustible par mètre carré de section de tube.....	»	162,97	897,76	»	418,57	759,25	959,88	712,50	2000	»	672,73

467 *Détermination de la surface de chauffe.* — La détermination de la surface de chauffe est, après la détermination de la surface de la grille, la question la plus importante à résoudre, et c'est celle que nous avons surtout cherché à calculer d'après l'examen des chaudières existantes.

Armstrong, dans un article inséré dans la deuxième édition de Tredgold (*On the evaporative power of the locomotive Engine boiler*), dit textuellement que, avec une grille et des barreaux de construction ordinaire, et de la houille commune, il n'y a aucune perte, dans l'effet de vaporisation, si l'aire de la surface de chauffe dépasse celle de la surface de grille, ou de la surface immédiatement au-dessus d'elle, dans la proportion de 9 à 1. L'auteur a certainement en vue d'établir un rapport minimum nécessaire entre la surface de chauffe directe et la surface de chauffe indirecte; mais cette distinction est, la plupart du temps, difficile à faire, et elle donne toujours lieu à des appréciations plus ou moins hasardées.

Le docteur Lardner, dans son traité sur les *Steam Engines*, dit que chaque yard carré de surface de chauffe ($0^m\ 1,837$), suffit pour vaporiser 1 pied cube d'eau par heure ($28^k,37$), règle qui, comparée à celle qu'il a donnée pour la surface de grille (un pied carré ($0^m\ 1,093$) pour la même vaporisation) correspondrait à ce même rapport de 9 à 1 entre la surface de chauffe et la surface de grille. Cette proportion est évidemment insuffisante.

M. Fairbairn, qui s'est livré à un examen analogue à celui que nous avons fait nous-même, dit page 205*, qu'en comparant les chaudières fixes et les chaudières à tubes, à celles des bateaux et des locomotives, on trouve les rapports suivants, entre les surfaces de grille et les surfaces chargées d'absorber la chaleur de la combustion, au profit de l'eau de la chaudière :

* *Useful informations for Engineers.*

Chaudières fixes.....	1 à 11
Chaudières fixes tubulaires.....	1 à 22
Chaudières tubulaires marines.....	1 à 20
Chaudières locomotives (moyenne de 12 sortes de machines).	1 à 80

Il cite ailleurs (page 59) les chaudières de Cornouailles, comme remarquables par le rapport 1 à 25 entre la surface de grille et la surface de chauffe; et il paraît s'arrêter à celui de 1 à 18, comme étant le plus convenable pour toutes les chaudières, à l'exception des chaudières des locomotives.

En France, où le prix élevé du combustible a certainement déterminé des règles plus favorables à son bon emploi, nous nous trouvons conduits à des surfaces de chauffe notablement plus grandes, excepté pour les machines de mer, qui consomment presque exclusivement les houilles anglaises.

L'importance de l'étendue des surfaces de chauffe est certainement très-grande, et leur rapport avec l'étendue de la grille doit varier avec l'activité de la combustion; si, dans les locomotives, l'emploi des tubes permet d'atteindre, pour ce rapport, jusqu'aux chiffres de 75 et de 80, il n'est cependant pas nécessaire d'arriver à ces dimensions dans les autres applications, lorsque l'activité de la combustion sur la grille n'est pas quadruplée par l'échappement de la vapeur dans la cheminée.

Nous avons vu des chaudières à bouilleurs ne consommer que 3 kilogrammes par mètre carré de surface de chauffe totale. Dans la plupart des locomotives le chiffre correspondant ne dépasse pas 4 kilogrammes.

En nous appuyant sur les faits les plus favorables de la pratique, nous nous arrêterons à cette règle unique : Une chaudière sera dans de bonnes conditions de surface de chauffe lorsque, par mètre carré, elle ne dépassera pas les consommations de combustible indiquées au tableau suivant :

	kil.
Chaudières fixes à bouilleurs inférieurs.	3,00
Chaudières fixes à bouilleurs latéraux..	3,00
Chaudières locomobiles.....	2,50
Chaudières de bateaux.....	2,50
Chaudières de locomotives.....	4,00

Appliquées aux déterminations des surfaces de grilles que nous proposons, ces indications reviennent, en définitive, à adopter pour le rapport entre la surface de chauffe et la surface de grille :

Chaudières fixes.....	70:3	=24
Chaudières de locomobiles..	80:2,50	=32
Chaudières de bateaux.....	70:2,50	=28
Chaudières de locomotives.	280:4	=70

En partant de l'une ou de l'autre de ces séries de chiffres il sera toujours facile de calculer, par une simple opération arithmétique, la surface totale de chauffe.

468. Répartition de la surface de chauffe. — On n'a généralement aucune règle fixe pour calculer la surface de chauffe totale ; la plupart des ingénieurs ont l'habitude de distinguer cette surface de chauffe en surface directe, immédiatement exposée à la radiation du foyer, et en surface indirecte : celle des carnaux et des conduits de fumée. Ils font alors le calcul de la surface totale en ajoutant, à la surface directe calculée, la moitié de la surface indirecte.

Ce mode de calcul donne lieu à des incertitudes, et il nous a paru plus convenable de prendre pour base de nos rapports la surface de chauffe tout entière. Si cette surface est suffisamment grande, il est bien certain que la plus grande partie de la chaleur de la combustion sera absorbée, et pourvu qu'elle le soit en proportion convenable, peu importe que ce soit par radiation ou par contact avec les gaz brûlés.

On peut d'ailleurs admettre, en général, que les diverses dispositions conduisent, à peu près, aux évaluations suivantes, pour le rapport entre la surface de chauffe totale et la surface de chauffe directe.

Chaudières fixes à bouilleurs inférieurs...	15
Chaudières fixes à bouilleurs latéraux....	10
Chaudières de locomobiles.....	5
Chaudières de bateaux	8
Chaudières de locomotives.....	7

Ces proportions ne sont ici mentionnées que comme indi-

cation de ce fait que, dans les chaudières tubulaires, la surface de chauffe directe est proportionnellement plus grande ; cette circonstance est surtout due à ce que le foyer est entouré de lames d'eau de tous côtés.

469. *Vaporisation maxima par mètre carré de surface de chauffe directe.* — En opérant sur une chaudière à fond légèrement concave, M. Péclet a trouvé qu'un mètre carré de ce fond, exposé directement à l'action du feu, vaporisait jusqu'à 70 et 75 kilogrammes par heure ; M. de Pambour a trouvé 120 kilogrammes par l'examen d'expériences faites sur des locomotives.

Christian, et après lui Clément Desormes, avait fixé ce chiffre à 100 kilogrammes, qui est peut-être un peu trop élevé ; si nous admettions la valeur de Péclet pour l'appliquer aux chaudières ordinaires, on pourrait trouver la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe indirecte, par la formule

$$70 S + x \times S' = 20 (S + S')$$

en représentant respectivement par S et par S' les surfaces de chauffe directe et indirecte, par x la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe indirecte, et en admettant une vaporisation moyenne de 20 kilogrammes d'eau par mètre carré de surface de chauffe et par heure ; on tirerait de la relation précédente

$$x = \frac{20 S' - 50 S}{S'}$$

si $S' = 4 S$, il vient

$$x = \frac{80 - 50}{4} = 7^{\text{kil}}, 50 ;$$

si $S' = 3 S$, il vient

$$x = \frac{60 - 50}{3} = 3^{\text{kil}}, 33 .$$

C'est à peu près entre ces limites qu'on peut fixer la vaporisation produite par mètre de surface de chauffe indirecte,

pourvu que son étendue ne dépasse pas celle des constructions ordinaires, par rapport à la surface de chauffe directe.

470. Détermination du volume des chaudières à vapeur. —

On ne craint pas, dans les machines fixes, d'employer des chaudières de grandes dimensions, l'emplacement dont on peut disposer dans la plupart des usines, n'étant pas, en général, si restreint que l'on soit gêné pour choisir les conditions les plus favorables à une bonne utilisation du combustible.

Dans tous les autres cas, au contraire, il importe de réduire le volume et, par conséquent, le poids des appareils au minimum, puisque le transport de ce poids constitue une dépense de tous les jours, et que, dans les bateaux surtout, tout l'emplacement occupé par les chaudières est perdu pour le trafic.

Sans accorder au volume des chaudières la même importance qu'on lui donnait autrefois, il faut cependant reconnaître que la question est loin d'être indifférente.

Quand la chaudière contient beaucoup d'eau, le refroidissement des gaz de la combustion est plus assuré, et quand, pour l'alimentation de la machine, on laisse écouler une partie de la vapeur formée, il est très-avantageux d'avoir à sa disposition un grand volume d'eau chaude, tout prêt à fournir de la vapeur.

Si, d'un autre côté, le volume de la vapeur déjà formée dans la chaudière n'est pas suffisamment grand, la moindre dépense déterminera une variation appréciable de pression; et d'ailleurs l'expérience a démontré qu'il était bon que cette vapeur séjournât dans la chaudière pour se dépouiller de l'eau qu'elle entraînerait sans cela, aux dépens de celle dans laquelle les bulles de vapeur passent avant d'arriver dans la chambre de vapeur.

Le volume total de la chaudière doit donc se répartir, d'une certaine façon, entre celui qui est occupé par l'eau et celui de la chambre de vapeur : nous nous occuperons séparément

de ces deux éléments de la question, en commençant par celui de ces deux volumes qui exerce certainement, sur le fonctionnement des machines, l'influence la plus grande.

471. Volume de la chambre de vapeur. — Les auteurs anglais, le docteur Lardner avec eux, fixent le volume de la chambre de vapeur à dix pieds cubes, pour chaque pied cubique d'eau à vaporiser par heure. Cette manière de présenter la question a cela de remarquable qu'elle fait bien saisir la relation qui doit exister entre le volume de l'eau vaporisée et le volume réservé à la vapeur dans la chaudière. La capacité de la chambre de vapeur devrait, suivant cette règle, être décuple du volume de l'eau vaporisée par heure, mais on arriverait ainsi à des dimensions exagérées qui n'ont jamais été admises dans la pratique, ainsi qu'en on pourra juger par le tableau suivant, des dimensions relevées sur un certain nombre de chaudières.

TABLEAU DU RAPPORT ENTRE LE VOLUME DE LA CHAMBRE DE VAPEUR ET CELUI DE L'EAU VAPORISÉE PAR HEURE.

Désignation des chaudières.	Volume de la chambre de vapeur.	Eau vaporisée par heure.	Rapport.
<i>Chaudières fixes.</i>			
Durenne (1855).....	2028 ^{lit.}	999 ^{lit.}	2,03
Farcot (1855).....	2319	984	2,35
Dolfus Mieg (1862).....	1570	788	2,09
Marozeau (1849).....	3358	380	2,00
Farcot (Dépotoir).....	424	120	3,53
Farcot (Conservatoire).....	1290	300	4,34
<i>Chaudières locomobiles.</i>			
Barbier et Daubrée.....	227	140	1,70
Renaud et Litz.....	227	124	1,70
Tuxford.....	125	130	0,90
Thomas et Laurens.....	182	229	0,80
Chaudières de locomotives.....	1500	700	2,50
Chaudières de bateaux.....	110 N.	25	4,40

On voit comment nous sommes conduits à reconnaître que, dans la pratique, le volume de la chambre de vapeur ne dépasse pas cinq fois celui de l'eau vaporisée par heure.

Il ne faudra cependant pas, surtout pour les chaudières des machines fixes, négliger les moyens d'augmenter le volume de cette chambre; les dômes de vapeur sont destinés à cet objet, et ils ont en outre l'avantage de porter la naissance de la prise de vapeur à une plus grande distance de la surface du liquide, condition très-importante, au point de vue de la diminution de la quantité d'eau entraînée.

472. Relation entre le volume de la chambre de vapeur et le volume d'admission dans les cylindres. — Le volume de la chambre de vapeur a été considéré par Tredgold, dans sa relation avec les volumes de vapeur qu'il doit successivement fournir aux cylindres des machines qu'il alimente. Sans entrer, quant à présent, dans aucun détail sur le fonctionnement des machines à vapeur, on peut dire cependant que la chaudière doit toujours contenir de la vapeur, en quantité telle que les emprunts, qui lui sont faits par la machine, ne puissent modifier la pression de cette vapeur que dans des limites très-étroites. Tredgold donne à ce sujet la théorie de la décroissance de la pression dans la chaudière; nous préférons, en la reproduisant dans son esprit général, la modifier ainsi qu'il suit :

Soient c le volume de la chambre de vapeur,

c' le volume de vapeur à fournir chaque fois au cylindre;

t le temps qui s'écoule entre le commencement d'un emprunt de vapeur et le commencement de l'emprunt suivant;

t' le temps pendant lequel l'écoulement a lieu.

Si l'on suppose que la chaudière fournit, dans le temps t , un volume c' de vapeur, et que sa production soit régulière, elle produira dans le temps t' un volume $\frac{c't'}{t}$, et si l'on considère la quantité de vapeur existant, à la fin de l'introduction, dans la chambre de vapeur, elle pourra être représentée par

$$c + c' \frac{t'}{t} - c';$$

cette vapeur occupant le volume c , sa pression, qui était précédemment p , deviendra

$$p' = \frac{p \left(c + \frac{c' t'}{t} - c' \right)}{c}$$

d'où l'on tire

$$p - p' = p - \frac{p \left(c + \frac{c' t'}{t} - c' \right)}{c} = \frac{p c'}{c} \left(1 - \frac{t'}{t} \right).$$

On pourra toujours calculer, avec cette formule, la valeur de c , convenable pour que les différences de pression soient renfermées entre des limites données à l'avance : si, par exemple, on veut que la variation ne soit pas plus grande que $\frac{1}{30}$ on aura

$$p - p' = \frac{p}{30} = \frac{p c'}{c} \left(1 - \frac{t'}{t} \right)$$

d'où l'on tire

$$c = 30 c' \left(1 - \frac{t'}{t} \right)$$

La quantité $\frac{t'}{t}$ diminuant en même temps que t' , on voit que la chambre de vapeur devra être d'autant plus grande que la durée de l'introduction dans le cylindre de la machine sera moindre ou que la machine marchera plus vite.

Nous reviendrons sur ces considérations en traitant des dimensions des cylindres, mais nous devons dire, dès à présent, qu'elles ne seront jamais de nature à donner à la chambre de vapeur un volume plus grand que celui auquel nous nous sommes arrêtés. En réalité, le calcul de Tredgold est plus ingénieux que pratiquement utile.

Armstrong, cependant, est d'avis que la règle posée par cet auteur a été sanctionnée par l'expérience, encore bien que la grande capacité de la chambre de vapeur soit plutôt nécessitée par la condition, que nous avons indiquée déjà, de ne permettre à la vapeur d'entraîner, avec elle, une trop grande proportion d'eau.

475. Volume d'eau des chaudières. — Des considérations analogues avaient primitivement conduit à la détermination du volume de l'eau que doivent contenir les chaudières à vapeur; cette détermination est basée, non plus sur l'intermittence de la dépense de vapeur, mais sur l'intermittence de l'introduction de l'eau dans la chaudière; on sait, en effet, que, dans la plupart des cas, l'alimentation de la chaudière se fait avec des pompes : soient v le volume d'eau, introduit par chaque coup de piston; t la température de cette eau; x le volume de l'eau de la chaudière, que nous supposons à la température T ; il est clair que, T' étant la température commune après le mélange, on aura :

$$(v+x) T' = v t + x T$$

d'où l'on tire

$$x = v \frac{T' - t}{T - T'}$$

Le volume x de la chaudière devra être d'autant plus grand que l'on voudra rendre la température plus constante : si, par exemple, on voulait que $T - T' = \frac{T}{30}$ il viendrait

$$T' = \frac{29}{30} T$$

et par suite

$$x = v \frac{\frac{29}{30} T - t}{\frac{T}{30}} = v \frac{29 T - 30 t}{T}$$

ou plus simplement, et avec une approximation suffisante,

$$x = 30 v \frac{T - t}{T}.$$

Si l'on voulait appliquer ce mode de calcul à une chaudière de Watt, alimentée avec de l'eau provenant de la condensation, il faudrait faire

$$T = 108^{\circ}, t = 35^{\circ},$$

d'où l'on tirerait

$$x = 30 v \times \frac{73}{108} = 20 v.$$

On pourrait, tout au plus, voir, dans ce calcul, un moyen de déterminer v , lorsque le volume de la chaudière est connu, et il nous paraît plus simple de dire que le volume d'eau de la chaudière n'a plus, à beaucoup près, l'importance qu'on lui accordait autrefois, depuis que l'on a vu qu'on pouvait même desservir, avec une certaine régularité, les machines à vapeur, par des chaudières à circulation, dans lesquelles le volume d'eau en réserve est presque nul.

Cependant il faut que le volume d'eau soit suffisant pour maintenir, autant que possible, l'égalité de pression indispensable, malgré les refroidissements résultant de l'alimentation, et surtout malgré les inégalités du feu, qui seront d'autant plus à craindre que le chauffeur sera moins habile, et que le combustible sera plus inégal dans sa combustion.

Les combustibles très-ardents, et les combustibles les plus lents sont également à craindre sous ce rapport : les premiers produisent immédiatement une grande chaleur et le feu tombe aussitôt que cesse la première flamme ; les autres, en se consumant avec lenteur, empêchent le renouvellement du combustible sur la grille, entraînent nécessairement de longs intervalles entre les charges, et, par conséquent, de longues périodes de feu modéré, après quelques instants d'une activité beaucoup plus grande.

Il est bon, d'après ces motifs, de recourir aux données de l'expérience qui sont en cette matière les guides les plus sûrs.

Le docteur Lardner donne une règle qui correspondrait, comme pour la vapeur, à 10 fois le volume de l'eau vaporisée par heure : elle n'a pas davantage un intérêt réel dans la question, si ce n'est peut-être pour les chaudières marines, dont l'eau se dépense, tout à la fois, par la vaporisation et par l'extraction. Pour que l'extraction soit effective, on comprend, dans ce cas, qu'un certain volume d'eau soit nécessaire, et les chiffres pratiques qui suivent devront servir de guide.

TABLEAU DU RAPPORT ENTRE LE VOLUME D'EAU DE LA CHAUDIÈRE
ET CELUI DE L'EAU VAPORISÉE PAR HEURE.

Désignation des chaudières.	Volume de l'eau contenue.	Eau vaporisée par heure.	Rapport.
<i>Chaudières fixes.</i>			
Durenne (1855).....	6950 ^{lit.}	999 ^{lit.}	6,96
Farcot (1855).....	5411	984	5,50
Dolfus Mieg (1859).....	7190	788	9,13
Marozeau (1849).....	9553	380	17,23
Farcot (Dépotoir).....	3013	300	10,05
Farcot (Conservatoire).....	500	120	4,18

Chaudières locomobiles.

Barbier et Daubrée.....	449	140	3,20
Renaud et Lotz.....	466	124	3,70
Tuxford.....	375	130	2,80
Thomas et Laurens.....	1226	229	5,34
Chaudières de locomotives,....	2500	600	4,00
Chaudières de bateaux.....	130 N.	25 N.	5,20

474. Volume total des chaudières. — Le volume total des chaudières est déterminé par la somme des deux volumes partiels dont il se compose : le volume de la chambre de la vapeur et le volume de l'eau. Une simple addition suffira pour former à cet égard le tableau suivant qui nous a permis de calculer la proportion de chacun des volumes élémentaires dans le volume total.

TABLEAU DE LA RÉPARTITION DU VOLUME
DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Désignation des chaudières.	Volume de la vapeur.	Volume de l'eau.	Proportion du volume total occupé par	
			l'eau.	la vapeur.
<i>Chaudières fixes.</i>				
Fouché.....	200 ^{lit.}	817 ^{lit.}	0,20	0,80
Montluçon.....	1120	8183	0,12	0,88
Carillon.....	252	1471	0,15	0,85
Durenne (1855).....	2028	6950	0,23	0,77
Farcot (1855).....	2309	5411	0,30	0,70
Marozeau (1849).....	3359	6553	0,34	0,66
Farcot (Dépotoir).....	1290	3013	0,30	0,70
Farcot (Conservatoire).....	424	500	0,46	0,54

TABLEAU DE LA RÉPARTITION DU VOLUME

DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Désignation des machines.	Volume de la vapeur.	Volume de l'eau.	Proportion du volume total occupé par	
			l'eau.	la vapeur.
<i>Chaudières fixes.</i>				
Prouvost (Mulhouse).....	1220	5280	0,17	0,81
Molinos et Pronnier.....	1940	3090	0,38	0,62
Zambeaux (1855).....	111	307	0,18	0,82
Clavières.....	132	115	0,53	0,47
Belleville.....	62	29	0,68	0,32
<i>Chaudières locomobiles.</i>				
Cail et C ^{ie}	231	407	0,36	0,64
Thomas et Laurens.....	182	1226	0,13	0,87
Renaud et Lotz.....	227	466	0,33	0,67
Barbier et Daubrée.....	247	449	0,36	0,64
Breval.....	121	385	0,24	0,76
Duvoir (verticale).....	228	597	0,28	0,72
Breval (verticale).....	121	285	0,19	0,81
<i>Chaudières de locomotives.</i>				
Moyennes de 20 machines.....	1300	2600	0,33	0,67
<i>Chaudières de bateaux.</i>				
Moyenne de 20 appareils.....	120 N.	130 N.	0,48	0,52

473. *Étendue de la surface de niveau d'eau.* — C'est seulement dans les chaudières de bateau que l'on attache à cette dimension une importance bien justifiée : si cette surface était trop restreinte, les bulles de vapeur la traverseraient tumultueusement; l'eau serait entraînée en grande proportion; la chaudière serait sujette à cracher. C'est encore à la production de vapeur par heure qu'il convient de comparer cette surface.

Le docteur Lardner donne une règle qui revient à 1^m.q,635 pour une vaporisation de 100 kilogrammes par heure.

Pour les chaudières de l'*Algésiras*, cette surface s'élève à 78^m.q,02, pour une vaporisation de 27 777 kilogrammes, soit seulement 0^m.q,28 pour 100 kilogrammes; on peut considérer ce rapport comme à peu près constant pour toutes les chaudières de mer, qui sont aujourd'hui construites, ainsi que nous l'avons indiqué déjà, suivant un type qui est aussi à peu près constant.

476. *Incertitude de la désignation des chaudières par l'indication du nombre des chevaux-vapeur.* — Jusqu'ici nous avons désigné les chaudières à vapeur d'après les quantités de vapeur qu'elles produisent, mais on les désigne souvent, dans l'industrie, d'après la puissance des machines qu'elles desservent: on dit ainsi qu'une chaudière est de 10 ou de 20 chevaux; mais cette désignation est extrêmement vicieuse, et elle jette souvent les industriels dans l'erreur.

Telle machine de 10 chevaux, qui consommera 30 kilogrammes de vapeur par heure et par cheval, ne pourra être entretenue avec une chaudière à vapeur qui desservirait une machine de 20 chevaux, consommant seulement, par heure et par cheval, 12 kilogrammes de vapeur. L'indication de la puissance de la machine laisse donc une très-grande incertitude sur les conditions relatives à la chaudière, et il importe que celles-ci soient toujours définies par l'indication de la quantité d'eau que l'appareil doit vaporiser.

Dans les chaudières de bateau seulement on se sert d'une expression, le cheval nominal, qui a un sens à peu près défini par ce que nous avons dit dans le n°462, et d'après lequel nous avons déjà déterminé les dimensions des diverses parties de la chaudière; on trouvera même, dans les tableaux relatifs à la plupart des chaudières citées, l'indication du volume d'eau et de vapeur, et de la surface de niveau par cheval nominal.

477. *Calcul des divers éléments d'une même chaudière.* — Afin de mettre en regard toutes les données relatives à la construction des chaudières à vapeur, nous ferons sommairement les calculs relatifs à la détermination des principaux éléments de quatre chaudières différentes, dans les conditions de leurs applications les plus usuelles.

478. *Projet d'une chaudière de machine fixe.* — Si l'on veut construire une chaudière de machine fixe consommant P kilogrammes de combustible par heure, on aura immédiatement la surface de la grille par la formule $P = G \times 70$, d'où $G = \frac{P}{70}$,

puisque l'on sait que ces sortes de foyers fonctionnent convenablement en consommant 70 kilogrammes par mètre carré de surface de grille et par heure.

Les barreaux seront peu épais, ils laisseront un espace libre de 0,33 G.

La surface de chauffe devra varier entre 25 et 30 G, ce qui est indiqué par la formule

$$S = 30 G = \frac{30P}{70} = 0,43P$$

environ et est d'ailleurs conforme au chiffre que nous avons donné pour la consommation de combustible, par mètre carré de surface de chauffe.

Si l'on veut construire une chaudière à bouilleurs latéraux, rien ne sera plus facile que de réaliser cette condition : elle ne pourra être obtenue, pour les chaudières à bouilleurs ordinaires qu'au moyen d'une très-grande longueur du corps.

La section de la cheminée sera donnée par la formule

$$G = \frac{P}{500};$$

celle des carnaux par la relation

$$G' = \frac{P}{300}.$$

Il ne reste plus qu'à déterminer le volume de la chambre de vapeur V, de manière que $V = 4P$ litres ou $5P$.

Celui de l'eau résultera de la construction même, et il suffit maintenant de calculer les éléments de la surface de chauffe totale

$$S = 0,40P.$$

Supposons qu'il s'agisse d'une chaudière à deux bouilleurs inférieurs; si D est le diamètre du corps principal, d le diamètre de ces bouilleurs, l la longueur, supposée commune, de ces trois parties du générateur, on aura ainsi :

$$S = \left(\frac{1}{2}\pi D + 2\pi d \right) l = \pi l \left(\frac{1}{2}D + 2d \right) = 0,40P.$$

On tire de là

$$l = \frac{0,40 P}{\pi \left(\frac{1}{2} D + 2d \right)} = \frac{0,127 P}{\frac{1}{2} D + 2d}.$$

On calculera d'abord la valeur de l en faisant

$$D = 1^m \quad d = 0^m,40,$$

ce qui donnera

$$2d + \frac{1}{2} D = 1^m,30,$$

et par suite

$$l = \frac{0,127 P}{1,30} = 0,1 P.$$

C'est-à-dire que l'on obtient d'abord une évaluation très-simple de la longueur en prenant en mètres le 10^e du poids du combustible consommé par heure exprimé en kilogrammes; si cette longueur est convenable, et elle le sera jusqu'à la valeur $P = 80$ kilogrammes, on adoptera l'ensemble de ces dispositions, sinon on fera de nouvelles hypothèses sur D et d , savoir :

$$D = 1^m,20 \quad d = 0^m,50,$$

auquel cas

$$\frac{D}{2} + 2d = 1^m,60,$$

ce qui donnera une nouvelle longueur

$$l' = \frac{0,127 P}{1,60} = 0,08 P,$$

qui conviendra pour une consommation de 80 à 120 kilogrammes. Pour une consommation plus grande, il vaudra mieux employer deux chaudières, calculées chacune isolément, pour une vaporisation de $\frac{1}{2} P$ seulement.

On a remarqué que nous avons toujours pris $d < \frac{1}{2} D$, afin que les deux bouilleurs puissent se placer, l'un à côté de

l'autre, au-dessous de la chaudière, d'une manière commode pour le déplacement de tout l'appareil à la fois, sans attaquer le gros de la maçonnerie. Cela n'est plus possible pour les bouilleurs latéraux auxquels on donne habituellement un diamètre $d = \frac{1}{2}D$, ce qui permet de simplifier le dénominateur de la formule ainsi qu'il suit :

$$\frac{D}{2} + 2d = \frac{3D}{2}.$$

Il vient alors

$$l = \frac{0,127 P}{\frac{3}{2}D} = \frac{0,085 P}{D};$$

si $D = 1^m$: $l = 0,085 P$;

si $D = 1^m,20$: $l = 0,070 P$.

Dans les calculs qui précèdent, nous avons négligé de tenir compte des surfaces de chauffe formées par les fonds de la chaudière et ceux des bouilleurs, mais il conviendra de les faire entrer dans les calculs définitifs, en diminuant un peu la longueur du corps principal. Il sera du reste convenable de choisir toujours des diamètres et des longueurs qui permettent d'employer, sans perte, les tôles du commerce.

479. *Projet d'une chaudière de machine locomobile.* — Pour les machines locomobiles, on emploiera la relation suivante :

$$G = \frac{P'}{85}$$

qui exprime que la quantité de combustible brûlé, par mètre carré de surface de grille et par heure, est de 85 kilogrammes.

La section totale des tubes sera donnée par la formule

$$c' = \frac{P'}{700}.$$

On connaîtra facilement le nombre des tubes en égalant cette valeur de c' à leur section totale

$$\pi r^2 \times n = \frac{P'}{700},$$

d'où $\pi r n = \frac{P'}{700r}$

et $n = \frac{P'}{700\pi r^2}.$

En général, la surface de chauffe des boîtes à feu et à fumée sera peu différente de

$$s' = 6G = \frac{6P'}{85} = 0,07 P';$$

la surface totale de chauffe des tubes est

$$s' = 2\pi r \times nl = 2 \frac{P'}{700r} l = \frac{Pl}{350r};$$

si l'on veut que la surface de chauffe soit égale à

$$S = 30G = \frac{30P'}{85} = 0,35 P',$$

on a immédiatement la relation

$$S = s + s' = 0,35 P' + 0,07 P' = \frac{Pl}{350r},$$

d'où $l = 350r (0,35 - 0,07) = 350 \times 0,28r = 100r.$

Les tubes, dans ces conditions, auraient donc une longueur de 2^m,50 à 3 mètres, suivant que l'on adopterait pour leur rayon 0^m,025 ou 0^m,03, c'est-à-dire des diamètres de 5 ou de 6 centimètres.

Ce dernier chiffre devra être considéré comme un minimum pour les chaudières dans lesquelles on se proposera de brûler de la houille.

Si cette longueur paraissait trop considérable, et elle le serait en effet pour les machines montées sur roues, il faudrait se contenter de faire

$$S = 25 \cdot G = \frac{25P'}{85} = 0,30 P',$$

auquel cas la valeur de l deviendrait

$$l = 350r (0,30 - 0,07) = 80r,$$

ce qui n'exigerait plus que des longueurs de 2^m,00 ou de 2^m,40 suivant que l'on emploierait des diamètres de 5 ou 6 centimètres.

On voit maintenant pourquoi les gros tubes sont d'un placement difficile, mais il n'en est pas moins avantageux d'allonger la chaudière, ainsi que l'exige l'emploi des grands diamètres, et de s'assurer ainsi une meilleure utilisation du combustible.

On déterminera la section de la cheminée par la relation

$$C = \frac{P'}{600},$$

qui conduira toujours à une valeur suffisante de son diamètre.

Ces premières dimensions pourront être modifiées par une étude plus complète : elles serviront seulement à déterminer les principaux éléments du projet, dans lequel on cherchera d'ailleurs à grouper les tubes de manière que le diamètre extérieur du corps cylindrique ne dépasse pas 1 mètre à 1^m,20, pour rester dans les conditions ordinaires de la pratique.

Si la chaudière était à retour de flamme on ferait

$$S = 36G,$$

en distribuant cette surface totale de manière à trouver à peu près une surface égale à 7G dans les boîtes à feu et à fumée, à 20G dans les tubes de retour de flamme, et à 8 ou 10G dans les carreaux qui aboutissent au foyer.

Quant au volume de vapeur, on prendra soin qu'il soit égal au double du volume d'eau à vaporiser par heure, en laissant au moins une hauteur d'eau de 0^m,15 au-dessus du dernier tube; le complément du volume V sera fourni par un dôme de vapeur aussi grand et aussi haut que possible.

On voit, par ces indications, que les dimensions des chau-

dières locomobiles ne sont variables qu'entre des limites très-restreintes. Dans les petites chaudières on pourra diminuer la longueur, mais non le diamètre des tubes, en ayant soin d'augmenter leur nombre dans une proportion convenable.

480. *Projet d'une chaudière de machine locomotive.* — L'élaboration complète d'un projet de chaudière locomotive exige une connaissance approfondie de l'art de l'ingénieur, et nous n'avons d'autre but, dans ce paragraphe, que de déterminer les éléments principaux d'un avant-projet.

Soient P et P' les poids d'eau et de coke à dépenser par heure, nous savons que l'on a

$$P = 8P'.$$

La surface de la grille sera donnée par la formule

$$G = \frac{P'}{280},$$

qui correspond à une combustion de 280 kilogrammes par mètre carré.

La surface de chauffe totale sera donnée par la formule

$$S = \frac{P'}{3,80},$$

qui suppose une consommation de 3^{kil},80 de combustible par mètre carré de surface de chauffe et un rapport $\frac{280}{3,8} = 73$ entre la surface de chauffe et la surface de grille.

La section totale des tubes s'obtiendra en faisant

$$c = \frac{P'}{2000} = \pi r^2 n,$$

d'où

$$n = \frac{P'}{2000\pi r^2},$$

qui devient

$$n = \frac{P'}{2,5},$$

si l'on suppose que les tubes ont 4 centimètres de diamètre à l'intérieur des viroles.

On se trompera peu en admettant que la surface de chauffe directe, augmentée de celle de la boîte à fumée, s'élève à

$$10G = \frac{P'}{28}.$$

La surface de chauffe totale sera alors

$$S = \frac{P'}{3,80} = \frac{P'}{28} + 2\pi rn \times l$$

d'où, en remarquant que

$$2\pi rn = \frac{2\pi r^2 n}{r} = \frac{P'}{1000r},$$

et en substituant, on tire

$$\frac{P'}{3,80} - \frac{P'}{28} = l \frac{P'}{1000r},$$

et enfin

$$\frac{l}{1000r} = \frac{1}{3,80} - \frac{1}{28}$$

et $l = 242r$; pour $r = 0^m,02$ on aurait $l = 4^m,80$

ce qui est à peu près la longueur des chaudières ordinaires : cette dimension d'ailleurs pourra être modifiée dans les calculs définitifs.

L'enveloppe cylindrique des tubes aura un diamètre de 1 mètre à 1^m,20, de manière à obtenir une chambre de vapeur, qui, avec un dôme convenable, s'élève au moins à 2P litres.

Quant à la section de la cheminée, on a

$$C = \frac{P'}{2800},$$

d'où il est facile de déduire la valeur approximative du diamètre.

481. Projet d'une chaudière de bateau. — La solution de ce problème est la plus simple de toutes, puisqu'il suffira toujours de déterminer le nombre des groupes de chaudières,

chacun d'eux devant convenir à une puissance nominale de 100 chevaux environ; les différents corps présenteront alors la forme de ceux que nous avons décrits, et il suffira de les grouper ensemble de manière à rendre leur service facile et à éviter l'encombrement.

Les indications du n° 463 seront, dans tous les cas, suffisantes, alors que l'on sait que chaque cheval nominal correspond à une consommation de 20 kilogrammes de vapeur sensible, et de 3 kilogrammes de combustible par heure.

Trois grilles de 2 mètres carrés formeront une surface totale de $3 \times 2 = 6^{\text{m}^2}$, qui, à raison de 70 kilogrammes par mètre carré, correspondraient à une consommation de 400 kilogrammes de combustible par heure.

482. Pouvoir de vaporisation des chaudières. — Nous venons de voir, avec quelques détails, comment on peut calculer les éléments principaux de la construction d'une chaudière à vapeur, lorsque l'on connaît la quantité de vapeur qu'elle doit fournir; le problème inverse peut aussi se présenter; il doit s'énoncer ainsi : une chaudière à vapeur étant donnée, déterminer la quantité de vapeur qu'elle peut fournir en une heure, en marche régulière. Armstrong, qui a traité cette question, a donné une formule assez simple que voici :

$$P = \frac{1}{2} (F + S).$$

P étant la puissance en chevaux, F, la surface de la grille en pieds carrés, S la surface de chauffe en yards carrés.

Quelque soin que nous ayons pris de transformer les divers éléments de cette formule en mesures françaises, nous n'avons pu en déduire aucune expression satisfaisante du pouvoir de vaporisation des chaudières, et nous ne saurions, dès lors, indiquer aucune autre règle à suivre que celles qui résultent des chiffres de vaporisation par mètre carré de surface de chauffe, chiffres qui varient, comme nous l'avons vu, de 20 à 35 kilogrammes, suivant l'étendue de la sur-

face de chauffe, par rapport à la surface de grille; mais ce dernier chiffre n'est applicable qu'aux locomotives; pour toute autre chaudière, établie dans les conditions ordinaires, le chiffre de la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe et par heure ne variera qu'entre 15 et 25 kilogrammes.

485. Production de vapeur en service courant. — Les divers résultats que nous avons indiqués ont été obtenus dans des conditions exceptionnelles, alors que la sollicitude des chauffeurs était surexcitée; les appareils étant, en général, en bon état d'entretien, les chaudières souvent neuves, les carneaux bien nettoyés, les registres ouverts seulement de la quantité nécessaire pour produire le meilleur tirage. Dans bien des cas, le combustible dépensé pour la mise en vapeur n'a pas été compté; enfin il a été fait déduction du temps de chômage, pendant les heures de repas des ouvriers, toutes circonstances qui, en service courant, ne laissent pas que d'avoir une assez grande importance sur la consommation moyenne d'une année.

Nous ne pensons pas que les meilleurs appareils vaporisent en service courant, plus de 6 kilogrammes de combustible, et c'est en voulant comparer la consommation courante à celle d'une expérience isolée que les inventeurs de nouvelles dispositions parviennent souvent à faire supprimer des installations tout aussi bonnes que les leurs.

L'importance des soins journaliers est très-grande; un chauffeur habile et actif, qui saura gouverner ses feux avec modération, tirera toujours bon parti d'une chaudière, si la surface de chauffe n'est pas disproportionnée avec l'effet à produire.

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE PREMIER VOLUME.

CHAPITRE PREMIER.

GAZ ET VAPEURS.

I. *Propriétés des vapeurs.*

N ^{os}	Pages.
1. Les corps se présentent sous trois états différents.	1
2. Caractères des gaz.	3
3. Distinction entre les gaz et les vapeurs.	3
4. Principales propriétés qui intéressent l'étude des machines à vapeur.	4
5. De la pression atmosphérique et de sa mesure.	6
6. Loi de Mariotte sur la compressibilité des gaz	9
7. Expériences de Dulong et Arago.	9
8. Expériences de M. Regnault.	10
9. Conclusion sur l'emploi de la loi de Mariotte dans les calculs. . .	11
10. Représentation graphique entre les volumes et les pressions d'une même quantité de gaz.	12
11. Détente des gaz	13
12. Application de la loi de Mariotte aux vapeurs.	13
13. Appareil de M. Regnault.	14
14. Expériences de M. Morin.	15
15. Résultats généraux des observations.	16
16. Comparaison entre les résultats de l'observation et les lois proposées pour la détente de la vapeur.	16
17. Condensation résultant de la détente.	17

II. *Tension des vapeurs.*

18. Tension maxima de la vapeur.	17
19. Relation entre la tension maxima et la température d'ébullition des liquides.	18
20. Tension maxima de la vapeur d'eau aux différentes températures	18
21. Expériences de Watt.	18
22. Expériences de Dalton.	19
23. Expériences d'Arago et Dulong.	21
24. Expériences de l'Institut de Franklin.	21
25. Expériences de M. Regnault.	22
26. Tables des tensions et des températures de la vapeur d'eau saturée.	23

N ^{os}	Pages.
27. Représentation graphique de la relation entre la température et la pression maxima de la vapeur d'eau.	29
28. Forces élastiques de quelques autres vapeurs.	30
29. Formules qui expriment la relation entre la température et la tension de la vapeur d'eau saturée.	32
30. Formule de Dalton.	32
31. Formule de Tredgold.	35
32. Formule de Roche.	36
33. Formule de Coriolis.	37
34. Formule d'Arago et Dulong.	38
35. Formules de M. Regnault.	38
36. Comparaison entre les différentes formules proposées pour exprimer la relation entre la tension maxima de la vapeur et sa température.	40
37. Conclusion.	41

III. Dilatation des gaz et des vapeurs.

38. Loi de Gay-Lussac sur la dilatation des gaz.	42
39. Module ou binôme de dilatation.	42
40. Expériences de M. Regnault.	44
41. Dilatation de l'air sous diverses pressions.	44
42. Dilatation des gaz à pression constante ou à volume constant.	45
43. Représentation graphique de la loi de Gay-Lussac sur la dilatation des gaz.	45
44. Coefficient de dilatation des différents gaz.	46
45. Coefficient de dilatation de l'air aux diverses températures.	47
46. Formule anglaise de la dilatation des gaz.	48
47. Combinaison de la loi de Mariotte avec celle de Gay-Lussac.	49
48. Autre disposition de la formule combinée.	50
49. Formule anglaise correspondante.	50
50. Condition nécessaire pour obtenir de grandes pressions par l'action de la chaleur sur les gaz.	51
51. Action combinée de la chaleur et de la pression sur les vapeurs.	52
52. Action de la chaleur et du froid sur les vapeurs.	53
53. Action d'une augmentation ou d'une diminution de pression.	54
54. Représentation graphique des résultats.	54
55. Des conditions dans lesquelles se trouve la vapeur dans les machines.	58
56. Vapeur humide.	58
57. Vapeur détendue.	58
58. Vapeur surchauffée.	59
59. Rapprochement à établir entre la vapeur détendue et la vapeur surchauffée.	60
60. Tension de la vapeur dans un espace inégalement chaud.	60
61. Tension d'un mélange de gaz et de vapeur.	61

IV. Densités des gaz et des vapeurs.

62. De la densité et de l'unité de densité.	62
63. Poids du mètre cube et volume du kilogramme.	62
64. Densité de l'air et de quelques gaz.	63

TABLE DES MATIÈRES.

535

N ^{os}	Pages.
65. Détermination de la densité d'un gaz suivant sa pression et sa température.	63
66. Expériences de Gay-Lussac sur la détermination de la densité de la vapeur d'eau.	64
67. Conséquences de ces expériences.	65
68. Résultats obtenus par divers physiciens sur la densité de la vapeur d'eau.	66
69. Appareil de M. Regnault.	67
70. Observation tirée de la composition de l'eau.	67
71. Expériences de M. Regnault.	68
72. Poids d'un mètre cube de vapeur aux diverses températures et aux diverses pressions.	68
73. Volumes d'un kilogramme de vapeur aux diverses températures et aux diverses pressions.	69
74. Tableau des poids du mètre cube et des volumes du kilogramme de vapeur d'eau, aux diverses températures et aux diverses pressions.	70
75. Rapport entre le volume de la vapeur saturée et le volume de l'eau liquide.	71
76. Indicateur du point de saturation de M. W. Fairbairn.	72
77. Appareil de M. W. Fairbairn.	73
78. Tableau indiquant la relation entre la densité, la pression et la température de la vapeur saturée, d'après les expériences de MM. W. Fairbairn et Tate.	74
79. Relation entre le volume spécifique et la pression de la vapeur saturée.	75
80. Relation entre le volume et la pression de la vapeur d'eau saturée.	76
81. Formule de Navier.	77
82. Formule de M. de Pambour.	77
83. Application à la vapeur non saturée.	78
84. Poids du mètre cube de vapeur surchauffée à pression constante.	78
85. Expériences de MM. W. Fairbairn et Tate sur la vapeur surchauffée.	79
86. Formule de M. Clausius.	81
87. Conclusions quant aux calculs de la densité de la vapeur d'eau saturée et non saturée, dans les applications.	83
88. Expériences de MM. Lyon Playfair et Wanklin.	83

V. Chaleur employée à la formation des vapeurs.

89. Définition de l'unité de chaleur ou calorie.	84
90. Chaleur spécifique ou capacité des corps pour la chaleur.	84
91. Méthode des mélanges.	85
92. Expériences de M. Regnault sur l'eau liquide.	86
93. Tableau de la chaleur spécifique de quelques substances de 0° à 100°.	87
94. Loi de Dulong et Petit.	88
95. Lois de la chaleur spécifique des corps composés.	89
96. Chaleur spécifique des gaz.	89
97. Expériences de M. Regnault.	90
98. Capacité de l'air atmosphérique sous des pressions et des températures différentes.	92
99. Loi de Dulong sur la chaleur spécifique des gaz.	94

N ^{os}	Pages.
100. Chaleur spécifique des gaz à volume constant.	96
101. Chaleur spécifique de l'air à volume constant.	97
102. Chaleur spécifique des vapeurs.	97
103. Chaleur spécifique de la vapeur d'eau.	98
104. Chaleur latente	98
105. Chaleur latente de vaporisation.	99
106. Chaleur totale de la vapeur d'eau.	99
107. Loi de Watt	100
108. Loi de Southern.	100
109. Expériences de M. Regnault.	100
110. Résultats généraux des expériences de M. Regnault.	102
111. Chaleur contenue dans un kilogramme de vapeur saturée.	102
112. Chaleur latente ou de formation de la vapeur d'eau	103
113. Comparaison entre la formule de M. Regnault et celles de Watt et de Southern.	104
114. Chaleur totale de la vapeur surchauffée.	105
115. Chaleur totale de la vapeur humide.	105
116. Quantité d'eau à injecter pour condenser un kilogramme de vapeur.	106
117. Tableau général des données numériques relatives à la vapeur d'eau saturée.	107
118. Tableau général des données numériques relatives aux vapeurs des divers liquides.	108

VI. Action mécanique de la vapeur.

119. Mode d'action de la vapeur dans les phénomènes mécaniques. . .	110
120. Emploi général de la pression de la vapeur comme force motrice. .	110
121. Transmission de l'action de la vapeur à distance.	111
122. Précautions à prendre pour cette transmission.	111
123. Travail théorique de la vapeur à pleine pression	112
124. Observation sur le travail de la vapeur à pleine pression.	112
125. Travail théorique par unité de chaleur dépensée.	113
126. Travail de la détente.	114
127. Perte de chaleur et de travail à l'échappement.	114
128. Utilisation d'une partie de la chaleur conservée par la vapeur à l'échappement.	115
129. Notion sur l'équivalent mécanique de la chaleur.	115
130. Comparaison entre les chaleurs spécifiques de l'air à pression constante et à volume constant.	116

CHAPITRE II.

DES COMBUSTIBLES ET DE LEUR POUVOIR CALORIFIQUE.

I. De la combustion et de ses produits.

131. Chaleur dégagée ou absorbée dans les réactions chimiques. . . .	119
132. Combinaison avec l'oxygène.	119
133. Des corps combustibles et des conditions nécessaires à la combustion.	119
134. Composition de l'air atmosphérique.	120

TABLE DES MATIÈRES.

537

Nos	Pages.
135. Composition des combustibles.	121
136. Proportions dans lesquelles les gaz sont consommés ou produits dans la combustion du carbone et de l'hydrogène.	124
137. Combustion par l'air atmosphérique.	124
138. Volumes des produits de la combustion de 1 mètre cube des différents gaz combustibles par l'oxygène et par l'air	127
139. Volumes d'air et d'oxygène nécessaires pour brûler 1 kilogramme des différents combustibles.	129

II. *Quantité de chaleur dégagée par la combustion.*

140. Détermination de la quantité de chaleur dégagée par la combustion.	131
141. Expériences de MM. Favre et Silbermann.	131
142. Chaleur dégagée par la combinaison de 1 kilogramme d'oxygène avec différents combustibles.	132
143. Observation sur le pouvoir calorifique de l'hydrogène.	133
144. Quantités de chaleur dégagées par un même corps, à des degrés d'oxydation différents.	134
145. Chaleur dégagée par la combustion des corps composés.	134
146. Chaleur dégagée par la combustion de quelques corps composés.	136
147. Observation sur les combustibles liquides.	136
148. Composition et pouvoir calorifique de l'huile de colza.	137
149. Application des données précédentes à la détermination de la température initiale des gaz brûlés.	138
150. Énumération des combustibles employés dans l'industrie.	139
151. Quantité d'air nécessaire à la combustion.	141
152. Volume des produits gazeux de la combustion.	141
153. Pouvoirs calorifiques des combustibles de l'industrie.	142

III. *Combustibles de l'industrie.*

154. Combustibles solides.	142
155. Combustibles minéraux.	143
156. Gisement des combustibles minéraux.	143
157. Caractères chimiques des combustibles minéraux.	144
158. Classification industrielle des houilles.	146
159. Composition des houilles.	147
160. Expériences de M. de Marsilly.	154
161. Analyse de la houille de Ronchamp par M. Rivot.	155
162. Houilles de Sarrebruck.	156
163. Houille chinoise.	157
164. Généralités sur la composition de la houille.	157
165. Expériences de MM. Richardson et Liebig.	158
166. Poids de l'hectolitre de houille.	159
167. Propriétés et usages de la houille.	160
168. Altérabilité de la houille.	161
169. Propriétés et usages des anthracites	163
170. Propriétés et usages des lignites	163
171. Propriétés et usages de la tourbe.	163
172. Du coke	165
173. Classification des cokes.	165

Nos	Pages.
174. Composition du coke.	165
175. Altérabilité de la houille par rapport à la fabrication du coke. . .	166
176. Rendement des houilles en coke.	167
177. Proportion des cendres dans le coke.	167
178. Composition des cendres de coke.	168
179. Propriétés et usages du coke.	170
180. De la tourbe carbonisée.	171
181. Combustibles minéraux artificiels.	171
182. Combustibles végétaux.	173
183. Classification des bois.	173
184. Composition chimique des bois.	174
185. Proportion d'eau hygrométrique	175
186. Poids du stère de bois.	176
187. Propriétés et usages des bois.	178
188. Menus combustibles végétaux.	179
189. Charbon de bois.	181
190. Rendement des bois en charbon.	182
191. Combustibles végétaux artificiels.	183
192. Des combustibles gazeux.	184
193. Oxyde de carbone.	184
194. Composition du gaz d'éclairage.	185
195. Combustion du gaz d'éclairage	186
196. Volume des produits de la combustion.	188
197. Composition des gaz des hauts fournaux.	189
198. Combustion des gaz des hauts fournaux.	190
199. Autres combustibles gazeux.	191
200. Air atmosphérique chargé de vapeurs d'hydrocarbures	192
201. Propriétés et usages des combustibles gazeux.	192

IV. *Pouvoirs calorifiques et valeurs comparatives des combustibles de l'industrie.*

202. Détermination du pouvoir calorifique des combustibles.	193
203. Expériences à faire.	194
204. Pouvoir calorifique des combustibles	195
205. Pouvoir calorifique des combustibles solides, déduit de leur composition chimique.	195
206. Quantité d'eau qu'un kilogramme de combustible peut vaporiser.	198
207. Expériences faites sur la quantité d'eau que peut vaporiser 1 kilogramme des différents combustibles.	199
208. Expériences de MM. de La Bèche et Playfair.	199
209. Expériences de M. Brix.	202
210. Expériences de M. Wicksteed.	203
211. Observations sur l'état de combinaison dans lequel se trouve l'hydrogène dans les combustibles.	203
212. Expériences de Johnston.	204
213. Essai des combustibles minéraux par l'oxyde de plomb.	205
214. Comparaison entre les diverses valeurs obtenues pour le pouvoir calorifique des combustibles carbonisés.	206
215. Comparaison entre les diverses valeurs obtenues pour le pouvoir calorifique des combustibles crus.	207
216. Expériences sur l'action de la vapeur d'eau dans les foyers.	208

N ^o	Pages.
217. Emploi des hydrocarbures liquides pour le chauffage des chaudières à vapeur.	209
218. Pouvoir calorifique des gaz.	210
219. Pouvoir calorifique de l'oxyde de carbone	210
220. Pouvoir calorifique du gaz d'éclairage	210
221. Pouvoir calorifique du gaz des hauts-fourneaux.	211
222. Tableau résumé des pouvoirs calorifiques des différents combustibles de l'industrie.	212
223. Valeurs relatives des combustibles.	212
224. Pouvoir rayonnant des combustibles.	213
225. Valeurs comparatives de diverses qualités de houille.	215
226. Valeurs comparatives de la houille et du coke.	216
227. Valeurs comparatives du bois et de la houille.	218
228. Résumé des données générales relatives aux combustibles de l'industrie	218

CHAPITRE III.

DESCRIPTION GÉNÉRALE DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES
DE CHAUDIÈRES A VAPEUR.

I. Considérations générales.

229. Des chaudières à vapeur.	221
230. Distinction en chaudières à foyer extérieur et chaudières à foyer intérieur.	223

II. Chaudières à foyer extérieur.

231. Chaudières à foyer extérieur.	224
232. Chaudières de Watt.	225
233. Chaudières cylindrique de Woolf.	227
234. Chaudières horizontales à deux étages superposés.	229
235. Chaudière cylindrique à bouilleurs inférieurs	231
236. Chaudière cylindrique à trois bouilleurs inférieurs	232
237. Chaudière cylindrique à bouilleurs latéraux	234
238. Chaudières verticales.	236
239. Chaudières à bouilleurs verticaux de M. Beslay.	237
240. Chaudières mixtes, à foyer extérieur et à carneaux intérieurs.	238
241. Chaudière de Butterley.	238
242. Chaudières Farcot à bouilleurs de retours de flamme.	239
243. Chaudière à bouilleurs de retour de flamme de M. Prouvost.	239
244. Chaudières à bouilleurs de retour de flamme de MM. Holcroft et Joyle.	240
245. Chaudière fixe de MM. Molinos et Pronnier.	241

III. Chaudières à foyer intérieur.

246. Chaudière à foyer intérieur.	241
247. Chaudière cylindrique à foyer intérieur.	242
248. Chaudières cylindriques à deux foyers intérieurs.	244
249. Chaudières mixtes à foyer intérieur et à carneaux extérieurs.	245

N ^{os}	Pages.
250. Chaudières verticales à foyer intérieur.	246
251. Chaudières à foyer intérieur et à galeries de fumée.	248
252. Chaudières à bouilleurs supérieurs servant de retour de flamme.	248
253. Chaudières dites à galeries.	249

IV. Chaudières tubulaires.

254. Chaudières tubulaires.	252
255. Chaudière tubulaire de Joël Barlow.	252
256. Chaudières des locomotives.	253
257. Application des chaudières tubulaires aux machines locomobiles.	257
258. Chaudières tubulaires pour bateaux.	258
259. Chaudières à retour de flamme par des tubes.	258
260. Chaudières marines à retour de flamme.	259
261. Chaudières marines actuelles.	259
262. Application des chaudières à retour de flamme aux machines locomobiles.	262
263. Chaudière de la locomotive Tuxford.	262
264. Chaudières elliptiques.	263
265. Chaudières à double retour de flamme.	264
266. Chaudière verticale de M. Zambaux.	264

IV. Chaudières à tubes accessibles.

267. Chaudière à foyer amovible.	265
268. Chaudière à tronçons tubulaires de M. Durenne.	266
269. Chaudière de M. Chevalier.	268
270. Chaudière à foyer amovible de M. Pérignon.	269
271. Chaudière locomobile de MM. Thomas, Laurens et Pérignon.	270
272. Application des chaudières à foyer amovible aux machines fixes.	271
273. Chaudière fixe à foyer amovible de MM. Farcot et fils.	272
274. Chaudière locomobile à foyer amovible de MM. Farcot et fils.	275

V. Chaudière à circulation rapide.

275. Chaudières à circulation d'eau.	276
276. Chaudière à circulation de Jacob Perkins.	277
277. Chaudière Izoard.	279
278. Chaudières à circulation et à réservoir de vapeur.	280
279. Chaudière de M. Belleville.	280
280. Chaudière Belleville employée avec l'eau de mer.	284
281. Chaudière de M. Clavières.	284
282. Chaudière à circulation de M. Joly, d'Argenteuil.	285
283. Chaudière de MM. Hédiard et Joly.	286
284. Chaudières à circulation et à réservoirs d'eau et de vapeur.	287
285. Chaudière Larmanjat.	287
286. Chaudière anglaise de Scott.	288
287. Chaudière de M. Boutigny.	289
288. Comparaison entre les chaudières à circulation et les chaudières ordinaires.	293

VI. Chaudières chauffées au gaz.

Nos	Pages.
289. Dispositions diverses de ces chaudières.	295
290. Chaudière horizontale pour combustible mixte.	295
291. Emploi des flammes des fours à puddler et à réchauffer.	295
292. Chaudière verticale de MM. Cail et Cie	296
293. Chaudières anglaises chauffées par les flammes perdues des fours à puddler.	297
294. Chaudière horizontale et verticale de MM. Claparède et Commartin.	297

VII. Résumé.

295. Observation sur le volume des chaudières à vapeur	298
296. Emploi des divers systèmes de chaudières à vapeur suivant leur destination	299

CHAPITRE IV.

DÉVELOPPEMENT ET UTILISATION DE LA CHALEUR DANS LES FOYERS
DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

I. Production de la chaleur.

297. Développement de la chaleur par la combustion.	301
298. Combustion du carbone dans les foyers des chaudières à vapeur.	301
299. Formation et combustion de l'oxyde de carbone.	302
300. Formation de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone.	302
301. Entraînement mécanique de parcelles charbonneuses.	303
302. Combustion de l'hydrogène dans les foyers des chaudières à vapeur.	304
303. Combustion des hydrocarbures gazeux.	305
304. Formation de la fumée.	305
305. Phases successives de la combustion après chaque chargement.	306
306. Température des corps en ignition.	307
307. Expériences de M. Wye Williams	308
308. Longueur de la flamme.	311
309. Expériences de M. Houldsworth.	311

II. Air consommé et gaz produits.

310. Détermination de la quantité d'air consommée.	315
311. Résultats d'expériences sur les quantités d'air fournies à la combustion	316
312. Expériences de M. Combes.	317
313. Analyses de M. Debette.	317
314. Expériences de MM. Foucou et Amiguis.	319
315. Comparaison avec les gaz des hauts fournaux	320
316. Proportion du carbone transformé en acide carbonique dans les foyers des locomotives.	321
317. Expériences de Johnstone	322
318. Composition des gaz de la combustion dans les fourneaux à bois.	324
319. Composition des gaz de la combustion, dans un fourneau à tourbe.	324

N ^{os}	Pages.
320. Circonstances qui influent sur la proportion de l'azote dans les gaz brûlés.	325
321. Détermination de la quantité d'air introduite, d'après les résultats de l'analyse.	326

III. Utilisation de la chaleur développée.

322. Utilisation de la chaleur produite par la combustion.	327
323. Transmission de la chaudière.	328
324. Chauffage par radiation.	328
325. Chauffage par contact.	329
326. Conductibilité des corps pour la chaleur.	330
327. Lois générales de la conductibilité.	331
328. Quantité de chaleur qui traverse une lame de métal dont les deux faces sont maintenues respectivement à des températures T et T'.	331
329. Cas où la température est variable sur la face la plus froide.	332
330. Détermination du coefficient de conductibilité absolue.	333
331. Coefficients de conductibilité absolue de quelques corps.	334
332. Limites entre lesquelles ces coefficients pourront être employés.	335
333. Observations à faire sur les conditions de la pratique.	336
334. Influence de l'épaisseur des chaudières.	337
335. Différence de température entre les deux parois d'une même chaudière.	337
336. Refroidissement d'un tuyau alimenté de vapeur et exposé à l'air libre.	338
337. Incertitude des données expérimentales.	338
338. Formule pratique proposée	339

IV. Vaporisation produite par les diverses parties de la surface de chauffe.

339. Influence des diverses parties de la surface de chauffe.	339
340. Premières expériences de M. John Graham.	340
341. Expériences de M. Graham sur des chaudières cylindriques juxtaposées.	341
342. Comparaison entre l'effet utile de la surface de chauffe indirecte, au-dessus et au-dessous de 100 degrés.	344
343. Expériences de MM. Devrance et Woods sur la vaporisation produite par les différentes parties des tubes.	344
344. Expériences de M. Wye Williams.	345
345. Loi de la décroissance de la vaporisation.	347

V. Influence des autres circonstances de la pratique des ateliers.

346. Influence des principales circonstances de la pratique.	348
347. Influence de la grandeur des grilles	348
348. Influence de la section libre des grilles.	349
349. Avantages que présentent les barreaux minces.	350
350. Distance entre la grille et la chaudière.	351
351. Dimensions des carneaux.	351
352. Importance du fréquent nettoyage des carneaux.	352
353. Influence du refroidissement par les tubes.	353
354. Influences atmosphériques.	353

TABLE DES MATIÈRES.

543

Nos	Pages.
355. Influence de la fréquence des charges.	354
356. Conduite du feu.	355

CHAPITRE V.

CAUSES DES PERTES DE CHALEUR DANS LES FOURNEAUX
DES CHAUDIÈRES À VAPEUR.

357. Principales causes des pertes de chaleur.	357
358. Pertes par les escarbilles et par les cendres.	357
359. Pertes par défaut de combustion.	358
360. Perte par les gaz brûlés.	360
361. Relation entre les pertes par défaut de combustion et les pertes par les gaz brûlés.	362
362. Difficulté de ne consommer qu'une petite quantité d'air.	364
363. Appréciation moyenne de la perte par les gaz brûlés.	364
364. Détermination directe de la température des gaz brûlés.	365
365. Détermination de la température des gaz brûlés par la fusion d'un fil de métal.	367
366. Détermination de la température des gaz brûlés, au moyen d'une masse de métal chauffée.	367
367. Pertes dues aux rentrées d'air par la maçonnerie.	370
368. Pertes par refroidissement.	372
369. Refroidissement des fourneaux.	372
370. Revêtement des chaudières.	375
371. Influence des enveloppes et revêtements des chaudières.	378
372. Refroidissement des tuyaux de vapeur.	379
373. Revêtement des tuyaux de vapeur.	380
374. Expériences de MM. Burnat et Royet.	381
375. Pertes par les incrustations.	385
376. Perte de chaleur par l'extraction.	387
377. Perte de travail pour l'extraction.	389
378. Perte par l'eau entraînée.	390
379. Détermination de la quantité d'eau entraînée.	390
380. Moyens à employer pour éviter l'entraînement de l'eau.	393
381. Pertes par les fuites de vapeur.	393
382. Perte par la mise en train et les temps d'arrêt.	394
383. Résumé sur l'utilisation du combustible.	396
384. Observation sur les économies réalisables.	397
385. Différences entre les résultats des expériences et ceux de la pra- tique industrielle.	398

CHAPITRE VI.

RÉSULTATS PRATIQUES SUR LES CHAUDIÈRES À VAPEUR.

I. Des expériences sur les chaudières à vapeur.

386. Objet des expériences sur les chaudières à vapeur.	400
387. Éléments à considérer dans les expériences sur les chaudières à vapeur.	401

N ^o .	Pages.
388. Détermination du combustible brûlé.	403
389. Détermination de la quantité de vapeur produite.	405
390. Détermination de la surface de grille.	407
391. Détermination de la surface de chauffe.	408
392. Détermination des dimensions de la cheminée et des carneaux.	408
393. Volume et température des gaz introduits et des gaz brûlés.	409
394. Expériences sur les chaudières fixes.	409
395. Visite de la chaudière et des carneaux.	410

II. Influence des diverses circonstances de la vaporisation.

396. Influence de la pression.	410
397. Influence de la rapidité de la combustion.	412
398. Expériences de M. Cavé.	414
399. Résultats des expériences de M. Cavé, au point de vue de l'influence de la rapidité de la combustion.	417
400. Discussion des autres résultats des expériences de M. Cavé.	418
401. Influence des bouilleurs.	418
402. Influence de la température de l'air.	421

III. Expériences sur les chaudières non tubulaires.

403. Étude générale des résultats d'expériences sur les chaudières à vapeur.	422
404. Anciennes expériences de M. Albert Schlumberger.	423
405. Expériences de M. Wicksteed sur les chaudières en tombeau.	425
406. Expériences de M. Wicksteed sur les chaudières cylindriques à foyer intérieur.	426
407. Chaudières cylindriques à foyer extérieur.	428
408. Expérience sur une chaudière cylindrique à un seul bouilleur inférieur.	429
409. Expériences sur diverses chaudières à deux bouilleurs inférieurs.	430
410. Observations sur l'inconvénient de surmener les chaudières.	431
411. Chaudière à deux bouilleurs, de M. Durenne, à l'exposition de 1855.	432
412. Expériences de M. Marozeau sur les chaudières à trois bouilleurs de Wessering.	433
413. Chaudière à trois bouilleurs de MM. Dollfus, Mieg et C ^e	435
414. Avantages relatifs des chaudières à bouilleurs inférieurs.	436
415. Résumé sur les chaudières à bouilleurs inférieurs.	438
416. Expériences sur diverses chaudières à bouilleurs latéraux.	439
417. Chaudière à deux bouilleurs latéraux de l'exposition de 1855.	440
418. Avantages particuliers des bouilleurs latéraux.	441
419. Résumé sur les chaudières à bouilleurs latéraux.	442
420. Comparaison entre les chiffres obtenus par divers chauffeurs.	443

IV. Chaudières tubulaires employées pour les machines fixes.

421. Emploi d'une chaudière tubulaire pour machines fixes, à l'exposition de 1855.	444
422. Chaudière tubulaire de M. Nozo aux ateliers du chemin du Nord.	445
423. Système tubulaire de MM. Molinos et Pronnier.	447
424. Chaudière tubulaire verticale de M. Zambeaux.	449

TABLE DES MATIÈRES.

545

Nos	Pages.
425. Chaudière présentée par M. Prouvost au concours de la Société industrielle de Mulhouse.	451
426. Résumé relatif aux chaudières tubulaires employées pour les machines fixes.	453
427. Expériences comparatives de M. Nozo au chemin de fer du Nord.	453
428. Expériences de M. Chavès au chemin de fer du Nord.	457
429. Expériences de MM. Cail et C ^{ie}	459
430. Expériences de la société de Newcastle.	461
431. Discussion des résultats comparatifs.	462
432. Conclusions sur l'application des chaudières tubulaires aux machines fixes.	466

V. Chaudières des machines locomobiles.

433. Résultats des expériences faites sur diverses chaudières de machines locomobiles.	468
434. Expériences faites sur les machines locomobiles du concours agricole de 1856.	468
435. Expériences du concours agricole de 1860.	470
436. Expériences faites au Conservatoire des arts et métiers.	472
437. Influence du diamètre des tubes.	475
438. Influence du retour des flammes.	477
439. Avantages de la mobilité du faisceau tubulaire.	478
440. Chaudières verticales pour machines locomobiles.	479
441. Chaudières à circulation rapide.	480
442. Résumé sur les chaudières des machines locomobiles.	480

VI. Chaudières des machines locomotives.

443. Chaudières des machines locomotives.	481
444. Dimensions principales des chaudières de locomotives.	481
445. Consommation des chaudières des machines locomotives en combustible et en eau.	483
446. Expériences de M. Noblemaire sur la ligne de Toulon à Marseille.	485
447. Dimensions des cheminées.	486
448. Nouvelles machines locomotives.	486
449. Résumé sur les chaudières des machines locomotives.	487

VII. Chaudières de bateaux.

450. Chaudières de bateaux.	488
451. Appréciation de la quantité d'eau vaporisée.	489
452. Générateur du Phénix, de 200 chevaux, construit par M. Nilus.	491
453. Générateur du Duquesne, de 650 chevaux, construit par M. Mazeline.	493
454. Générateur de l'Algésiras, de 900 chevaux.	494
455. Générateur du Napoléon, de 950 chevaux.	495
456. Règles pratiques pour les dimensions des chaudières de bateaux	498
457. Dimensions des anciennes chaudières à galeries.	499
458. Comparaison entre les chaudières tubulaires et les anciennes chaudières à galeries.	501
459. Comparaison entre le poids des chaudières tubulaires et celui des chaudières à galeries.	502

N ^{os}	Pages.
460. Vaporisation réelle des chaudières marines	502
461. Quantité de bois brûlée par mètre carré de surface de grille, dans les bateaux à vapeur.	504
462. Application des chaudières de locomotives aux bateaux.	505
463. Application des tubes à circulation d'eau aux chaudières de bateaux.	507
464. Résumé sur les chaudières marines.	508

VIII. *Résumé des conditions relatives à l'établissement des chaudières à vapeur.*

465. Résumé des conditions relatives à l'établissement des chaudières à vapeur.	509
466. Tableau des conditions relatives à l'établissement des chaudières à vapeur.	509
467. Détermination de la surface de chauffe.	511
468. Répartition de la surface de chauffe.	513
469. Vaporisation maxima par mètre carré de surface de chauffe directe.	514
470. Détermination du volume des chaudières à vapeur.	515
471. Volume de la chambre de vapeur.	516
472. Relation entre le volume de la chambre de vapeur et le volume d'admission dans les cylindres.	517
473. Volume d'eau des chaudières.	519
474. Volume total des chaudières.	521
475. Étendue de la surface de niveau d'eau.	522
476. Incertitude de la désignation des chaudières par le nombre des chevaux-vapeur.	523
477. Calculs des divers éléments d'une même chaudière.	523
478. Projet d'une chaudière de machine fixe.	523
479. Projet d'une chaudière de machine locomobile.	526
480. Projet d'une chaudière de machine locomotive.	529
481. Projet d'une chaudière de bateau.	530
482. Pouvoir de vaporisation des chaudières.	531
483. Production de vapeur en service courant.	532

FIN DE LA TABLE.



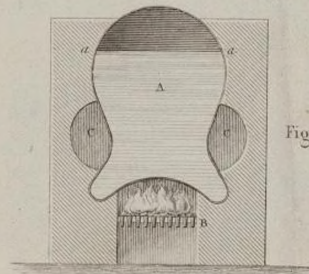


Fig. 1

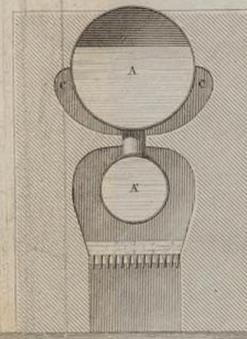


Fig. 2.

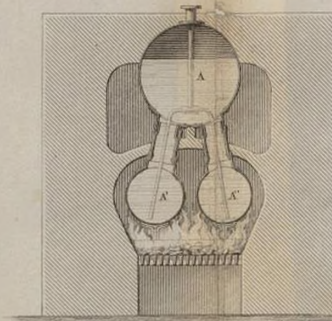


Fig. 3.

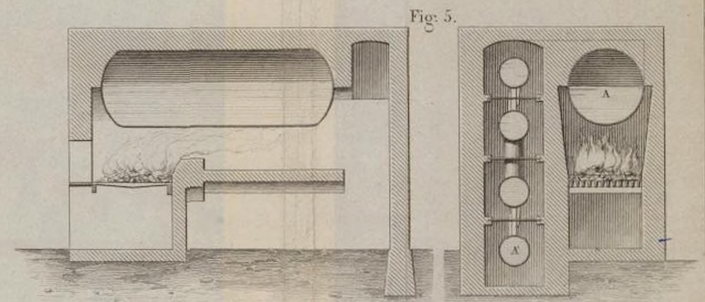


Fig. 5.

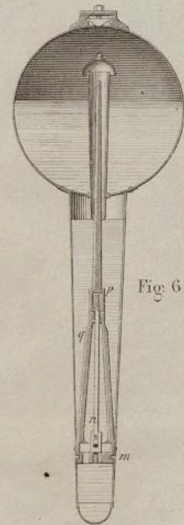


Fig. 6.

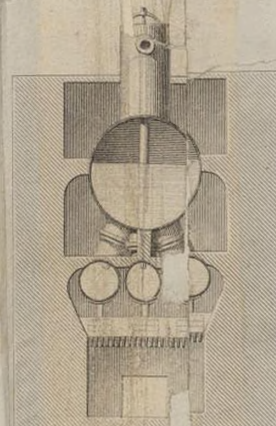


Fig. 4.

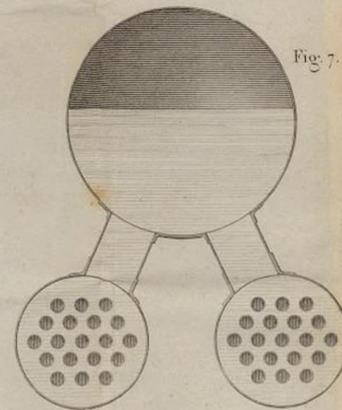


Fig. 7.

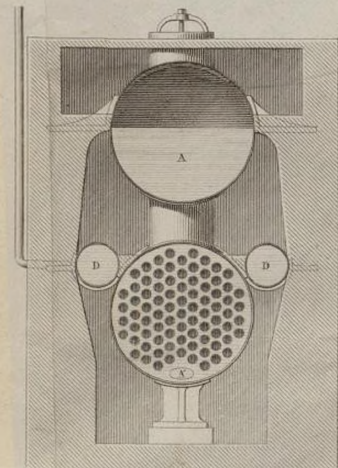


Fig. 8.

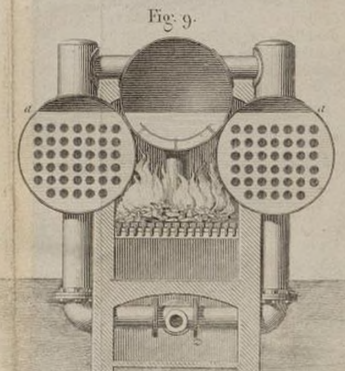
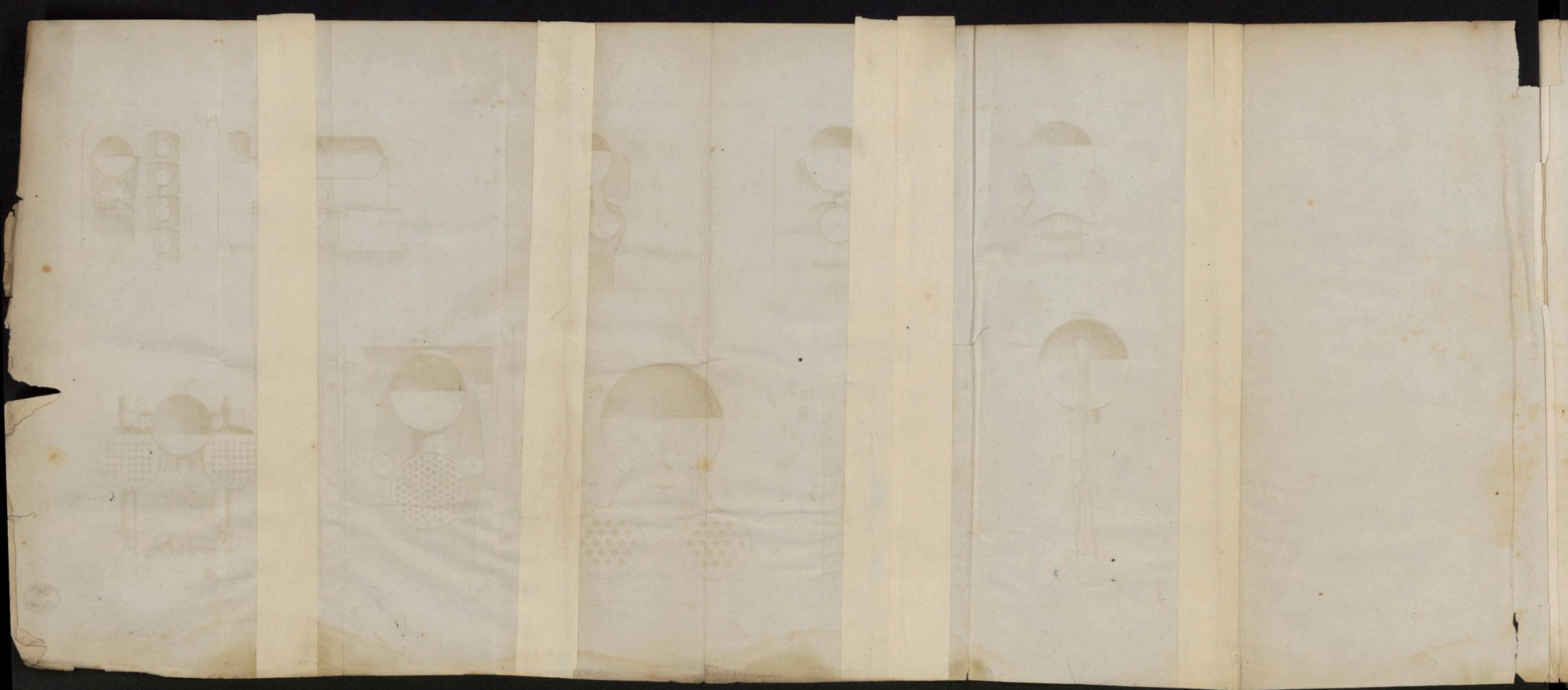
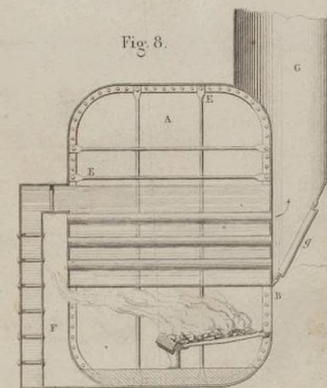
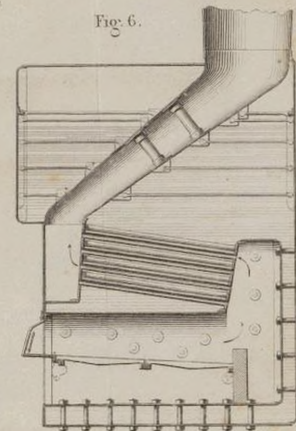
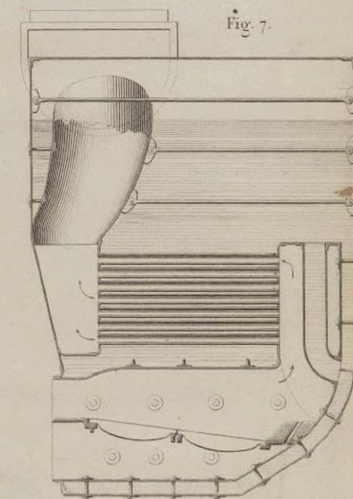
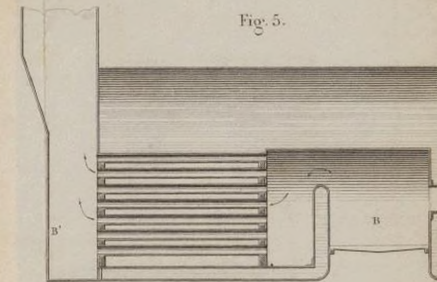
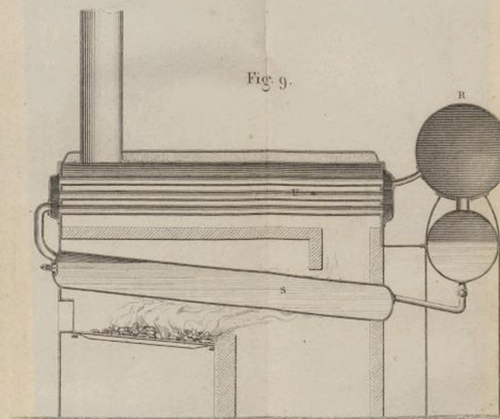
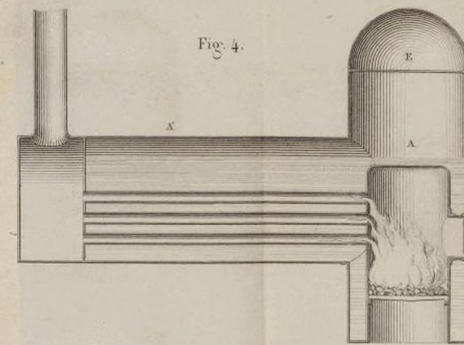
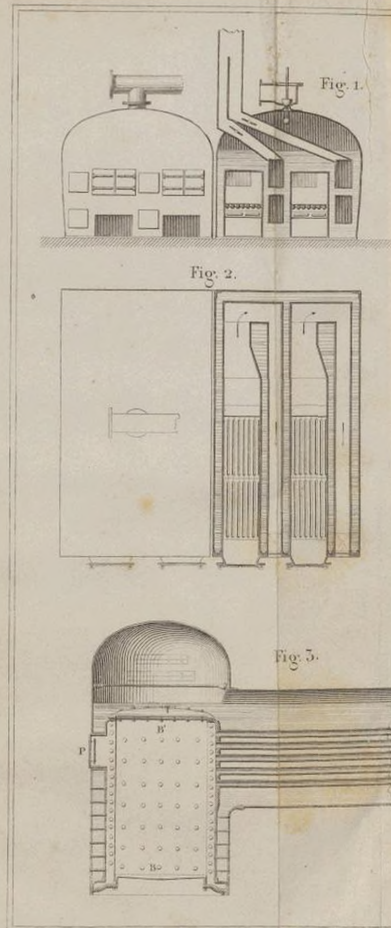
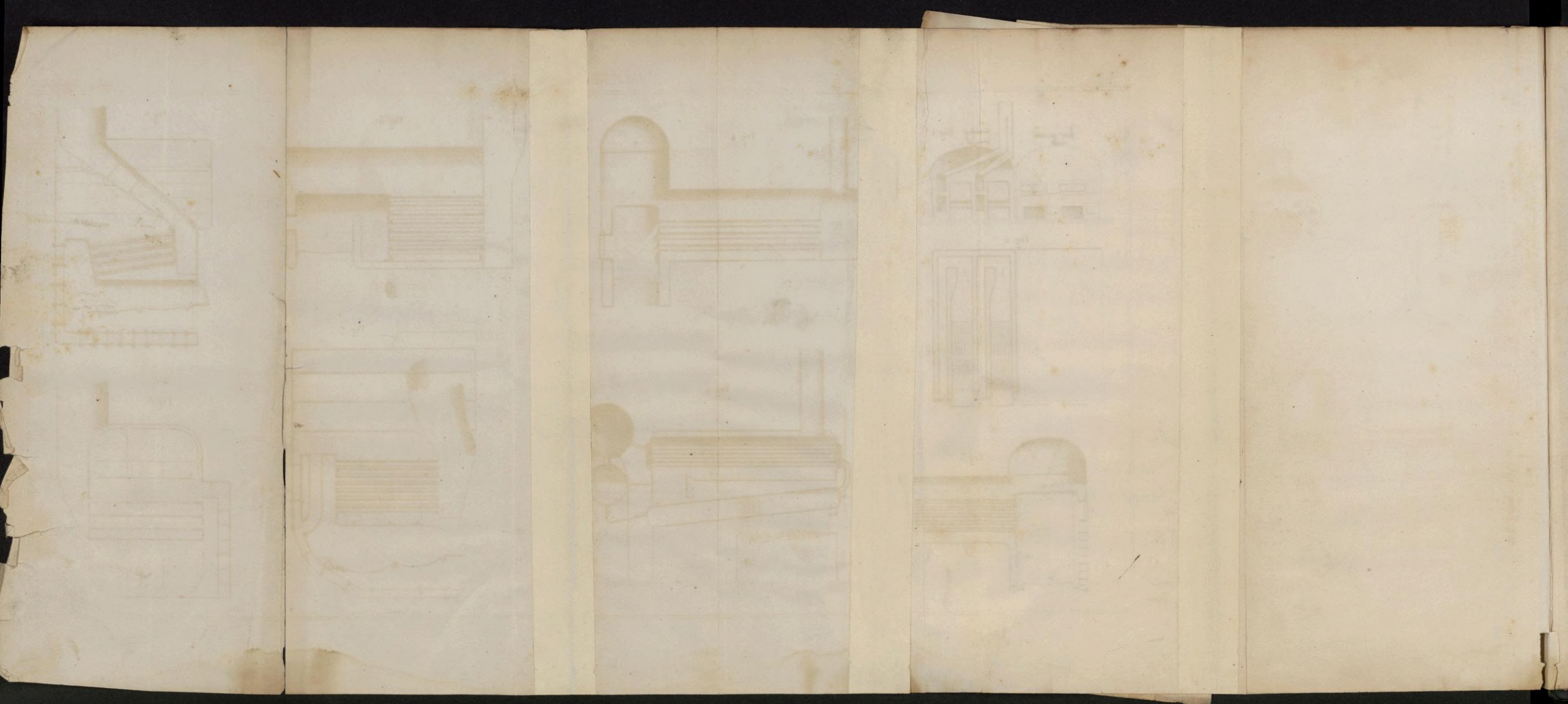


Fig. 9.







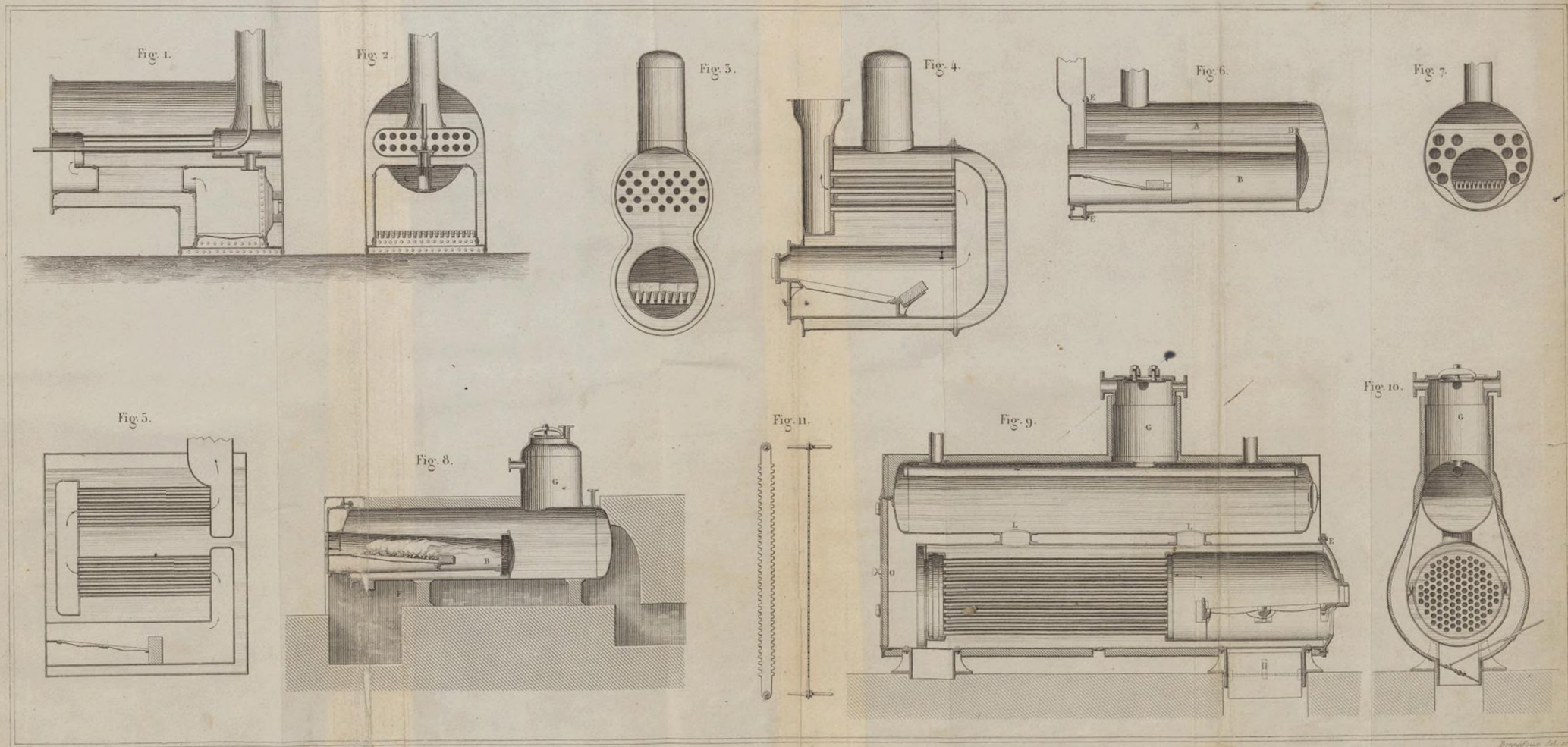




Fig. 3.

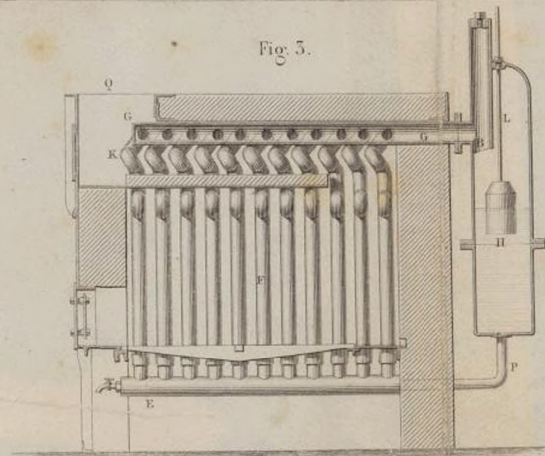


Fig. 5.

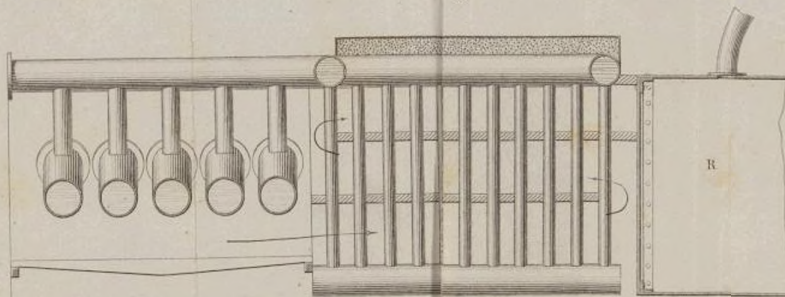


Fig. 6.

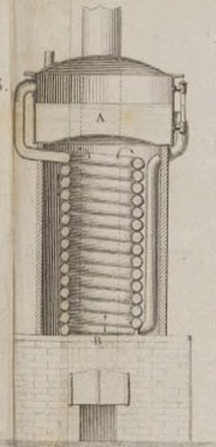


Fig. 7.

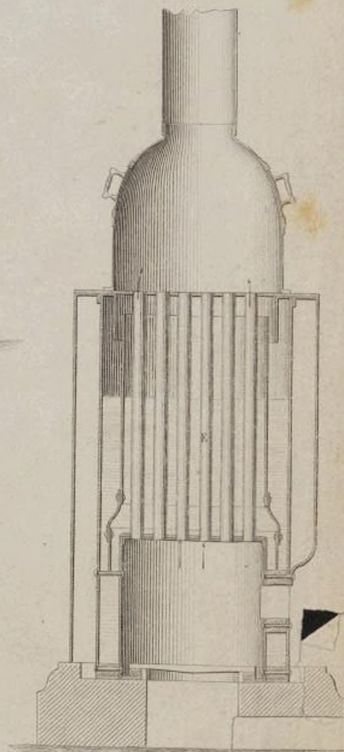


Fig. 1.

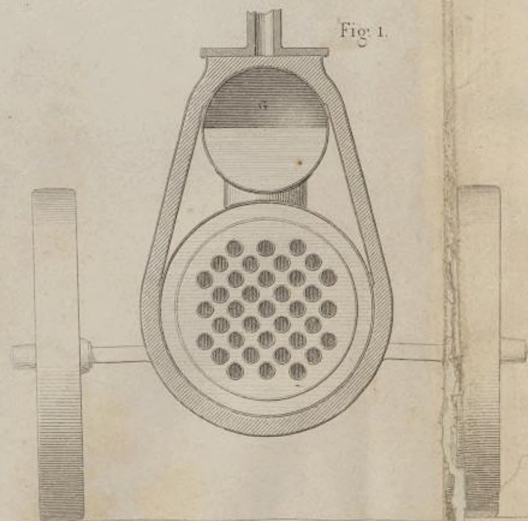


Fig. 2.

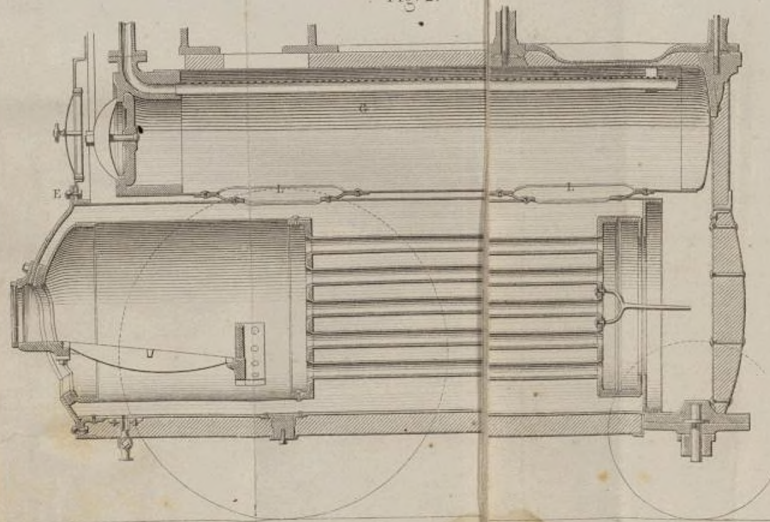
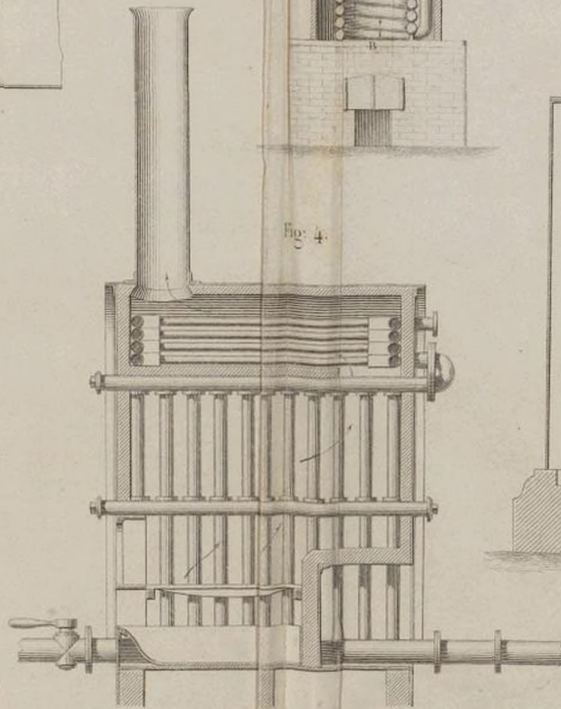


fig. 4.



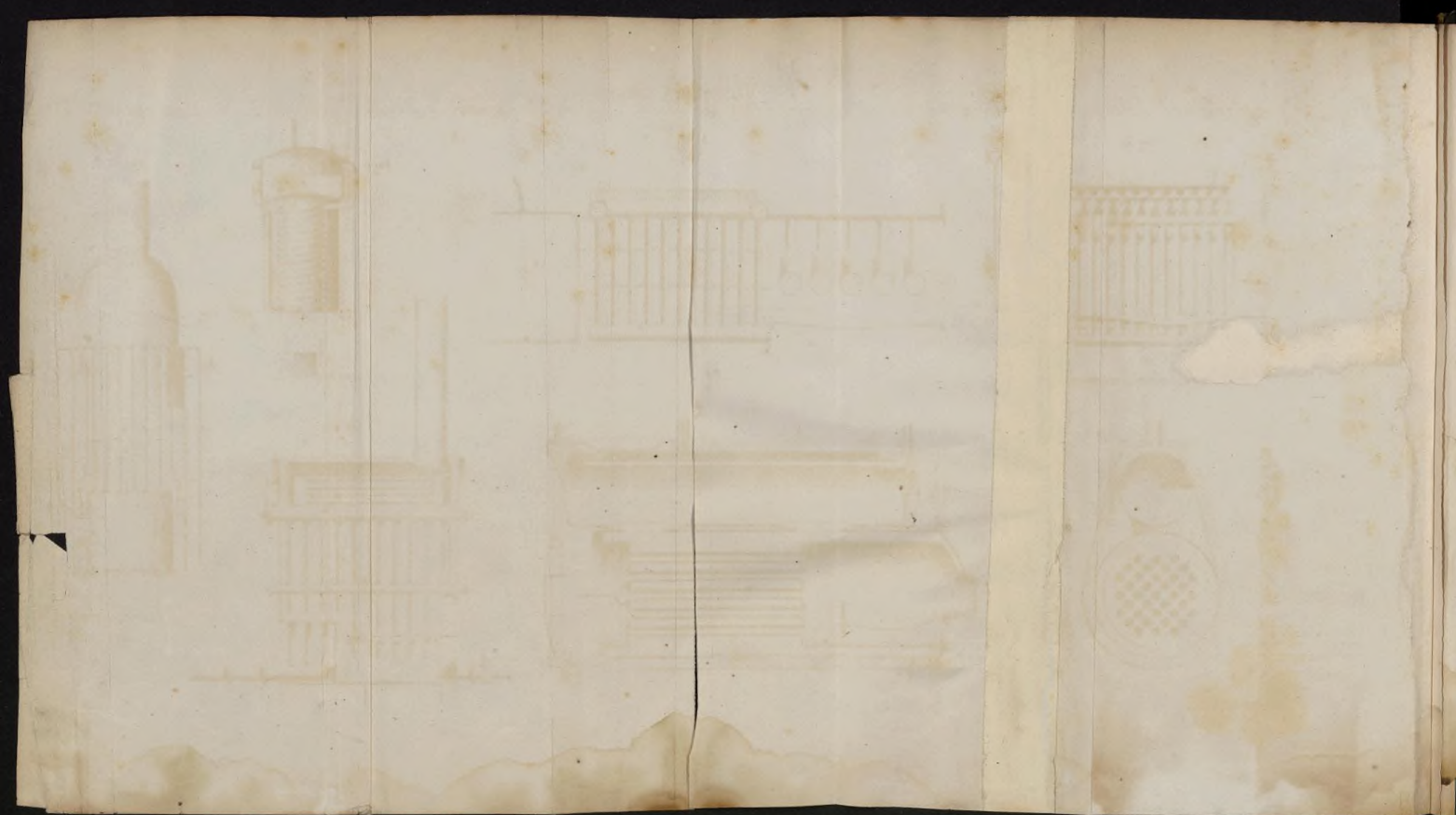


Fig. 1.

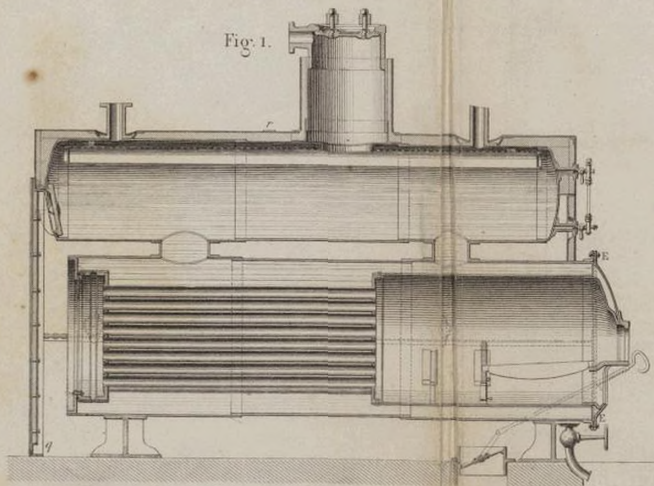


Fig. 2.

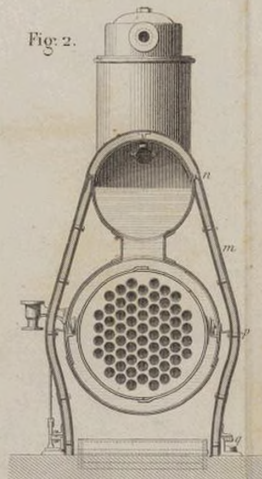


Fig. 9.

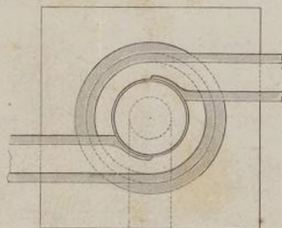


Fig. 7.

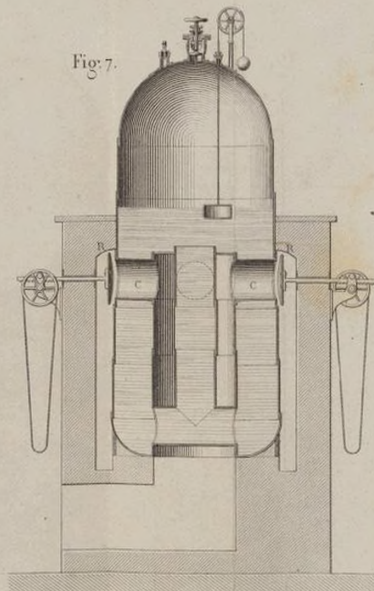


Fig. 5.

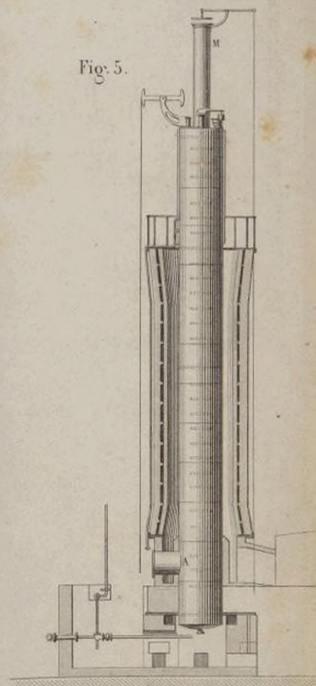


Fig. 3.

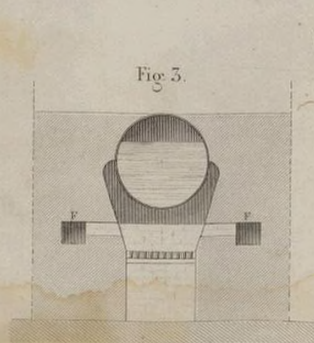


Fig. 4.

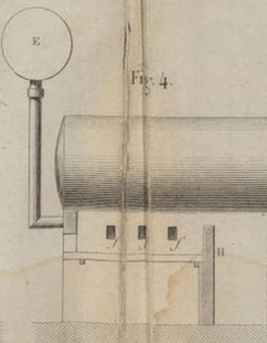


Fig. 10.

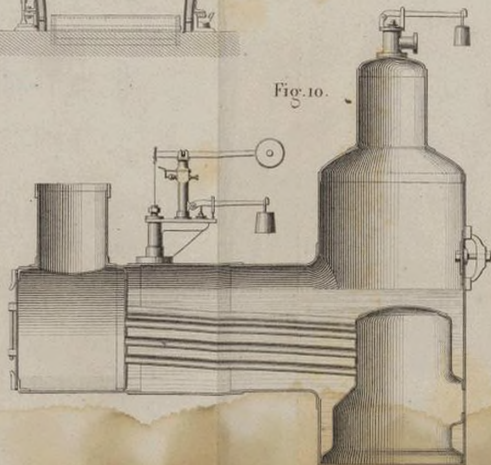


Fig. 8.

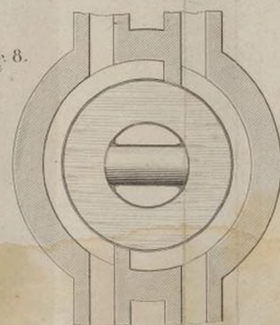
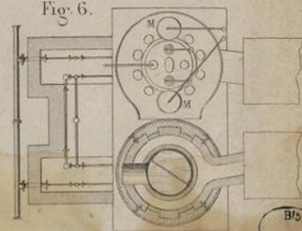
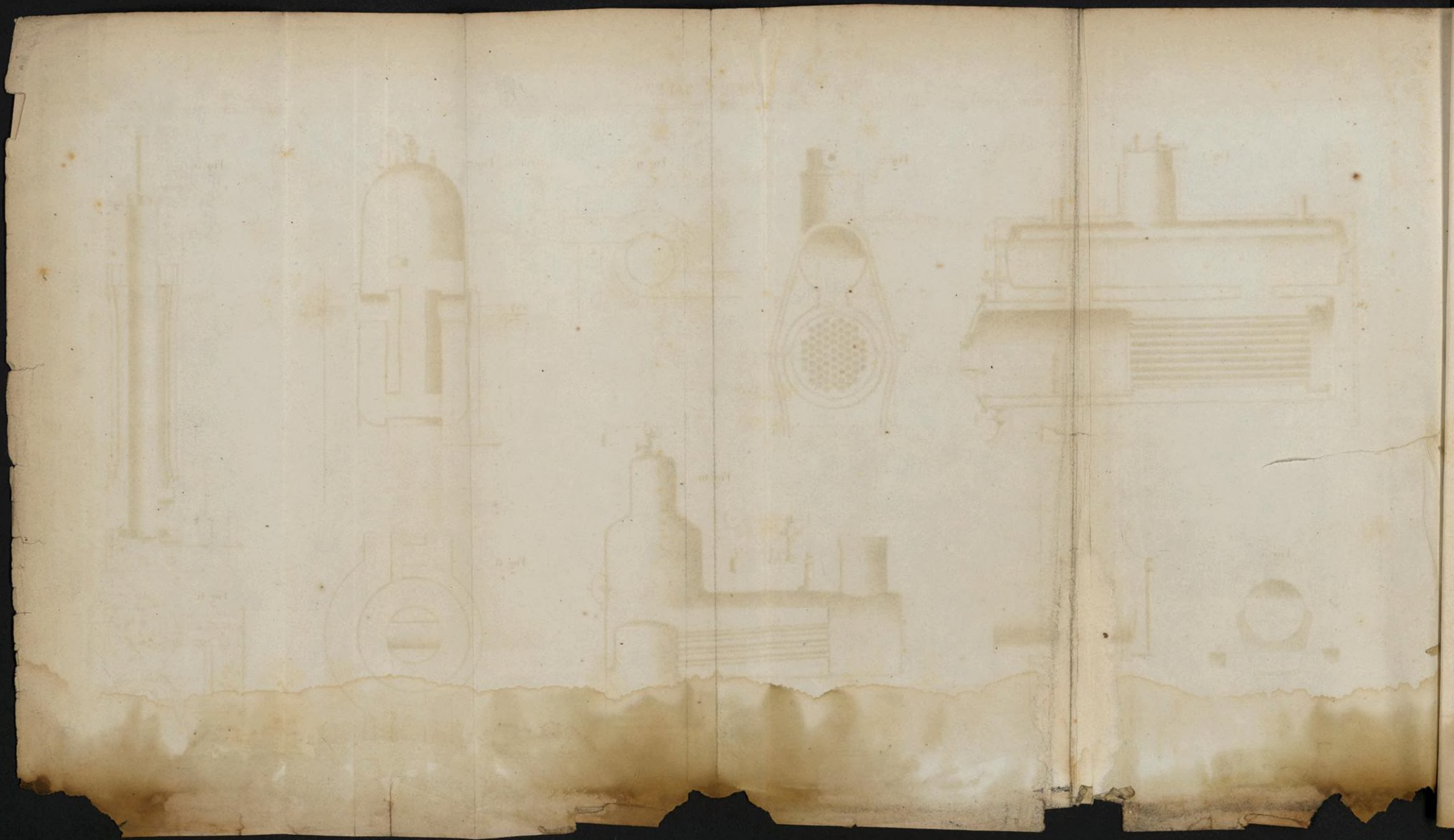
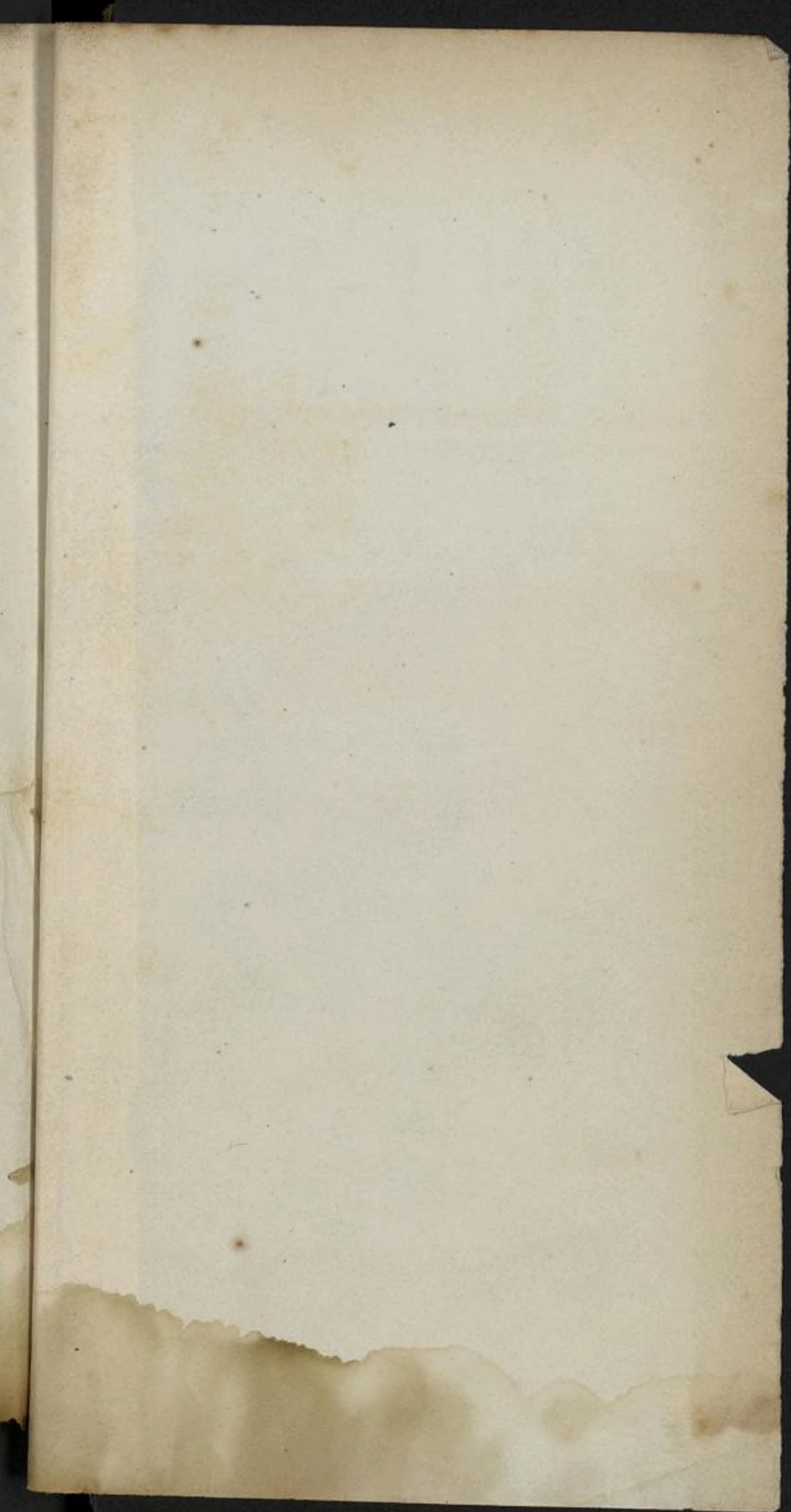
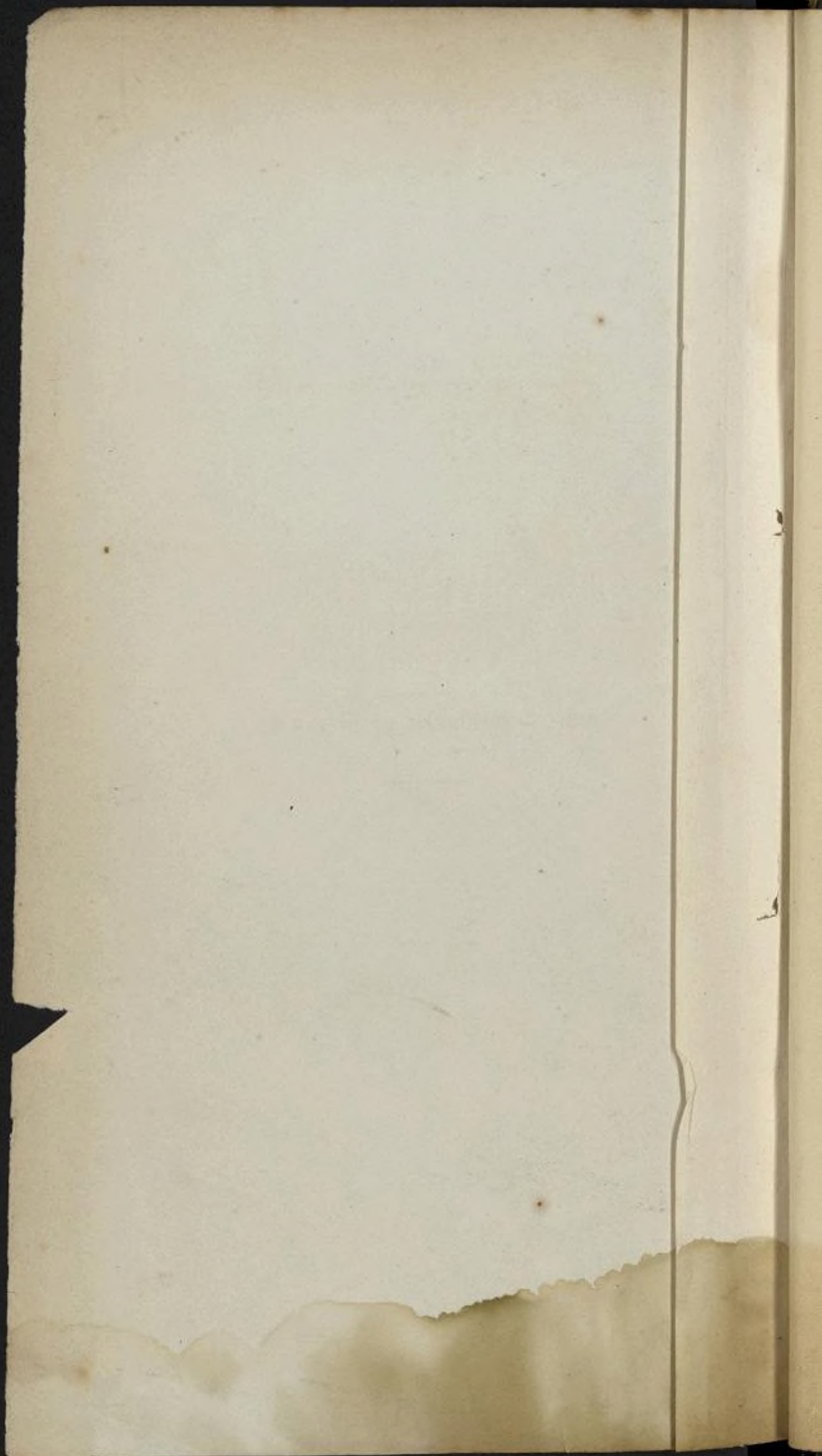


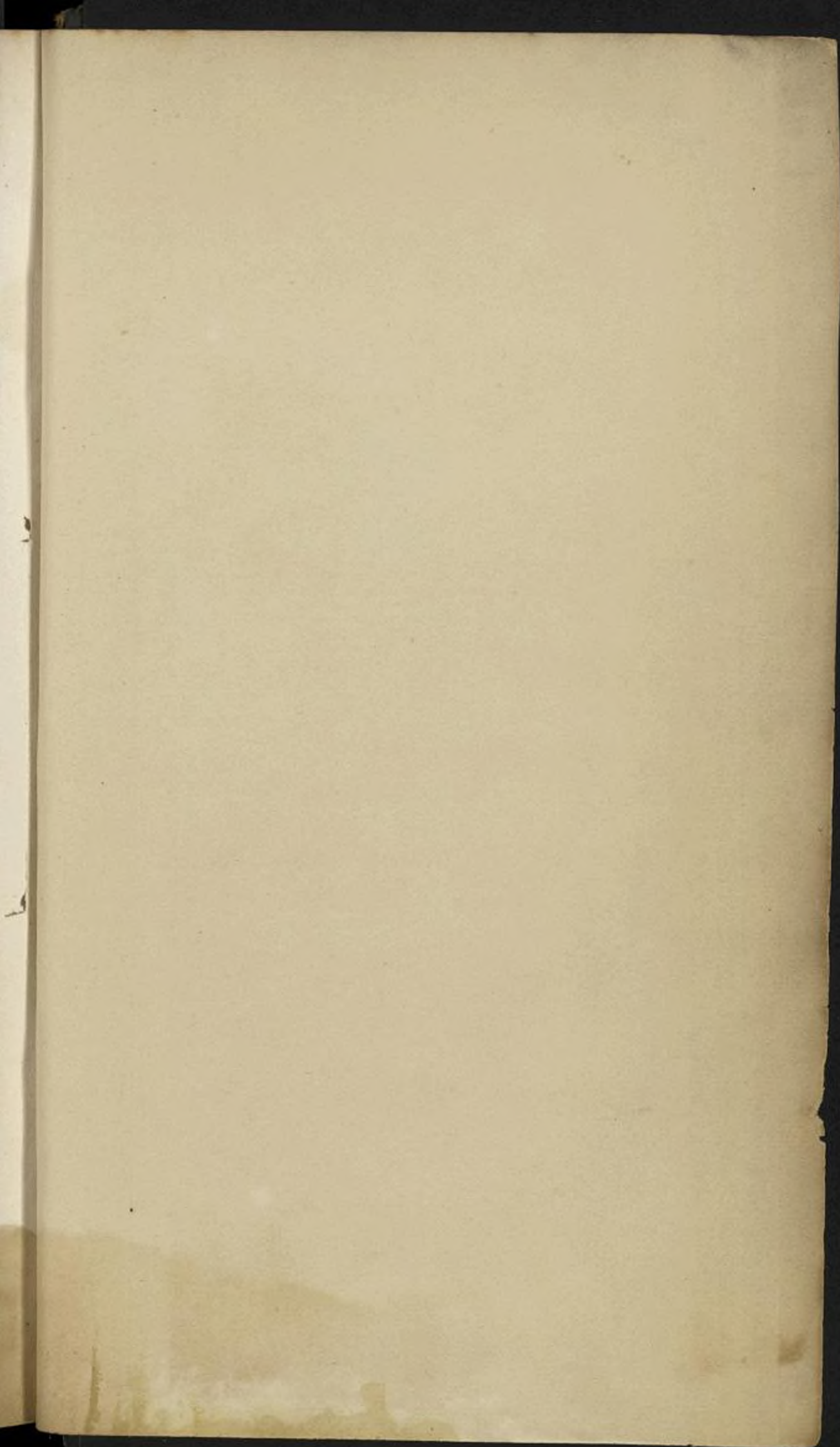
Fig. 6.

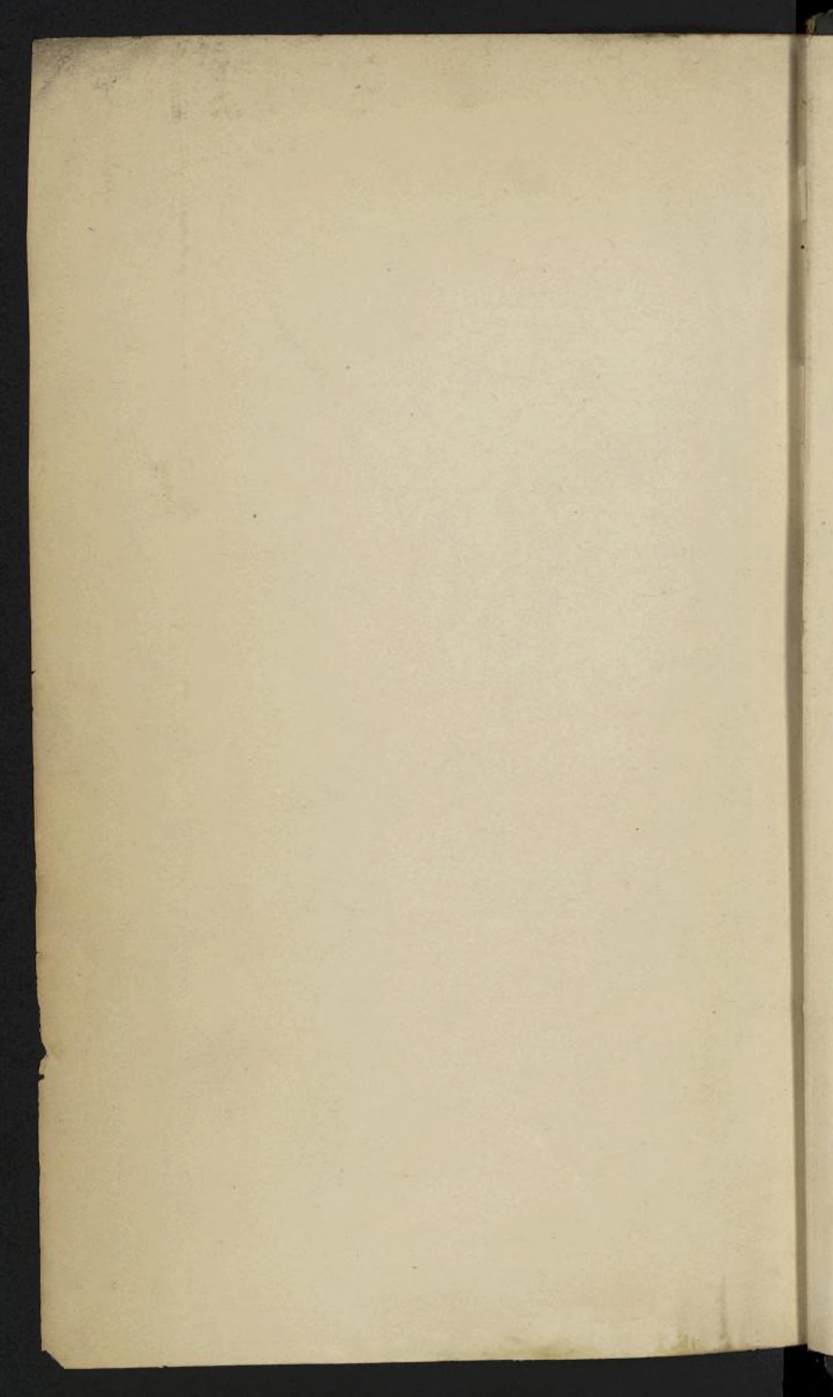












22
8
1000



