



TRAITÉ
DE LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE
DANS SES APPLICATIONS

PAR E. PÉCLET

INSPECTEUR GÉNÉRAL DE L'UNIVERSITÉ, PROFESSEUR DE PHYSIQUE APPLIQUÉE AUX ARTS, A L'ÉCOLE CENTRALE
MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ PHILOMATHIQUE, DU CONSEIL DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT, ETC

DEUXIÈME ÉDITION

ENTIÈREMENT REFONDUE

Tome Premier

PARIS

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE

RUE PIERRE-SARRAZIN, 12

1845



TRAITÉ

DE LA CHALEUR

COMMUNIQUE

DANS SES APPLICATIONS

PAR M. LEBLANC

DEUXIÈME ÉDITION

Paris

PARIS

LIBRAIRIE DE M. BASTIENNE

1882



PRÉFACE.

Ce Traité de la chaleur n'est ni un livre purement théorique ni un simple recueil de descriptions d'appareils. Pour tous les modes d'emploi de la chaleur, j'ai toujours examiné les conditions à remplir, les avantages et les inconvénients de chaque système, et j'ai cherché à déduire d'expériences faites en grand ou dans des circonstances convenables, des formules ou des règles d'une application facile, qui puissent servir de guide aux constructeurs; mais souvent, par la complication des phénomènes et le manque de données suffisamment précises, j'ai dû me borner à de simples indications.

Cet ouvrage, résumé d'une partie du cours dont je suis chargé à l'École centrale, depuis sa fondation, diffère beaucoup de la première édition de mon Traité de la chaleur, non-seulement par la distribution des matières, par le nombre et la nature des planches, mais surtout par les nombreuses additions que réclamaient les progrès de l'industrie. Aussi ce livre doit être considéré plutôt comme un ouvrage nouveau que comme une réimpression.

Les tables des matières placées à la fin de chaque volume font connaître l'ordre que j'ai suivi. J'ai réuni, dans un premier chapitre, les principaux faits physiques auxquels on a recours à



chaque instant dans les applications. J'ai ensuite examiné successivement les combustibles, les mouvements de l'air produits par la compression et par la chaleur, les cheminées, les foyers, et la transmission de la chaleur. Là se terminent les considérations qui précèdent les différents modes d'emploi de la chaleur.

J'ai passé en revue les appareils de vaporisation, d'évaporation et de séchage, ainsi que ceux qui sont destinés au chauffage de l'air, des liquides et des solides.

Un chapitre est consacré à l'exposé des lois du refroidissement, et renferme les résultats des expériences que j'ai faites sur la transmission de la chaleur à travers les corps mauvais conducteurs, principalement ceux qu'on emploie dans les constructions.

Enfin, dans le dernier chapitre, qui traite de l'assainissement des lieux habités, j'ai posé les principes sur lesquels doivent se baser tous les systèmes de chauffage et de ventilation.

Malgré un grand nombre de recherches particulières et les renseignements qui m'ont été fournis par plusieurs ingénieurs distingués, cet ouvrage renferme encore quelques lacunes; mais elles tiennent à des questions que l'état de la science ne permet pas de résoudre (1).

(1) Dans la correction des épreuves du texte et des planches, ainsi que dans la vérification des calculs, j'ai été très-bien secondé par M. Thauvin, ancien élève de l'École centrale.

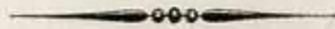
ERRATA DU PREMIER VOLUME.

Pages.	Lignes.	Au lieu de :	Lisez :
14	4	la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur primitive	la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur à 0°.
17	30	$V' = \frac{Vp}{p'} \left(\frac{1+0,00364t}{1+0,00364t'} \right)$	$V' = \frac{Vp}{p'} \left(\frac{1+0,00364t'}{1+0,00364t} \right)$
35	18	Alcool.... 79,7	Alcool.... 78,4
45	1	Et par suite qu'on	Et par suite on
<i>id.</i>	27	produites	produits
48	10	(57)	(56)
123	21	88 kilogrammes	88 parties
136	3	$v = 29 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42 \frac{D^5}{d^4}}}$	$v = 29 \frac{1}{d^2} \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42 \frac{D^5}{d^4}}}$
<i>id.</i>	6	$v = 29 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42D}}$	$v = 29 \sqrt{\frac{PD}{L + 42D}}$
<i>id.</i>	9	$v = 26,44 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 54D}}$	$v = 26,44 \sqrt{\frac{PD}{L + 54D}}$
146	30	$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D} v^2 + \frac{KL'}{D\delta} v^2$	$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D} v^2 + \frac{KL'}{D\delta^2} v^2$
155	18	v	v^2
176	18. 20. 22 et 30	441,45	429,67
<i>id.</i>	22	D = 0,98	D = 0,29
177	6	6,18	5,18
219	25	$p \left(\frac{V - v}{29} \right)^2$	$p \frac{(V - v)^2}{2g}$
<i>id.</i>	26	2Vv:2g	2pVv:2g
<i>id.</i>	31	La différence entre la vitesse absolue	La différence entre les carrés des vitesses absolues
<i>id.</i>	33	2Vv:2g	2Vv
328	16	baromètre	manomètre
336	5	fig. 9 et 10 (pl. 9)	fig. 9 et 10 (pl. 19)



ERRATA DU SECOND VOLUME.

Pages.	Lignes.	Au lieu de :	Lisez :
4	22	20 ^m ,492	20 ^m ,98
14	24	50	59
53	15	(403)	(404)
64	17	(705)	(703)
88	29	l'alimentation de la chaudière à vapeur	l'alimentation des chaudières de concentration
121	15	Les figures 4, 5, 6 et 7	Les figures 4, 5, 6 et 7 (pl. 61)
132	34	Diamètre inférieur	Diamètre intérieur
152	6	figures 2 et 3 (pl. 66)	figures 2 et 3 (pl. 67)
155	16	tringles de fer fixés	tringles de fer fixées
355	22	Coton très-divisé.... 0,035	Coton très-divisé.... 0,054
364	22	du liquide	de l'eau
<i>id.</i>	21	l'eau	l'air.

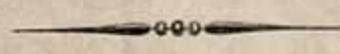




TRAITÉ DE LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE

DANS SES APPLICATIONS.



CHAPITRE PREMIER.

PRINCIPAUX FAITS RELATIFS A LA THÉORIE PHYSIQUE DE LA CHALEUR.



§ 1. — TEMPÉRATURE. THERMOMÈTRES.

1. Dans ce résumé, nous énoncerons les faits observés, nous rapporterons les lois relatives à ces faits, et cela sans aucune démonstration; nous renvoyons, pour ce dernier objet, aux traités élémentaires de physique.

2. Lorsqu'un corps s'échauffe, on dit que sa température augmente, qu'elle baisse quand il se refroidit, et que les corps ont la même température lorsque, par leur contact, leur état de chaleur ne change pas, quoiqu'ils puissent alors produire sur nos organes des effets fort différents. On est convenu de mesurer la température par les variations de volume des corps, qui accompagnent toujours les variations de température; et, comme la température de la glace fondante et celle de l'ébullition de l'eau sous la pression de 0^m,76 sont constantes, on est convenu de prendre pour degré de température l'accroissement de chaleur correspondant à un accroissement de volume du corps thermométrique égal à $\frac{1}{100}$ de l'accroissement de volume qu'il éprouve en passant de la température de la glace fondante à celle de l'ébullition de l'eau, sous la



pression de $0^{\text{m}},76$. Mais comme tous les corps ne se dilatent pas de la même manière, une même température intermédiaire à celles de la glace fondante et de l'ébullition serait représentée par des nombres différents, lorsqu'on emploierait différentes substances thermométriques. On a donc été obligé de convenir aussi de la nature du corps thermométrique. On a choisi les gaz, attendu que tous se dilatent de la même manière, les effets de la chaleur dans ces corps sont indépendants de leur nature, et doivent être plus simples que quand les corps sont à l'état liquide ou solide. Mais comme le mercure se dilate de la même manière que les gaz dans des limites très-étendues, on peut employer indifféremment l'air ou le mercure. On emploie aussi l'alcool comme substance thermométrique; mais comme la dilatation de cette substance est très-irrégulière, du moins par rapport à celle du mercure, on gradue ces instruments en déterminant un grand nombre de points de l'échelle par comparaison avec un thermomètre étalon à mercure.

3. On emploie trois échelles thermométriques différentes : l'échelle centigrade, qui renferme 100 divisions, de la glace fondante à l'ébullition de l'eau; le thermomètre de Réaumur, qui en contient 80; enfin, celle de Fahrenheit, qui marque 32° pour la température de la glace fondante et 212 pour celle de l'ébullition. En désignant par C, R et F les indications de ces trois échelles dans la même circonstance, on a évidemment

$$C = \frac{5}{4}R \quad \text{et} \quad C = (F - 32) \frac{5}{9}.$$

4. Comme il est impossible de se procurer des tubes capillaires parfaitement cylindriques, lorsqu'on veut faire des observations très-exactes, on emploie des tubes divisés en parties d'égale capacité; on note les indications de l'échelle arbitraire qui correspondent aux températures de la glace fondante et de l'ébullition, et on déduit facilement de ces nombres la température qui correspond à une indication quelconque de l'échelle. Dans toutes les recherches de précision, on vérifie souvent l'indication qui correspond à la glace fondante, attendu qu'elle change, du moins pendant un certain temps, par un travail intérieur du verre.

5. Les thermomètres à air sont formés, comme les thermomètres à mercure, d'un tube très-capillaire, terminé par un réservoir; mais le tube est ouvert à la partie supérieure, et le réservoir ainsi qu'une partie de la tige contiennent de l'air sec, séparé de l'air extérieur par une

bulle de mercure. La tige est divisée en parties d'égale capacité, dont le volume est une fraction connue de celui du réservoir. En désignant par V et V' les volumes de l'air de l'instrument à la température de la glace fondante et à la température T que l'on veut déterminer, par P et P' les pressions de l'atmosphère dans ces deux circonstances, et par $a = 0,00364$ le coefficient de dilatation de l'air, on a

$$T = \frac{P'V' - PV}{aPV}.$$

Dans cette formule on a négligé la dilatation du verre, parce qu'elle est 150 fois plus petite que celle de l'air.

6. Il y a dans les thermomètres deux espèces de sensibilité : celle qui fait apprécier de très-petites variations de température, et celle qui permet à ces instruments de se mettre très-prompement en équilibre de température avec le milieu environnant. Pour obtenir la première espèce de sensibilité, il faut donner aux tiges des thermomètres un très-petit diamètre, et aux réservoirs une grande capacité. La dernière exige au contraire que la masse thermométrique soit très-petite. Ainsi, on ne peut pas réunir dans un même instrument ces deux espèces de sensibilité à un très-haut degré.

7. Lorsqu'il s'agit de mesurer de petites différences de température, on emploie des appareils qui sont composés de deux boules de verre, fixées aux extrémités d'un tube de verre capillaire recourbé sous la forme d'un U. La partie inférieure renferme une bulle d'alcool coloré, ou une longue colonne de ce liquide, qui sépare complètement l'air d'une des boules de celui que renferme l'autre. On conçoit que la plus petite différence de température des deux boules sera manifestée par un mouvement du liquide intermédiaire.

8. *Thermomètres à maxima et à minima.* Ces instruments sont destinés à conserver la trace du maximum ou du minimum de température dans un certain laps de temps. Les plus simples sont disposés comme les thermomètres ordinaires, mais ils sont placés horizontalement; ceux qui sont destinés à indiquer les maxima sont à mercure et renferment un petit cylindre d'acier que le mercure pousse devant lui quand la température s'élève, et qu'il abandonne quand elle baisse; ceux qui doivent indiquer les minima sont à alcool, et leur tige renferme un petit

index en émail que le liquide entraîne quand la température baisse, et qu'il abandonne dans sa position quand la température s'élève.

9. *Thermomètres métalliques.* Tous les instruments dont nous venons de parler sont fondés sur la différence de dilatation des liquides et du verre ; on emploie aussi des instruments fondés sur l'inégale dilatation des métaux. Ces appareils sont formés de deux barres de métaux différents, d'inégale longueur, appliquées l'une contre l'autre et fixées par une de leurs extrémités ; l'extrémité libre de la plus courte coïncide avec des points de l'autre, variables avec la température. On peut graduer ces appareils comme les thermomètres à mercure, mais les divisions sont très-rapprochées. On augmente ordinairement la dilatation apparente à l'aide d'un ou plusieurs leviers. Ces appareils sont rarement employés.

10. *Mesure des hautes températures.* Les instruments destinés à la mesure des hautes températures portent le nom de *pyromètres*. Le plus généralement employé est celui de Vedgwood. Il est fondé sur le retrait qu'éprouve l'argile soumise à l'action de la chaleur : ce retrait croît avec la température, mais suivant une loi inconnue et qui varie avec la nature de l'argile ; il est dû, jusqu'à une certaine limite, à l'eau que cette matière abandonne ; mais au delà il paraît provenir uniquement d'une plus forte agglomération de la matière. Le pyromètre de Vedgwood est composé d'une plaque de cuivre sur laquelle sont fixées deux règles de même métal inclinées entre elles, et entre lesquelles se placent de petits cônes tronqués en argile qui s'élèvent d'autant plus qu'ils ont éprouvé un plus grand retrait. Les cônes doivent être faits avec la même pâte renfermant la même quantité d'eau, et être recuits à la même température ; Vedgwood a adopté le rouge naissant, et a marqué zéro au point où les cônes s'arrêtent : au delà, 240 divisions sont tracées sur une des règles. Pour reconnaître la température d'un fourneau, on y introduit un des petits cônes d'argile placé dans un creuset ; on le retire quand il en a pris la température, on le laisse refroidir et on le place entre les deux règles en le faisant glisser jusqu'au point le plus élevé qu'il puisse atteindre. Le degré de l'échelle auquel il parvient indique la température. Dans le pyromètre de Vedgwood, le zéro correspond à 580° du thermomètre centigrade, et chaque division a 72°. Ces instruments sont surtout utiles pour reconnaître des variations de température ; ils ne sont employés que dans les fourneaux à poteries.



11. La température de la fusion des corps étant constante, on conçoit que ce phénomène puisse servir à reconnaître si la température d'un foyer a été au-dessus ou au-dessous de certaines limites; et si on pouvait se procurer des corps dont la fusibilité se manifestât à des températures croissantes et peu éloignées, on parviendrait ainsi à trouver la température d'un corps avec une approximation d'autant plus grande que les températures de fusion des corps employés seraient plus voisines. Ainsi, par exemple, si on plaçait dans un foyer de chaleur, de l'étain, du plomb et du zinc, dans trois vases séparés, ces trois métaux fondant à 210° , 260° et 360° , si l'étain seul entraît en fusion, la température du foyer serait comprise entre 210° et 260° . Mais les métaux simples fondent à des températures trop différentes pour que leur fusion donne des indications suffisamment approchées. M. J. Prinsep a imaginé d'employer des alliages d'argent et d'or, ou d'or et de platine, à différents titres, qui, embrassant toutes les températures comprises entre celles de la fusion de l'argent et du platine, et pouvant être aussi nombreux qu'on le veut, permettent d'assigner exactement la nature de l'alliage fusible à une température déterminée. M. Prinsep forme avec l'or et l'argent dix alliages seulement, renfermant des quantités croissantes d'or de $\frac{1}{10}$; et cent alliages avec l'or et le platine, dans lesquels ce dernier métal augmente successivement de $\frac{1}{100}$. Pour observer la température d'un foyer, on y place une coupelle d'os calcinés, renfermant un certain nombre de cavités numérotées, dans chacune desquelles on place un fragment d'alliage de la grosseur d'une tête d'épingle; quand la coupelle a pris la température du foyer, on la retire et on observe à quel alliage la fusion s'est arrêtée. Ce physicien désigne cet alliage par les deux lettres initiales des métaux alliés, et fait précéder l'une d'elles du chiffre indiquant la proportion dans laquelle il entre dans l'alliage. Ainsi, par exemple, si l'alliage le plus réfractaire fondu était formé de neuf parties d'argent et d'une d'or, il le désignerait par A. 0,1 O. Cette méthode est très-commode pour reconnaître si la température d'un foyer est plus basse ou plus élevée que celle d'un autre foyer; mais, pour qu'elle en donnât une évaluation exacte, du moins pour que celle-ci fût comparable à celle qui serait donnée par un thermomètre ordinaire, il faudrait connaître la température de la fusion de chaque alliage en degrés du thermomètre à air. M. Prinsep a fait cette détermination pour la fusion



de l'argent et de plusieurs alliages d'or, par la mesure de la dilatation de l'air renfermé dans un vase d'or. Voici le résultat de ces expériences :

Chaleur rouge.....	649° cent.
Chaleur orange.....	899
Fusion de l'argent.....	999
Argent avec $\frac{1}{10}$ d'or.....	1048
Argent avec $\frac{1}{3}$ d'or.....	1121

12. Lorsqu'on plonge un corps chaud dans de l'eau, la température que prend le liquide dépend à la fois des températures primitives des deux corps et de leurs chaleurs spécifiques; alors si on connaît la température finale de l'eau et trois des autres quantités, on peut calculer la quatrième. C'est ainsi qu'on détermine la chaleur spécifique des corps. Cette méthode peut aussi être employée pour déterminer la température d'un fourneau. Supposons qu'on introduise dans un fourneau un morceau de fer dont le poids soit P , qu'on l'en retire lorsqu'il en a pris la température, et qu'on le plonge dans un vase renfermant un poids P' d'eau à la température t , et supposons que la température de ce liquide s'élève à t' ; en désignant par x celle du fourneau, et par c la chaleur spécifique du fer, on aura évidemment

$$Pc(x-t') = P'(t'-t) \quad \text{d'où} \quad x = \frac{P'(t'-t)}{Pc} + t'.$$

Cette méthode pourrait conduire à des résultats très-exacts si la chaleur spécifique du fer était constante; mais comme elle varie avec la température, on ne peut obtenir ainsi qu'une approximation assez grossière. Cependant, avec un peu de soin, on peut déterminer la température d'un fourneau à moins de 0,1, et cette approximation est presque toujours suffisante.

13. On peut enfin obtenir la température d'un fourneau par les courants thermo-électriques. Si on fixe au fond d'un canon de fusil un fil de platine dirigé suivant son axe et communiquant avec une des extrémités du fil d'un rhéomètre, et à l'autre bout du tube un autre fil de platine communiquant avec l'autre extrémité du fil du rhéomètre, et si on place dans un fourneau la première extrémité du canon de fusil,



en maintenant à la même température toutes les autres soudures, l'aiguille du rhéomètre éprouvera des déviations qui croîtront avec la température du fourneau, et celle-ci pourra se mesurer, en admettant que l'intensité du courant est proportionnelle à la différence des températures des deux soudures fer et platine, comme cela a été reconnu pour des différences de température comprises entre des limites assez étendues.

§ 2. — CALORIQUE RAYONNANT.

14. Tous les corps, quelles que soient d'ailleurs leur nature et leur température, émettent de la chaleur qui se transmet comme la lumière, et qui porte le nom de calorique rayonnant.

15. Le calorique rayonnant se meut en ligne droite avec une très-grande vitesse, comparable à celle de la lumière.

16. Les rayons de chaleur se réfléchissent à la surface des corps polis; les rayons incidents et réfléchis sont dans un même plan normal à la surface au point d'incidence, et les deux rayons sont également inclinés sur la normale. Il résulte de là que les rayons de chaleur se comportent avec les miroirs comme les rayons de lumière.

17. L'intensité du calorique rayonnant varie en raison inverse du carré de la distance à la source de chaleur. C'est une conséquence nécessaire de la divergence des rayons à leur origine.

18. Les corps réfléchissent d'autant mieux la chaleur qu'ils sont mieux polis; mais la nature des corps a aussi une grande influence.

Tableau des pouvoirs réflecteurs des corps, d'après Leslie.

Cuivre jaune.....	100
Argent.....	90
Étain en feuilles.....	80
Acier.....	70
Plomb.....	60
Étain mouillé de mercure.....	10
Verre.....	10
Verre huilé.....	5
Noir de fumée.....	0



D'après M. Melloni, les différents liquides, la faïence, les émaux et les marbres ont un pouvoir réflecteur qui diffère peu de celui de l'eau.

19. *Pouvoir émissif.* L'intensité des faisceaux de chaleur de même section est constante, quelle que soit leur inclinaison sur la surface du corps rayonnant; d'où il résulte que les faisceaux de chaleur émis par une même étendue de la surface d'un corps, ont des intensités proportionnelles au sinus de l'angle formé par la direction des rayons avec cette surface.

Tableau des pouvoirs émissifs d'un certain nombre de corps; d'après Leslie.

Noir de fumée.....	100
Eau.....	100
Papier à écrire.....	98
Verre ordinaire.....	90
Encre de Chine.....	88
Glace.....	85
Mercure.....	20
Plomb brillant.....	19
Fer poli.....	15
Étain, argent, or.....	12

D'après M. Melloni.

Noir de fumée.....	100
Carbonate de plomb.....	100
Colle de poisson.....	91
Encre de Chine.....	85
Gomme laque.....	72
Surface métallique.....	12

20. Pour les métaux, l'état de la surface a une grande influence sur le pouvoir émissif; celui-ci est beaucoup plus grand quand les surfaces sont ternes que quand elles sont polies. Pour les corps non métalliques, le pouvoir émissif paraît être indépendant de l'état de la surface.

21. *Pouvoir absorbant.* Le pouvoir absorbant des corps varie dans le même sens que le pouvoir émissif, mais il change avec la nature de la source de chaleur.

CALORIQUE RAYONNANT.



M. Melloni, en faisant tomber des rayons de même intensité, mais partis de sources différentes, sur différents corps, a obtenu les résultats suivants :

	LAMPE.	PLATINE INCANDESCENT.	CUIVRE à 400°.	CUIVRE à 100°.
Noir de fumée.....	100	100	100	100
Carbonate de plomb.....	53	56	89	100
Colle de poisson.....	52	54	64	91
Encre de Chine.....	96	95	87	85
Gomme laque.....	43	47	70	72
Surface métallique.....	14	13,5	13	13

21 bis. On admet que les pouvoirs émissifs et absorbants sont égaux.

22. *Transmission du calorique rayonnant à travers les corps solides et liquides transparents.* Les rayons de chaleur traversent les corps diaphanes comme la lumière; à ce fait connu depuis longtemps, M. Melloni a ajouté récemment un grand nombre de faits nouveaux; nous signalerons ceux qui peuvent avoir de l'importance dans le sujet qui nous occupe.

23. Les quantités de chaleur qui traversent les corps *diathermanes* (c'est ainsi que M. Melloni désigne ceux qui peuvent être traversés par la chaleur rayonnante) sont d'autant plus grandes, toutes choses égales d'ailleurs, que le poli de leur surface est plus grand.

24. La quantité de chaleur qui traverse des plaques de nature différente, mais de même épaisseur, est très-variable et n'a point de rapport avec leur degré de transparence, ni avec leur teinte. De tous les corps diathermanes, le sel gemme est celui qui laisse passer le plus de chaleur, l'alun celui qui en laisse passer le moins.

25. La quantité de chaleur qui traverse une plaque diathermane diminue à mesure que son épaisseur augmente, mais suivant une loi beaucoup moins rapide. Le sel gemme fait exception: il laisse passer la même quantité de chaleur sous toutes les épaisseurs. Les vitres ordinaires laissent passer à peu près 0,70 des rayons émanés des flammes, 0,45 de ceux qui partent d'un métal incandescent, et 0,07 de ceux qui émanent des corps chauffés au-dessous de la chaleur rouge.



§ 3. — PROPAGATION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES CORPS.

26. Lorsqu'une plaque d'une matière homogène a ses deux surfaces maintenues à des températures constantes, la quantité de chaleur qui traverse la plaque est proportionnelle à la différence de température des deux surfaces et en raison inverse de l'épaisseur. Pour des plaques de différentes natures, de même épaisseur et la même différence de température des surfaces, les quantités de chaleur qui les traversent sont proportionnelles aux nombres suivants :

Or.....	1000
Platine.....	981
Argent.....	973
Cuivre.....	898
Fer.....	374
Zinc.....	363
Étain.....	303
Plomb.....	179
Marbre.....	23
Porcelaine.....	12
Terre cuite.....	11

27. Les corps les plus mauvais conducteurs sont les substances composées de filaments très-fins qui ne se touchent que par très-peu de points, telles que le coton, la laine, le duvet, le son, la paille, etc.

28. Dans les liquides, la propagation de la chaleur a aussi lieu comme dans les corps solides de molécule à molécule; mais ce mode d'échauffement ne produit que des effets presque inappréciables. Les liquides s'échauffent principalement par les courants qui se produisent dans leur masse, lorsque la chaleur est appliquée à la partie inférieure des vases qui les renferment.

29. Les gaz n'absorbent qu'une très-petite partie des rayons de chaleur qui les traversent, et ne peuvent s'échauffer, comme les liquides, que par les courants qui en amènent successivement les différentes parties en contact avec des surfaces solides échauffées. Ces mouvements se produisent naturellement quand le foyer de chaleur est placé au-dessous des gaz.



§ 4. — LOIS DU RÉCHAUFFEMENT ET DU REFROIDISSEMENT.

30. Lorsqu'un liquide renfermé dans un vase exposé à l'air est à une température plus élevée que le milieu environnant, le liquide se refroidit et par la différence du rayonnement de son enveloppe sur celle de l'enceinte dans laquelle le vase est placé, et par le mouvement de l'air qui l'environne.

En désignant par A la température initiale du liquide, par T sa température après le temps t , par a un coefficient constant, et par V la vitesse du refroidissement, c'est-à-dire le refroidissement qui aurait lieu pendant l'unité de temps, pour un excès T de température du corps sur celle du milieu environnant, en supposant que cet excès reste constant, on a les relations

$$\log T = \log A - \frac{at}{2,30}; \quad \text{et} \quad V = aT.$$

Au moyen de la première, on pourra trouver la température T après le temps t , lorsque l'on connaîtra la valeur de a qui dépend du poids du liquide, de l'étendue et de la nature de l'enveloppe, et que l'on peut déterminer par une seule expérience. La seconde donne la vitesse du refroidissement lorsqu'on connaît l'excès de la température du corps sur celle de l'air environnant.

Ces formules, qui sont dues à Newton, sont exactes quand la différence des températures du liquide et de l'air ne dépasse pas 20 ou 30° : au delà elles deviennent de plus en plus inexactes; elles sont cependant suffisantes dans un grand nombre de cas.

MM. Petit et Dulong, à la suite d'un travail très-remarquable sur le refroidissement, ont été conduits à une formule beaucoup plus exacte que celle de Newton pour représenter la vitesse du refroidissement en fonction de l'excès de la température du corps sur celle du milieu environnant; mais elle est beaucoup plus compliquée et d'une application très-difficile.

§ 5. — DILATATION DES CORPS.

31. *Dilatation des corps solides.* Le tableau suivant renferme les résultats des expériences faites par plusieurs physiciens. L'unité est le volume du corps à 0°.



Dilatation linéaire des corps solides, de 0° à 100°.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	FRACTIONS DÉCIMALES.	FRACTIONS ORDINAIRES.
<i>D'après MM. Laplace et Lavoisier.</i>		
Flint-glass anglais.....	0,00081166	1/1248
Platine (selon Borda).....	0,00085655	1/1167
Verre de France avec plomb.....	0,00087199	1/1147
Tube de verre sans plomb.....	0,00087572	1/1142
<i>Idem</i>	0,00089694	1/1115
<i>Idem</i>	0,00089760	1/1114
<i>Idem</i>	0,00091750	1/1090
Verre de Saint-Gobain.....	0,00089089	1/1122
Acier non trempé.....	0,00107880	1/927
<i>Idem</i>	0,00107915	1/927
<i>Idem</i>	0,00107960	1/926
Acier trempé jaune, recuit à 65°.....	0,00123956	1/807
Fer doux forgé.....	0,00122045	1/819
Fer rond passé à la filière.....	0,00123504	1/812
Or de départ.....	0,00146606	1/682
Or au titre de Paris, recuit.....	0,00151361	1/661
<i>Idem</i> , non recuit.....	0,00155155	1/645
Cuivre.....	0,00171220	1/584
<i>Idem</i>	0,00171733	1/582
<i>Idem</i>	0,00172240	1/581
Cuivre jaune ou laiton.....	0,00186670	1/535
<i>Idem</i>	0,00187821	1/533
<i>Idem</i>	0,00188970	1/529
Argent au titre de Paris.....	0,00190868	1/524
Argent de coupelle.....	0,00190974	1/524
Étain des Indes ou de Malaca.....	0,00193765	1/516
Étain de Falmouth.....	0,00217298	1/462
Plomb.....	0,00284836	1/351
<i>D'après Smeaton.</i>		
Verre blanc (tubes de baromètre).....	0,00083333	1/1175
Régule martial d'antimoine.....	0,00108333	1/923
Acier.....	0,00115000	1/870
Acier trempé.....	0,00122500	1/816
Fer.....	0,00125833	1/795



DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	FRACTIONS DÉCIMALES.	FRACTIONS ORDINAIRES.
Bismuth.....	0,00139167	1/719
Cuivre rouge battu.....	0,00170000	1/588
Cuivre rouge 8 parties, étain 1.....	0,00181667	1/550
Cuivre jaune fondu.....	0,00187500	1/533
Cuivre jaune 16 parties, étain 1.....	0,00190833	1/524
Fil de laiton.....	0,00193333	1/517
Métal de miroir de télescope.....	0,00193333	1/517
Soudure, cuivre 2 parties, zinc 1.....	0,00205833	1/486
Étain fin.....	0,00228333	1/438
Étain en grains.....	0,00248333	1/403
Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2.	0,00250533	1/399
Zinc, 8 parties, étain 1, un peu forgé..	0,00269167	1/372
Plomb.....	0,00286667	1/349
Zinc.....	0,00294167	1/340
Zinc allongé au marteau de 1/12.....	0,00310833	1/322
<i>D'après le major général Roy.</i>		
Verre en tube.....	0,00077550	1/1289
Verre en verge solide.....	0,00080833	1/1237
Fer fondu (prisme de).....	0,00111000	1/901
Acier (verge d').....	0,00114450	1/874
Cuivre jaune de Hambourg.....	0,00185550	1/539
Cuivre jaune anglais, en forme de verge.	0,00189296	1/528
Cuivre jaune anglais, en forme d'auge ou canal rectangulaire.....	0,00189450	1/528
<i>D'après M. Troughon.</i>		
Platine.....	0,00099180	1/1008
Acier.....	0,00118990	1/840
Fer tiré à la filière.....	0,00144010	1/694
Cuivre.....	0,00191880	1/521
Argent.....	0,00208260	1/480
<i>D'après M. Wollaston.</i>		
Palladium.....	0,00100000	1/1000



DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	FRACTIONS DÉCIMALES.	FRACTIONS ORDINAIRES.
<i>D'après MM. Dulong et Petit.</i>		
Platine, de 0° à 100.....	0,00088420	1/1161
<i>Idem.</i> de 0° à 300.....	0,00091827	1/1089
Verre, de 0° à 100.....	0,00086133	1/1161
<i>Idem.</i> de 0° à 200.....	0,00094836	1/1032
<i>Idem.</i> de 0° à 300.....	0,00101084	1/987
Fer, de 0° à 100.....	0,00118210	1/846
<i>Idem.</i> de 0° à 300.....	0,00146842	1/681
Cuivre. de 0° à 100.....	0,00171820	1/582
<i>Idem.</i> de 0° à 300.....	0,00188324	1/531

Laplace et Lavoisier ont reconnu que les dilatations d'un même corps étaient uniformes de 0° à 100°, c'est-à-dire que, pour un même nombre de degrés compris dans ces limites, la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur primitive.

Cependant MM. Petit et Dulong ont trouvé que, pour un même nombre de degrés, la dilatation croissait avec la température, comptée sur le thermomètre à air. A la vérité, cet accroissement est presque inappréciable dans les limites de 0° à 100°; mais de 0° à 300° il est assez considérable comme on peut le voir par le tableau précédent.

32. L'accroissement de surface qu'un corps éprouve par son échauffement est sensiblement égal au double de l'accroissement linéaire, et l'accroissement de volume au triple de cet accroissement; de sorte qu'en désignant par L, S et V la longueur, la surface et le volume d'un corps à 0°, par L', S' et V', la longueur, la surface et le volume du même corps à t°, et enfin par δ la dilatation linéaire pour 1°, on a

$$L' = L(1 + \delta t); \quad S' = S(1 + 2\delta t); \quad V' = V(1 + 3\delta t).$$

33. Un corps creux, d'une matière homogène, augmente de volume par l'accroissement de température de la même quantité que s'il était plein.

34. *Dilatation des liquides.* D'après les expériences de M. Dulong, les dilatations de l'air et du mercure étaient les mêmes jusqu'à 100;

mais, en partant du nouveau coefficient de dilatation de l'air, l'identité se prolonge plus loin; car si un thermomètre à mercure indiquait 360°, un thermomètre à air, dans les mêmes circonstances, indiquerait 350°. Ainsi on peut sans erreur sensible admettre que les thermomètres à air et à mercure s'accordent jusqu'aux températures les plus élevées.

Le coefficient de dilatation du mercure est de $\frac{1}{5550}$.

Le coefficient de dilatation apparent du mercure dans le verre est de $\frac{1}{6480}$.

35. Les dilatations des autres liquides relativement à celles du mercure, sont très-irrégulières. L'eau a un maximum de densité qui correspond à 4°,1.

Densité et volume de l'eau de 0° à 30° centigrades, par Hallstrom.

TEMPÉRATURES.	EN PRENANT POUR UNITÉ LE VOLUME ET LA DENSITÉ DE L'EAU A 0°.		EN PRENANT POUR UNITÉ LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 4°,1.	
	DENSITÉS.	VOLUMES.	DENSITÉS.	VOLUMES.
0°	1,0	1,0	0,9998918	1,0001082
1	1,0000466	0,9999536	0,9999382	1,0000617
2	1,0000799	0,9999202	0,9999717	1,0000281
3	1,0001004	0,9998996	0,9999920	1,0000078
4	1,00010817	0,9998918	0,9999995	1,0000002
4,1	1,00010824	0,99989177	1,0	1,0
5	1,0001032	0,9998968	0,9999950	1,0000050
6	1,0000856	0,9999144	0,9999772	1,0000226
7	1,0000355	0,9999445	0,9999472	1,0000527
8	1,0000129	0,9999872	0,9999044	1,0000954
9	0,9999579	1,0000421	0,9998497	1,0001501
10	0,9998906	1,0001004	0,9997825	1,0002200
11	0,9998112	1,0001888	0,9997030	1,0002970
12	0,9997196	1,0002804	0,9996117	1,0003888
13	0,9996160	1,0003841	0,9995080	1,0004924
14	0,9995005	1,0004997	0,9993922	1,0006081
15	0,9993731	1,0006273	0,9992647	1,0007357
16	0,9992340	1,0007666	0,9991260	1,0008747
17	0,9990832	1,0009176	0,9989752	1,0010259
18	0,9989207	1,0010805	0,9988125	1,0011888



TEMPÉRATURES.	EN PRENANT POUR UNITÉ LE VOLUME ET LA DENSITÉ DE L'EAU A 0°.		EN PRENANT POUR UNITÉ LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 4°,1.	
	DENSITÉS.	VOLUMES.	DENSITÉS.	VOLUMES.
	19	0,9987468	1,0012548	0,9986387
20	0,9985615	1,0014406	0,9984534	1,0015490
21	0,9983648	1,0016379	0,9982570	1,0017560
22	0,9981569	1,0018465	0,9980489	1,0019549
23	0,9979379	1,0020664	0,9978300	1,0021746
24	0,9977077	1,0022976	0,9976000	1,0024058
25	0,9974666	1,0025398	0,9973587	1,0026483
26	0,9972146	1,0027932	0,9971070	1,0029016
27	0,9969518	1,0030575	0,9968439	1,0031662
28	0,9966783	1,0033328	0,9965704	1,0034414
29	0,9963941	1,0039189	0,9962864	1,0037274
30	0,9960993	1,0039160	0,9959917	1,0040245

Dilatation apparente de différents liquides dans le verre.

NOMS DES SUBSTANCES.	DILATATION DE 0° A 100°.	
Eau.....	1/22	0,0466
Acide hydrochlorique (P. S. 1,137).....	1/27	0,0600
Acide nitrique (P. S. 1,40).....	1/9	0,1100
Acide sulfurique (P. S. 1,85).....	1/17	0,0600
Éther sulfurique.....	1/14	0,0700
Huile d'olive et de lin.....	1/12	0,0800
Essence de térébenthine.....	1/14	0,0700
Eau saturée de sel marin.....	1/20	0,0500
Alcool.....	1/9	0,1100
Mercure.....	1/64	0,0156
<i>Dilatation absolue pour 1°.</i>		
Mercure de 0° à 100°.....	1/5550	0,0180180
Mercure de 100° à 200°.....	1/5425	0,0184331
Mercure de 200° à 300°.....	1/5300	0,0188679

36. *Dilatation des gaz.* Tous les gaz se dilatent de la même manière, du moins à partir des températures suffisamment éloignées de celles qui correspondent à leur liquéfaction. L'uniformité de leur dilatation résulte de la convention faite pour mesurer les températures.

Les lois de la dilatation des gaz furent découvertes presque en même temps par M. Gay-Lussac en France, et par Dalton en Angleterre. Charles avait depuis longtemps constaté l'égalité de dilatation des gaz, mais il n'avait pas mesuré le coefficient de dilatation. Dalton avait trouvé 0,372 pour la dilatation absolue de 0° à 100°, et il prétendait que la dilatation pour chaque degré était $\frac{1}{267}$ du volume du gaz à la température inférieure, par exemple que de 20° à 21° la dilatation était $\frac{1}{267}$ du volume du gaz à 20°; tandis que, d'après M. Gay-Lussac, la dilatation est $\frac{1}{267}$ ou 0,00375 du volume à 0°. Les expériences faites depuis par MM. Petit et Dulong ont démontré l'exactitude de la loi de M. Gay-Lussac. Mais de nouvelles expériences faites par M. Rudberg donnent 0,00364 pour coefficient de dilatation des gaz, et le même chiffre a été obtenu par M. Regnault : nous adopterons ce dernier nombre.

37. En désignant par V le volume d'un gaz à 0°, par V' son volume à t' , sous la même pression on a

$$V' = V(1 + 0,00364 \cdot t). \quad (1)$$

Si V était le volume d'un gaz à t , V' le volume du même gaz à t' , toujours sous la même pression, on aurait

$$V' = V \frac{1 + 0,00364 t'}{1 + 0,00364 t}; \quad \text{ou} \quad V' = V(1 + 0,00364(t' - t)). \quad (2)$$

Cette dernière formule a été obtenue en négligeant les termes qui renferment le carré de 0,00364; comme elle est beaucoup plus simple que la première et en réalité tout aussi exacte, nous l'emploierons de préférence.

Si le volume V était à la pression p , et le volume V' à la pression p' , on aurait

$$V' = \frac{Vp}{p'} \left(\frac{1 + 0,00364 t}{1 + 0,00364 t'} \right),$$

et en négligeant le carré de 0,00364, on a

$$V' = \frac{Vp}{p'} (1 + 0,00364(t' - t)). \quad (3)$$



§ 6. — DES VAPEURS.

38. Lorsqu'un espace vide renferme un liquide vaporisable, il se remplit instantanément de toute la vapeur qui peut se former à la température du liquide. Si l'espace augmente, le liquide fournit de nouvelle vapeur, de manière que la force élastique et la densité de la vapeur restent constantes; si l'espace diminue, une certaine partie de la vapeur se condense, de manière à conserver à celle qui reste sa tension et sa densité primitives. Mais cette permanence n'a lieu qu'autant que, dans le premier cas, une source de chaleur fournit au liquide la chaleur employée à la formation des vapeurs; et que, dans le second, l'enveloppe peut absorber et disperser la chaleur qui résulte de la condensation partielle de la vapeur. En admettant les mêmes hypothèses, si on élevait ou si on abaissait la température du liquide, pendant toutes les variations de l'étendue de l'espace, la vapeur aurait toujours la tension et la densité maximum qui correspondent à la température du liquide.

39. On appelle vapeur saturée, la vapeur qui a le maximum de tension et le maximum de densité qui correspondent à sa température.

40. Si un espace saturé de vapeurs ne renfermait point de liquide, en supposant que l'enveloppe ne fournît point de chaleur et n'en absorbât point, par l'accroissement du volume de l'espace, la densité, la tension et la température de la vapeur diminueraient; et par la diminution de l'espace, la densité, la tension et la température de la vapeur augmenteraient, et, dans ce dernier cas, on ne sait pas si une partie de la vapeur ne serait pas condensée. D'après M. de Pambour, dans ces deux circonstances la vapeur est toujours saturée, c'est-à-dire, elle a toujours la tension maximum qui correspond à sa température, et, dans la dernière il n'y a point de vapeurs condensées.

41. Dans le cas que nous venons de considérer, si on échauffait et si on augmentait l'espace renfermant la vapeur, sa force élastique varierait comme celle d'un gaz permanent. En général, une vapeur non saturée se comporte comme un gaz permanent par les variations de température et de pression, pourvu que ces variations ne l'amènent pas à la saturation.

42. Les tableaux suivants renferment la tension de la vapeur d'eau à différentes températures.



Tensions de la vapeur d'eau de —20° à 100 et pressions sur 1 centimètre carré.

DEGRÉS du thermomètre centigrade.	TENSION de la vapeur en millimèt.	PRESSION sur un centimètre carré.	DEGRÉS du thermomètre centigrade.	TENSION de la vapeur en millimèt.	PRESSION sur un centimètre carré.
degr. —20	mm. 1,333	kil. 0,0018	degr. 33	mm. 36,188	kil. 0,0492
—15	1,879	0,0026	34	38,254	0,0520
—10	2,631	0,0036	35	40,404	0,0549
— 5	3,660	0,0050	36	42,743	0,0581
0	5,059	0,0069	37	45,038	0,0612
1	5,393	0,0074	38	47,579	0,0646
2	5,749	0,0078	39	50,147	0,0681
3	6,123	0,0084	40	52,998	0,0720
4	6,523	0,0089	41	55,772	0,0758
5	6,947	0,0094	42	58,792	0,0799
6	7,396	0,0101	43	61,958	0,08418
7	7,871	0,0107	44	65,627	0,08916
8	8,375	0,0114	45	68,751	0,09340
9	8,909	0,0122	46	72,393	0,09835
10	9,475	0,0129	47	76,205	0,10353
11	10,074	0,0137	48	80,195	0,10900
12	10,707	0,0146	49	84,370	0,11662
13	11,378	0,0155	50	88,743	0,12056
14	12,087	0,0165	51	93,301	0,12676
15	12,837	0,0170	52	98,075	1,13325
16	13,630	0,0186	53	103,060	0,13999
17	14,468	0,0197	54	108,270	0,14710
18	15,353	0,0209	55	113,710	0,15449
19	16,288	0,0222	56	119,390	0,16220
20	17,314	0,0235	57	125,310	0,17035
21	18,317	0,0250	58	131,500	0,17866
22	19,447	0,0265	59	137,940	0,18736
23	20,577	0,0281	60	144,660	0,19653
24	21,805	0,0297	61	151,700	0,20610
25	23,090	0,0314	62	158,960	0,21586
26	24,452	0,0334	63	166,560	0,22639
27	25,881	0,0353	64	174,470	0,23758
28	27,390	0,0374	65	182,710	0,24823
29	29,045	0,0396	66	191,270	0,25986
30	30,643	0,0418	67	200,180	0,27196
31	32,410	0,0440	68	209,440	0,28456
32	34,261	0,0465	69	219,060	0,29761

DEGRÉS du thermomètre centigrade.	TENSION de la vapeur en millimèt.	PRESSION sur un centimètre carré.	DEGRÉS du thermomètre centigrade.	TENSION de la vapeur en millimèt.	PRESSION sur un centimètre carré.
degr.	mm.	kil.	degr.	mm.	kil.
70	229,070	0,31121	86	449,260	0,61036
71	239,450	0,32532	87	467,380	0,63498
72	250,230	0,33996	88	486,090	0,66040
73	261,430	0,35518	89	505,380	0,68661
74	273,030	0,37094	90	525,28	0,71364
75	285,070	0,39632	91	545,80	0,74152
76	297,570	0,40428	92	566,95	0,77026
77	310,490	0,42184	93	588,74	0,79986
78	323,890	0,44004	94	611,18	0,83035
79	337,760	0,45888	95	634,27	0,86172
80	352,080	0,47834	96	658,05	0,89402
81	367,000	0,49860	97	682,59	0,92736
82	382,380	0,51950	98	707,63	0,96138
83	398,280	0,54110	99	733,46	0,99448
84	414,730	0,56345	100	760,00	1,03253
85	431,710	0,58632			

Dans les limites de température de cette table, la température et la force élastique sont liées par la formule

$$t = 85\sqrt{f} - 75,$$

dans laquelle t représente la température en degrés centigrades, et f la force élastique en centimètres de mercure. Cette formule, entièrement empirique, est due à Tredgold.

43. *Tensions de la vapeur d'eau à de hautes températures.* La mesure de la force élastique de la vapeur d'eau à de hautes températures présentait de grandes difficultés et n'était pas sans danger. On ne connaissait que des tensions inférieures à huit atmosphères et les résultats obtenus par différents physiciens ne s'accordaient pas entre eux, jusqu'en 1830, époque de la publication des expériences de MM. Dulong et Arago. Le tableau suivant donne les forces élastiques de la vapeur d'eau et les températures correspondantes de 1 à 24 atmosphères d'après l'observation de ces deux physiciens, et de 24 à 50 atmosphères les résultats du calcul. Nous plaçons à côté les pressions en kilogrammes qu'exercerait la vapeur à ces températures, parce que ces nombres peuvent être utiles dans les applications.

Table des forces élastiques de la vapeur d'eau à différentes températures.

ÉLASTICITÉ DE LA VAPEUR, en prenant la pression de l'atmosphère pour unité.	COLONNE de mercure à 0° qui mesure l'élasticité.	TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermom. centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré.
	mm.		kil.
1	0,7600	100°	1,033
1 1/2	1,1400	112,2	1,549
2	1,5200	121,4	2,066
2 1/2	1,9000	128,8	2,582
3	2,2800	135,1	3,099
3 1/2	2,66	140,6	3,615
4	3,04	145,4	4,132
4 1/2	3,42	149,06	4,648
5	3,80	153,08	5,165
5 1/2	4,18	153,8	5,681
6	4,56	160,2	6,198
6 1/2	4,94	163,48	6,714
7	5,32	166,5	7,231
7 1/2	5,70	169,37	7,747
8	6,08	172,1	8,264
9	6,84	177,1	9,297
10	7,60	181,6	10,33
11	8,36	186,03	11,363
12	9,12	190,0	12,396
13	9,88	193,7	13,429
14	10,64	197,19	14,462
15	11,40	200,48	15,495
16	12,16	203,60	16,528
17	12,92	206,57	17,561
18	13,68	209,4	18,594
19	14,44	212,1	19,627
20	15,20	214,7	20,660
21	15,96	217,2	21,693
22	16,72	219,6	22,726
23	17,48	221,9	23,759
24	18,24	224,2	24,792
25	19,00	226,3	25,825
30	22,80	236,2	30,990
35	26,60	244,85	36,155
40	30,40	252,55	41,320
45	34,20	259,52	46,485
50	38,00	265,89	51,650



44. Les nombres renfermés dans ce dernier tableau satisfont à la formule

$$t = \frac{\sqrt[5]{f} - 1}{0,7153},$$

dans laquelle t représente la température en degrés centigrades à partir de 100° , en prenant pour unité l'intervalle de 100° , et f la force élastique en atmosphères de 0,76. Mais de 1 à 4 atmosphères, la formule de Tredgold s'accorde mieux avec les expériences.

45. Pour tous les autres liquides vaporisables, la tension peut se calculer approximativement au moyen de cette loi découverte par Dalton : *les vapeurs des différents liquides ont des tensions égales à des températures également éloignées de celles de leur ébullition.*

46. *Densité des vapeurs.* On désigne sous le nom de densité de la vapeur d'un certain liquide, le nombre constant qui représente le rapport des poids de deux volumes égaux de vapeur et d'air à la même température et à la même pression.

47. Le tableau suivant renferme la densité de la vapeur d'un certain nombre de liquides.

NOMS DES LIQUIDES.	DENSITÉS DES VAPEURS.	TEMPÉRATURES DE L'ÉBULLITION.
Eau.....	0,6235	100
Acide hydro-cyanique.....	0,9476	26,50
Alcool.....	1,6138	78
Éther hydro-chlorique.....	2,219	11
Éther sulfurique.....	2,5860	36
Sulfure de carbone.....	2,6447	47
Essence de térébenthine.....	5,0130	157
Éther hydriodique.....	5,4749	65

48. On désigne sous le nom de densité d'une vapeur à une certaine température et à une certaine pression, le nombre de fois que le poids d'un certain volume de cette vapeur à cette température et sous cette pression, contient le poids d'un même volume d'eau à 4° .

49. La densité d'une vapeur à une certaine température et sous une certaine pression, est égale à la densité tabulaire multipliée par celle de l'air à cette température et sous cette pression. La densité d de la vapeur d'eau à t° et sous la pression p est représentée par la formule

$$d = 0,6235 \frac{P}{0,76 \cdot (1 + at)} \cdot 0,0013.$$

50. Le tableau suivant renferme la tension et la densité de la vapeur d'eau à différentes températures, ainsi que son volume rapporté à celui de l'eau qui l'a produit.

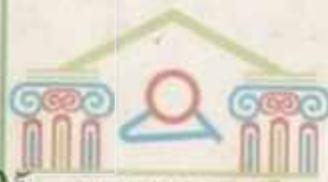
Tableau de la tension, de la densité et du volume de la vapeur d'eau à différentes températures.

TEMPÉRAT.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.	TEMPÉRAT.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.
—20°	^{mm.} 1,333	0,00000154	650588	20	^{mm.} 17,314	1718	58224
—15	1,879	212	470898	21	18,317	1811	55206
—10	2,631	292	342984	22	19,417	1914	52260
— 5	3,660	398	251358	23	20,577	2021	49487
0	5,059	540	182323	24	21,805	2133	46877
1	5,393	573	174495	25	23,090	2252	44411
2	5,748	609	164332	26	24,452	2376	42084
3	6,123	646	154842	27	25,881	2507	39895
4	6,523	686	145886	28	27,890	2643	37838
5	6,947	727	137488	29	29,045	2794	35796
6	7,396	772	129587	30	30,643	2938	34041
7	7,871	818	122241	31	32,410	3097	32291
8	8,375	867	115305	32	34,261	3263	30650
9	8,909	919	108790	33	36,188	3435	29112
10	9,475	974	102670	34	38,254	3619	27636
11	10,074	0,00001032	99202	35	40,404	3809	26253
12	10,707	1092	91564	36	42,743	0,00004017	24897
13	11,378	1157	86426	37	45,038	4219	23704
14	12,087	1224	81686	38	47,579	4442	22513
15	12,837	1299	77008	39	50,147	4666	21429
16	13,630	1372	72913	40	52,998	4916	20343
17	14,468	1451	68923	41	55,772	5156	19396
18	15,353	1534	65201	42	58,792	5418	18459
19	16,288	1622	61654	43	61,958	5691	17572



TEMPÉRAT.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.	TEMPÉRAT.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.
44°	mm. 65,627	0,00006023	16805	85	mm. 431,710	0,00034916	2864
45	68,751	6274	15938	86	449,260	36237	2760
46	72,393	6585	15185	87	467,380	37590	2660
47	76,205	6910	14472	88	486,090	38984	2565
48	80,195	7242	13809	89	505,380	40417	2474
49	84,370	7602	13154	90	525,280	41891	2387
50	88,742	7970	12546	91	545,800	43405	2304
51	93,301	8354	11971	92	566,950	44956	2224
52	98,075	8753	11424	93	588,740	46556	2148
53	103,060	9174	10901	94	611,180	48201	2075
54	108,270	9606	10410	95	634,270	49886	2005
55	113,710	0,00010054	9946	96	658,050	51613	1938
56	119,390	10525	9501	97	682,590	53388	1873
57	125,310	11011	9082	98	707,630	55191	1812
58	131,550	11523	8680	99	733,460	57055	1751
59	137,940	12044	8303	100	760,000	58955	1695
60	144,660	12599	7937	106,60	950,000	72391	1381
61	151,700	13179	7594	112,40	1140,000	85539	1169
62	158,960	13760	7267	117,10	1330,000	98324	1014
63	166,560	14374	6957	121,55	1520,000	0,00111652	896
64	174,470	15010	6662	125,50	1710,000	123923	806
65	182,710	15668	6382	128,85	1900,000	136636	732
66	191,270	16356	6114	132,15	2090,000	0,00149056	671
67	200,180	17066	5860	135,00	2280,000	161453	619
68	209,440	17797	5619	137,70	2470,000	173739	576
69	219,060	18566	5386	140,35	2660,000	185886	538
70	229,070	19355	5167	142,70	2850,000	198020	505
71	239,450	20174	4957	144,95	3040,000	210067	476
72	250,230	21013	4759	146,76	3230,000	222731	449
73	261,430	21889	4569	149,15	3420,000	233938	428
74	273,030	22794	4387	151,15	3610,000	245763	407
75	285,070	23789	4204	153,30	3800,000	257363	389
76	297,570	0,00024702	4048	155,00	3990,000	268956	392
77	310,490	15699	3891	156,70	4180,000	280827	356
78	323,890	26739	3741	158,30	4370,000	292485	342
79	337,760	27789	3599	160,00	4560,000	304651	328
80	352,080	28889	3462	161,54	4750,000	315513	317
81	367,000	30025	3331	163,25	4940,000	326828	306
82	382,380	31195	3206	164,84	5130,000	338148	296
83	398,280	32399	3087	166,42	5320,000	349393	286
84	414,730	33637	2973	167,94	5510,000	360606	277

DES VAPEURS.



25 ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

TEMPÉRAT.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.	TEMPÉRAT.	TENSION.	DENSITÉ.	VOLUME.
169,41	5700,000	371783	269	177,40	6840,000	438111	228
170,78	5890,000	382907	261	178,68	7030,000	447955	223
172,13	6080,000	394110	254	179,89	7220,000	459873	217
173,46	6270,000	405198	247	180,95	7418,000	473858	212
174,79	6460,000	416123	240	182,00	7600,000	481690	208
176,11	6650,000	427182	234	215,00	23800,000	0,01570780	64

Poids d'un mètre cube de vapeur saturée à différentes températures.

TEMPÉRATURE.	POIDS EN GRAMMES.	TEMPÉRATURE.	POIDS EN GRAMMES.
0°	5,3	55	102,20
5	7,3	60	126,10
10	9,7	65	159,20
15	13,10	70	196,40
20	17,30	75	238,80
25	22,70	80	293,60
30	29,70	85	355,70
35	39,00	90	426,10
40	49,90	95	507,40
45	63,70	100	590
50	71,00		

Poids de la vapeur renfermée dans 1 mètre cube d'air saturé à différentes températures, sous la pression de 0^m,76.

TEMPÉRATURE.	POIDS EN GRAMMES.	TEMPÉRATURE.	POIDS EN GRAMMES.
0°	5,2	55	88,74
5	7,2	60	105,84
10	9,50	65	127,20
15	12,83	70	141,96
20	16,78	75	173,74
25	22,01	80	199,24
30	28,51	85	227,20
35	37,00	90	251,34
40	46,40	95	273,78
45	58,60	100	295.
50	63,63		

51. M. de Pambour a trouvé par tâtonnement une formule au moyen de laquelle on obtient le volume d'un poids donné de vapeur en fonction seulement de la pression; cette formule est

$$v = \frac{10000}{0,4227 + 5,2897 p}$$

dans laquelle v représente le volume de vapeur rapporté au volume d'eau qui l'a produit, et p la pression par centimètre carré en kilogrammes. Si la pression était estimée en mètres de mercure, la formule serait

$$v = \frac{10000}{0,4227 + 7,14 p}$$

52. *Mélanges des gaz et des vapeurs.* Lorsqu'on met un liquide dans un vase fermé renfermant un gaz sec, on observe les faits suivants : 1° les vapeurs ne se forment que lentement, et ce n'est qu'après un certain temps, plus ou moins long, que le gaz renferme toute la vapeur qui peut se produire à la température du liquide; 2° la force élastique du mélange saturé de vapeur est égale à la force élastique du gaz augmentée de la tension maximum de la vapeur à cette température, et par conséquent la quantité de vapeur que renferme le gaz, est égale à celle qui se produirait à la même température dans le même espace vide. Ainsi les vapeurs se développent dans les gaz comme dans le vide; seulement, les gaz opposent à l'évaporation un obstacle mécanique qui la retarde, et le mélange des gaz et des vapeurs s'effectue comme celui des gaz permanents.

53. *Hygrométrie.* On désigne sous le nom d'état hygrométrique de l'air, le rapport de la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'air, à la quantité maximum qui pourrait s'y trouver si l'air était saturé; ou le rapport de la tension de la vapeur d'eau dans l'air à la tension maximum correspondante à cette température.

Les deux moyens généralement employés pour déterminer l'état hygrométrique de l'air sont : 1° la détermination de l'abaissement de température que l'air devrait éprouver pour être saturé; 2° l'emploi de l'hygromètre de Saussure.

54. La première méthode consiste à mettre de l'eau dans un vase d'argent et à la refroidir successivement par de l'eau à la glace, jusqu'à ce que la vapeur d'eau commence à se condenser à la surface du

vase : la température correspondante est celle à laquelle l'air devrait être abaissé pour se trouver saturé. Les tables donnent la tension maximum de la vapeur à cette température, et cette tension est celle de la vapeur qui se trouve dans l'air. On peut aussi employer pour cet objet l'hygromètre de Daniel.

55. L'hygromètre de Saussure donne des indications desquelles on peut facilement déduire l'état hygrométrique de l'air d'après le tableau suivant :

Tableau de la force élastique de la vapeur, correspondante aux degrés de l'hygromètre, à la température de 10° centésimaux, exprimée en centièmes de la tension à la saturation.

TENSION de la vapeur.	DEGRÉS correspondants de l'hygromètre.	TENSION de la vapeur.	DEGRÉS correspondants de l'hygromètre.	DEGRÉS de l'hygrom.	TENSIONS correspondantes de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygrom.	TENSIONS correspondantes de la vapeur.
0	0,00	25	46,24	0	0,00	25	12,05
1	2,19	26	47,55	1	0,45	26	12,59
2	4,37	27	48,86	2	0,90	27	13,14
3	6,56	28	50,18	3	1,35	28	13,69
4	8,75	29	51,49	4	1,80	29	14,23
5	10,94	30	52,81	5	2,25	30	14,78
6	12,93	31	53,96	6	2,71	31	15,36
7	14,92	32	55,11	7	3,18	32	15,94
8	16,92	33	56,27	8	3,64	33	16,52
9	18,91	34	57,42	9	4,10	34	17,10
10	20,91	35	58,58	10	4,57	35	17,68
11	22,81	36	59,61	11	5,05	36	18,30
12	24,71	37	60,64	12	5,52	37	18,92
13	26,61	38	61,66	13	6,00	38	19,54
14	28,51	39	62,69	14	6,48	39	20,16
15	30,41	40	63,72	15	6,96	40	20,78
16	32,08	41	64,63	16	7,46	41	21,45
17	33,76	42	65,53	17	7,95	42	22,12
18	35,43	43	66,43	18	8,45	43	22,79
19	37,11	44	67,34	19	8,95	44	23,46
20	38,78	45	68,24	20	9,45	45	24,13
21	40,27	46	69,03	21	9,97	46	24,86
22	41,76	47	69,83	22	10,49	47	25,59
23	43,26	48	70,62	23	11,01	48	26,32
24	44,75	49	71,42	24	11,53	49	27,06

TENSION de la vapeur.	DEGRÉS correspondants de l'hygromètre.	TENSION de la vapeur.	DEGRÉS correspondants de l'hygromètre.	DEGRÉS de l'hygrom.	TENSIONS correspondantes de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygrom.	TENSIONS correspondantes de la vapeur.
50	72,21	76	88,47	50	27,79	76	55,25
51	72,94	77	88,99	51	28,58	77	56,74
52	73,68	78	89,51	52	29,38	78	58,24
53	74,41	79	90,03	53	30,17	79	59,73
54	75,14	80	90,55	54	30,97	80	61,22
55	75,87	81	91,05	55	31,76	81	62,89
56	76,54	82	91,55	56	32,66	82	64,57
57	77,21	83	92,05	57	33,57	83	66,24
58	77,88	84	92,54	58	34,47	84	67,92
59	78,55	85	93,04	59	35,37	85	69,59
60	79,22	86	93,52	60	36,28	86	71,49
61	79,84	87	94,00	61	37,31	87	73,39
62	80,46	88	94,48	62	38,34	88	75,29
63	81,08	89	94,95	63	39,36	89	77,19
64	81,70	90	95,43	64	40,39	90	79,09
65	82,32	91	95,90	65	41,42	91	81,09
66	82,90	92	96,36	66	42,58	92	83,08
67	83,48	93	96,82	67	43,73	93	85,08
68	84,06	94	97,29	68	44,49	94	87,07
69	84,64	95	97,75	69	46,04	95	89,06
70	85,22	96	98,20	70	47,19	96	91,25
71	85,77	97	98,69	71	48,51	97	93,44
72	86,31	98	99,10	72	49,82	98	95,63
73	86,86	99	99,55	73	51,14	99	97,81
74	87,41	100	100,00	74	52,45	100	100,00
75	87,95			75	53,76		

§ 7. CHALEURS SPÉCIFIQUES DES CORPS.

56. En désignant sous le nom d'*unité de chaleur* la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer 1 k. d'eau de 1°, la *chaleur spécifique* d'un corps est le nombre d'unités de chaleur nécessaires pour échauffer 1 k. de ce corps de 1°.

Le tableau suivant donne les chaleurs spécifiques d'un grand nombre de corps; il est le résultat des travaux de M. Regnault qui, dans ses expériences, a employé la méthode des mélanges qu'il a perfectionnée de manière à la rendre supérieure à toutes les autres méthodes connues.

Chaleurs spécifiques, d'après M. Regnault.

Fer.....	0,11379	Protoxyde de plomb, en poudre.	0,05118
Zinc.....	0,09555	— — fondu....	0,05089
Cuivre.....	0,09515	Protoxyde de manganèse.....	0,15701
Argent.....	0,05701	Oxyde de cuivre.....	0,14201
Arsenic.....	0,08140	Oxyde de nickel.....	0,16234
Plomb.....	0,03140	Magnésie.....	0,24394
Bismuth.....	0,03084	Oxyde de zinc.....	0,12480
Antimoine.....	0,05077	Peroxyde de fer (fer oligiste)...	0,16695
Étain des Indes.....	0,05623	Colcothar peu calciné.....	0,17569
Étain anglais.....	0,05695	— calciné une 2 ^e fois..	0,17167
Nickel.....	0,10863	— fortement calciné....	0,16921
Cobalt.....	0,10696	— — une 2 ^e fois.	0,16707
Platine laminé.....	0,03243	Acide arsénieux.....	0,12786
Platine en mousse.....	0,03293	Oxyde de chrome.....	0,17960
Palladium.....	0,05927	Oxyde de bismuth.....	0,06053
Or.....	0,03244	Oxyde d'antimoine.....	0,09009
Soufre.....	0,20259	Alumine (corindon).....	0,19762
Acier Haussmann.....	0,11848	Saphir.....	0,21732
Fine-metal.....	0,12728	Acide stannique.....	0,09326
Fonte de fer blanche de Bourg.	0,12983	Acide stannique artificiel....	0,17164
Charbon.....	0,24111	Acide stannique (rutil).....	0,17032
Manganèse très-carburé.....	0,14411	Acide antimonieux.....	0,09535
Mercure.....	0,03332	Acide tungstique.....	0,07983
Alliage 1 at. de plomb et 1 at.		Acide molybdique.....	0,13240
étain.....	0,04073	Acide silicique.....	0,19132
Alliage 1 at. de plomb, 2 at.		Acide borique.....	0,23743
étain.....	0,04506	Oxyde de fer magnétique....	0,16780
Alliage 1 at. de plomb, 1 at.		Proto-sulfure de fer.....	0,13570
antimoine.....	0,03880	Sulfure de nickel.....	0,12813
Alliage 1 at. bismuth, 1 at. étain.	0,04000	Sulfure de zinc.....	0,12303
Alliage 1 at. bismuth, 2 at. étain.	0,04504	Sulfure de plomb.....	0,05086
Alliage 1 at. bismuth, 2 at. étain,		Sulfure de mercure.....	0,05117
1 at. antimoine.....	0,04621	Proto-sulfure d'étain.....	0,08365
Alliage 1 at. bismuth, 2 at. étain,		Sulfure d'antimoine.....	0,08403
1 at. antimoine, 2 at. zinc..	0,05657	Sulfure de bismuth.....	0,06002
Alliage 1 at. plomb, 2 at. étain,		Bi-sulfure de fer.....	0,13009
1 at. bismuth.....	0,04476	Bi-sulfure d'étain.....	0,11932
Alliage 1 at. plomb, 2 at. étain,		Sulfure de cuivre.....	0,12118
2 at. bismuth.....	0,06082	Sulfure d'argent.....	0,07460
Alliage 1 at. mercure, 1 at. étain.	0,07294	Pyrite magnétique.....	0,16023
Alliage 1 at. mercure, 2 at. étain.	0,06591	Chlorure de sodium.....	0,21401
Alliage 1 at. mercure, 1 at. plomb.	0,03827	Chlorure de potassium.....	0,17295



Protochlorure de mercure.....	0,05205	Chromate de potasse.....	0,18505
Protochlorure de cuivre.....	0,13827	Bi-chromate de potasse.....	0,18937
Chlorure d'argent.....	0,09109	Borate de potasse.....	0,21975
Chlorure de barium.....	0,08957	Borate de soude.....	0,23823
Chlorure de strontium.....	0,11990	Borate de plomb.....	0,11409
Chlorure de calcium.....	0,16420	Borate de potasse.....	0,20478
Chlorure de magnésium.....	0,19460	Borate de soude.....	0,25709
Chlorure de plomb.....	0,06641	Borate de plomb.....	0,09046
Protochlorure de mercure.....	0,06889	Carbonate de potasse.....	0,21623
Chlorure de zinc.....	0,13618	Carbonate de soude.....	0,27275
Perchlorure d'étain.....	0,10161	Carbonate de chaux (<i>spath</i>	
Chlorure de manganèse.....	0,14255	<i>d'Islande</i>).....	0,20858
Chlorure d'étain.....	0,14759	Aragonite.....	0,20850
Fluorure de calcium.....	0,21492	Marbre saccharoïde gris.....	0,20989
Nitrate de potasse.....	0,23875	Craie blanche.....	0,21485
Nitrate de soude.....	0,27821	Carbonate de baryte.....	0,11038
Nitrate d'argent.....	0,14352	Carbonate de strontiane.....	0,14483
Nitrate de baryte.....	0,15228	Carbonate de fer.....	0,19345
Chlorate de potasse.....	0,20956	Carbonate de plomb.....	0,08596
Phosphate de potasse.....	0,19102	Dolomie.....	0,21743
Phosphate de soude.....	0,22833	Noir animal.....	0,26085
Phosphate de plomb.....	0,08208	Charbon de bois.....	0,24150
Phosphate de plomb.....	0,07982	Coke du cannel-coal.....	0,20307
Arséniate de potasse.....	0,15631	— de la houille.....	0,20085
Arséniate de plomb.....	0,07280	Charbon de l'anthracite du pays	
Sulfate de potasse.....	0,19010	de Galles.....	0,20172
Sulfate de soude.....	0,23115	Charbon de l'anthracite de Phi-	
Sulfate de baryte.....	0,11285	ladelphie.....	0,20100
Sulfate de strontiane.....	0,14279	Graphite naturel.....	0,20187
Sulfate de plomb.....	0,08723	— des hauts-fourneaux..	0,49702
Sulfate de chaux.....	0,19656	— des cornues du gaz..	0,20360
Sulfate de magnésie.....	0,22159	Diamant.....	0,14687

A ces nombres nous en ajouterons d'autres qui peuvent être utiles dans les applications.

Chaux vive.....	0,2169	} Laplace et
Huile d'olive.....	0,3096	
Acide sulfurique (densité 1,87).....	0,3346	} Lavoisier.
Acide nitrique (densité 1,30).....	0,6614	
Vinaigre.....	0,920	Dalton.
Acide hydrochlorique (densité 53).....	0,600	id.
Alcool (densité 0,81).....	0,700	id.
— (densité 0,793).....	0,622	id.

CHALEURS SPÉCIFIQUES.



Éther sulfurique (densité 0,76).....	0,660	id.
— (densité 0,715).....	0,520	Despretz.
Essence de térébenthine (densité 0,872).....	0,472	id.
Bois de pin.....	0,650	Mayer.
Bois de chêne.....	0,570	id.
Bois de poirier.....	0,500	id.
Flint-glass.....	0,190	Dalton.
Chlorure de sodium.....	0,230	id.
Fer de 0 à 100.....	0,1098	Petit et Dulong.
Fer de 0 à 200.....	0,1150	id.
Fer de 0 à 300.....	0,1218	id.
Fer de 0 à 350.....	0,1255	id.

57. La chaleur spécifique d'un même corps augmente avec la température, surtout pour les températures auxquelles il commence à se ramollir; elle varie aussi avec l'état d'agrégation des molécules; elle est d'autant plus petite que cette agrégation est plus grande. Cependant M. Regnault a reconnu, à la suite des nombreuses expériences dont nous avons rapporté les résultats, 1°, que pour les métaux, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse de leurs poids atomiques; 2° qu'il en est de même pour les groupes de corps de même composition atomique et de constitution chimique semblable; 3° que la chaleur spécifique d'un alliage est sensiblement égale à la moyenne de celles des métaux alliés.

58. *Chaleur spécifique des gaz.* La détermination de la chaleur spécifique des gaz présente beaucoup plus de difficultés que celle des corps solides et liquides, non-seulement parce qu'elle est très-petite, mais encore parce qu'on peut la considérer sous deux points de vue différents: 1° quand la pression reste la même et que le gaz, en s'échauffant, peut se dilater; 2° lorsque le volume est constant et que la force élastique augmente avec la température.

59. *Chaleur spécifique des gaz sous une pression constante.* Lorsque les gaz se dilatent librement par l'accroissement de température, c'est-à-dire qu'ils restent sous la même pression, la chaleur spécifique des gaz simples est la même, mais elle est différente pour les gaz composés. Le tableau suivant renferme les chaleurs spécifiques des principaux gaz rapportées à l'air et à l'eau, d'après les expériences de MM. Laroche et Berard.

Chaleurs spécifiques de différents gaz sous une même pression.

NOMS DES GAZ.	LA CAPACITÉ CALORIFIQUE DE L'AIR étant prise pour unité.		LA CAPACITÉ calorifique de l'eau étant prise pour unité.
	A VOLUMES ÉGAUX.	A POIDS ÉGAUX.	
Air atmosphérique.	1,0000	1,0000	0,2669
Hydrogène.	0,9033	12,5401	3,2936
Acide carbonique.	1,2583	0,8280	0,2210
Oxygène.	0,9765	0,8848	0,2361
Azote.	1,0000	1,0318	0,2754
Oxyde d'azote.	1,3503	0,8878	0,2369
Hydrogène carboné.	1,0530	1,5763	0,4207
Oxyde de carbone.	1,0340	1,0805	0,2884
Vapeur d'eau.	1,9600	3,1360	0,8470

60. La chaleur spécifique des gaz varie en sens contraire de la pression qu'ils supportent. D'après M. Suerman, la chaleur spécifique de l'air est 0,2868 et 0,3136 pour des pressions de 0^m,691 et de 0^m,319.

D'après M. Gay-Lussac, elle augmente avec la température, mais suivant une loi inconnue.

61. *Chaleur spécifique des gaz à volume constant.* Lorsque l'on chauffe les gaz sans leur permettre de se dilater, à volume égal, les chaleurs spécifiques des gaz simples sont encore égales, mais elles sont plus petites qu'à pression constante.

62. Le tableau suivant renferme le rapport des deux chaleurs spécifiques d'un certain nombre de gaz, et les chaleurs spécifiques à volume constant rapportées à celle de l'air.

	RAPPORT DE LA CHALEUR spécifique à pression constante et à volume constant.	CHALEUR SPÉCIFIQUE à volume constant, celle de l'air étant prise pour unité.
Air atmosphérique.	1,421	1,000
Oxygène.	1,415	1,000
Hydrogène.	1,407	1,000
Acide carbonique.	1,338	1,249
Oxyde de carbone.	1,427	1,000
Oxyde d'azote.	1,343	1,227
Gaz oléfiant.	1,240	1,754

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS.



§ 8. — CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS.

Température de la fusion de différents corps.

NOMS DES SUBSTANCES.	DEGRÉS DU PYROMÈTRE.	DEGRÉS CENTÉSIMAUX.
Mercure.....	»	—39,0
Essence de térébenthine.....	»	—10
Glace.....	»	0
Suif.....	»	33,33
Acide acétique.....	»	45
Sperma-ceti.....	»	49
Stéarine.....	»	40 à 43
Acide margarique.....	»	55 à 60
Cire non blanchie.....	»	61
Cire blanche.....	»	68
Acide stéarique.....	»	70
Phosphore.....	»	43
Potassium.....	»	58
Sodium.....	»	90
Alliage de 5 plomb, 3 étain, 8 bismuth.	»	100
— 2 plomb, 3 étain, 5 bismuth.	»	100
Iode.....	»	107
Soufre.....	»	109
Alliage de 5 bismuth, 1 plomb, 4 étain.	»	118,9
— 1 étain, 1 bismuth.....	»	141,2
— 3 étain, 2 plomb.....	»	167,7
— 2 étain, 1 bismuth.....	»	167,7
— 8 étain, 1 bismuth.....	»	200
Étain.....	»	210
Bismuth.....	»	256
Plomb.....	»	260
Zinc.....	»	360
Antimoine.....	»	432
Cuivre.....	27	»
Or.....	32	»
Cobalt.....	130	»
Acier.....	130	»
Fer.....	130	»



NOMS DES SUBSTANCES.	DEGRÉS DU PYROMÈTRE.	DEGRÉS CENTÉSIMAUX.
Nickel.....	160	»
Manganèse.....	160	»
Colombium.....	170	»
Molybdène.....	170	»
Chrome.....	170	»
Tungstène.....	170	»
Argent pur.....	»	999
Argent allié avec 1/10 d'or.....	»	1048

63. Les corps solides, en passant à l'état liquide, absorbent une certaine quantité de chaleur nécessaire à la constitution de l'état liquide, et qui se dégage lorsque le liquide se solidifie. Le tableau suivant renferme la quantité d'unités de chaleur absorbées par 1^k de différents corps en se liquéfiant.

	TEMPÉRATURE DE LA FUSION.	UNITÉS DE CHALEURS ABSORBÉES.
Glace.....	0	75
Sperma-ceti.....	56	82,22
Cire d'abeilles.....	60	97,22
Étain.....	219	277,77

L'eau, le bismuth et la fonte de fer augmentent de volume par la congélation.

64. L'ébullition d'un liquide a lieu quand la force élastique de la vapeur que le liquide produirait dans le vide à cette température, fait équilibre à la pression qui est exercée sur lui. Ainsi on abaisse la température de l'ébullition d'un liquide en diminuant la pression qu'il supporte, et on l'élève en augmentant cette pression. Dans un vase exactement fermé, d'une résistance suffisante, l'ébullition d'un liquide ne se ma-

nifesterait pas malgré l'élévation de la température, à cause de la pression croissante de l'atmosphère de vapeur qui pèserait sur lui.

65. Dans les mêmes circonstances, la température de l'ébullition de l'eau est plus élevée de 1 à $1^{\circ}\frac{1}{2}$ dans des vases de verre que dans les vases métalliques. Dans le verre, certains liquides ne bouillent que par intermittences, malgré la continuité du feu. Les mouvements brusques qui accompagnent alors la production de la vapeur (soubresauts), occasionnent souvent la rupture des vases; on les évite en mettant dans les vases des limailles métalliques.

Les liquides versés sur des métaux incandescents s'évaporent très-lentement, beaucoup moins que si les métaux étaient à une température inférieure à celle du rouge naissant; il paraît qu'alors le liquide ne touche pas le métal, qu'il ne reçoit pas de chaleur par communication directe, et qu'il n'absorbe qu'une très-petite quantité de chaleur rayonnante.

Température de l'ébullition de différents liquides sous la pression ordinaire.

Éther sulfurique.....	37,8
Sulfure de carbone.....	47,0
Alcool.....	79,7
Dissolution saturée de sulfate de soude....	100,7
— d'acétate de plomb.....	102,0
— de chlorure de sodium.....	106,9
— de chlorhydrate d'ammoniaque..	114,4
— de nitre.....	115,6
— de tartre.....	116,7
— de nitrate d'ammoniaque.....	125,3
— de sous-carbonate de potasse... .	140,0
Essence de térébenthine.....	157,0
Phosphore.....	290,0
Soufre.....	299,0
Acide sulfurique.....	310,0
Huile de lin... .	316,0
Mercure.....	360,0

66. Les liquides, en se transformant en vapeur, absorbent une certaine quantité de chaleur qui reste latente dans la vapeur, et qui est restituée quand la vapeur se condense.



Chaleur latente des vapeurs d'après M. Despretz.

NOMS DES SUBSTANCES.	CHALEUR totale depuis 0°.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale en eau.	DENSITÉ par rapport à celle de l'air à la même température.	DENSITÉ de la vapeur au point d'ébullition par rapport à l'air à 0°.
Eau	631	531	631	0,623	0,454
Alcool	410,7	331,9	255	1,613	1,258
Éther sulfurique . . .	210	174,5	109,3	2,586	2,280
Essence de térébent.	323	166,2	149,2	5,013	3,207

67. D'après le comte de Rumfort, la chaleur de vaporisation de 1 kil. d'eau est de 557 unités de chaleur; d'après Dulong, de 543; d'après Clément et Desormes, de 550; d'après M. Southern, de 530; d'après Watt, de 527.

68. Suivant Clément et Desormes, la quantité totale de chaleur nécessaire pour chauffer et vaporiser ensuite à une température quelconque 1 kil. d'eau, primitivement à 0°, est égale à 650 unités de chaleur. Ainsi le calorique de vaporisation diminuerait à mesure que la température de la vaporisation serait plus élevée; il serait de 550 à 100°, et nul à 650°; mais la quantité totale de chaleur renfermée dans la vapeur serait constante; c'est-à-dire, si on condensait 1 kil. de vapeur à une température quelconque, de manière à obtenir de l'eau à 0°, il se dégagerait toujours la même quantité de chaleur. D'après M. Southern, au contraire, le calorique de vaporisation serait constant, et par conséquent la quantité totale de chaleur renfermée dans la vapeur croîtrait avec sa température. Aucun de ces deux résultats n'est appuyé sur un nombre suffisant d'expériences pour être admis.

69. D'après M. de Pambour, la loi de Clément est la seule qui soit admissible. En effet, il résulte de cette loi, que si on dilatait et si on comprimait de la vapeur saturée dans un vase, sans absorption et sans perte de chaleur, dans le premier cas la vapeur se refroidirait, dans le second elle s'échaufferait, et dans tous elle resterait saturée, sans condensation. Or, il résulte des expériences de M. de Pambour, qu'en observant la tension et la température de la vapeur dans les générateurs des locomotives



tives, et à la sortie des cylindres, les pressions sont toujours celles qui correspondent dans les tables aux températures observées. Mais les expériences de M. de Pambour ont été faites dans de trop petites limites de pression pour qu'on puisse être assuré que la loi qu'il a reconnue se vérifierait dans toutes les circonstances.

§ 9. — SOURCES DE CHALEUR ET DE FROID.

70. Les sources de chaleur sont, la chaleur solaire, la chaleur centrale de la terre, la pression, la percussion, le frottement, les changements d'état des corps, et les actions chimiques. Nous ne parlerons pas de la chaleur solaire et de la chaleur centrale de la terre, parce qu'elles sont étrangères à notre objet. Nous ne parlerons pas non plus de celle qui est due à la pression, à la percussion ou au frottement, parce que les effets qui résultent de ces causes sont peu importants. Nous avons déjà parlé des effets produits par les changements d'état des corps. Quant aux actions chimiques, les seules qui soient employées pour produire de la chaleur, sont celles qui constituent la combustion, et nous y consacrerons tout le deuxième chapitre de cet ouvrage.

71. Les sources de froid résident dans la dilatation des gaz, dans la liquéfaction des corps solides par des actions chimiques, et enfin dans la vaporisation spontanée. Nous nous contenterons de rapporter le tableau des effets produits par différents mélanges frigorifiques.

TABLE DES MÉLANGES FRIGORIFIQUES.

Mélanges d'eau et de sels.

	Parties.		Froid produit.
Eau.....	16	}	de + 10° à — 12°..... 22°
Nitre.....	5		
Hydrochlorate d'ammoniaque.....	5		
Eau.....	16	}	de + 10 à — 16..... 26
Hydrochlorate d'ammoniaque.....	5		
Nitre.....	5		
Sulfate de soude.....	8	}	de + 10 à — 16..... 26
Eau.....	1		
Nitrate d'ammoniaque.....	1		



	Parties.		Froid produit.
Eau.....	1	} de + 10 à — 19	29
Nitrate d'ammoniaque.....	1		
Sous-carbonate de soude.....	1		
Eau.....	4	}	15
Chlorure de potassium.....	57		
Chlorhydrate d'ammoniaque.....	32		
Nitrate de potasse.....	20		

Mélanges de glace et de sels.

Neige ou glace pilée.....	2	}	20°
Sel.....	1		
Neige ou glace pilée.....	5	}	24
Sel marin.....	2		
Sel ammoniac.....	1		
Neige ou glace pilée.....	24	}	28
Sel marin.....	10		
Sel ammoniac.....	5		
Nitre.....	5		
Neige ou glace pilée.....	12	}	31
Sel marin.....	5		
Nitrate d'ammoniaque.....	5		

Mélanges d'acides et de sels.

Sulfate de soude.....	3	} de + 10° à — 19°.....	29°
Acide nitrique étendu.....	2		
Sulfate de soude.....	6	} de + 10 à — 23	33
Sel ammoniac.....	4		
Nitre.....	2		
Acide nitrique étendu.....	4	} de + 10 à — 26	36
Sulfate de soude.....	6		
Nitrate d'ammoniaque.....	5		
Acide nitrique étendu.....	4		
Phosphate de soude.....	9	} de + 10 à — 29	39
Acide nitrique étendu.....	4		
Sulfate de soude.....	20	} de + 10 à — 8,15	18, 15
Acide sulfurique à 36°.....	16		
Sulfate de soude.....	22	} de + 10 à — 8.....	18
Résidu d'éther à 33°.....	17		
Sulfate de soude.....	8	} de + 10 à — 17.....	27
Acide chlorhydrique.....	5		



DENSITÉ.

§ 10. — DENSITÉ.

72. Pour les corps solides et les liquides, la densité est égale au rapport du poids du corps à celui d'un égal volume d'eau à 4°. Pour ces corps, le poids, le volume et la densité sont liés par l'équation

$$P = Vd$$

dans laquelle l'unité du poids est égale au poids de l'eau renfermée dans l'unité de volume.

Tableau de la densité d'un certain nombre de corps solides et liquides.

Platine laminé	22,0690	Porcelaine de la Chine	2,3847
— passé à la filière	21,0417	Chaux sulfatée cristallisée	2,3117
— forgé	20,3366	Porcelaine de Sèvres	2,1457
— purifié	19,5000	Soufre natif	2,0332
Or forgé	19,3617	Ivoire	1,9170
Or fondu	19,2581	Albâtre	1,8740
Mercure à 0°	13,5980	Anthracite	1,8000
Plomb fondu	11,3523	Alun	1,7200
Argent fondu	10,4743	Houille compacte	1,3292
Bismuth fondu	9,8220	Jayet	1,2590
Cuivre en fil	8,8785	Succin	1,0780
Cuivre rouge fondu	8,7880	Glace fondante	0,9300
Arsenic	8,3080	Potassium	0,8651
Nickel fondu	8,2790	Bois de hêtre	0,8520
Acier non écroui	7,8163	Frêne	0,8450
Cobalt fondu	7,8119	If	0,8070
Fer en barre	7,7880	Bois d'orme	0,8000
Étain fondu	7,2914	Pommier	0,7330
Fer fondu	7,2070	Bois d'oranger	0,7050
Zinc fondu	6,8610	Sapin jaune	0,6570
Antimoine fondu	6,7120	Tilleul	0,6040
Spath pesant	4,4300	Bois de cyprès	0,5980
Flint-glass	3,3293	Bois de cèdre	0,5610
Spath fluor	3,1911	Peuplier blanc d'Espagne	0,5290
Tourmaline (verte)	3,1555	Bois de sassafras	0,4820
Asbeste roide	2,9958	Peuplier ordinaire	0,3830
Marbre de Paros	2,8376	Liège	0,2400
Chaux carbonatée cristallisée	2,7182	Acide sulfurique	1,8409
Cristal de roche pur	2,6530	Acide nitreux	1,550
Quartz agate	2,6150	Eau de la mer Morte	1,2403
Feldspath limpide	2,5644	Acide nitrique	1,2175
Verre de Saint-Gobain	2,4882	Eau de la mer	1,0263



Lait.....	1,03	Éther chlorhydrique.....	0,874
Eau distillée.....	1,0000	Huile essentielle de térébenthine	0,8697
Vin de Bordeaux.....	0,9993	Bitume liquide, dit naphte.....	0,8475
Vin de Bourgogne.....	0,9915	Alcool absolu.....	0,792
Huile d'olive.....	0,9153	Éther sulfurique.....	0,7155

73. Pour les gaz, l'unité de densité est la densité de l'air, et on a aussi la formule $P = Vd$; mais l'unité de poids est le poids de l'unité de volume de l'air.

Tableau de la densité des principaux gaz.

DÉSIGNATION DES GAZ.	DENSITÉ.	POIDS en grammes d'un litre de gaz à 0° et sous la pression de 0 ^m 76.
Air.....	1,000	1,2991
Acide iodhydrique.....	4,443	6,7719
— fluo-silicique.....	3,5735	4,6423
— chloro-carbonique.....		4,4156
Chlore.....	2,470	3,2088
Euchlorine.....		3,0081
Acide fluo-borique.....	2,3709	3,0800
— sulfureux.....	2,1204	2,8489
— chloro-cyanique.....		
Cyanogène.....	1,8064	2,3467
Protoxyde d'azote.....	1,5204	1,9752
Acide carbonique.....	1,524	1,9805
— chlorhydrique.....	1,2474	1,6205
— sulfhydrique.....	1,1912	1,5475
— oxygène.....	1,1036	1,4323
Bioxyde d'azote.....	1,0388	1,3495
Gaz oléfiant.....	0,978	1,2752
Azote.....	0,976	1,2675
Oxyde de carbone.....	0,9569	1,2451
Hydrogène phosphoré.....	0,87	
Ammoniaque.....	0,5967	0,7752
Hydrogène carboné.....	0,555	0,7270
Hydrogène arsénié.....	0,529	
Hydrogène.....	0,0688	0,0894



CHAPITRE II.

DE LA COMBUSTION ET DES COMBUSTIBLES.

§ 1. DE LA COMBUSTION EN GÉNÉRAL.

74. La combustion réside uniquement dans le fait de la combinaison d'un corps avec l'oxygène ; ce phénomène est souvent accompagné de chaleur et de lumière , mais il ne l'est pas toujours.

75. L'oxygène est un corps gazeux, incolore, mais pesant, élastique, et jouissant de toutes les propriétés de l'air atmosphérique, dont il forme un des éléments. L'air est composé de soixante-dix-neuf parties d'azote, et de vingt et une d'oxygène. L'azote ne joue qu'un rôle passif dans les phénomènes de la combustion ; pour cette raison, nous n'en décrivons point les propriétés, dont la connaissance n'est point nécessaire pour l'objet que nous nous proposons.

76. L'oxygène jouit de la propriété remarquable de se combiner avec tous les corps simples, et avec un grand nombre de corps composés. Tous ces corps portent alors le nom de combustibles.

77. L'affinité des différents corps combustibles pour l'oxygène est extrêmement variable ; il en est qui l'absorbent à la température ordinaire, d'autres exigent une température plus ou moins élevée ; d'autres enfin ne peuvent se combiner avec l'oxygène que lorsqu'il sort d'une combinaison solide ou liquide. On désigne cet état passager sous le nom de gaz naissant.

78. L'oxygène peut être mis en contact avec un corps combustible, de bien des manières différentes ; car ce corps existe non-seulement dans l'air, mais dans un grand nombre d'autres substances. On peut pro-



duire la combustion des corps par l'air, par l'oxygène pur ou mêlé avec d'autres gaz, et même par des combinaisons solides ou liquides qui contiennent de l'oxygène. Dans tous les cas, il se forme toujours une combinaison du corps combustible et d'oxygène. Quand la combustion d'un corps a lieu dans l'air, c'est ce dernier qui fournit l'oxygène nécessaire; si la masse d'air dans laquelle s'opère la combustion est petite relativement à celle du combustible, elle s'épuise bientôt, et cesse d'alimenter la combustion; aussi est-il nécessaire de renouveler continuellement l'air qui doit produire ce phénomène. Quand un métal est dissous par un acide, le métal éprouve une véritable combustion, et c'est l'acide ou l'eau qui, en se décomposant, fournissent l'oxygène nécessaire. Enfin, dans la détonation de la poudre, les matières combustibles qu'elle renferme, le soufre et le charbon, éprouvent encore une combustion réelle, pour laquelle l'oxygène est fourni par le salpêtre.

79. Il résulte évidemment de ce qui précède, que le produit de la combustion doit être plus pesant que le corps combustible, de tout l'oxygène absorbé. Mais les produits de la combustion peuvent être solides ou gazeux. Dans le premier cas, le résidu de la combustion en est tout le produit, et on reconnaît facilement qu'il y a augmentation de poids. Dans le second cas, les produits se dégagent à mesure qu'ils se forment, et le résidu est uniquement formé des substances incombustibles qui existaient dans la matière qui a été brûlée. C'est ainsi, par exemple, qu'en brûlant du plomb dans un vase d'argile ou de fonte, on obtient pour produit une matière grise beaucoup plus pesante que le plomb employé; et qu'au contraire dans la combustion du bois ou du charbon, il ne reste pour résidu que les matières étrangères qui étaient contenues dans ces combustibles. Ainsi, il faut bien distinguer les produits des résidus de la combustion. Les produits sont des combinaisons d'oxygène et des corps combustibles, dont le poids excède toujours celui de ces derniers, mais qui restent avec le résidu, ou se dégagent suivant qu'ils sont solides ou gazeux.

80. Nous avons déjà dit que la chaleur et la lumière accompagnent ordinairement la combustion. Il paraît qu'en général la lumière ne commence à se manifester qu'autant que la température du corps est au moins à 500° . A cette température la lumière est d'un rouge obscur à peine visible; mais à mesure que la température augmente, la lumière

prend plus d'éclat, elle devient rouge-cerise, et presque complètement blanche à une température très-élevée.

81. Lorsqu'un combustible est solide, et reste tel quelle que soit sa température, pendant toute la durée de la combustion, ce phénomène n'a lieu qu'à la surface du combustible, et cette surface seule est lumineuse. L'air environnant, quoique soumis à une température très-élevée, n'est point lumineux, parce que les gaz ne sont point susceptibles de le devenir par une chaleur communiquée, quelque grande qu'elle soit. Ils ne le deviennent que quand ils sont eux-mêmes combustibles et qu'ils brûlent. Ainsi, le charbon privé d'autres matières combustibles n'est lumineux qu'à sa surface. La flamme qu'il produit ordinairement, du moins au commencement de sa combustion, provient d'une certaine quantité d'hydrogène, qu'il renferme toujours quand il n'a pas été soumis, lors de sa formation, à une température assez élevée, et en outre, à l'eau que le charbon absorbe par son contact avec l'air, et qui se décompose à une haute température.

82. Mais si le corps combustible est susceptible de se réduire en vapeur à une température inférieure à celle qui se développe dans la combustion, la combustion aura lieu sur la vapeur elle-même. Le lieu de la combustion sera un espace situé au-dessus du combustible, car toutes ces vapeurs, à la température élevée à laquelle elles se trouvent, sont plus légères que l'air. Cet espace lumineux aura une forme qui dépendra à la fois de la forme et de la vitesse du courant de vapeur et du courant d'air. Si le corps combustible, au lieu de se réduire en vapeurs, se décompose et dégage des gaz combustibles, comme, par exemple, le bois, la houille, les huiles, ces gaz en brûlant donneront lieu au même phénomène.

83. Le lieu de la combustion d'un gaz est l'enveloppe de la flamme. Il est facile de reconnaître par l'expérience, que c'est réellement la combustion des gaz qui se dégagent des corps combustibles qui la produit. En effet, si on éteint une chandelle de manière que la mèche conserve encore quelques points en ignition, il se dégage un filet de fumée épaisse et très-odorante; si on approche un corps enflammé de cette fumée, elle s'enflamme, et la combustion se propage rapidement de haut en bas jusqu'à la mèche, la flamme de la chandelle redevient ce qu'elle était d'abord, et la fumée cesse. On peut même brûler cette fumée à une

certaine distance de la mèche, et empêcher la combustion de se propager jusqu'à elle; pour cela, il suffit de placer une toile métallique un peu au-dessus de la mèche, et d'enflammer le gaz qui passe à travers; la toile métallique intercepte la flamme, et on obtient ainsi une flamme et de la fumée au-dessous. Mais pour produire cet effet, il faut que le tissu soit d'autant plus serré que le gaz dont on veut arrêter la flamme est plus combustible. Cette propriété singulière des toiles métalliques a été attribuée par Davy au refroidissement qu'elles produisent dans la flamme. Mais M. Libri regarde comme beaucoup plus probable qu'elle résulte d'une véritable répulsion qui s'exerce entre les corps échauffés.

84. La flamme n'est lumineuse qu'à sa surface, parce que c'est là seulement que le gaz combustible est en contact avec l'air; c'est d'ailleurs ce dont il est facile de s'assurer en plaçant une toile métallique en travers de la flamme d'une chandelle; le tissu métallique intercepte la flamme, et en regardant au-dessus de la toile, on voit la partie centrale de la flamme complètement noire.

85. La longueur de la flamme est le chemin parcouru par une tranche transversale du gaz, pendant que la combustion se propage de la circonférence au centre de cette tranche. Elle a évidemment d'autant plus d'étendue, que l'air se renouvelle avec moins de vitesse. On peut reconnaître l'influence de la vitesse du courant d'air sur l'étendue de la flamme au moyen d'une lampe à cheminée; si on augmente la longueur de la cheminée avec un cylindre de papier de même diamètre, circonstance qui augmente la vitesse du courant d'air, la hauteur de la flamme diminue; si on diminue la longueur de la cheminée ou si on rétrécit son ouverture, circonstances qui diminuent la vitesse du courant, la flamme s'allonge. Il résulte de là une conséquence très-importante dans les arts: on peut, à volonté, allonger ou raccourcir la flamme d'un foyer, en diminuant ou en augmentant le tirage.

86. Lorsque des gaz combustibles partent d'une très-grande surface d'un corps en ignition, ils ne peuvent jamais brûler complètement, du moins quand on n'emploie pas un moyen quelconque pour augmenter la vitesse du courant d'air, parce que la partie centrale de la colonne de gaz se trouve à une température trop basse lorsqu'elle arrive à la distance à laquelle elle est en contact avec l'air. C'est pourquoi, jusqu'à la découverte d'Argant, on ne pouvait employer dans



les lampes que des mèches d'un très-petit diamètre, et par suite qu'on ne pouvait obtenir que des foyers de faible intensité. Mais avec l'emploi des becs annulaires, simples ou multiples, à cheminées, dans lesquels l'air est appelé à l'intérieur et à l'extérieur de la mèche et où la vitesse du courant se trouve accélérée par le tirage de la cheminée, on est parvenu à obtenir des foyers d'une intensité quelconque, une combustion sans fumée et un effet utile des huiles beaucoup plus grand que dans les anciens appareils.

87. La flamme se dirige naturellement verticalement de bas en haut, à cause de la haute température des gaz, avant, pendant et après la combustion; mais cette direction est modifiée par celle du courant d'air; la flamme peut être inclinée d'une manière quelconque à l'horizon; elle peut être rendue horizontale, et même dirigée de haut en bas.

88. La combustion des corps gazeux produit une température beaucoup plus élevée que celle des corps solides; c'est ce que l'on peut déduire de la couleur et de l'éclat de la flamme, éclat que l'on ne peut produire sur les corps solides que par une combustion alimentée par un courant d'air forcé, ou par l'oxygène pur. On peut d'ailleurs s'assurer directement de ce fait en plongeant dans la flamme des corps solides d'une petite dimension; ils prennent un éclat qui ne peut être produit que par une température extrêmement élevée.

89. Les gaz, pour s'enflammer, exigent une température plus ou moins élevée, suivant leur nature. Il en est qui s'enflamment dans l'air à la température ordinaire: tel est le gaz anciennement connu sous le nom d'hydrogène perphosphoré. D'autres exigent une température plus élevée que le rouge-cerise: tels sont la plupart des gaz et des vapeurs produites par les combustibles employés dans le chauffage et l'éclairage: tout le monde sait en effet qu'un corps au rouge-cerise ne peut pas allumer la fumée d'une lampe, d'une chandelle, du bois, etc.

90. Quand la combustion est complète, la quantité de chaleur dégagée, comme nous le verrons plus tard, est toujours la même pour la même quantité du même combustible, quelles que soient les circonstances de la combustion; elle est la même quand la combustion s'effectue avec de l'air, sous une pression plus grande ou plus petite que celle de l'atmosphère, quand l'oxygène est en quantité plus ou moins grande dans l'air, et même quand la combustion a lieu dans l'oxygène

pur. Mais elle varie d'un combustible à un autre. La lumière, au contraire, pour le même combustible et la même consommation dans le même temps, varie avec les circonstances qui accompagnent la combustion et surtout avec la vitesse du courant d'air.

91. Pour que la flamme d'un même gaz combustible soit la plus brillante possible, il faut que sa température soit très-élevée, et par conséquent que le courant d'air qui alimente la combustion soit très-rapide; mais à mesure qu'elle augmente d'éclat elle perd en étendue, et comme cette diminution est plus grande que l'augmentation d'éclat de chaque point, sa faculté éclairante diminue. Il y a dans chaque cas particulier une vitesse du courant d'air qui donne le maximum de pouvoir lumineux; c'est celle qui amène sur la flamme une quantité d'air seulement suffisante pour effectuer complètement la combustion.

92. Pour qu'une flamme soit très-brillante, il faut qu'elle renferme des matières solides d'une manière quelconque; il faut, ou qu'il y ait des corps solides en permanence, ou que le gaz, avant de brûler, en dépose, ou enfin que le produit de la combustion soit solide. Toutes les combustions de gaz qui ne satisfont pas à l'une ou à l'autre de ces conditions, ont lieu avec une faible lumière. Ainsi, la combustion de l'hydrogène pur ou du soufre donne une flamme peu brillante, parce que le produit de la combustion de l'hydrogène est de la vapeur d'eau, et que celle du soufre est de l'acide sulfureux gazeux. Mais les flammes du phosphore, de l'arsenic, de l'hydrogène carboné, ont un grand éclat; parce que la combustion des deux premiers produit des corps solides, et que celle de l'hydrogène carboné est précédée d'un dépôt de charbon.

La nécessité de la présence des corps solides dans les flammes pour qu'elles soient brillantes, provient de ce que les gaz ne sont lumineux qu'à une température beaucoup plus élevée que les corps solides.

93. Nous n'entrerons pas maintenant dans de plus grands développements sur la combustion; mais en parlant de chacun des combustibles qui sont employés dans les arts, nous étudierons les circonstances particulières que présente leur combustion, ainsi que les produits qu'elle fournit.

§ 2. — DES COMBUSTIBLES EN GÉNÉRAL, ET DES MÉTHODES EMPLOYÉES POUR DÉTERMINER LEUR PUISSANCE CALORIFIQUE ET LEUR POUVOIR RAYONNANT.

94. Les combustibles sont très-nombreux, car cette grande classe de corps renferme, non-seulement tous les corps simples, mais encore un grand nombre de corps composés. Cependant ceux qui sont en usage dans les arts pour produire de la chaleur sont très-peu nombreux, parce que pour être employés ils doivent satisfaire à plusieurs conditions importantes, qui en excluent un grand nombre.

95. 1° Ils doivent être facilement brûlés dans l'air atmosphérique, et la chaleur dégagée par la combustion doit être suffisante pour la maintenir; ou, en d'autres termes, la chaleur dégagée par la combustion doit être supérieure à celle qui est nécessaire pour la produire. Le soufre, le charbon, l'hydrogène, le phosphore, satisfont à cette condition; mais, le fer, le plomb, quoique très-combustibles, n'y satisfont point, car, lorsque ces métaux sont en ignition, si on les enlève du foyer où il a été nécessaire de les placer, la combustion s'arrête. Il est probable que cet effet est dû à ce que le corps brûlé qui se forme, étant solide, forme autour du métal une croûte qui le soustrait au contact de l'air; cette raison devient plus vraisemblable encore, lorsqu'on considère que dans l'oxygène pur, où la combustion du fer se soutient, la température est assez élevée pour fondre et faire couler l'oxyde de fer à mesure qu'il se forme. Quoi qu'il en soit, il y a des corps très-combustibles dans lesquels la combustion ne se propage pas d'elle-même dans les circonstances ordinaires, et ceux-là ne peuvent être d'aucune utilité pour produire dans les arts de la chaleur ou de la lumière. 2° Ils doivent être abondants, et leurs prix ne doivent point être trop élevés. 3° Enfin, les produits de la combustion doivent être de nature à ne point altérer les corps qui reçoivent l'action de la chaleur, et à ne pas porter dans l'air des gaz ou des vapeurs qui pourraient avoir une action nuisible sur l'économie animale ou végétale.

96. Le carbone et l'hydrogène sont les seuls corps simples qui remplissent ces différentes conditions; aussi les seules matières combustibles en usage sont celles dont ces deux corps forment les principaux éléments.

97. Les combustibles généralement employés sont :

- Le bois,
- Le charbon de bois,
- La tannée,
- La tourbe,
- Le charbon de tourbe,
- La houille,
- Le coke.

98. Nous désignerons désormais sous le nom de *puissance calorifique* d'un combustible, la quantité d'unités de chaleur (57) qu'un kilogramme de ce corps développe par sa combustion; nous avons déjà dit (90) que pour le même combustible, cette quantité est constante, quelles que soient les circonstances de la combustion.

99. Dans certains cas, la nature du combustible qui peut être employé se trouve fixée par certaines conditions à remplir; d'autres fois, on n'en a qu'un seul à sa disposition. Mais, le plus souvent, on peut en employer plusieurs. Dans tous les cas, il est important de connaître leurs puissances calorifiques, pour déterminer la quantité qu'on doit en employer pour produire l'effet demandé et pour calculer les dimensions des appareils; et dans le cas général où l'on peut employer plusieurs espèces de combustibles, c'est la connaissance de leurs puissances calorifiques qui, combinée avec leur prix, sert à déterminer celui qui est réellement à meilleur marché.

100. *Méthodes employées pour déterminer la puissance calorifique des combustibles.* Rumfort est le premier physicien qui se soit occupé de la détermination de la puissance calorifique des combustibles; l'appareil dont il s'est servi et qui porte encore le nom de calorimètre de Rumfort, consiste en une caisse de cuivre rouge de peu de hauteur, au fond de laquelle circule un tuyau qui, par une extrémité, communique avec un entonnoir renversé placé au-dessous de la caisse, et par l'autre, avec un tuyau vertical qui s'élève à une certaine hauteur. Pour se servir de cet appareil, on remplit la caisse d'eau à une certaine température, et on fait passer dans le serpentin la fumée du combustible que l'on brûle sous l'entonnoir; alors, connaissant le poids du combustible brûlé, le poids de l'eau renfermée dans la caisse, son accroissement de température, et le poids de la caisse, on peut en dé-



duire la quantité de chaleur développée par un poids donné du combustible. Supposons, par exemple, que la quantité de combustible consommé soit de 10 grammes, le poids de l'eau de 10 kilogrammes, celui de la caisse de 1 kilogramme, et enfin l'élévation de température de 5°. Comme la chaleur spécifique du cuivre est 0,0949, la quantité de chaleur absorbée par la caisse sera égale à celle qui aurait été prise par un même poids d'eau multiplié par 0,0949; ainsi la chaleur dégagée a élevé de 5 degrés un poids d'eau égal à $10^k + 1 \times 0,0949 = 10,0949$, et pourrait élever d'un degré $10,0949 \times 5 = 50,4745$ kilogrammes d'eau, et par conséquent la puissance calorifique du combustible serait égale à $50,47 \times \frac{1000}{10} = 5047$.

101. L'emploi du calorimètre de Rumfort, indépendamment de la correction relative à la masse de l'appareil et au refroidissement pendant l'opération, exigerait encore deux autres corrections : l'une relative à la quantité de chaleur entraînée par les gaz qui sortent du serpentin; l'autre à celle qui est perdue par le rayonnement du combustible, au-dessous de l'entonnoir sous lequel la combustion a lieu. Ces deux corrections sont importantes, et je ne pense pas qu'elles aient été faites, car la première exige, non-seulement la connaissance de la température de l'air à sa sortie, mais encore celle de la vitesse du courant, qui est assez difficile à déterminer; et pour effectuer la seconde, il faut connaître la quantité de chaleur que rayonnent les différents combustibles, et mesurer l'étendue du cône qui laisse dissiper le rayonnement. D'après cela, on peut considérer l'emploi du calorimètre de Rumfort, comme donnant des résultats trop faibles.

102. Laplace et Lavoisier ont fait aussi un grand nombre d'expériences au moyen du calorimètre qui porte le nom de ces deux hommes célèbres; la chambre intérieure était occupée par un serpentin qui communiquait d'un côté avec un entonnoir, sous lequel on brûlait le combustible, et de l'autre, avec un tube vertical qui servait de cheminée. Mais ce mode d'expérience est sujet à beaucoup d'erreurs. Hassenfratz a fait aussi quelques expériences avec le même appareil, et les résultats qu'il a obtenus attestent, par leur grande irrégularité, les vices de cette manière d'opérer.

103. Depuis, M. Despretz a fait sur quelques corps des expériences

plus exactes que celles qui avaient été faites avant lui. Il s'est servi du calorimètre de Rumfort, mais modifié de manière à éviter la perte de chaleur par le rayonnement du combustible, et assez grand pour que la température de l'eau, à la fin de la combustion, excédât seulement de 2° celle de l'air; par ce moyen on pouvait négliger la chaleur perdue par le refroidissement du vase pendant l'opération et la quantité de chaleur entraînée par l'air en sortant de l'appareil.

104. Marcus Bull a fait, en Amérique, il y a quelques années, de nombreuses expériences pour déterminer les rapports des puissances calorifiques des différents combustibles. Le bulletin de la Société d'encouragement, de 1827, renferme un extrait de son mémoire. Voici le procédé qu'il a employé. Son appareil consistait en une chambre en bois construite dans une chambre d'une maison d'habitation, de manière que toutes les faces de ces chambres fussent à la même distance; après avoir établi par la combustion dans un poêle d'une certaine quantité de charbon de bois une différence de 10° entre la température de l'air intérieur et celle de l'air extérieur de la petite chambre, il a déterminé le temps pendant lequel cette même différence était maintenue par la combustion d'un poids donné de différents combustibles. Cette méthode est bien compliquée, et renferme bien des causes d'erreurs; nous donnerons cependant les résultats obtenus, lorsque nous parlerons des différentes classes de combustibles.

105. Enfin, on a trouvé dans les papiers de M. Dulong, les résultats d'un grand nombre d'expériences sur la puissance calorifique d'un certain nombre de corps. Ces nombres ont été obtenus au moyen d'un appareil analogue à celui de Rumfort, décrit dans les comptes rendus des séances de l'Institut, tom. 7, par M. Gamard, ancien élève de l'école polytechnique; mais on ne connaît pas les détails des expériences.

106. Pour déterminer avec beaucoup plus de précision la puissance calorifique des combustibles, il faudrait employer un appareil analogue à celui de Rumfort, mais beaucoup plus grand, qui contiendrait, par exemple, plusieurs mètres cubes d'eau, et qui renfermerait un foyer disposé comme celui des chaudières à vapeur; on estimerait la puissance calorifique par le poids de l'eau évaporée, en corrigeant le résultat obtenu du refroidissement de l'enveloppe, et de la température de l'air brûlé à sa sortie. Cette méthode serait bien préférable à celles qui ont été em-

ployées, parce qu'on pourrait prolonger les expériences autant qu'on le voudrait, que le foyer étant intérieur il n'y aurait point de perte de chaleur par le rayonnement, et enfin parce qu'on pourrait opérer sur tous les combustibles employés dans les arts, même sur ceux qui ne brûlent qu'en grande masse. Mais nous verrons que ces expériences coûteuses ne sont pas nécessaires, et que la puissance calorifique des combustibles peut se déduire de leur composition, quand on connaît celle du carbone et celle de l'hydrogène.

107. *Chaleur rayonnée.* Lorsqu'un corps est en combustion, la chaleur se dissipe de deux manières différentes : 1° par le courant d'air qui se forme naturellement, soit que la combustion ait lieu dans l'air libre, soit qu'elle s'effectue dans un appareil fermé; 2° par le rayonnement.

Le courant d'air provient de la légèreté spécifique qu'acquiert l'air qui alimente la combustion. L'air en contact avec le corps incandescent s'échauffe, se dilate, devient spécifiquement plus léger que l'air environnant, et par conséquent doit s'élever; il est remplacé par de l'air neuf qui, après avoir alimenté la combustion, s'être échauffé, s'élève à son tour : ainsi la combustion détermine elle-même le courant d'air nécessaire à son alimentation. Quant à la seconde cause de déperdition de la chaleur développée par la combustion, elle est fondée sur une propriété générale de tous les corps échauffés.

Jusqu'ici, on a complètement négligé le rayonnement des corps combustibles, parce qu'on le regardait comme très-faible. Pour faire voir qu'en effet ce rayonnement ne dissipe qu'une très-petite quantité de chaleur, on a comparé la chaleur que l'on éprouve en approchant la main latéralement et verticalement de la flamme d'une chandelle; latéralement, on ne reçoit que la chaleur rayonnante; verticalement, que celle du courant d'air chaud; or comme, à des distances égales, la différence de température est énorme, on en a conclu que la dispersion de la chaleur par rayonnement est très-petite, du moins par rapport à celle qui est entraînée par l'air.

Cette expérience, qui paraît décisive au premier abord, ne peut pas conduire cependant à la conséquence qui est généralement admise. En effet, le courant d'air chaud ne se dégage que dans une seule direction, et son diamètre excède peu celui de la flamme, tandis que le rayonne-

ment a lieu dans tous les sens. Ainsi, pour avoir le rapport des quantités de chaleur dissipées par le courant d'air et par le rayonnement, il ne suffit pas de comparer la température du courant à celle qui est produite par le rayonnement à la même distance de la flamme, il faudrait multiplier cette dernière par le rapport de l'étendue de la sphère à celle du secteur intercepté par le courant d'air; il faudrait de plus, avoir égard à un grand nombre d'autres considérations, telles que la vitesse du courant, la capacité calorifique de l'air, etc. On voit d'après cela, que l'expérience dont il s'agit ne prouve rien pour le rayonnement de la flamme, et encore beaucoup moins pour celui des combustibles qui brûlent sans flamme.

108. Il était important de déterminer la quantité relative de chaleur qui se dissipe par le rayonnement, car c'est la chaleur rayonnante qui est seule utilisée dans nos cheminées domestiques, et il était bon de s'assurer si, comme plusieurs auteurs l'ont annoncé, on ne profite ainsi que de quelques centièmes de la chaleur dégagée par le combustible.

J'ai fait à ce sujet un grand nombre d'expériences sur le bois, le charbon de bois, la tourbe, le charbon de tourbe et les houilles, et je suis parvenu à des résultats fort opposés à ce qu'on croyait généralement. Les résultats seront rapportés, quand nous examinerons les différents combustibles en particulier; je décrirai seulement ici l'instrument que j'ai employé et la méthode d'observation.

L'appareil dont je me suis servi consiste (pl. I, fig. 1) en une caisse annulaire en fer-blanc $ABCD$ $abcd$; l'espace compris entre les deux cylindres concentriques $ABCD$ et $abcd$ est fermé à la partie inférieure et à la partie supérieure; la paroi supérieure renferme deux tubulures m et n , destinées à recevoir deux thermomètres à longs réservoirs, dont les tiges passent à travers le bouchon de liège qui les ferme. Au centre du cylindre intérieur, qui est complètement ouvert par les deux extrémités, est suspendu un hémisphère en fil de fer, destiné à recevoir le combustible; l'intérieur du cylindre $abcd$ est recouvert d'une couche mince de noir de fumée, et l'appareil est supporté par trois pieds.

Pour faire usage de cet appareil, on commence par remplir d'eau l'intervalle des deux cylindres; on place les thermomètres, et on introduit dans la grille M une quantité déterminée de combustible en ignition; une partie de la chaleur rayonnante est reçue par la paroi $abcd$ du vase,

et passe dans l'eau. Lorsque la combustion est terminée, on observe, à l'aide des thermomètres, la température du liquide; alors, connaissant le poids de l'eau, celui de l'enveloppe métallique, on peut facilement calculer la quantité de chaleur rayonnante absorbée. Mais pour en déduire la quantité totale de chaleur rayonnante émise par le combustible, il faut évidemment déterminer le rapport entre la surface totale de la sphère, et celle du secteur annulaire circonscrit au cylindre *abcd*, car le vase n'a réellement absorbé que les rayons compris entre les droites qui joignent le centre de la sphère *M* avec tous les points des circonférences supérieure et inférieure du cylindre intérieur, et tous les rayons dirigés sur les calottes sphériques *ad* et *bc* ont échappé.

Ce dernier rapport est facile à déterminer. En effet, on sait que la portion de la surface de la sphère engendrée par un arc, est proportionnelle à sa projection sur l'axe de rotation; par conséquent la surface absorbante est à la surface totale de la sphère comme *gh* est à *ef* (fig. 2, pl. 1^{re}).

Dans l'appareil dont je me suis servi $ad = 0^m,20$, $ab = 0^m,30$, d'où l'on déduit :

$$ef = 2Me = 2Ma = 2\sqrt{Mg^2 + ag^2} = 2\sqrt{(0,15)^2 + (0,10)^2} = 0,36; \text{ et } ab = 0,30.$$

Ainsi le rayonnement total est à celui qui est absorbé :: 36 : 30 ou :: 12 : 10. D'où il suit qu'il faudra multiplier la quantité de chaleur obtenue par $\frac{6}{5} = 1,20$, pour avoir la quantité totale de chaleur émise par rayonnement.

Il est évident que, pour éviter la perte de chaleur par les parois du vase, il faut employer le procédé de Rumfort, et placer dans le vase de l'eau dont la température soit au-dessous de celle de l'air atmosphérique, d'une quantité égale à celle dont elle sera élevée au-dessus à la fin de l'expérience.

109. Pour faire les expériences sur des combustibles liquides, tels que les huiles, j'ai employé l'appareil de combustion (pl. 1, fig. 3). Cet appareil est formé d'un réservoir à niveau constant, placé en dehors de l'appareil, qui alimente sept becs disposés circulairement sur un petit tuyau annulaire.

§ 3. DES BOIS.

110. Les bois sont formés, 1° d'une matière désignée par M. Payen sous le nom de *cellulose*, qui constitue la charpente solide de toutes les plantes; cette substance, qui a toujours la même composition chimique, est formée de 0,444 de carbone et de 0,556 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau; 2° d'une matière incrustante dont la composition est variable, suivant la nature des bois, mais qui est plus riche en carbone et qui renferme un petit excès d'hydrogène. Les bois de chauffage ordinaires parfaitement secs renferment rarement plus de 0,02 de matières étrangères.

111. La densité des bois est extrêmement variable, comme on peut le voir d'après le tableau suivant, dû à Brisson :

Grenadier.	1,35	Cerisier.	0,75
Gaïac, ébène.	1,33	Oranger.	0,70
Buis de Hollande	1,32	Coignassier	0,70
Chêne de 60 ans (le cœur).	1,17	Orme (le tronc).	0,67
Néflier.	0,94	Noyer de France.	0,67
Olivier.	0,94	Poirier.	0,66
Buis de France.	0,91	Cyprès d'Espagne.	0,64
Mûrier d'Espagne.	0,89	Tilleul.	0,60
Hêtre.	0,85	Coudrier ou noisetier.	0,60
Frêne (le tronc).	0,84	Saule.	0,58
Aune.	0,80	Thuya.	0,56
If d'Espagne.	0,80	Sapin mâle.	0,55
Pommier.	0,79	Sapin femelle	0,49
If de Hollande.	0,78	Peuplier	0,38
Prunier.	0,78	Peuplier blanc d'Espagne.	0,32
Érable.	0,75	Liège.	0,24

112. Le temps le plus favorable pour la coupe des bois est l'hiver; les bois coupés doivent rester sur place pendant l'été suivant, et ce n'est qu'en automne qu'ils peuvent être livrés à la consommation.

113. Lorsqu'un bois parfaitement sec est exposé dans une chambre où l'on ne fait pas de feu, en douze mois il absorbe une quantité d'eau équivalente à un dixième de son poids. Marcus-Bull, à qui l'on doit ce



résultat, a fait des expériences sur quarante-six espèces de bois: toutes ont donné le même résultat. Par un temps plus sec, l'absorption ne s'est élevée qu'à 8 pour cent. D'après cela, la quantité d'humidité que peuvent absorber les bois secs est entièrement indépendante de leur nature et de leur densité.

Les bois verts renferment des quantités d'eau assez inégales. D'après des expériences faites par Marcus-Bull, sur 100 parties de bois vert, par la dessiccation, le noyer perd 37,5; le chêne blanc, 41; l'érable, 48. Ainsi, il paraît que les bois renferment d'autant plus d'eau, qu'ils ont une plus faible densité. On peut estimer, terme moyen, à 42 pour 100 la quantité d'eau que renferment les bois verts, à 30 ou 35 celle que renferment les bois de 4 à 5 mois de coupe, qui sont employés au charbonnage dans les forêts, et seulement à 20 ou 25 celle que renferment les bois de chauffage ordinaires qui ont été exposés à l'air pendant 8 à 12 mois.

Une analyse directe des bois de charbonnage a donné les résultats suivants :

Eau hygrométrique.	0,275
Carbone.	0,375
Oxygène et hydrogène... ..	0,338
Cendres.....	0,012

114. Sous le rapport de leur emploi comme combustibles, on divise les bois en deux classes. La première comprend les bois durs et compactes, ceux dont la pesanteur spécifique est la plus considérable; tels sont le chêne, le hêtre, l'orme et le frêne, etc. La seconde renferme les bois blancs, mous, légers; tels sont le pin, le sapin, le bouleau, le tremble et le peuplier, etc.

En France, on divise les bois de chauffage en bois neufs, bois flottés, et bois pelards. Le bois neuf est celui qui a été transporté au lieu de la consommation en voiture ou en bateau, le bois flotté celui qui a été transporté en trains flottants; enfin, le bois pelard n'est autre que le bois de chêne écorcé.

115. Les bois humides, sous le même poids, donnent beaucoup moins de chaleur que ceux qui sont secs, 1° parce que l'eau, n'étant point combustible, ne peut point développer de chaleur; 2° parce que



ce liquide en absorbe une grande quantité pour se réduire en vapeur. C'est le comte de Rumfort qui, le premier, a appelé l'attention sur le mauvais usage des bois humides.

Il est tellement avantageux d'employer des bois secs, que dans plusieurs espèces d'usines on ne se contente pas de n'admettre que des bois aussi secs qu'ils peuvent l'être naturellement par la dessiccation à l'air, on les fait encore sécher dans des étuves. Telles sont les verreries de verre fin et les fabriques de porcelaine. On emploie alors du bois pour produire la chaleur nécessaire à la dessiccation; mais il serait beaucoup plus avantageux d'utiliser, pour cet objet, une partie de la chaleur perdue dans les fours. Nous parlerons plus tard de la disposition qu'il faudrait employer.

D'après M. Héron de Villefosse, la production annuelle de la France, en bois de chauffage, est de 9,804,928 cordes, chacune de 2 stères $\frac{3}{4}$, qui représentent une valeur de 84,163,646 fr. Cette production représente à peu près 70,000,000 d'hectolitres ras de houille.

116. *Produits de la combustion.* Les produits de la combustion complète du bois sont uniquement formés de vapeur d'eau et d'acide carbonique. Mais quand la combustion n'est pas complète, il se dégage de la fumée qui est principalement formée d'eau, d'acide acétique, d'huile essentielle empyreumatique, et d'une matière analogue au goudron. C'est à l'acide acétique qu'est due l'excitation de la fumée sur les yeux.

L'acide carbonique est un gaz incolore, inodore, beaucoup plus lourd que l'air, incombustible et impropre à alimenter la combustion. Pendant la combustion, il s'élève dans l'atmosphère par la haute température qu'il possède.

117. Le tableau suivant, extrait d'un mémoire de M. Berthier (*Annales de Chimie*, tome 32), indique les quantités de cendres produites par différents bois.

Quantités de cendres produites par différents bois et combustibles végétaux.

Chêne.....	0,025	Sureau à grappe.....	0,0164
Écorce de chêne.....	0,0600	Arbre de Judée.....	0,0170
Tilleul.....	0,0500	Noisetier.....	0,0157
Sainte-Lucie.....	0,0160	Mûrier blanc.....	0,0160

BOIS.

Bouleau	0,0100	Paille de froment	0,0440
Faux ébénier	0,0125	Fanes de pomme de terre	0,1500
Sapin	0,0083		



D'après M. de Saussure.

De jeunes branches de chêne écorcées produisent	0,004	de cendres
Leur écorce	0,060	
Un tronc de chêne	0,002	
Son écorce	0,060	

Nous remarquerons cependant, que les quantités de cendres données par un même bois varient suivant la nature du terrain, l'exposition, l'âge, et même suivant les différentes parties d'un même individu. En général, les plantes ligneuses en donnent moins que les plantes herbacées; les feuilles toujours vertes, moins que celles des arbres qui se dépouillent en hiver; le tronc de l'arbre en donne moins que les branches, les branches moins que les feuilles et l'écorce, et le cœur du bois moins que l'aubier.

118. *Puissance calorifique.* La cellulose et la matière incrustante se trouvant dans des proportions variables dans les différentes espèces de bois, il en résulte que tous les bois au même degré de dessiccation ne doivent pas produire exactement la même quantité de chaleur. Mais comme la différence de composition des bois de chauffage ordinaires est peu considérable, on peut regarder leurs puissances calorifiques comme étant sensiblement les mêmes. C'est ce qui résulte d'ailleurs des expériences directes faites par M. Berthier.

119. Rumfort, après lui Hassenfratz, et récemment Marcus-Bull, se sont beaucoup occupés de la détermination des quantités de chaleur qui résultent de la combustion des différentes espèces de bois. Rumfort s'est servi de l'appareil qui porte son nom, Hassenfratz du calorimètre à glace, et Marcus-Bull de l'appareil que nous avons décrit (104). Tous ont fait leurs expériences sur des poids égaux de bois à l'état ordinaire de dessiccation ou préalablement desséché.

Voici les principaux résultats obtenus par Rumfort: nous avons transformé les quantités de glace fondues en unités de chaleur.



Table de la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un kilogramme de différentes espèces de bois.

ESPÈCES.	ÉTAT DANS LEQUEL ILS ONT ÉTÉ ESSAYÉS.	NOMBRE D'UNITÉS DE CHALEUR DÉVELOPPÉES.
Tilleul.	bois sec de menuisier, de 4 ans.	3460
<i>Idem.</i>	bois fortement desséché dans un poêle.	3960
Hêtre.	bois sec de menuisier, de 4 ans.	3375
<i>Idem.</i>	bois fortement desséché dans un poêle.	3630
Orme.	bois sec de menuisier, de 4 à 5 ans.	3037
<i>Idem.</i>	bois fortement séché dans un poêle.	3450
Chêne.	bois à brûler ordinaire en copeaux moyens.	2550
<i>Idem.</i>	en copeaux minces bien séchés à l'air.	2925
Frêne.	de menuiserie ordinaire sec.	3075
<i>Idem.</i>	fortement séché dans un poêle.	3525
Érable.	bois de la saison, fortement séché sur un poêle.	3600
Cormier.	bois desséché sur un poêle.	3600
Merisier.	bois sec de menuisier.	3375
<i>Idem.</i>	bois séché sur un poêle.	3675
Sapin.	bois sec de menuisier, ordinaire.	3037
<i>Idem.</i>	en copeaux bien séchés à l'air.	3375
<i>Idem.</i>	bois fortement desséché sur un poêle.	3750
Peuplier.	bois sec de menuiserie, ordinaire.	3460
<i>Idem.</i>	fortement desséché dans un poêle.	3712
Charme.	bois sec de menuisier.	3187
Chêne.	sec.	3300

120. En prenant les expériences faites sur les bois préalablement desséchés, on trouve, pour la puissance calorifique moyenne, le nombre 3654; le bois de chêne à brûler ordinaire a donné 2550. Toutes les autres expériences faites sur des bois désignés sous le nom de bois secs, mais qui n'avaient pas été desséchés artificiellement, et qui renfermaient nécessairement des quantités variables d'eau, ont donné des résultats qui ne peuvent conduire à rien de positif. Il est bon de remarquer qu'en partant du nombre 3654, pour le bois sec, celui qui correspondrait au bois renfermant 25 pour cent d'eau serait 2740.

121. Hassenfratz a essayé 28 espèces de bois, au moyen du calori-

mètre à glace : les résultats extrêmes qu'il a obtenus sont, qu'un kilogramme de bois peut fondre de 32 à 49 kilogrammes de glace; et comme un kilogramme de glace, en fondant, absorbe 75 unités de chaleur, les limites extrêmes de la chaleur dégagée sont $32 \times 75 = 2400$; et $49 \times 75 = 3675$, nombres qui se rapprochent beaucoup de ceux obtenus par Rumfort pour les bois secs et pour ceux qui se trouvent à l'état ordinaire de dessiccation.

122. Marcus-Bull a fait un grand nombre d'expériences, pour déterminer les quantités relatives de chaleur dégagée par différentes espèces de bois, au moyen de l'appareil que nous avons décrit (104). Le mode d'opération consistait, comme nous l'avons dit, à établir entre la température de l'air de la chambre intérieure et celle de l'air de la chambre extérieure une différence constante que l'on maintenait en brûlant un combustible donné dans la chambre intérieure. L'activité de la combustion, que l'on pouvait régler à volonté, était d'autant plus grande, que le combustible développait moins de chaleur. En employant des quantités égales des divers combustibles, il est évident que leurs pouvoirs calorifiques étaient proportionnels aux temps pendant lesquels la différence constante de température était maintenue. Cette méthode, qui ne donne que les valeurs relatives des puissances calorifiques des combustibles, renferme trop de causes d'erreur pour qu'on puisse compter sur les résultats qui ont été obtenus.

Il résulte des expériences de M. Marcus-Bull, que les bois également secs ne donnent pas rigoureusement la même quantité de chaleur, car elle a varié de 6 à 6,4. Mais ces variations doivent être attribuées aux erreurs inévitables dans des expériences si compliquées.

123. Nous rapporterons encore deux expériences faites sur une grande échelle, l'une aux bains Vigier du pont Marie, l'autre à Vesserling, qui confirment les résultats précédents. Ces expériences n'ont pas eu pour objet la détermination de la puissance calorifique du bois, mais elles y conduisent.

124. Dans l'établissement de bains du pont Marie, l'appareil de chauffage est disposé de telle manière, que la fumée s'échappe à une température peu différente de celle de l'air. Dans un essai fait avec beaucoup de soin, on a brûlé, à très-peu près, 200^k de bois pelard en 2 heures : l'effet produit a été équivalent à l'échauffement de 7180^k d'eau de 85°. Ainsi, on a recueilli $7180 \times 85 = 610306$ unités de chaleur, ce qui donne,



pour chaque kilogramme, environ 3000, et $3000 \times \frac{5}{4} = 3750$ pour le bois parfaitement sec, car celui qui a été employé ne renfermait pas au delà de 20 pour cent d'eau.

125. A Vesserling, dans une chaudière à vapeur chauffée au bois, on a obtenu, pour la moyenne de plusieurs jours d'expérience, 3^k,24 de vapeur par kilogramme de bois; la fumée, à son entrée dans la cheminée, était à 250°, et elle conservait encore 10 pour cent d'oxygène; par conséquent, la moitié seulement de l'oxygène de l'air avait été employée à la combustion. D'après cela, la puissance calorifique du bois se compose : 1° de la quantité de chaleur renfermée dans la vapeur produite, qui est égale à $3,24 \times 650 = 2106$; 2° de la quantité de chaleur entraînée par la fumée; or, comme le poids de l'air nécessaire pour brûler 1^k de bois est de 4^k,47, et de 8,94, en supposant que la moitié de l'air ait échappé à la combustion; et comme la capacité calorifique de l'air est le quart de celle de l'eau, la quantité de chaleur entraînée par la fumée a été de $8,94 \times 250 \times \frac{1}{4} = 557$; 3° de la quantité de chaleur absorbée par la vaporisation de l'eau renfermée dans le bois, qui est égale à $\frac{650}{4} = 162$. Ainsi, la puissance calorifique du bois, déduite de cette expérience, serait de $2106 + 557 + 162 = 2825$; celle du bois complètement desséché serait de $2825 \times \frac{4}{3} = 3766$.

126. Il résulte de ce qui précède, que la quantité de chaleur dégagée par 1^k de bois parfaitement sec est :

D'après Rumfort, de.....	3654
D'après Hassenfratz, de.....	3675
D'après l'expérience faite aux bains Vigier...	3750
D'après l'expérience faite à Wesserling, de...	3766
Moyenne.....	3711

127. Ces nombres diffèrent peu les uns des autres, et sont très-voisins de celui qu'on obtiendrait en supposant que la chaleur développée par la combustion du bois résultât seulement de celle du carbone qu'il contient. En effet, les bois ordinaires de chauffage parfaitement secs contiennent à peu près 0,52 de carbone; et pour les bois secs qui donnent 0,02 de cendres, la quantité de carbone serait seulement de $0,52 \times 0,98 = 0,51$. Or, d'après les expériences de M. Dulong, que nous rapporterons plus loin, la puissance calorifique de carbone est 7161; par conséquent celle

du bois serait de $7161 \times 0,51 = 3652$. En prenant pour la puissance calorifique du carbone le nombre 7800, trouvé par M. Despretz, la puissance calorifique du bois sec serait de $7800 \times 0,51 = 3978$.

128. La coïncidence entre la puissance calorifique des bois déduite des expériences directes et celle qui résulte de l'hypothèse que l'oxygène et l'hydrogène n'ont aucune influence sur l'effet produit, quand ils sont dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, a conduit à admettre ce principe général : *La quantité de chaleur développée par un combustible organique est égale à celle qui est produite par la combustion du carbone qu'il contient, augmentée de celle qui résulte de l'hydrogène en excès.*

Il résulte de cette loi un fait très-important, c'est que dans la décomposition de l'eau il y a autant de chaleur absorbée qu'il y en a de dégagée dans sa formation ; c'est d'ailleurs un fait qui résulte de ce que les charbons humides qui brûlent avec flamme produisent autant de chaleur que le charbon sec qu'ils renferment.

129. En résumant tout ce qui précède, nous admettons,

1° Que tous les bois au même état de dessiccation produisent sensiblement la même quantité de chaleur.

2° Que pour les bois parfaitement desséchés artificiellement, la puissance calorifique est de 3600.

3° Que pour les bois dans l'état ordinaire de dessiccation, qui renferment de 20 à 25 pour cent d'eau, la puissance calorifique varie de 2800 à 2700.

Dans l'estimation de la puissance calorifique des bois, on devrait, à la rigueur, déduire la chaleur employée à vaporiser l'eau hygrométrique, chaleur qui n'est pas restituée, du moins quand la fumée s'échappe à plus de cent degrés, et c'est le cas ordinaire ; mais comme le nombre d'unités de chaleur employées à cet effet s'élève seulement de 130 à 160, et que ces chiffres sont inférieurs à celui qui représente la variation d'eau hygrométrique, il est inutile d'y avoir égard.

130. Quant à la puissance calorifique des bois rapportée à leur volume, on ne peut donner aucun nombre un peu précis, attendu que le poids d'un même volume de bois varie non-seulement avec la densité du bois, mais beaucoup plus encore avec la grosseur des bûches, leurs courbures et la manière de les placer pour former les piles.



Les résultats suivants obtenus par M. Berthier, font voir jusqu'à quel point ces variations peuvent s'étendre.

NATURE DES BOIS.	ÉTAT DES BOIS.	POIDS DU MÈTRE CUBE EN KILOGRAMMES.
Chêne de futaies des environs de Moulins.....	coupé depuis 1 an en bûches refendues.....	275 ^k
<i>Idem</i>	coupé en quatre.....	515
Chêne de la forêt de Monadier, près Moulins.....	gros bois coupé depuis 3 ans, refendu.....	386
<i>Idem</i>	coupé en quatre.....	485
Chêne des environs de Cahors.	coupé depuis 1 an.....	525
Chêne de charbonnage.....	même, long de 30 pouces...	220 à 262
Hêtre des environs de Moulins.	en gros rondins refendus...	400
<i>Idem</i>	vermoulu en partie.....	375
Bouleau des environs de Moulins.....	en gros rondins.	440
Tremble de charbonnage....	190 à 220
Sapin de Moulins.	en gros bois.....	300 à 340

On voit d'après cela que dans chaque localité et pour l'espèce de bois qu'on emploie, des expériences directes seront nécessaires pour obtenir avec une suffisante exactitude le poids du bois sous l'unité de mesure.

131. La mesure désignée sous le nom de voie est de 2 mètres cubes ou 2 stères. La longueur des bûches étant d'après l'ordonnance de 1^m,14, la mesure du stère a 0^m,88 de hauteur sur 1 mètre de longueur. A Paris, le poids de la voie des bois de chauffage varie de 700 à 750 kilo. Celui des bois de charbonnage varie de 600 à 700^k.

132. *Effets produits par les différentes espèces de bois.* Quoique les bois à un état de dessiccation parfaite soient tous susceptibles de donner sous le même poids des quantités de chaleur peu différentes, leur structure produit, dans leur mode de combustion, des variétés qui ne les rendent pas tous également propres à tous les genres de travaux.

Les bois compactes ne brûlent qu'à leur surface; la chaleur qui se propage dans l'intérieur en dégage les gaz combustibles qui brûlent en totalité dans les commencements, et il ne reste bientôt qu'un charbon



volumineux, compacte, qui brûle lentement et sans flamme. Les bois légers brûlent avec beaucoup plus de rapidité, parce que leur porosité permet à l'air d'y pénétrer plus facilement et qu'ils se déchirent par l'action de la chaleur; la majeure partie du charbon qu'ils renferment brûle en même temps que les gaz combustibles, et ils ne laissent que peu de charbon; aussi ces bois donnent de la flamme presque pendant toute leur combustion. La différence, entre ces deux espèces de bois, diminue à mesure qu'ils sont en bûches d'une plus petite dimension; la raison en est évidente.

On concevra facilement, d'après ce qui précède, pourquoi, dans les verreries, les fourneaux à porcelaine, et même les fours à poterie commune, où l'on a besoin d'une température très-élevée et d'une flamme longue et continue, on emploie toujours des bois tendres, tandis que pour presque tous les autres usages, où l'on a besoin d'une température beaucoup moins élevée et dans un lieu plus voisin du foyer, les bois durs sont préférés.

Quel que soit d'ailleurs le bois que l'on emploie, l'effet calorifique sera d'autant plus grand que le bois sera plus divisé, parce qu'alors une plus petite quantité d'air échappera à l'action du combustible; en effet, il faut toujours que l'air finisse par s'échapper à une température supérieure à celle de l'atmosphère, et on conçoit facilement que plus la quantité d'air employée à la combustion de la même quantité de matière sera petite, moins il y aura de perte de chaleur par l'air qui s'écoule. Mais, indépendamment des frais qu'occasionnerait la refente du bois, souvent la nature de l'opération ne permet pas d'employer du bois trop menu, parce que la combustion serait trop rapide. Il n'y a qu'un petit nombre d'usines, telles que certaines verreries et les fabriques de porcelaine, où la prompte combustion étant un avantage, puisqu'elle produit toujours une température plus élevée, il soit important d'employer le bois refendu.

133. Pouvoir rayonnant. Relativement à la quantité de chaleur rayonnante que le bois dégage pendant sa combustion, j'ai reconnu qu'elle était variable pour les différents bois, mais que, quand ils étaient brûlés en morceaux très-menus, elle était à peu près constante. Voici le résultat d'une expérience faite sur du bois de hêtre :

La température de l'atmosphère était de 20°; l'eau introduite dans le

vase était à $17^{\circ},5$; par la combustion de $97^{\text{e}},5$ de bois, elle s'est élevée à $22^{\circ},5$; ainsi, la quantité de chaleur absorbée par l'eau avait élevé sa masse de 5° ; la quantité d'eau que renfermait l'appareil était de $11^{\text{k}},29$; le poids de l'enveloppe était de $2^{\text{k}},223$; comme la capacité calorifique du fer-blanc est de $0,11$, la quantité de chaleur absorbée par le vase est égale à celle de $2^{\text{k}},223 \times 0,11 = 0^{\text{k}},244$ d'eau, élevé de 5° ; par conséquent, la quantité de chaleur absorbée par l'appareil $= (11^{\text{k}},291 + 0^{\text{k}},244) 5^{\circ} = 57,65$ unités de chaleur.

Or, d'après ce que nous avons dit (108), la quantité totale de rayonnement $= 57,65 \times 1,36 = 78,40$ unités. Mais d'après l'art. 129, 1000 grammes de bois doivent donner, en brûlant, 2800 unités de chaleur, qui se dissipent et par le courant d'air et par le rayonnement; par conséquent $97^{\text{e}},5$ ont dû en produire 273. Ainsi, la quantité de chaleur dispersée par le rayonnement est à la chaleur totale développée $:: 78,40 : 273 :: 1 : 3,48$, ou par approximation $:: 1 : 3,5$; la quantité de chaleur rayonnante est par conséquent à celle qui est entraînée par le courant d'air $:: 1 : 3,5 - 1 :: 1 : 2,5$.

Ce rapport est beaucoup plus considérable qu'on ne l'avait cru jusqu'ici; mais il est encore beaucoup plus grand lorsque le bois est brûlé en grandes masses, de manière à donner naissance à des charbons volumineux, parce que le pouvoir rayonnant des charbons est beaucoup plus considérable que celui des flammes, comme nous le verrons plus tard.

§ 3. — CHARBON DE BOIS.

134. Le charbon de bois est, comme l'indique son nom, une substance qui ne contient plus que le carbone qui se trouvait dans le bois. Les produits de la combustion de charbon de bois parfaitement carbonisé, sont uniquement formés d'acide carbonique; mais, comme le charbon de bois contient presque toujours une certaine quantité d'hydrogène, il se forme alors une quantité correspondante de vapeur d'eau. Le charbon, quel que soit le mode de fabrication par lequel il ait été obtenu, conserve la structure du bois; il est plus léger, plus sonore, et brûle sans flamme quand il est pur. Quant à ses autres propriétés, elles varient et avec le mode de fabrication et avec la nature du bois qui l'a

fourni : nous ne les exposerons qu'après avoir décrit les différentes méthodes de carbonisation.

D'après M. Berthier, tous les bois qui ne sont pas résineux produisent la même quantité de charbon quand ils sont soumis à la même méthode de carbonisation.

135. *Différentes méthodes de carbonisation du bois.* La carbonisation en meule, dont la connaissance remonte à une époque très-reculée, est encore généralement suivie dans nos forêts.

On commence par choisir, à portée du bois que l'on exploite, un terrain ferme, uni, horizontal, pour y établir le fourneau. Si l'on ne trouvait dans le voisinage de l'exploitation qu'un terrain rocailleux, on le nivellerait par des transports de terre. Après avoir battu le sol à la dame et avoir tracé la circonférence du fourneau, on place verticalement une des plus grosses bûches, et on range horizontalement et dans la direction des rayons du cercle les bûches les plus grosses; sur cette première couche de bois, qu'on nomme le plancher, on place d'autres lits disposés de la même manière, mais d'un diamètre de plus en plus petit, de manière à former un cône tronqué. Plus souvent les bûches sont placées verticalement sur le premier plancher. Quand la pile a atteint la hauteur de la bûche centrale, on place une seconde bûche sur celle qui formait l'axe, afin d'en doubler la hauteur, et on continue de monter la pile jusqu'au sommet de la seconde bûche. Cette opération étant terminée, on revêt toute la surface extérieure de la meule d'une couche de fraizin : on désigne ainsi un mélange de terre et de poussier de charbon qui reste sur le sol du fourneau après l'opération. Faute de fraizin, on se sert de terre très-divisée, de gazon, pour former le premier enduit du fourneau; il doit avoir de 4 à 6 pouces d'épaisseur. On a soin de laisser à découvert quelques trous correspondants aux rondins placés à la base, afin de donner accès à l'air extérieur dans la meule.

Le fourneau étant ainsi disposé, on peut le mettre en feu; pour cela, on enlève la bûche placée dans l'axe lors de l'élévation du dernier étage, et on jette dans le vide qu'elle laisse du bois sec très-menu et des charbons incandescents. La combustion se propage rapidement, et bientôt il sort de la fumée, non-seulement par la cheminée, mais encore par un grand nombre de points de la surface du fourneau. Aussitôt que la

flamme commence à sortir par la cheminée, on ferme celle-ci en partie par une plaque de gazon. Le charbonnier doit alors observer le feu avec attention, afin de régler l'entrée de l'air et l'issue de la fumée le plus régulièrement possible; il doit couvrir de terre les parties de la surface d'où la fumée se dégage en trop grande abondance, et il doit, de temps en temps, ajouter de la terre au bas du fourneau pour rétrécir continuellement les ouvertures qui donnent accès à l'air extérieur. Les vents peuvent avoir une influence très-fâcheuse sur les fourneaux à charbon; aussi est-on souvent obligé de s'en préserver par des abris ordinairement formés d'un clayonnage en osier.

Après un certain temps, qui dépend de la grandeur de la meule, toute la masse est incandescente, et l'ouvrier attend l'apparition du *grand feu*; c'est le moment où l'enveloppe devient rouge; à cet instant, le charbon est fait. Alors on jette de la terre sur le fourneau pour le recouvrir en totalité et arrêter la combustion; quelques heures après, on renouvelle cette enveloppe, et on attend que le charbon soit éteint pour le retirer.

On voit, d'après cela, que la réussite de l'opération dépend uniquement des soins et de la vigilance des ouvriers, et que les moindres négligences, ou des vents violents dont on ne pourrait pas s'abriter, occasionneraient non-seulement de grandes diminutions dans le produit en charbon, mais encore pourraient ne laisser que des cendres pour résultat de l'opération.

136. Par ce procédé, on obtient de 17 à 18 de charbon pour cent parties de bois en poids; dans les grandes meules, le produit est plus considérable. On obtient en volume de 25 à 30 dans les petites meules, et de 30 à 34 dans les grandes.

137. D'après les renseignements recueillis par M. Sauvage, ingénieur des mines, dans les départements des Ardennes et de la Meuse, les essences de bois employées pour la carbonisation sont $\frac{1}{4}$ de hêtre et de chêne, $\frac{1}{4}$ de tremble et de saule, $\frac{1}{2}$ de charme. Les bûches ont de 28 à 30 pouces de longueur; elles sont placées presque verticalement dans le fourneau qui en renferme trois couches; les fourneaux contiennent ordinairement de 60 à 90 stères; la carbonisation dure de sept à douze jours. Les rendements sont ainsi qu'il suit :

CHARBON DE BOIS.



Ardennes.

	Bois mêlés.
Poids du stère de bois.....	300 ^k
Un stère rend en volume.....	0 ^{m. c.} ,30 à 0 ^{m. c.} ,33
Un stère rend en poids.....	60 à 66 ^k
100 ^k de bois rendent.....	20 à 22 ^k
Le poids du mètre cube de charbon est.....	200 ^k

Meuse.

	Bois durs.
Poids du stère de bois.....	375 ^k
Un stère rend en volume.....	0 ^{m. c.} ,33 à 0 ^{m. c.} ,40
Un stère rend en poids.....	80 ^k
100 ^k de bois rendent.....	21 ^k
Le poids du mètre cube de charbon est.....	240 ^k

138. Marcus-Bull, en remplissant les intervalles des bûches avec du poussier de charbon, a obtenu une augmentation notable dans le rendement. L'accroissement de produit obtenu par ce moyen est facile à comprendre : le poussier de charbon, en brûlant, préserve le bois de la combustion.

139. Le mode d'opération que nous venons de décrire a l'inconvénient d'être d'une direction difficile à cause des vents, et celui de faire perdre tous les produits de la distillation des bois. On a proposé différents procédés pour éviter ces inconvénients; nous les décrirons successivement.

140. Le premier procédé, dû à M. Foucault, consiste à entourer le fourneau d'une enveloppe fermée de toute part, facilement transportable, qui reçoit les fumées qui se dégagent, et d'où celles-ci peuvent être dirigées dans des appareils de condensation. L'intervalle du fourneau et de l'enveloppe est assez grand pour permettre aux ouvriers de surveiller le feu.

Un abri de 30 pieds de diamètre à sa base, de 10 pieds à son sommet, et de 8 à 9 pieds de hauteur, se compose de 10 châssis de 12 pieds de long, ayant 3 pieds à la base et 1 au sommet; ces châssis sont formés de pièces de bois de 2 pouces d'équarrissage; leurs montants sont garnis de trois poignées qui se correspondent, et au moyen desquelles on maintient les châssis en passant un morceau de bois dans deux poignées contiguës. Ces châssis, avant d'être placés, sont recouverts d'échalas et enduits de terre détrempée; l'ouverture supérieure du cône tronqué

est fermée par un plateau en bois muni de deux trappes destinées à laisser échapper la première fumée; une ouverture triangulaire, pratiquée sur le même couvercle, est destinée à recevoir un conduit de même forme, composé de trois planches, qui sert à conduire et à condenser les fumées; il communique avec une série de tonneaux où l'acide pyroligneux condensé se réunit. Une porte est destinée à permettre au charbonnier de visiter le fourneau. Lorsqu'on veut changer de place, on bat les châssis pour faire tomber leur enduit terreux, et on enlève les clavettes qui les tenaient réunis. Cet appareil paraît donner d'assez bons résultats, et sous le rapport de la qualité et sous celui du rendement.

141. Le second procédé dont nous allons parler, a d'abord été proposé par M. Baillet, inspecteur des mines; il a été reproduit plus tard par M. Lamothe, et par M. de Foncand, et mis seulement ensuite en pratique par M. de la Chabeaussière, qui y a ajouté différents perfectionnements.

Ce procédé consiste à former le fourneau d'un cylindre en terre battue, creusé dans le sol ou élevé sur le terrain; dans le premier cas, on pratique dans le sol des événements qui viennent s'ouvrir au bas du cylindre; dans le second, les événements sont percés au bas du cylindre. Dans les deux cas, le cylindre est fermé par un couvercle en tôle, mobile au moyen d'une grue. Ce plateau est percé au centre d'un orifice destiné à introduire dans le fourneau des matières incandescentes pour l'allumer, et à sa circonférence, de plusieurs orifices plus petits, destinés à régler le travail du fourneau. Tous ces orifices sont ordinairement bouchés. La fumée se dégage par un orifice latéral, pratiqué vers le bord supérieur du fourneau, qui communique par des tuyaux en terre avec une série de tonneaux, dans lesquels se condensent l'eau, l'acide et le goudron qui proviennent de la distillation du bois. Voyez, pour plus de détails, le tome 20 du Bulletin de la Société d'encouragement, et le Dictionnaire technologique, tome 5. Par ce procédé, on obtient 20 de charbon en poids, pour 100 de bois.

142. Le dernier procédé est dû à M. Schwartz. L'appareil se compose d'une voûte en terre battue, fermée aux deux extrémités par des murs de même matière; c'est dans cet espace que l'on place le bois à carboniser. Le sol du fourneau est à double pente, pour permettre l'écou-



lement du goudron, qui est reçu dans des vases par des tuyaux plongeurs, afin d'éviter la communication de l'air avec l'intérieur du fourneau. En avant des deux murs verticaux, se trouvent deux foyers, qu'on alimente avec des fagots ou des bois impropres à la carbonisation, et dont la flamme pénètre dans le fourneau. Sur les deux autres faces et à fleur du sol, se trouvent des tuyaux pour le dégagement de la fumée; ces tuyaux sont interrompus par une série de tonneaux, dans lesquels se réunissent les produits de la condensation de la fumée, et aboutissent à une cheminée commune, dans laquelle le tirage peut être augmenté par un foyer. Cet appareil donne à peu près 18 de charbon pour 100 parties de bois.

143. Ces différents procédés ne sont pas plus avantageux, sous le rapport du rendement, que celui qui est généralement suivi dans les forêts, aussi ils ont été abandonnés, et on continue à employer exclusivement l'ancienne méthode.

144. Dans les fabriques d'acide pyroligneux, le bois est distillé dans des chaudières en tôle, qu'on peut enlever des fourneaux et replacer au moyen d'une grue. Ces chaudières communiquent avec l'appareil de condensation au moyen d'un tuyau, et les gaz, après leur refroidissement et la condensation des vapeurs, sont dirigés dans le foyer où ils sont brûlés. La consommation de bois dans le foyer est de 12,5, pour distiller 100 parties de bois. Le charbon obtenu est de bonne qualité; son poids s'élève de 28 à 30 pour 100 parties de bois.

Dans ce mode d'opération, comme nous venons de le dire, on brûle sur la grille les gaz combustibles qui se dégagent, mais après qu'ils ont été séparés de l'acide pyroligneux et du goudron qu'ils renfermaient. Il n'est pas douteux que si ces gaz et le goudron arrivaient chauds sur la grille, ils suffiraient seuls à la distillation.

145. On voit, d'après tous ces résultats, que les produits de la distillation du bois varient beaucoup avec le mode d'opération; mais la différence provient surtout de la durée de l'opération; plus elle s'effectue lentement, et moins il y a de charbon entraîné par les gaz. D'après les expériences de Karsten, le bois séché à l'air et soumis longtemps à une température de 150°, finit par ne plus éprouver d'altération; il est alors transformé en une matière charbonneuse, dont le poids s'élève à 31 ou 34 pour cent du poids du bois. Si le bois avait été



d'abord complètement desséché, le poids de la matière charbonneuse serait de 40 à 44 pour cent du bois. Par une distillation rapide en vase clos, les différentes espèces de bois réduits en copeaux très-minces, donnent des quantités de charbon qui varient entre 12 et 16 pour cent; et par une distillation lente, dans laquelle la matière est élevée progressivement jusqu'au rouge, les produits varient de 24 à 27 pour cent.

146. Il résulte de ce que nous venons de dire, que les différents procédés employés pour la fabrication du charbon de bois se divisent en deux classes : dans la première, la chaleur nécessaire à la carbonisation provient de la combustion d'une partie du bois; dans la seconde, la chaleur est fournie par un combustible étranger. Dans tous les cas on est loin d'obtenir tout le charbon qui existe dans le bois. En effet, considérons du bois parfaitement sec : nous pourrions, du moins pour les bois généralement employés à la carbonisation, négliger la petite quantité de matière étrangère qui s'y trouve renfermée; dans cet état, le bois ne contient environ que 50 pour cent de carbone, bien que sa puissance calorifique corresponde à 53 de carbone à cause du petit excès d'hydrogène qu'il contient. Alors le bois parfaitement sec devrait produire 50 pour cent de charbon, et le bois à 25 pour cent d'eau, à peu près 37,5. Ainsi, le bois ordinaire de charbonnage devrait produire 37,5 de charbon, si on pouvait extraire l'oxygène et l'hydrogène sans enlever de carbone, et si la chaleur nécessaire à la séparation de l'eau était fournie par un combustible étranger; ce serait par conséquent le rendement qu'on pourrait obtenir dans la distillation en vase clos. Mais, comme nous l'avons vu, on n'obtient que 28 pour cent; ainsi il y a 9,5 parties de charbon entraînées par les gaz. Lorsque la distillation a lieu par la chaleur qui résulte de la combustion d'une partie du bois, le rendement est beaucoup plus petit; on peut avoir une valeur approchée du maximum qu'on pourrait atteindre, en supposant que la quantité de chaleur nécessaire à la décomposition du bois se compose de la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau, et de celle qu'exige le chauffage à 500° du charbon et des gaz qui se dégagent.

Chaleur pour la vaporisation de l'eau.....	$62,5 \times 650$	$= 40625$
Chaleur pour l'échauffement de la vapeur...	$62,5 \times 400 \times 0,84$	$= 21000$
Chaleur pour l'échauffement du charbon...	$37,5 \times 500 \times 0,24$	$= 4500$
		<hr/>
		66125

Cette quantité de chaleur correspond à $\frac{66125}{7161} = 9,23$ de charbon, et serait même réduite à près de moitié si on supposait que l'excès d'hydrogène contenu dans le bois fût brûlé; il l'est probablement en partie; mais en n'ayant pas égard à cette circonstance, on voit que, dans la carbonisation en meule, on pourrait obtenir 28,3 pour cent de rendement, et ce rendement serait possible, car il diffère peu de celui qu'on obtient dans les vases clos. Ainsi, dans la carbonisation du bois en meule, le rendement, qui n'est au plus que de 20, pourrait être dépassé de beaucoup. Mais, pour cela, il faudrait nécessairement changer la disposition des appareils. Les conditions auxquelles il paraîtrait le plus important de satisfaire, seraient 1° une distribution uniforme de la chaleur dans la masse à convertir en charbon; 2° l'emploi pour le chauffage du bois menu qui ne peut pas être converti en charbon; 3° un mode de chauffage qui permit de le régler à volonté. Cette dernière circonstance est peut-être la plus importante de toutes, car, dans la carbonisation du bois en vases clos on remarque une accélération subite dans l'opération, quand la calcination a atteint un certain point, accélération qui diminuerait beaucoup le rendement, si, à l'instant où elle se manifeste, on n'éteignait pas le foyer. Le même phénomène se reproduit dans la carbonisation en meule; à une certaine époque de l'opération, le dégagement des gaz devient tout à coup très-considérable, et si on ne le maîtrisait pas, en bouchant une grande partie des issues, la perte deviendrait très-grande. Le mode de carbonisation employé par M. Échemont, pour la fabrication des charbons roux, dont nous parlerons plus loin, convenablement modifié, conduirait peut-être à de bons résultats. La vapeur chauffée après son émission, employée déjà par MM. Thomas et Laurens, pour la revivification du noir animal, et qu'ils ont déjà essayée pour la fabrication du charbon de bois, serait peut-être le moyen le plus avantageux. Mais les appareils devraient être simples, peu dispendieux et facilement transportables, et ces conditions seront probablement difficiles à remplir.

147. *Charbon roux.* MM. Honzeau et Fauveau ont imaginé d'employer dans les hauts fourneaux marchant au charbon de bois, du bois seulement en partie carbonisé, et ils ont obtenu des résultats très-satisfaisants. Avec le charbon ordinaire, pour produire 1000 kilogrammes de fonte, on employait 21 stères de bois, tandis qu'avec le nouveau procédé,

11 stères suffisent. Le nouveau charbon est brun foncé, cassant, facile à pulvériser. Une corde de bois pesant 375 à 380 kilogrammes produit 220 kilogrammes de charbon brun, à peu près 0,57, dont l'effet, d'après M. Berthier, correspond à 0,535 de son poids de charbon. Ainsi le rendement apparent en carbone d'une corde de bois pesant 380 kilogrammes, serait de $220 \times 0,535 = 117^k,7$ de charbon, ou de 0,31; rendement qu'on n'obtient jamais par aucun procédé, quand la carbonisation est complète.

MM. Honzeau et Fauveau ont employé pour produire cette carbonisation, la chaleur perdue d'un haut fourneau. Le bois était placé dans des caisses en fonte ayant 1 mètre cube de capacité, dont les fonds et les faces latérales étaient parcourus par la flamme du gueulard (*Annales des Mines*, tome 10).

148. Depuis, M. Sauvage, ingénieur des mines, a constaté dans l'usine d'Haraucourt, dirigée par MM. Fort et Guillaume, les mêmes effets économiques; et il a fait sur la préparation des charbons roux des expériences nombreuses dont nous rapporterons les principaux résultats (*Annales des Mines*, tome 11).

Les expériences ont été faites sur le bois, le charbon noir, et du bois soumis à des distillations qui ont duré 3 heures, 4 heures trois quarts, 5 heures, 5 heures et demie, 6 heures et demie. Les résidus de ces distillations partielles seront désignés par les lettres A, B, C, D, E.

Les poids des résidus obtenus par une simple dessiccation, par les 5 distillations partielles et par une calcination complète, ont été :

0,72; 0,65; 0,53; 0,47; 0,41; 0,39; 0,17.

Ces résidus représentent les quantités suivantes de carbone :

0,375; 0,314; 0,28; 0,27; 0,25; 0,25; 0,14.

Par une calcination brusque et complète ces résidus donnent les quantités suivantes de charbon :

0,126; 0,124; 0,137; 0,173; 0,174; 0,184; 0,13.

Ainsi on voit que la richesse des résidus décroît à mesure que la calcination est plus avancée, comme il était facile de le prévoir, mais que la variation est très-petite pour les états B, C, D et E, et que les produits en charbon complet sont d'autant plus forts que le bois a été plus longtemps soumis à l'action de la chaleur.

149. Mais ce mode de travail n'est réellement avantageux qu'autant que les bois ne sont pas très-éloignés des usines; car s'il en était autrement, la différence des frais de transport des bois et des charbons pourrait compenser, et au delà, l'avantage de l'emploi des charbons roux sur celui des charbons ordinaires.

150. On s'est alors occupé de la fabrication des charbons roux dans les forêts. On a d'abord essayé si, par la méthode ordinaire, en arrêtant la calcination à une époque convenable, on ne parviendrait pas au résultat cherché; mais on n'a rien obtenu de satisfaisant: une partie du bois était transformée en charbon noir, et une autre était à peine altérée. Mais M. Échemont paraît avoir complètement réussi, par une disposition particulière du fourneau et du mode de chauffage. Le fourneau a la forme d'un prisme allongé; le bois y est placé horizontalement, et il est recouvert à la méthode ordinaire. Au-dessous du fourneau et dans l'axe se trouve un canal creusé dans le sol, de 0,2 de côté, fermé en dessus par des plaques de fonte disposées de manière à laisser de petits intervalles entre elles; autour de ce canal le bois est disposé de manière à former une voûte concentrique, demi-cylindrique, de 0,5 à 0,6 de rayon. Le canal creusé dans le sol communique avec un foyer à grille construit à l'un des bouts du fourneau, dans lequel l'air est injecté par un ventilateur à force centrifuge, mis en mouvement par un enfant. Le foyer est entretenu avec du bois et des branchages. La quantité de bois qu'on brûle dans le foyer est égale à $\frac{1}{10}$ de celle du bois torréfié. On conçoit facilement que par cette méthode on puisse arriver à une calcination uniforme dans toute la masse, car on est maître de faire passer le courant d'air chaud par une partie quelconque du fourneau, puisque cette direction est déterminée par la position des orifices de l'enveloppe (*Annales des Mines*, tome 16).

151. *Propriétés du charbon de bois.* Le charbon de bois est solide, cassant, friable; il conserve la structure du bois qui l'a produit; quoique facile à pulvériser, il donne une poussière qui est très-dure. En masse il est plus léger que l'eau, mais quand il est en poudre sa densité est à peu près égale à 2.

152. D'après M. Berthier, le charbon, tel qu'on le trouve dans le commerce et tel qu'on l'emploie habituellement dans les arts, perd de 0,14 à 0,15 de son poids lorsqu'on le calcine à la chaleur blanche, parce qu'il



renferme des gaz combustibles, et en outre de l'eau hygrométrique qu'il prend rapidement dans l'atmosphère.

Voici les poids d'un mètre cube des principales variétés du charbon :

	kilogrammes.
Charbon de chêne et de hêtre.....	240 à 250
<i>Idem</i> de bouleau.....	220 à 230
<i>Idem</i> de pin.....	200 à 210

153. Le charbon de bois est infusible. Il jouit de la propriété d'absorber un grand nombre de gaz.

154. Les charbons qui n'ont été soumis qu'à la température seulement suffisante pour leur production, sont à la fois mauvais conducteurs de la chaleur et de l'électricité et très-combustibles; tandis que ceux qui ont été rougis sont bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité, d'une combustion difficile, et d'autant plus qu'ils ont été plus fortement chauffés. Lorsque les premiers sont séparés d'un foyer et exposés à l'air, ils continuent de brûler, tandis que les autres s'éteignent. Ces dernières propriétés sont les conséquences nécessaires de la différence de conductibilité.

155. Lorsque des charbons ont été soumis à la même température, ils sont d'autant plus conducteurs de la chaleur et de l'électricité, et d'autant moins combustibles, qu'ils proviennent de bois plus denses.

156. Les charbons ordinaires absorbent très-rapidement l'humidité de l'air; ils en prennent, terme moyen, de 0,07 à 0,08, mais d'autant moins qu'ils renferment plus de matières volatiles. Les charbons roux d'Angoulême n'absorbent que 0,04, et les charbons calcinés à la chaleur blanche 0,12 à 0,13.

157. Les charbons de bois après leur immersion dans l'eau retiennent des quantités très-considérables de ce liquide, mais d'autant moins qu'ils ont été soumis à une température plus élevée. D'après M. Chevreuse,

100 parties de charbon de peuplier non rougi ont absorbé..	753
100 parties du même charbon rougi.....	482
100 parties de charbon de gaïac non rougi.....	77
100 parties du même charbon rougi.....	46

Le charbon se vendant à la mesure, les marchands n'ont aucun intérêt à le mouiller; cependant, comme on prend rarement les précautions né-

cessaires pour le soustraire à la pluie, il est rare de trouver des charbons qui ne contiennent pas de 10 à 12 pour cent d'eau. Il en résulte un inconvénient assez grave; pendant la combustion une partie de la chaleur est employée inutilement à vaporiser cette eau.

158. Les charbons de bois conservés longtemps deviennent friables, et dans le transport produisent beaucoup de poussier; les charbons légers ont cet inconvénient plus que ceux qui proviennent des bois compactes. On attribue cet effet à la cristallisation des sels que renferme le charbon, cristallisation qui produit dans le charbon un phénomène analogue à celui de la gelée dans certaines pierres de construction.

159. Pour le service des hauts fourneaux et des forges, on garde les charbons en halle sept à huit mois. Au delà de ce terme ils commencent à se détériorer sensiblement. Quand on est obligé de les conserver en tas exposés à l'air, on les abrite par des couvertures légères; mais ils perdent alors beaucoup de leur qualité par un séjour de plusieurs mois. Cependant on a reconnu que les charbons récents sont moins avantageux qu'après un séjour d'un à deux mois dans les halles.

160. Les charbons de bois donnent des quantités de cendres qu'il est facile de calculer quand on connaît celles qui résultent de la combustion du bois, et les quantités de charbon que peuvent produire les différentes espèces de bois; car les cendres du bois se trouvent toutes dans celles du charbon qu'il produit. Or, d'après le tableau page 57, la quantité moyenne de cendres des différents bois est à peu près de 0,015, et en admettant le chiffre 20, pour la quantité de charbon produit, on trouve que la quantité moyenne de cendres que peuvent donner les différents charbons est de $0,015 \times \frac{100}{20} = 0,075$.

161. *Puissance calorifique.* Tous les charbons en brûlant dégagent sensiblement la même quantité de chaleur; c'est un fait qui était connu depuis longtemps, et que Marcus Bull a constaté par des expériences faites sur des charbons de noyer, d'érable, de chêne et de pin.

162. Mais tous les charbons ne brûlent pas de la même manière: ceux qui sont compactes brûlent plus difficilement et plus lentement que les charbons légers, et ne peuvent pas produire dans un foyer une température aussi élevée.

163. La quantité absolue de chaleur développée par la combustion du charbon a été déterminée par différents physiciens; voici les résultats

qui ont été obtenus. Les nombres représentent les unités de chaleur produites par la combustion de 1 kilog. de charbon.

Laplace, Lavoisier.....	7226
Hassenfratz.....	7200
Clément et Desormes.....	7050

164. La puissance calorifique des charbons doit varier dans des limites assez étendues, non-seulement à cause de l'inégalité des quantités de cendres qu'ils produisent, mais surtout par la variation des quantités de gaz et d'humidité qu'ils contiennent.

D'après M. Sauvage, ingénieur des mines, le charbon fabriqué dans les forêts serait composé de

Carbone.....	0,79
Matières volatiles.....	0,16
Cendres.....	0,79

et représenterait 0,85 de carbone. La puissance calorifique serait alors $7161 \times 0,85 = 6086$.

Mais comme l'équivalent en carbone a été obtenu par des expériences faites au moyen de la litharge, et que ce procédé suppose que la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'hydrogène est seulement trois fois plus grande que celle produite par le même poids de carbone, tandis que les expériences de M. Dulong donnent un rapport beaucoup plus grand, nous regardons le nombre ainsi obtenu comme étant beaucoup trop petit.

La puissance calorifique du charbon fortement calciné et ne renfermant ni gaz ni eau hygrométrique serait de $7161 \times 0,93 = 6659$.

Si on admettait, d'après M. Despretz, le nombre 7800 pour la puissance calorifique du carbone, on trouverait 7200 pour celle du charbon fortement calciné, et un nombre beaucoup plus grand pour les charbons ordinaires.

165. Désormais nous admettrons que la puissance calorifique des charbons de bois varie entre 6600 et 7000.

166. Les valeurs relatives des différents charbons sous le même volume et dans l'état où ils se trouvent ordinairement dans le commerce, sont, d'après Bull, dans les rapports des nombres suivants :

CHARBON DE BOIS.

Charbon de noyer.....	166
Charbon d'érable.....	114
Charbon de chêne.....	106
Charbon de pin.....	75

77



Ces nombres sont proportionnels aux poids spécifiques de ces différents charbons.

167. *Pouvoir rayonnant.* Reste maintenant à déterminer le pouvoir rayonnant du charbon de bois.

Voici les éléments de l'expérience que j'ai faite à ce sujet, au moyen de l'appareil décrit (108).

La température de l'atmosphère était de 21°. L'eau introduite dans le vase était à 14°. Par la combustion de 56 grammes de charbon, elle s'est élevée à 28°. Ainsi la quantité de chaleur absorbée par l'eau avait élevé sa température de 14°. La quantité d'eau que renfermait l'appareil était, comme dans l'expérience sur le bois (133), de 11^h,29. Le poids de l'enveloppe étant toujours de 2^h23, la quantité de chaleur absorbée par le vase était équivalente (133) à celle qui serait renfermée dans 0^h,244 d'eau élevés de 14°.

Par conséquent la quantité totale de chaleur absorbée par l'appareil était de $(11,29 + 0,244) 14^{\circ} = 161,47$ unités de chaleur, et la quantité de chaleur rayonnée (108) $= 161,47 \times 1,36 = 219,60$. Mais nous avons vu (165) que la quantité totale de chaleur dégagée par 1000 grammes de charbon était de 7000 unités, d'où il suit que 56 grammes ont dû en produire 392. Ainsi la quantité de chaleur dispersée par le rayonnement est à la quantité totale de chaleur développée $:: 219,6 : 392 :: 1 : 1,78$; et la quantité de chaleur rayonnante est à celle qui est entraînée par le courant d'air chaud $:: 1 : 0,78$.

D'après cela, la quantité de chaleur que le charbon rayonne est à celle qui est emportée par le courant d'air chaud $:: 5 : 4$. Ce résultat est bien supérieur à tout ce que l'on a dit jusqu'ici sur la chaleur rayonnante; mais j'ai répété plusieurs fois l'expérience, et j'ai toujours obtenu des résultats peu différents.

Les expériences ont été faites sur du charbon incandescent qui a été pesé dans cet état. Une fois la totalité du charbon n'était pas entièrement allumée, et j'ai obtenu un résultat plus faible, à peu près de $\frac{1}{3}$, mais il y avait au moins $\frac{1}{3}$ de la surface du charbon non incandescente.



Cette manière d'opérer aurait dû occasionner une petite correction, relative à la quantité de chaleur qui se trouvait déjà dans le charbon au commencement de l'expérience; mais il est facile de la calculer. En effet, la capacité calorifique du charbon est de 0,26; en admettant que sa température ait été de 500°, les 56 grammes de charbon, dont il faut seulement tenir compte, auraient renfermé une quantité de chaleur capable d'élever 1 gramme d'eau de $500 \times 56 \times 0,26 = 7280^\circ$, ou 1^k d'eau de 7°,28, ou enfin 11^k,29, qui est la quantité d'eau de l'appareil, de 0°,6. Ainsi, l'erreur pouvait au plus s'élever à 0,04. En prenant 13° pour la différence de température au lieu de 14°, on trouve que la quantité de chaleur rayonnante est à la quantité totale comme 1 : 1,92.

Je ne crois pas qu'on s'éloigne beaucoup de la vérité en admettant que le pouvoir rayonnant du charbon disperse $\frac{1}{2}$ de la chaleur totale : c'est le résultat approximatif que nous admettrons.

§ 4. — TANNÉE.

168. Le tan épuisé qui n'est plus formé que de la partie ligneuse de l'écorce de chêne, sert de combustible dans un grand nombre de localités. Pour l'employer, on le comprime, encore humide, dans des moules de fer ordinairement circulaires; les mottes qui résultent de cette opération sont séchées à l'air libre, et sont vendues pour le chauffage domestique des familles les plus pauvres. Les mottes renferment encore beaucoup d'eau, elles brûlent lentement et donnent beaucoup de cendres. C'est un combustible précieux dans les grandes cités, où en général les autres combustibles sont beaucoup plus chers. La production du tan étant peu considérable, son emploi dans les usines sera toujours très-limité. Il y a cependant des circonstances dans lesquelles il peut être employé avec avantage : on en jugera facilement d'après les résultats suivants.

169. 1250^k d'écorce de chêne produisent 1000^k de tannée sèche, et ces 1000^k se vendent à Paris 10 francs. 1000^k de tannée équivalent pour la puissance calorifique à 800^k de bois ou de 270 à 300^k de houille; les 800^k de bois coûtent à Paris à peu près 39 francs, et les 300^k de houille à peu près 15 francs en comptant à 4 francs l'hectolitre ras de 80^k. Ainsi, pour des quantités égales de chaleur développées, les prix de la tannée, du bois et de la houille, sont proportionnels aux nombres 10, 39, et 15.



170. Dans un des faubourgs de Paris, une machine à vapeur de 12 chevaux à basse pression est alimentée par de la tannée sèche : elle en consomme de 1600 à 1700^k en 12 heures. Ce qui fait 12^k par cheval et par heure.

171. Les résidus qui proviennent des bois de teinture peuvent être employés au même usage que la tannée.

D'après des expériences faites en 1830, par M. Pimont, les résidus de bois de teinture abandonnés pendant quelques mois dans des fosses, éprouvent une fermentation à la suite de laquelle ils peuvent facilement être moulés comme le tan; il estime à 3 francs le prix de revient de 1000 briques dont le poids s'élève à 360^k, et il regarde ce combustible comme présentant une économie des deux tiers sur la houille.

172. Désormais nous admettrons que la puissance calorifique de la tannée parfaitement sèche est 3300, et que celle de la tannée dans l'état ordinaire de dessiccation est seulement 2300.

§ 5. — TOURBE.

173. La tourbe est un combustible léger, spongieux, d'un brun noirâtre. Elle est formée de plantes herbacées, entrelacées, souvent reconnaissables, et dont la décomposition est plus ou moins avancée. Les tourbes renferment toujours une quantité plus ou moins considérable de terre et de sable.

174. Les produits de la combustion de la tourbe sont assez compliqués, parce qu'il est difficile de la rendre complète. Ils sont composés des mêmes éléments que ceux qui se dégagent de la combustion incomplète du bois; on y trouve en outre de l'ammoniaque, et souvent de l'acide sulfureux.

175. On distingue plusieurs variétés de tourbes; mais une seule est employée communément comme combustible, c'est celle des marais. Cette tourbe a des caractères qui varient suivant la profondeur à laquelle elle a été prise. A la surface du sol la tourbe est lâche et composée de végétaux à peine décomposés; à mesure que l'on s'enfonce davantage dans la couche, elle devient plus compacte, plus noire, et les débris organiques qui la composent sont plus altérés; enfin, dans les dernières assises, la tourbe ne laisse plus apercevoir de traces de végétaux.

Cette espèce de tourbe se trouve, comme l'indique son nom, dans les

terrains marécageux et humides, ou qui ont été le fond d'étangs ou de lacs d'eau douce. Elle n'est jamais enfouie profondément, elle est ordinairement recouverte d'une couche de terre ou de sable de quelques décimètres d'épaisseur. Les couches de tourbe atteignent souvent une grande épaisseur : on en connaît qui ont plus de dix mètres. Les bancs de tourbe ont souvent une très-grande étendue. Ils sont beaucoup plus répandus dans le nord que dans le midi.

La tourbe provient sans aucun doute des débris de plantes aquatiques déposés successivement au fond des marais ; mais comme tous les marais ne renferment pas de tourbe, il faut nécessairement admettre que leur formation exige ou des espèces particulières de végétaux ou des circonstances qui ne se rencontrent pas partout.

Les tourbières les plus considérables de la France, sont : 1° celles de la vallée de la Somme, entre Amiens et Abbeville ; 2° celles des environs de Beauvais ; 3° celles de la rivière d'Essonne, entre Corbeil et Villeroi ; 4° celles des environs de Dieuze. La Hollande, la Westphalie et l'Écosse sont très-riches en tourbes.

176. La tourbe s'extrait en mottes carrées de la grosseur d'une brique ; quelquefois on la délaye et on la moule ensuite. La tourbe est ordinairement séchée sur le lieu même de l'exploitation.

Elle renferme alors 25 à 30 pour cent d'eau qu'on ne peut dégager que par un courant d'air à 50 ou 60°.

La tourbe brûle lentement, et ne donne pas une chaleur intense. Elle est d'un très bon usage pour le chauffage des étuves, et peut servir avantageusement à l'alimentation des foyers de chaudières à vapeur. Mais elle répand pendant sa combustion une odeur piquante et fort désagréable.

177. *Puissance calorifique.* La qualité des tourbes étant extrêmement variable, même dans chaque exploitation, et la quantité de terre qu'elles renferment l'étant également et dans des limites très-étendues, on conçoit facilement qu'il est impossible de rien dire de bien positif sur la quantité de chaleur que donne la combustion de la tourbe. D'après les expériences de MM. Blavies et Miché, il paraîtrait qu'une tourbe de bonne qualité donne tout au plus la cinquième partie de la chaleur que produit le même poids de houille.

Mais des expériences faites plus récemment et sur une grande échelle,

par M. Garnier, ingénieur des mines, indiquent pour ce combustible une puissance calorifique beaucoup plus grande.

Ces expériences ont été faites sur la tourbe des marais de Brèles, près de Beauvais. Les tourbes de ces marais sont d'un gris-noirâtre, sans mélange de substances terreuses; elles éprouvent un grand retrait par leur dessiccation, car leur longueur, qui est d'abord d'environ trois cent vingt-cinq millimètres, se réduit au tiers. On distingue dans cette localité six variétés de tourbes : les deux dernières ne sont bonnes que pour faire des cendres ; la seconde qualité coûte à Beauvais, tous frais compris, 14 f. 60 c. la corde pesant 2000^k et composée de 4500 tourbes d'environ un décimètre cube.

Les essais ont eu lieu sur la chaudière d'une machine à vapeur à haute pression, et de la force de vingt chevaux, de MM. Halette et compagnie. M. Garnier a trouvé que, pour produire le même effet avec la houille et la tourbe de seconde qualité, il fallait employer un poids double de ce dernier combustible. Il résulte de là, qu'à Beauvais, où l'hectolitre de houille de 80^k coûte 4 f. 20 c., les dépenses pour produire le même effet avec la houille et la tourbe de deuxième qualité de Brèles, sont comme 4 : 1.

La tourbe limoneuse des environs d'Essonne, de première qualité, me paraît approcher beaucoup de celle dont il vient d'être question, car, d'après des expériences faites avec soin, elle ne laisse après sa combustion que 7,41 pour 100 de cendres.

Voici encore un renseignement qui conduit à la même conséquence. Une machine à vapeur de 16 chevaux consomme en 12 heures 45 sacs de tourbes de 50^k ou 2250^k, ce qui fait 140^k par cheval, et 11^k,6 par cheval et par heure. C'est à peu près le double du poids de houille qu'exigerait la machine si elle était alimentée par ce dernier combustible.

178. D'après M. Sauvage, ingénieur des mines, la tourbe de Bar (Ardenne) est composée ainsi qu'il suit : carbone 0,22; matières volatiles 0,67; cendres 0,11. Il estime à 0,16 la valeur en carbone des matières volatiles, ce qui porterait à 0,38 la valeur de la tourbe sèche en carbone; et il dit que cette tourbe desséchée à l'air, a la même puissance calorifique que le bois. Ce dernier résultat tient très-probablement à ce que ces tourbes renferment plus d'eau ou plus de cendres que celles de Beauvais.



179. Le tableau suivant renferme les résultats des analyses faites par M. Regnault sur la composition des tourbes. Nous avons inséré dans ce tableau les puissances calorifiques de ces combustibles, en supposant que la chaleur produite résultât uniquement de la combustion du carbone et de l'hydrogène en excès. Nous avons fait ces calculs dans deux hypothèses, en prenant d'abord pour les puissances calorifiques de l'hydrogène et du carbone, les nombres 23800 et 7800 qui étaient admis avant les recherches de Dulong, et ensuite les nombres 34742 et 7170, qui résultent des expériences de ce physicien.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	COMPOSITION.				HYDROGÈNE en excès.	Puissance calorifique, en admettant pour le carbone 7800 pour l'hydrogène 23800.	Puissance calorifique, en admettant pour le carbone 7170 pour l'hydrogène 34742.
	Carbone.	Hydrog.	Oxyg.	Cendres.			
Tourbe de Vulcaire près Abbeville.....	57,05	5,63	31,76	5,58	1,69	4849	4673
Tourbe de Long près Abbeville.....	58,09	5,93	31,37	4,61	2,04	5013	4873
Tourbe du Champ-du-Feu près de Framont.....	57,79	6,11	30,97	5,33	2,30	5051	4943

180. D'après ce tableau, la puissance calorifique de la tourbe excéderait de beaucoup celle du bois, parce qu'elle renferme plus de carbone et plus d'hydrogène en excès; elle excède même la moitié de celle de la houille qui n'atteint jamais 8000, comme nous le verrons bientôt. Mais il faut remarquer que les essais ont été faits sur des tourbes complètement desséchées; et comme les tourbes telles qu'elles sont livrées à la consommation, ont été seulement desséchées par leur exposition à l'air, elles renferment encore de l'eau en proportion très-variable. Cette circonstance ne permet alors d'estimer la puissance calorifique des tourbes qu'autant qu'on connaît la quantité d'eau qu'elles renferment.

En admettant que les tourbes longtemps exposées à l'air renferment encore 25 pour cent d'eau, comme plusieurs expériences l'indiquent, on trouverait pour leur puissance calorifique, d'après le tableau précédent,



à peu près 3600; nombre qui s'éloigne peu de la puissance calorifique du bois parfaitement sec, et de la moitié de celle de la houille de bonne qualité, comme les expériences en grand l'indiquent.

181. Pour les tourbes, encore plus que pour le bois, il y aurait un grand avantage à enlever complètement l'eau qu'elles renferment, par une dessiccation faite au moyen d'un courant d'air chaud. Et cette dessiccation serait d'autant plus utile, que la chaleur qu'elle exigerait pouvant être fournie par la chaleur perdue dans presque tous les appareils de chauffage, ne coûterait rien. Lorsque la tourbe est desséchée, elle développe réellement plus de chaleur malgré la diminution de son poids, sa combustion est plus vive et produit une plus haute température. Pour tous les usages métallurgiques, la dessiccation complète de la tourbe est indispensable.

182. *Pouvoir rayonnant.* D'après plusieurs expériences, j'ai trouvé que la tourbe rayonne sensiblement autant de chaleur que le charbon de tourbe dont nous allons parler.

§ 6. — CHARBON DE TOURBE.

183. Le charbon de la tourbe peut s'obtenir, comme celui du bois, par deux procédés différents, par suffocation et par distillation. Ces deux procédés s'exécutent comme pour la carbonisation du bois.

184. La carbonisation de la tourbe, par le procédé généralement employé dans les forêts pour la carbonisation du bois, présente beaucoup plus de difficultés, attendu que la masse s'affaisse davantage, et qu'il se forme des crevasses nombreuses par lesquelles l'air s'introduit dans le fourneau. Malgré la difficulté de conduire l'opération, la carbonisation en meule est encore la seule usitée dans le Nord. Il est probable que l'opération serait plus facile à conduire et donnerait de meilleurs résultats, si on employait les dispositions imaginées pour la carbonisation du bois, par MM. Baillet ou Schwartz.

La meilleure méthode serait la distillation en vase clos; mais elle exige des appareils trop compliqués, et n'est réellement pas praticable en grand.

185. Les essais de carbonisation de la tourbe se font facilement dans un creuset de platine ou d'argent, et même dans une marmite de fer, que

l'on ferme après y avoir introduit un poids connu de tourbe, et que l'on soumet ensuite à la chaleur rouge jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de vapeurs. Les vases d'argile ne conviendraient point pour cette opération, parce que la plupart sont perméables à l'air, et qu'une partie du charbon pourrait être brûlé. J'ai trouvé ainsi, que cent parties de tourbe d'Essonne carbonisée en vase clos donnent 40,75 de charbon.

186. D'après M. Blavier, la tourbe de Vesle, distillée en vase clos, donne pour résidu un charbon compacte, dont le poids est de 34,7 pour cent parties de tourbe. En grand on a obtenu de 40 à 41. On peut admettre comme un résultat qui s'éloigne peu de la réalité, que les charbons provenant de tourbes de bonne qualité contiennent de 14 à 18 pour cent de cendres.

187. D'après M. Sauvage, on fabrique le charbon de tourbe dans les Ardennes avec la tourbe de Bar, dans des fours en maçonnerie; le produit est de 44 pour cent; et le charbon est formé de 0,32 de matières volatiles et combustibles, de 0,43 de carbone et de 0,25 de cendres.

188. Le charbon de tourbe développe dans sa combustion les produits qui se forment dans celle du charbon de bois; mais les gaz qui se dégagent ont une odeur piquante fort désagréable.

189. *Puissance calorifique.* Le charbon de tourbe renfermant toutes les cendres que contenait la tourbe qui l'a produit, et ces quantités étant très-inégales dans les différentes tourbes, la quantité de chaleur qu'il dégage par sa combustion est très-variable. On peut cependant regarder le charbon de tourbe comme devant produire une quantité de chaleur égale à celle qui serait produite par le charbon pur qu'il contient. Le charbon de tourbe d'Essonne, sur 100 parties, donnant 18,2 de cendres, résultat moyen de plusieurs expériences faites avec beaucoup de soin, il en résulte que sa puissance calorifique est 5800.

190. Le charbon de tourbe brûle lentement, du moins quand il n'est pas remué, parce que les cendres qu'il produit en grande quantité restent en place et ralentissent la circulation de l'air à la surface du charbon.

191. *Pouvoir rayonnant.* La quantité de calorique rayonnant que dégage le charbon de tourbe pendant sa combustion est très-considérable. Voici le résultat d'une expérience que j'ai faite avec l'appareil décrit (108).

L'air atmosphérique était à 23°; l'eau introduite dans le vase à 18,75.



Par la combustion de 39 grammes de combustible, la température de l'eau s'est élevée à $27^{\circ},25$. Ainsi, la quantité de chaleur rayonnante absorbée par l'eau avait élevé la température de sa masse de $8^{\circ},50$. La quantité d'eau étant toujours de $11^{\text{k}},29$, et le poids du vase de $2^{\text{k}},223$, la quantité de chaleur réellement absorbée était de $(11^{\text{k}},29 + 2,223 \times 0,11) \times 8^{\circ},50 = 98$ unités de chaleur. La quantité totale de chaleur rayonnée était donc $98 \times 1,36 = 133,28$. Or, les 39 grammes de matières combustibles qui ont été brûlées, et que l'on peut considérer comme du charbon pur, ont dû produire $7170 \times \frac{39}{1000} = 280$.

Ainsi, la quantité de chaleur rayonnée est à la quantité de chaleur produite :: $133 : 280 :: 1 : 2,1$. Et la quantité de chaleur rayonnée est à celle qui est entraînée par le courant d'air :: $1 : 1,1$.

Ce rapport est un peu trop grand, par les mêmes raisons que nous avons exposées en parlant du rayonnement du charbon de bois (167); en prenant les nombres 1 et 2,2 pour le premier rapport, on s'éloignera fort peu de la vérité.

§ 7. — COMBUSTIBLES FOSSILES.

LIGNITES. HOUILLES. ANTHRACITES.

192. Les différents combustibles que nous avons examinés jusqu'ici ont tous une origine végétale évidente. Ceux qui nous restent à étudier ont probablement tous aussi la même origine, mais elle n'est manifeste que dans certains lignites. Les houilles et les anthracites ont une pâte homogène dans laquelle il est impossible de découvrir les plus légères traces de structure organique; mais comme il y a un passage continu des lignites qui ont conservé la structure des plantes qui les ont formés, aux houilles et aux anthracites, il n'est pas permis de douter de la communauté d'origine de ces différentes substances.

193. Quoi qu'il en soit, la tourbe appartient aux terrains d'alluvion les plus modernes; au dessous, dans les terrains tertiaires, se trouvent les lignites; on les rencontre encore dans les couches supérieures des terrains secondaires, mais ils disparaissent des couches inférieures qui ne contiennent plus que de la houille; enfin les terrains intermédiaires renferment l'anthracite. Il semble, d'après cela, que la formation de

l'anthracite remonte à l'époque la plus reculée, que la houille est moins ancienne, et le lignite plus moderne encore.

Nous n'entrerons pas dans les détails géologiques des gisements des combustibles fossiles, ni dans les détails des modes d'extraction : nous sortirions du cadre que nous nous sommes tracé; mais nous étudierons avec soin ces combustibles sous le rapport de leurs effets calorifiques.

Lignites.

194. Les lignites ont tantôt une couleur brune et une texture ligneuse, ou une apparence terreuse; d'autres fois ils sont noirs à structure ligneuse ou en masse homogène à cassure résineuse. Les lignites se distinguent par ces deux caractères, d'être en grande partie formés d'une matière soluble dans la potasse, désignée anciennement sous le nom d'acide ulmique, et de donner pour produit de leur distillation un charbon pulvérulent ou de même forme que la masse distillée. Jamais ces deux caractères ne se trouvent réunis, ni dans les houilles, ni dans les anthracites.

195. Les lignites terreux sont employés comme combustibles; il en est qui, par une plus profonde altération, ont acquis une structure schisteuse et sont accompagnés de pyrites, et pour cette raison sont employés dans d'importantes exploitations d'alun.

196. On trouve en France des dépôts plus ou moins considérables de lignite terreux aux environs de Soissons et de Laon, dans le département de l'Aisne; à Montdidier, dans le département de la Somme; à Sainte-Marguerite, près de Dieppe; à Ruelle, dans le département des Ardennes; à Polieuc, près d'Orange, dans le département de Vaucluse.

197. Les lignites compactes ont la plus grande analogie avec la houille: ils en portent souvent le nom, et la remplacent dans tous les usages qui n'exigent pas les qualités spéciales des houilles grasses. Le jayet appartient à cette espèce.

Les lignites compactes forment souvent des bancs d'une grande puissance qui donnent lieu à de grandes exploitations. En France, on en trouve dans les environs de Marseille, de Toulon, de Vaucluse, de Ruelle (Ardennes).

*Houilles. Anthracites.*

198. Les houilles sont toujours noires, tantôt schisteuses, tantôt compactes; elles donnent lieu à d'immenses exploitations. Sous le rapport de leur conduite au feu, on peut les ranger en cinq classes :

1° *Houilles grasses maréchales*. Ces houilles sont d'un beau noir et présentent un aspect gras caractéristique; leur poussière est brune. Elles éprouvent au feu une espèce de fusion pâteuse et donnent un coke très-boursoufflé, brillant, mais léger et peu avantageux pour les opérations métallurgiques. De toutes les houilles maréchales, la plus estimée est celle de Saint-Étienne; après, vient celle de Mons, désignée sous le nom de *fine forge*; elle a moins de corps que celle de Saint-Étienne, et résiste moins au vent du soufflet. Cette houille, brûlée sur grille, produit une chaleur extrême; mais par sa fusion pâteuse elle intercepte le courant d'air, brûle les grilles et exige beaucoup de soin de la part du chauffeur.

2° *Houilles grasses et dures*. Ces houilles diffèrent des houilles maréchales par une moindre fusibilité; leur coke est plus dense et le meilleur pour les hauts fourneaux.

3° *Houilles grasses à longues flammes*. Ces houilles sont encore moins collantes que les précédentes, les fragments s'agglutinent seulement; ces houilles sont les meilleures pour les grilles. Sous ce rapport, la houille de Mons connue sous le nom de *flénu* est en première ligne. Le cannel-coal du Lancashire appartient à cette variété.

4° *Houilles sèches à longues flammes*. Ces houilles donnent un coke à peine fritté; souvent même les fragments n'ont qu'une adhérence très-faible. Elles sont employées pour les grilles; elles brûlent avec une flamme longue, mais de peu de durée, et ne peuvent pas produire une chaleur aussi intense que les houilles précédentes.

5° *Houilles sèches qui brûlent sans flammes*. Ces houilles donnent un résidu pulvérulent; elles brûlent difficilement et sont principalement employées pour la cuisson des briques et de la chaux, dans les brasseries pour la dessiccation du malt, et dans l'économie domestique.

199. *Anthracites*. L'anthracite ne change que très-peu d'aspect par la calcination, et les fragments ne se collent pas. Il brûle très-difficilement, et n'est guère employé en Europe que pour la cuisson

des briques et de la chaux ; mais aux États-Unis d'Amérique on en fait une consommation immense pour les foyers domestiques et pour les chaudières, et dans le pays de Galles on commence à l'employer dans les hauts fourneaux.

Les houilles, en sortant de la mine, ne renferment qu'une très-petite quantité d'eau qui ne s'élève jamais à 0,02 ; mais comme elles sont rarement abritées dans les transports et dans les lieux où elles sont accumulées, elles peuvent en contenir des quantités très-considérables, surtout quand elles sont menues.

200. *Composition des houilles.* Les premières analyses des combustibles fossiles ont été faites par Thomson ; mais elles sont très-inexactes, parce que l'analyse organique n'avait pas atteint le degré de perfection auquel elle est parvenue. Quelques années après, Karstein a donné la composition d'un grand nombre de variétés de houilles ; mais, d'après M. Regnault, ces compositions, quoique plus exactes que celles de Thomson, sont loin de la vérité : la quantité d'hydrogène y est trop faible presque constamment de moitié.

201. Le tableau suivant donne, d'après M. Regnault, la composition des lignites et des houilles. Les houilles, avant d'être analysées, avaient été complètement desséchées à la température de 120°. Les pertes ont varié de 1,36 à 1,60. La quantité d'azote est en général très-faible dans les anthracites et dans les autres combustibles, elle varie de 1,5 à 2. D'après cela, on a regardé les volumes réunis de l'oxygène et de l'azote comme représentant le volume du premier gaz.

J'ai ajouté à ce tableau les puissances calorifiques des combustibles, en admettant qu'elles résultent du carbone et de l'excès d'hydrogène qu'ils contiennent et, en prenant d'abord les chiffres 7800 et 23640 pour les puissances calorifiques du carbone et de l'hydrogène, et ensuite les nombres qui résultent des expériences de Dulong.

HOUILLES ET ANTHRACITES.



89

ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

DÉSIGNATION des COMBUSTIBLES.	LIEUX d'où ILS PROVIENNENT.	DENSITÉ.	NATURE du COKE.	POIDS DU COKE.	COMPOSITION.				HYDROGÈNE EN EXCÈS.	PUISSANCE CALORIFIQUE, en prenant 7800 pour le carb. et 226,60 pour l'hydrogène.	PUISSANCE CALORIFIQUE, en prenant 7170 pour le carb. et 217,42 pour l'hydrogène.
					CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE ET AZOTE.	CENDRES.			
COMBUSTIBLES DE LA FORMATION CARBONIFÈRE.											
Anthracites.	Pensylvanie.	1,462	Pulvérulent. . .	84,83	90,45	2,43	2,45	4,67	2,09	7553	7211
	Pays de Galles.	1,348	<i>Dito</i>	89,72	92,56	3,33	2,53	1,58	2,98	7923	7672
	Mayenne.	1,367	<i>Dito</i>	89,96	91,98	3,92	3,16	0,94	3,48	7999	7614
Houilles grasses et dures.	Rolduc.	1,343	<i>Dito</i>	86,96	91,45	4,18	3,12	2,25	3,95	8060	7930
	Alais (Rochebelle).	1,322	Boursoufflé. . . .	76,29	89,27	4,85	4,47	1,41	4,23	7892	7869
Houilles grasses maréchaies.	Rive-de-Gier (P. Henry).	1,315	<i>Dito</i>	73,34	87,85	4,90	4,29	2,96	4,30	7868	7793
	Rive-de-Gier, 1.	1,298	Très-boursouf. . .	66,72	87,45	5,14	5,63	1,78	4,36	7851	7437
	(Grand' Croix), 2.	1,302	<i>Dito</i>	68,36	87,79	4,86	5,91	1,44	4,04	7802	7554
	Newcastle (Richardson).	1,280	<i>Dito</i>	"	87,95	5,24	5,41	1,40	4,49	7921	7866
	Fleu de Mons, 1.	1,276	Boursoufflé. . . .	"	84,67	5,29	7,94	2,10	4,18	7592	7523
	" 2.	1,292	<i>Dito</i>	"	83,87	5,42	7,03	3,68	4,44	7590	7556
	Cimetière, 1.	1,288	<i>Dito</i>	67,33	82,04	5,27	9,12	3,57	4,00	7344	7270
	Rive-de-	1,294	<i>Dito</i>	66,11	84,83	5,61	6,57	2,99	4,69	7724	7853
Houilles grasses à longues flammes.	Gier.	1,298	<i>Dito</i>	61,88	82,58	5,59	9,11	2,72	4,32	7462	7420
	Couzon.	1,311	<i>Dito</i>	60,23	81,71	4,99	7,98	5,32	3,88	7290	7206
	Lavaysse.	1,284	<i>Dito</i>	52,77	82,12	5,27	7,48	5,13	4,23	7405	7357
	Lancashire (Cannelcoal)	1,317	<i>Dito</i>	55,35	83,75	5,66	8,04	2,55	4,54	7605	7582
	Épinac.	1,353	<i>Dito</i>	59,97	81,12	5,10	11,25	2,53	3,53	7161	7034
	Commentry.	1,319	<i>Dito</i>	63,16	82,72	5,29	11,75	0,24	3,65	7314	7158
Houilles sèches à longues flamm.	Blanzy.	1,362	Fritté.	54,72	76,48	5,23	16,01	2,28	3,09	6695	6556
COMBUSTIBLES DES TERRAINS SECONDAIRES.											
Anthracite.	Lamure.	1,362	Pulvérulent. . .	89,5	89,77	1,67	3,99	4,57	1,49	7354	7048
<i>Dito</i>	Macot.	1,919	<i>Dito</i>	88,9	71,49	0,92	1,12	26,47	0,79	5762	5400
Houille.	Obernkirchen.	1,279	Très-boursouf. . .	77,8	89,50	4,83	4,67	1,00	4,27	7990	7900
<i>Dito</i>	Céral.	1,294	Fritté.	53,3	75,38	4,74	9,02	1,86	3,66	6744	6688
<i>Dito</i>	Noroy.	1,410	Pulvérulent. . .	51,2	63,28	4,35	13,17	19,20	2,77	5589	5297
Jayet.	Saint-Girons.	1,316	Fritté.	42,5	72,94	5,45	17,53	4,08	3,35	6481	6394
<i>Dito</i>	Bélertat.	1,305	<i>Dito</i>	42,0	75,41	5,79	17,91	0,89	3,64	6761	6444
COMBUSTIBLES DES TERRAINS TERTIAIRES.											
Lignite parfait.	Dax.	1,272	Pulvérulent. . .	49,1	70,49	5,59	18,93	4,99	3,32	6242	6207
<i>Dito</i>	Bouches-du-Rhône.	1,254	<i>Dito</i>	41,1	63,88	4,58	18,11	13,43	2,41	5552	5437
<i>Dito</i>	Mont-Mésiner.	1,351	<i>Dito</i>	48,5	71,71	4,85	21,67	1,77	2,25	6125	5923
<i>Dito</i>	Basses-Alpes.	1,276	<i>Dito</i>	49,5	70,02	5,20	21,77	3,01	2,59	6073	5921
Lignite imparf.	Grèce.	1,185	Analogue au	38,9	61,20	5,00	24,78	9,02	2,03	5252	5093
<i>Dito</i>	Cologne.	1,100	charbon de	36,1	63,29	4,98	26,24	5,49	1,83	5368	5173
<i>Dito</i>	Usnach (bois fossile).	1,167	bois.	"	56,04	5,70	36,07	2,19	1,38	4697	4497
Lignite passant au bitume.	Ellebogen.	1,157	Boursoufflé. . . .	27,4	73,79	7,46	13,79	4,96	5,81	7126	7309
<i>Dito</i>	Cuba.	1,197	<i>Dito</i>	39,0	75,85	7,25	12,96	3,94	5,70	7263	7418
Asphalte.	1,063	<i>Dito</i>	9,0	79,18	9,30	8,72	2,80	8,26	8130	8547

202. Il résulte de ces tableaux que , pour les houilles grasses maréchaies la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène est à peu près



de 11 pour cent, et que les quantités d'oxygène et d'hydrogène sont à peu près égales; que pour les houilles grasses et dures, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène est à peu près 9, et que la différence des poids de ces deux corps est encore très-petite; que pour les anthracites la somme de ces deux corps descend à 5 ou 6, et que la quantité relative d'hydrogène diminue; que pour les houilles sèches à longue flamme, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène s'élève jusqu'à 16, et que la proportion d'hydrogène diminue; enfin, que dans les lignites, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène s'élève jusqu'à 25, et qu'en même temps la proportion d'hydrogène diminue. Ainsi les houilles grasses passent aux houilles sèches non flambantes par la diminution de l'oxygène et de l'hydrogène, et aux houilles sèches flambantes, et aux lignites, par une augmentation de ces deux éléments, plus rapide pour l'oxygène que pour l'hydrogène.

Alors la faculté de se ramollir au feu ne provient pas comme on l'avait supposé, seulement de l'excès de l'hydrogène sur l'oxygène, mais encore de la quantité absolue de ces deux corps.

203. Comme nous l'avons déjà dit, on trouve une infinité de variétés de houilles entre les lignites et les houilles grasses marécales, et entre ces dernières et les houilles sèches non flambantes.

204. La houille se vend à la voie de 15 hectolitres ras. Sur les mines l'hectolitre comble est plus usité; 4 hectolitres combles valent à peu près 5 hectolitres ras. La voie de la plupart des mines de Mons pèse à très peu près 1200 kil.

Voici le poids de l'hectolitre ras de houille de diverses localités.

Houille de la mine de Labarthe.....	88 ¹
Houille d'Auvergne et de Blanzay.....	87
Houille de la mine de Combelle.....	86
Houille de la mine de Lataupe.....	85
Houille de la mine de Saint-Étienne.....	84
Houille de Decise.....	83
Houille du Creusot.....	79
Houille de Mons.....	80

Ces nombres doivent un peu varier avec la grosseur des morceaux de houille, avec la manière de mesurer, et avec l'humidité plus ou moins grande de la houille.



205. Les quantités de cendres que produisent les houilles dans les foyers, excèdent de beaucoup celles qui sont données par les analyses chimiques, parce que ces cendres contiennent toujours une certaine quantité de coke. Le tableau suivant renferme les résultats obtenus à la fabrique de tabac de Paris : on a opéré sur plus de 600^k de houille.

Quantités de cendres, scories et parcelles de coke, produites par différentes houilles à l'état de gaillettes.

Houille dite ancien Anzin.....	0,079
Houille de Newcastle (collante).....	0,071
Houille de Denain (collante).....	0,082
Houille dite nouvel Anzin (collante).....	0,057
Houille de Decize (collante).....	0,101
Houille des veines de Mathon et du Buisson..	0,095
Houille dite Flenu première qualité.....	0,095

206. Les charbons provenant de la même mine se distinguent en gros, gaillette et menu, et ces différentes sortes, qui ne diffèrent que par la grosseur des morceaux, se vendent à des prix très-différents. A Saint-Étienne, le gros charbon se vend 2 francs les 100^k; la gaillette, 1,25; le menu 0,25 à 0,50. Les charbons menus sont peu estimés, parce que partout, excepté en France, on ne les emploie pas pour les grilles; ils ne servent généralement qu'à la fabrication du coke, et à la préparation de briquettes (pâte de houille menue et de $\frac{1}{15}$ d'argile), qui sont employées dans le chauffage domestique. Dans les grands charbonnages il est difficile de vendre tout le menu qu'on extrait, et partout il en reste de masses énormes sur les lieux d'exploitation. D'après M. Landrin, sur les 25,000,000 de quintaux métriques exploités en France, plus de 12,000,000 de menu restent sans usage. Le même ingénieur pense qu'on pourra facilement les utiliser en leur faisant éprouver une légère calcination seulement suffisante pour les agglomérer; le résidu serait analogue à la houille maigre.

207. L'Angleterre est le pays le plus riche en houille; les Pays-Bas et la France viennent ensuite; les autres contrées du globe n'offrent que des exploitations beaucoup moins importantes. Le tableau suivant indique à peu près les quantités de houilles extraites annuellement dans les différents pays.

Pays.	Quintaux métriques.
Angleterre.....	75,000,000
Pays-Bas, Belgique, provinces prussiennes rhénanes, duché du Luxembourg.....	31,000,000
France.....	20,000,000
Prusse et Silésie.....	3,000,000
Hanovre et principautés de la Confédération germanique..	3,000,000
États-Unis d'Amérique.....	1,500,000
Saxe.....	600,000
Autriche.....	340,000
Bavière.....	160,000

Ce tableau, qui date de plusieurs années, présente certainement des quantités beaucoup trop petites, surtout pour la Belgique et la France. Pour la France, en 1834, la production de houille était de 25,000,000 de quintaux métriques. D'après les Annales des mines, à la même époque, la production de la France en combustibles minéraux était telle que l'indique le tableau suivant :

NATURE DU COMBUSTIBLE.	POIDS EN QUINTAUX MÉTRIQUES.	VALEUR EN FRANCS.
Houille. . .	19,919,656	18,723,656
Lignite. . .	873,743	779,369
Anthracite.) d'après les relevés officiels.	548,057	767,871
$\frac{1}{5}$ en sus pour évaluations incomplètes.	3,556,914	3,378,449
Tourbe.	3,372,184	2,995,738
		26,644,883

Nous donnerons sur les houillères qui approvisionnent Paris quelques détails tirés d'un mémoire de M. Michel Chevalier, imprimé en 1830 dans les Annales de l'industrie.

208. De 1818 à 1827, la consommation de Paris s'est élevée de 437,000 à 939,000 hectolitres ras. Alors la consommation de la banlieue ne dépassait pas 300,000^h. En comptant l'hectolitre à 80^h, la consommation de Paris et de la banlieue était environ de 900,000 quintaux métriques.



Dans cette quantité, les charbons du Nord figuraient à peu près pour moitié. Depuis, la consommation a beaucoup augmenté.

209. Les mines qui alimentent Paris, sont celles de Mons, d'Anzin, d'Aniche, de Saint-Étienne, d'Auvergne, de Blanzÿ, du Creusot, de Decize, de Fins, et d'Épinac.

210. En allant de l'extérieur au centre du bassin de Mons, on trouve d'abord des veines de charbon sec, brûlant sans flamme et sans fumée, très-propre à la cuisson de la chaux et des briques; sa densité est 1,3; au feu il perd de 11 à 14 pour cent. Ce charbon, à structure schisteuse, a peu de consistance: il n'est pas exporté. Après vient le charbon *fine forge*, principalement employé pour la forge; il est fragile, friable, sans être cependant pulvérulent et tachant comme le précédent. Ce charbon est très-propre à la fabrication d'un coke serré très-bon pour la métallurgie; son rendement en coke est en grand de 65 à 68 pour cent; sa densité est de 1,27. Dans des essais en petit, la perte par la calcination a été de 24 pour cent, et on a trouvé de 1,11 à 2,15 pour cent de cendres. Le coke fait en grand avec de la houille en morceaux a donné 4 pour cent de cendres, et celui qui provenait du menu un peu inférieur 11 pour cent. La houille *fine forge* de Mons est moins bonne pour la forge que celle de Saint-Étienne. Les exploitations de cette houille sont les plus infectées de *grisou*.

Au-dessous se trouvent les *charbons durs*; ils se distinguent des précédents par des plans de clivage, les uns perpendiculaires, les autres parallèles aux couches; les fragments affectent ordinairement une forme rectangulaire. Les charbons durs sont collants, et donnent de très-bon coke pour les fonderies et les hauts fourneaux; ils conviennent à la grille, sur laquelle ils brûlent avec une chaleur vive et soutenue; mais ils sont lents à s'embraser. En grand ils donnent 55 pour cent de coke. Dans des essais de laboratoire, on a trouvé de 1,287 à 1,262 pour sa densité, et de 1,22 à 4,4 pour cent de cendres.

Au centre du bassin on trouve un charbon désigné sous le nom de *flenu*, qui a acquis une grande réputation. Le *flenu* est brillant, bien taillé en rhomboïdes obliques; les faces portent des stries caractéristiques; il ne se réduit pas en poussière, mais en fragments à surface lisse. Il est facile à embraser, et brûle avec une flamme longue, vive et claire; il renferme très-peu de cendres et de pyrites, et ne donne que peu de

mâchefer; il est assez collant pour que le menu ne passe pas à travers la grille, mais pas assez pour s'agglutiner de manière à intercepter le courant d'air; toutes ces conditions réunies forment du *flenu* le meilleur charbon pour grilles. Le coke du flenu est moins serré et moins dur que celui qui provient des charbons durs et de *fine forge*, et serait moins convenable pour les travaux métallurgiques. Sa densité varie de 1,254 à 1,30; la perte au feu s'élève de 29 à 38 pour cent. Le charbon *flenu*, qui est pyriteux et en poussière, s'échauffe lorsqu'il est conservé en grande masse, et s'embrase quelquefois. Le *flenu* est le seul charbon de Mons qui arrive à Paris en grande quantité.

Les charbons de Mons en morceaux d'environ un décimètre cube, portent le nom de *gaillette*. Ceux qui sont entraînés par un râteau dont les dents sont espacées de 6 à 7 centimètres, portent le nom de *gailletterie*. Ce qui échappe au râteau porte le nom de *fin*. Les charbons flenu et durs sont vendus à des prix différents à l'état de gaillette, de gailletterie et de *fins*; les charbons *fine forge* se vendent tels qu'ils sortent du puits.

Les mines de Mons produisent annuellement de 12 à 13 millions d'hectolitres combles. Les charbons se vendent sur le rivage du canal de Mons à Condé. L'unité de mesure est le *muid*, qui équivaut à 4 mannes ou hectolitres combles. Le poids de l'hectolitre comble de gaillette flenu varie de 106 à 120 kil. Celui du gros de charbon dur est d'environ 125 kilog.; et celui du charbon fine forge gailletteuse de 100 à 110 kilog.

211. C'est le même bassin houiller qui est exploité à Anzin, à Raismes, à Denain, à Fresne et à Vieux-Condé. Mais les charbons de ces différentes exploitations diffèrent complètement.

Le charbon d'Anzin est gras, collant, tenant bien le feu, peu sulfureux et assez propre à la fabrication du coke, médiocrement convenable à la forge comparé à celui de Saint-Étienne et même au *fine forge* de Mons. Il présente beaucoup d'analogie avec le charbon dur de Mons. Il est employé pour grille, mais il est inférieur au *flenu*, parce qu'il est plus terreux, qu'il donne plus de mâchefer, qu'il se boursoufle sur la grille et fatigue le chauffeur. Suivant la grosseur des morceaux, il est vendu sous le nom de *gros* ou *gaillette*, ou de *gailletteux*, ou de *forge gailletteuse*. Des essais de laboratoire ont donné



1,284 pour sa densité, 25 pour la perte au feu et 3,50 pour cent de cendres.

Le charbon de Raismes est un charbon de grille, maigre, plus brillant et plus gailletteux que celui d'Anzin; mais il est plus sulfureux, plus difficile à embraser, il brûle plus lentement et donne une chaleur moins vive.

Le charbon de Fresnes et de Vieux-Condé est un charbon sec, analogue à l'anthracite, brûlant lentement sans flamme ni fumée, tantôt solide, à cassure conchoïde, tantôt se divisant suivant des plans perpendiculaires au lit, d'autres fois fragile et portant des stries exactement pareilles à celles *du flenu*. Son usage spécial est la cuisson de la brique et de la chaux. Sa densité varie de 1,354 à 1,369; sa perte au feu est de 7,20 à 9,60; la quantité de cendres qu'il laisse après sa combustion est de 0,75 à 4,25.

212. Les charbons d'Aniche ont la plus grande analogie avec ceux d'Anzin, mais ils sont plus propres au travail de la forge et à la fabrication du coke. L'extraction annuelle était, en 1830, d'environ 300,000 hectolitres combles. Il en vient peu à Paris.

213. Le bassin houiller de Saint-Étienne et de Rive-de-Gier renferme deux espèces de houille. La première, la houille *maréchale*, si estimée pour la forge, est d'un beau noir, brillante, à structure schisteuse, tendre, très-collante et passablement pyriteuse. Sa densité est de 1,28 à 1,34 elle perd au feu de 30 à 33 pour cent; elle renferme de 2 à 2 $\frac{1}{2}$ de cendres. Elle brûle avec une chaleur extrême, et forme beaucoup de mâchefer. C'est un charbon plus chaud que le *flenu* de Mons, mais dont la combustion est plus difficile à régler. Dans les fours, il donne 60 pour cent de coke, et 50 par la calcination dans les fourneaux en plein air. La seconde variété de houille de Saint-Étienne diffère de la première en ce qu'elle est beaucoup plus inflammable et moins collante, et qu'elle convient mieux à la combustion sur grille.

214. Le charbon d'Auvergne est un charbon de grille; il donne un coke solide. Sa densité varie de 1,35 à 1,45. Sa combustion a lieu avec une flamme vive, claire, et une chaleur soutenue; il est un peu difficile à allumer, et convient aux grands foyers qui exigent une haute température. La concession de Combelle fournit un charbon différent qui ne colle pas, qui est facile à embraser, flambant, moins fragile, et qui

résiste moins bien au feu. Les mines d'Auvergne fournissent encore une houille sèche non flambante, propre à la cuisson de la brique et de la chaux.

215. Le charbon du Creuzot est brillant, peu schisteux, très-collant, et convenable pour la forge et la fabrication du coke. Il donne 68 pour cent de coke, et renferme 3,4 pour cent de cendres. On trouve encore au Creuzot un gisement considérable de charbon maigre flambant, très-léger, dont la consommation est bornée.

216. Le charbon de Blanzay n'est pas collant, et par conséquent impropre à la fabrication du coke. Il est solide, non tachant, très-gailloteux, peu pierreux, mais pyriteux. Sur la grille il s'agglutine sans se boursouffler; il brûle avec une flamme vive mais de peu de durée; c'est un charbon léger, plus léger que le *flenu*. Au feu il perd 40 pour cent. On ne saurait l'employer aux usages qui exigent une forte chaleur, à moins de le mêler avec des houilles grasses. Exposé à l'air, il s'effleurit et perd une grande partie de sa puissance calorifique. Sa densité varie de 1,22 à 1,28.

Le charbon de Decize est flambant et sulfureux comme celui de Blanzay, mais plus collant et plus durable au feu; c'est un des charbons les moins estimés de ceux qui arrivent à Paris. Sa densité est 1,25; au feu il perd 30 pour cent.

217. Le charbon de Fins se rapproche beaucoup de celui de Saint-Étienne; il donne 70 pour cent de coke. Dans le même département (l'Allier) se trouvent les mines de Commentry, qui fournissent un charbon moins collant, moins bon à la forge, très-propre à la fabrication du coke et à la combustion sur grille, mais un peu pyriteux. Il produit 66 pour cent de coke.

218. Les couches de houille d'Épinac renferment deux espèces de ce combustible. La première est très-collante; elle se boursouffle au feu et brûle avec une grande vivacité. L'autre est plus terne, plus tachante, peu homogène, beaucoup plus terreuse et plus pyriteuse; elle est moins collante et donne moins de chaleur que la première.

219. *Anthracite*. L'anthracite est un combustible très-difficile à brûler; il en existe des mines puissantes dans les États-Unis d'Amérique, dans le pays de Galles et en France; mais on est loin, surtout en France, de l'utiliser dans tous les cas où l'on emploie la houille. Nous rapporte-



rons à ce sujet un extrait d'un mémoire très-intéressant de M. Michel Chevalier, inséré dans le journal d'architecture.

220. « Dans les États-Unis, l'État de Pensylvanie renferme trois gîtes puissants d'anhracite. L'exploitation de ces mines n'a produit, en 1820, que 371 tonnes; en 1830, la production était de 177,530 tonnes; et en 1839 elle s'est élevée à 798,122. La densité de l'anhracite de Pensylvanie varie dans les diverses localités. Dans le même bassin, l'inflammabilité est en raison inverse de la densité. La consommation de l'anhracite, restreinte d'abord à Philadelphie et à sa banlieue, s'est répandue au loin; actuellement les familles aisées de New-York, de Boston, de Washington et des autres cités du littoral, emploient exclusivement l'anhracite. Enfin, des essais récents paraissent devoir en étendre encore l'usage; car, à l'exemple de M. Crane qui a appliqué l'anhracite du pays de Galles à la fusion des minerais de fer, MM. Guiteau et Baughman, maîtres de forges à Mauch Chunk, près du Lehigh, en Pensylvanie, s'en sont servis avec succès dans leur haut fourneau, à l'exclusion de tout autre combustible.

221. « On n'est parvenu qu'à la longue à brûler l'anhracite sur des grilles, en petite quantité, pour les usages domestiques, et même à en tirer un parti quelconque. Ce fut la guerre qui, faisant sentir aux manufacturiers l'aiguillon de la nécessité, donna naissance à la pensée d'utiliser les gîtes d'anhracite pour la consommation des fabriques de la Pensylvanie, car alors on ne soupçonnait même pas qu'il pût jouer un rôle dans le chauffage des maisons. De 1812 à 1815, les escadres anglaises bloquaient étroitement les ports de l'Union. Installées audacieusement dans les baies de la Chesapeake et de la Delaware, elles commandaient de là les principaux passages. Les manufactures indigènes, accoutumées à s'approvisionner, par la voie maritime, des houilles de l'Angleterre, de la Virginie et de la Nouvelle-Écosse, étaient dans un embarras extrême. On songea donc au combustible minéral que la nature avait placé en masse aux sources du Schuylkill. On en fit venir à grands frais, en charrettes, par de mauvais chemins, jusqu'à Philadelphie, et on en chargea les fourneaux et les chauffes des chaudières, mais sans le moindre succès; l'anhracite se montra rebelle à tous les efforts. On varia les essais, mais toujours inutilement; et l'un des principaux manufacturiers de Philadelphie, M. J. P. Wetherill, me montrait,

en 1835, la place où vingt ans auparavant, désespérant de réussir, il avait fait creuser un trou en terre pour y enfouir ce charbon, regardé dès lors comme incombustible, et rebuté comme un jeu décevant de la nature.

« Cependant un accident vint démontrer positivement que l'anhracite pouvait s'embraser. Un tas d'anhracite gisait abandonné sur les bords du Schuylkill, près de la ville. Une nuit, le propriétaire d'une maison attenante fut réveillé en sursaut par une grande lueur accompagnée de décrépitements : c'était le monceau d'anhracite qui avait pris feu et qui flambait. On renouvela bientôt les essais, et cette fois on fut plus heureux. Actuellement, l'anhracite est employé à peu près à tous les usages possibles, domestiques et industriels.

222. « La France est riche en mines d'anhracite. Nous en avons sur les bords de la Mayenne, aux environs de Sablé, qui, utilisées pour la cuisson de la chaux, ont déjà produit une révolution dans l'agriculture des départements voisins. Dans l'Isère, le sol recèle une quantité considérable d'anhracite. On y trouve, à La Mure, des couches de 10 mètres et plus d'épaisseur. Il y a douze ou treize ans on essaya, mais sans succès, de se servir de l'anhracite de l'Isère pour la fusion des minerais de fer. On exploite également l'anhracite dans le département des Hautes-Alpes. Dans le bassin houiller d'Anzin, les couches de Fresnes et de Vieux-Condé sont formées d'anhracite. On commence à exploiter l'anhracite dans la Côte-d'Or. D'autres gîtes, peu connus, paraissent exister sur plusieurs points, et notamment dans le département de l'Allier, près de la célèbre mine de Commentry.

223. « Ce combustible n'est employé en France que pour la cuisson de la chaux et du plâtre, et pour le chauffage domestique des classes peu aisées ; car ce qui en est absorbé par d'autres usages, tels que la clouterie et le chauffage de quelques chaudières, est tout à fait borné : c'est donc un sujet qui mérite de fixer l'attention de l'administration et des industriels. Il est hors de doute que la consommation de l'anhracite s'étendrait beaucoup si l'on recourait à des appareils ou à des méthodes de fabrication en rapport avec sa nature. Ainsi, la parfaite réussite de la tentative de M. Crane, en Angleterre, pour appliquer l'anhracite à la fusion des minerais de fer, donne à penser que si l'on reprenait l'expérience de Vizille (Isère), en profitant des données nouvelles



ANTHRACITE.



du pays de Galles, ce serait cette fois avec profit. Les heureux essais opérés aux États-Unis, pour substituer l'anthracite au bois sur les bateaux à vapeur, autorisent à croire que sur quelques-uns de nos fleuves éloignés des mines de houille, ce combustible rendrait de grands services. Peut-être même là où la houille est à des prix assez modérés, lutterait-il avec avantage contre elle, à cause des caractères qui le distinguent. Partout où l'hiver est rigoureux, comme dans les départements de l'Isère et du Rhône, à Grenoble et à Lyon, ces caractères particuliers devraient lui mériter la préférence sur la houille pour le chauffage domestique, celle de toutes les destinations qui absorbe le plus de combustible. J'ai pu essayer à Paris, dans un poêle d'Olney, l'anthracite de Sablé, après en avoir séparé le poussier, et celui de l'Isère, qui est beaucoup moins pulvérulent, qui même ne l'est pas du tout, et qui ressemble à celui de la Pensylvanie. Dans ces expériences, l'anthracite français s'est comporté aussi bien que celui des États-Unis.

224. « L'exploitation de l'anthracite suit, en France, une marche progressive; voici comment elle s'est développée de 1814 à 1839, d'après les tableaux officiels de l'administration des mines :

Exploitation de l'anthracite en France.

ANNÉES.	INDICATION DES DÉPARTEMENTS.				TOTAL.
	HAUTES-ALPES.	ISÈRE.	MAYENNE.	SARTHE.	
1814	ton.	ton.	ton.	ton.	ton.
»	»	4,776	»	»	5,776
1815	»	5,823	»	»	5,823
1816	»	4,795	»	»	4,795
1817	»	4,641	»	»	4,641
1818	»	4,454	»	640	5,094
1819	»	5,036	1,235	1,888	8,159
1820	»	4,530	1,193	1,794	7,517
1821	100	4,361	542	760	5,763
1822	50	4,376	2,320	1,600	8,346
1823	100	4,634	1,820	2,900	9,454
1824	1,350	1,993	2,800	4,280	10,423
1825	500	6,909	6,340	9,980	23,729

ANNÉES.	INDICATION DES DÉPARTEMENTS.				TOTAL.
	HAUTES-ALPES.	ISÈRE.	MAYENNE.	SARTHE.	
1826	ton. 347	ton. 7,994	ton. 3,850	ton. 3,000	ton. 15,194
1827	1,620	9,364	4,426	10,760	25,870
1828	1,656	10,631	4,419	13,392	30,098
1829	2,590	10,694	7,051	12,672	53,007
1830	2,885	10,625	6,835	10,885	31,229
1831	1,475	10,689	8,296	10,638	31,098
1832	1,840	13,485	11,328	12,330	38,983
1833	2,205	15,572	15,563	12,528	45,869
1834	1,960	16,314	18,409	18,125	54,809
1835	1,832	17,022	23,190	16,437	58,481
1836	2,409	23,348	22,089	12,788	60,635
1837	2,220	23,397	22,494	20,286	69,157
1838	2,749	23,070	21,315	19,505	67,469

« Pendant que la production officiellement constatée d'anthracite s'élevait de 5,776 ton. à 67,469, après avoir atteint, en 1837, 69,157, celle de la houille montait de 646,534 ton. à 2,944,695.

« Si, pour prendre des termes de comparaison moins éloignés, on mettait en regard les deux années 1830 et 1838, on trouverait :

« Pour l'anthracite, une progression de 31,229 ton. à 67,469, ou de 116 pour cent.

« Pour la houille, une progression de 1,500,013 ton. à 2,944,695, ou de 96 pour cent.

« Il résulte du tableau précédent, que le progrès de l'exploitation de l'anthracite est dû principalement à l'emploi de la chaux comme amendement des terres dans la Sarthe et la Mayenne. Les usages métallurgiques, le chauffage domestique, celui des chaudières des manufactures et des bateaux à vapeur, opéreront en peu de temps, sous ce rapport, lorsqu'on le voudra bien, une révolution plus marquée encore. A cet égard, l'administration ne saurait trop exciter le zèle des hommes industriels qui ont mis en valeur les mines de la Mayenne et de la Sarthe, et stimuler les détenteurs des mines de l'Isère, qui paraissent ignorer la fortune qu'ils ont entre les mains. Elle devra aussi reconnaître que c'est pour elle un devoir de



pousser à la consommation de ce combustible en encourageant ou en entreprenant à ses frais l'établissement des routes, des canaux ou des chemins de fer dont il a besoin pour s'écouler. »

225. *Puissance calorifique des houilles.* Le tableau pag. 89 renferme les puissances calorifiques des houilles calculées d'après leur composition, en admettant d'abord les nombres 7800 et 23640 pour celles du carbone et de l'hydrogène, et ensuite les nombres 7170 et 34742, qui résultent des expériences de Dulong. C'est une chose remarquable, que, malgré la différence de ces nombres, les puissances calorifiques pour le même combustible diffèrent fort peu. La moyenne de tous les nombres inscrits dans le tableau s'éloigne peu de 7600, qui correspond à une houille qui renfermerait 83,75 de carbone, 4,54 d'hydrogène en excès, le reste étant formé d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, et de matières étrangères. Ce même nombre correspond à 11^k,69 d'eau réduite en vapeur, en supposant que toute la chaleur soit utilisée et que les cendres ne renferment point de coke. Voyons si les expériences faites sur une grande échelle s'accordent avec ce résultat.

226. Nous ne parlerons pas des nombreuses expériences qui ont été faites sur des chaudières à vapeur, en employant différentes espèces de houille, et qui avaient pour objet de reconnaître celles qui, dans les circonstances des expériences, produisaient le plus grand effet utile, parce que les différences observées pouvaient tenir aux dispositions du foyer qui n'était pas le plus convenable à chaque variété de houille, et que d'ailleurs dans aucun cas la température et la composition de l'air brûlé à son entrée dans la cheminée n'ont été déterminées. Mais nous rapporterons plusieurs expériences qui permettent de déterminer avec une suffisante exactitude la puissance calorifique des houilles employées.

227. Dans une expérience faite à Vesserling, on a obtenu 6^k,27 de vapeur par kilogramme de houille; la fumée était à 500 degrés, et contenait encore de 10 à 12 pour cent d'oxygène. Comme dans ce cas il faut à peu près 18 mètres cubes ou 23^k d'air pour brûler 1^k de houille, le nombre d'unités de chaleur entraînées par la fumée était de $\frac{23 \times 500}{4} = 2875$, ce qui correspondait à $\frac{2875}{650} = 4^k,4$ de vapeur. Il suit de là que, si toute la chaleur avait été utilisée, on aurait produit $6,27 + 4,4 = 10^k,67$ de vapeur;

ce qui donne pour la puissance calorifique de la houille employée 6935. Et comme cette houille a donné de 14 à 20 pour cent de résidu, en moyenne 15, il faudrait ajouter $\frac{1}{10}$ au nombre précédent pour obtenir la puissance calorifique moyenne d'une houille qui ne renfermerait que 5 pour cent de cendres. Cette puissance calorifique serait alors 7629.

228. Voici enfin deux expériences faites avec beaucoup de soin, par une commission du comité des arts économiques, de la Société d'encouragement, qui ont donné des résultats bien voisins de ceux que nous venons de rapporter.

Dans une chaudière à vapeur d'une disposition particulière, à foyer intérieur et entièrement exposée à l'air, imaginée par Lemare, on a brûlé en trois heures cinquante minutes 36^k37 de houille, et on a vaporisé $297^k,75$ d'eau. A ce produit il faut d'abord ajouter la chaleur perdue par le contact de l'air et par le rayonnement de la chaudière. La surface de la chaudière étant de 7 mètres, en admettant $1^k,87$ pour la quantité de vapeur correspondante à la chaleur perdue par mètre carré et par heure, la perte par heure a été 13^k , et pour trois heures cinquante minutes, à peu près 50^k , qu'il faut ajouter aux $297,75$ de vapeur produite, ce qui fait 347^k ; nombre qui correspond à $9^k,55$ de vapeur par kilogramme de houille. Enfin, il faut estimer en vapeur la chaleur perdue par la fumée. La température de la fumée et sa composition chimique n'ont point été observées; mais en supposant l'air à moitié brûlé, ce qui est le cas ordinaire, et la température seulement de 250 degrés, la quantité de vapeur correspondante serait pour chaque kilogramme de houille $\frac{23 \times 250}{4 \times 650} = 2,21$. Ainsi la puissance calorifique de la houille employée serait $(9,55 + 2,21) \times 650 = 11,76 \times 650 = 7644$.

229. Dans d'autres expériences faites avec une chaudière évaporatoire de Lemare, aussi à foyer intérieur, on a brûlé une fois 25 kilog. de bois et $91^k,1$ de houille, pour évaporer 1001^k d'eau en 5 heures; et une autre fois 20^k de bois et $98^k,40$ de houille pour vaporiser dans le même temps 1074^k d'eau. En admettant que 1^k de bois soit équivalent à $\frac{1^k}{2}$ de houille, les consommations de houille ont été de $103^k,6$ et $108^k,40$, et les quantités de vapeurs produites par 1^k de houille, de $\frac{1001}{103,6} = 9,66$, et $\frac{1074}{108,4} = 9,90$. La surface libre de la chaudière étant de $7^m,32$, la quantité de cha-



leur perdue estimée en vapeur était par heure de $7,32 \times 1,87 = 13,68$. Or, comme dans la première expérience on a consommé par heure $\frac{103,6}{5} = 20^k,72$, et dans la seconde $\frac{108,4}{5} = 21,68$, les quantités de vapeur pour chaque kilog. de houille, correspondantes aux quantités de chaleur perdues, sont $\frac{13,68}{20,72} = 0,66$ pour la première, et $\frac{13,68}{21,68} = 0,63$ pour la seconde, ce qui porte les quantités de vapeur qui auraient été produites sans le refroidissement de la chaudière, à $9,66 + 0,66 = 10,32$ pour la première expérience et à $9,90 + 0,63 = 10,53$ pour la seconde. Enfin, à ces deux nombres il faut ajouter la quantité de vapeur correspondante à la chaleur perdue par la fumée qui était à peu près à 200° ; ce qui donne $\frac{200 \times 23^k}{4 \times 650} = 1,8$. Ainsi, la puissance calorifique du combustible déduite de la première expérience, est $12,12 \times 650 = 7878$, et celle qui résulte de la seconde est $12,33 \times 650 = 8014$. Le charbon employé dans les deux cas était du flenu de Mons, qui avait été choisi avec beaucoup de soin.

230. Il résulte de ce qui précède, que la puissance calorifique des houilles déduite des expériences faites sur une très-grande échelle, diffère bien peu de celle qui est indiquée par leur composition chimique; cette différence est aussi petite qu'on pouvait l'espérer, dans des expériences aussi délicates, et qui d'ailleurs renferment une cause d'erreur dont il est presque impossible d'évaluer l'influence: c'est la quantité d'eau entraînée mécaniquement par la vapeur.

Désormais nous admettrons le nombre 7500, pour la puissance calorifique d'une houille moyenne, et le même nombre pour les anthracites.

231. *Pouvoir rayonnant.* Je n'ai point fait d'expériences directes sur le rayonnement de la houille, à cause de la difficulté de la faire brûler en petite masse; mais d'autres expériences ne me permettent pas de douter qu'il ne soit supérieur à celui du charbon de bois.

§ 8. — DU COKE.

232. Le coke (*charbon de terre épuré*) n'est autre chose que la houille

privée des matières volatiles qu'elle renferme. Le coke est presque uniquement formé de charbon et des substances terreuses que contenait la houille dont il provient. Le coke brûle presque sans flamme, et ne peut se maintenir en ignition qu'autant qu'il est en grande masse dans un foyer fermé; à l'air libre il s'éteint. La combustion du coke ne donne naissance qu'à de l'acide carbonique et à de l'oxyde de carbone.

233. Le coke est gris de fer, souvent d'un éclat métallique; il est tantôt en masses poreuses, légères, analogues à la pierre ponce, tantôt en masses seulement frittées, tantôt en poudre. On n'emploie jamais le coke que dans le premier état; il est alors fourni par les houilles grasses.

234. On se sert de deux procédés différents pour la fabrication du coke, la distillation et la combustion.

La distillation est uniquement employée dans les fabriques de gaz-light; mais le but de l'opération est moins d'obtenir du coke que les gaz combustibles qui se produisent dans la décomposition de la houille. Le coke préparé par ce procédé n'est pas convenable pour le traitement du fer. Aussi, pour cet objet et pour presque tous les autres usages, on prépare le coke par la combustion.

La fabrication du coke par combustion s'opère de différentes manières. La plus usitée dans les grandes exploitations consiste à former, sur un terrain battu, une masse conique de houille en morceaux, de 5 à 6 mètres de diamètre, et de 1 mètre de hauteur, en plaçant les plus gros fragments vers le centre et ménageant dans l'axe une cheminée comme dans les fourneaux à charbon. On allume par la cheminée; la combustion se propage, et finit après un certain temps par atteindre toute la masse. On recouvre de poussier de coke les parties où l'activité du feu est trop grande. La carbonisation à l'air libre dure de 40 à 48 heures; elle est terminée lorsque, toute la masse étant incandescente, il n'en sort point de fumée, et quand la flamme, de longue et rougeâtre qu'elle était d'abord, est devenue courte et blanche. Lorsque ces caractères se manifestent, on étouffe le feu avec du poussier de coke, et quand la température est diminuée, on achève le refroidissement du coke en l'étalant sur le sol; quelquefois on l'arrose avec une certaine quantité d'eau. Maintenant on préfère donner aux tas la forme d'un

demi-cylindre allongé; les dimensions les plus ordinaires sont 10 à 20 mètres de longueur, 2 à 3 mètres de largeur et 0,60 de hauteur. Par cette disposition, on économise la place et la main-d'œuvre.

235. En France, on emploie de préférence la carbonisation dans les fours. Ces fours sont tantôt circulaires avec une seule cheminée au centre, tantôt allongés avec une porte à chaque extrémité et une ou deux cheminées. La houille est introduite dans les fours préalablement chauffés au rouge; la chaleur y est maintenue par la combustion d'une partie des gaz qui se dégagent, au moyen d'un courant d'air qui pénètre dans le four, ou par les fissures de la porte, ou par des ouvertures qu'on y a pratiquées, ou par des orifices placés de chaque côté; dans ce dernier cas, l'air est amené dans le four sur plusieurs points. Dans toutes les dispositions de fours, les cheminées sont très-courtes. Les charges varient ordinairement de 20 à 25 hectolitres, et l'opération dure de 24 à 48 heures.

Le produit en poids de 100 parties de houille varie beaucoup avec la nature de la houille. Le tableau suivant renferme les résultats des expériences faites, en 1838, à la manufacture de tabac de Paris, par une commission composée de MM. Clément, Gueniveau et Lefroy.

Perte à la distillation.

Houille de Blanzv (Saône-et-Loire).....	0,44
Newcastle (Angleterre).....	0,395
Fleu première variété (Mons).....	0,39
Houille de Decize (Nièvre).....	0,365
Houilles des veines de Mathon et du Buisson (Belgique)...	0,36
Houille fleu deuxième variété.....	0,355
Houille dite nouvel Anzin.....	0,345
Houille de Denain.....	0,325
Houille dite ancien Anzin.....	0,255

236. Les fours donnent un plus grand produit que les meules, ils exigent moins de soin, et ne sont pas sujets aux accidents que la pluie et les grands vents peuvent occasionner dans les meules. Les fours sont surtout très-avantageux pour la carbonisation des houilles menues.

237. Quant au volume du coke produit, il varie avec la qualité des houilles, et pour une même houille avec le mode de carbonisation. Le rendement en volume est plus grand dans les meules que dans les fours.

En général, dans les grands appareils, le volume du coke diffère peu de celui de la houille qui l'a produit; cependant, pour les houilles très-grasses, le volume du coke excède souvent de 30 pour cent celui de la houille; pour les houilles maigres, il est plus petit.

Le mètre cube de coke à l'usage des hauts fourneaux pèse ordinairement 400 kilogrammes. A Paris, le coke provenant des usines à gaz pèse de 30 à 35 kilogrammes l'hectolitre comble; et celui qui provient des fours, de 40 à 45 kil.

238. En conduisant les fumées des fours à coke dans des chambres closes, le charbon léger qu'elles entraînent s'y dépose en grande partie; ce dépôt constitue le noir de fumée : la quantité qu'on en recueille forme à peu près la trentième partie de la houille employée.

239. La quantité de chaleur perdue dans la carbonisation de la houille est très-considérable; elle s'élève à près de la moitié de celle que peut donner la combustion complète de la houille, car le coke ne représente qu'environ la moitié du poids de la houille qui l'a produit, et les parties volatilisées sont celles qui développent le plus de chaleur.

Dans quelques usines, on utilise la chaleur qui se développe dans la fabrication du coke, en faisant passer la fumée sous des chaudières à évaporer, dans des canaux qui traversent des étuves, etc.

Mais pour utiliser le combustible perdu, il est indispensable de brûler complètement les gaz qui se dégagent des fours par l'introduction d'un courant d'air; autrement on n'obtient qu'une très-faible partie de la chaleur qu'ils peuvent produire.

On a prétendu qu'en utilisant la chaleur perdue dans les fours à coke on produisait dans la cheminée un plus grand tirage qui appelait une plus grande quantité d'air dans le fourneau, et que par suite on éprouvait une perte dans le rendement qui compensait et au delà l'avantage qui pouvait résulter de l'emploi de la chaleur des gaz; mais il est facile de se rendre maître du tirage et de ne faire passer dans le four que les quantités d'air nécessaires à l'opération.

240. *Puissance calorifique.* Je ne connais aucune expérience qui donne la quantité de chaleur développée par le coke; les expériences seraient d'ailleurs assez difficiles à faire, à cause de la faible combustibilité de ce corps; on suppose généralement au coke une puissance calorifique égale à celle du charbon de bois, parce que, comme lui, il



est presque uniquement composé de carbone. Nous ne pouvons cependant admettre cette identité, parce que le coke contient souvent de 15 à 18 pour cent de cendres, tandis que le charbon de bois n'en renferme que 7. Faute de donnée plus précise, nous supposerons que le coke produise l'effet de 0,85 de charbon pur, et nous admettrons désormais que 1 kilogramme de coke développe par sa combustion 6000 unités de chaleur. Suivant M. Bull, le pouvoir calorifique du coke n'est que les $\frac{4}{5}$ de celui du charbon de bois; mais il faut nécessairement que le coke qu'il a employé renfermât beaucoup plus de substances étrangères que celui qu'on emploie communément en France, ou que dans son appareil la combustion de cette matière ait été mal effectuée.

241. *Pouvoir rayonnant.* Je n'ai point fait d'expériences pour déterminer le pouvoir rayonnant du coke, mais je suis convaincu qu'il est plus considérable que celui du charbon de bois.

§ 9. — DÉTERMINATION DES VOLUMES D'AIR NÉCESSAIRES POUR BRULER LES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES, ET DES VOLUMES DE GAZ QUI S'ÉCHAPPENT.

242. La détermination des dimensions des cheminées destinées à produire un effet donné exigeant nécessairement la connaissance du volume d'air qu'elles doivent appeler par heure dans le foyer, il est indispensable de connaître le volume d'air qu'exige la combustion de 1 kilog. des différents combustibles.

243. Les combustibles employés dans l'industrie étant tous formés de carbone et d'hydrogène, lorsqu'on connaîtra les volumes d'air nécessaires pour brûler 1 kilogramme de chacun d'eux, on trouvera facilement, d'après la composition des autres combustibles, les volumes d'air nécessaires à leur combustion.

244. L'acide carbonique étant formé de 27,36 de carbone et de 72,64 d'oxygène, il en résulte qu'un kilogramme de carbone exige $72,64 : 27,36 = 2,65$ d'oxygène pour passer à l'état d'acide carbonique. La densité de l'oxygène par rapport à l'air étant 1,1026, et un mètre cube d'air à 0°, et sous la pression de 0,76, pesant 1³, un mètre cube d'oxygène pèse $1,3 \times 1,1026 = 1,43$; et par conséquent 1 kilogramme de carbone exige pour sa combustion $2,65 : 1,43 = 1^{\text{m}^{\text{c}}},85$ d'oxygène. Or, comme



l'air renferme 0,21 d'oxygène, la combustion de 1 kilogramme de carbone exige $1^{\text{m}},85 \times 100 : 21 = 8^{\text{m}},81$ d'air atmosphérique.

L'eau étant formée de 11,1 d'hydrogène et de 88,9 d'oxygène, 1 kilogramme d'hydrogène exige pour sa combustion $88,9 : 11,1 = 8$ kilogrammes d'oxygène ou $8 : 1,43 = 5^{\text{m}},6$; ou $5,6 \times 100 : 21 = 26^{\text{m}},66$ d'air.

D'après ces éléments, il est facile de calculer le volume d'air qu'exige la combustion de 1 kil. de chaque combustible.

245. Le bois parfaitement pur renfermant l'équivalent de 0,52 de carbone, le bois ordinaire complètement desséché et contenant 2 pour cent de cendres, renfermera $52 \times \frac{98}{100} = 51$ de carbone; et par conséquent le volume d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de bois parfaitement sec sera

$$8,81 \times 0,51 = 4^{\text{m}},50.$$

246. Quand le bois se trouve dans l'état ordinaire de dessiccation, il renferme 20 pour cent d'eau; et alors 1 kilogramme de bois ne contient que 0,80 de matières ligneuses, et le volume d'air nécessaire à sa combustion se réduit à

$$4,50 \times 0,8 = 3^{\text{m}},60.$$

247. Quant au charbon de bois, si on le considère comme formé de 0,93 de carbone et de 0,07 de cendres, la quantité d'air qu'exigera sa combustion sera

$$8,81 \times 0,93 = 8^{\text{m}},20.$$

248. La tannée peut être considérée comme du bois ordinaire, mais qui renfermerait au moins 3 pour cent de cendres de plus. Ainsi le volume d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de tannée sera

$$3^{\text{m}},60 \times 0,97 = 3^{\text{m}},50.$$

249. Pour les tourbes de bonne qualité et complètement desséchées, qui se composent de 0,58 de carbone, de 0,30 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, de 0,2 d'hydrogène en excès et de 0,05 de cendres, le volume d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de ce combustible sera évidemment

$$0,58 \times 8,81 + 0,02 \times 26,66 = 5^{\text{m}},64.$$

250. Pour les tourbes de bonne qualité qui n'ont été desséchées que



par une longue exposition à l'air sur les tourbières, et qui renferment encore 0,20 d'eau, la quantité d'air nécessaire à leur combustion sera

$$5,64 \times 0,80 = 4^{\text{m. c.}}, 51.$$

251. Quant au charbon de tourbe, qui renferme ordinairement 0,25 de cendres, on peut admettre approximativement que le volume d'air nécessaire pour en brûler un kil. est de

$$8,81 \times 0,75 = 6^{\text{m. c.}}, 60.$$

252. Le volume d'air nécessaire à la combustion des houilles ne peut pas être déterminé d'une manière précise, à cause de la variation de leur composition en carbone, oxygène, hydrogène et matières étrangères. Il faut alors faire le calcul pour une houille renfermant le plus d'hydrogène en excès, parce que l'hydrogène absorbe plus d'oxygène que le carbone. Nous choisirons une houille composée de 5 d'hydrogène en excès, 5 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, et de 88 de carbone, ce qui suppose 2 de cendres.

La quantité d'air nécessaire sera alors

$$8,81 \times 0,88 + 26,66 \times 0,05 = 9^{\text{m. c.}}, 05.$$

253. Enfin, pour le coke renfermant 0,15 de cendres, le volume d'air nécessaire sera

$$8,81 \times 0,85 = 7^{\text{m. c.}}, 5.$$

254. Mais les quantités d'air qui traversent les foyers sont beaucoup plus grandes que celles qui seraient rigoureusement nécessaires pour brûler le combustible consommé, attendu que l'oxygène de l'air n'est jamais absorbé en totalité. On conçoit même que ces quantités pourraient varier dans des limites très-étendues. Cependant, dans les foyers bien disposés où l'épaisseur de la couche de combustible et le tirage sont convenables, la quantité d'oxygène qui s'échappe sans altération n'éprouve que de faibles variations. D'après un grand nombre d'analyses de l'air pris à l'issue des cheminées des chaudières à vapeur dont les foyers étaient alimentés régulièrement par la houille, j'ai reconnu que la quantité d'air qui échappe ordinairement à la combustion est à peu près égale à la moitié de la quantité totale. Dans les foyers alimentés par le bois, cette quantité est un peu plus petite. La plus faible proportion d'air qui

échappe à la combustion dans un foyer à bois, provient sans aucun doute de ce que la combustion de ce corps est toujours accompagnée de flamme, ce qui n'arrive pas pour la houille. Les foyers à coke ont donné les mêmes résultats que les foyers à houille, mais seulement quand les morceaux de coke n'étaient pas trop gros et que l'épaisseur de la couche de combustible était considérable; quand ces conditions ne sont pas remplies, la quantité relative d'oxygène absorbée est beaucoup plus petite. Je n'ai point eu l'occasion de faire des expériences sur la combustion de la tourbe ni sur celle du charbon de tourbe, mais il est probable que les résultats auraient peu différencié de ceux qu'ont présentés la houille et le bois. Dans tous les cas, il est évident que la quantité d'air qui échappe à la combustion est encore beaucoup plus grande quand la porte du foyer est ouverte. Mais comme cette circonstance ne se reproduit que pendant des instants très-courts et à des intervalles assez éloignés, elle n'a pas d'influence sensible sur la quantité d'air moyenne qui traverse le foyer. Dans ce qui précède, il n'est pas question de nos foyers domestiques, car dans ceux-ci la quantité d'air qui s'échappe sans altération est beaucoup plus considérable encore, parce qu'une grande partie de l'air appelé dans la cheminée ne passe pas à travers le combustible.

255. La fumée d'une cheminée peut être recueillie de différentes manières: la plus simple consiste à remplir d'eau un flacon qu'on débouche après l'avoir renversé au sommet de la cheminée; l'eau est remplacée par la fumée. On peut aussi prendre un flacon plein d'eau qu'on met en communication par la partie supérieure avec l'intérieur de la cheminée au moyen d'un tube, et qu'on vide ensuite par un siphon dont la différence de hauteur des deux branches est suffisante. L'air brûlé étant recueilli, il faut déterminer la quantité d'oxygène libre et celle de l'acide carbonique par les procédés connus. La différence entre les $\frac{21}{100}$ et la somme des volumes de ces deux gaz représente la quantité d'oxygène qui a été employée à la combustion de l'hydrogène, ou à la production de l'oxyde de carbone, du moins quand la fumée ne contient pas de carbures d'hydrogène.

D'après des expériences nombreuses faites à Vesserling, dans l'usine de MM. Gros, Davillier, Roman et compagnie, en 1832, la quantité d'oxygène trouvée dans la fumée d'une cheminée de chaudière à vapeur a varié de 10,5