



à 11,5 lorsqu'on brûlait de la houille, et de 4,55 à 7 lorsqu'on brûlait du bois. Pour le premier combustible, la quantité d'acide carbonique a varié de 7 à 5,5, et pour le bois de 13 à 9,5; d'où il suit que la quantité d'oxyde de carbone et de gaz combustibles a varié pour la houille entre 3,5 et 4; et pour le bois entre 3,45 et 4,5. Les grilles des foyers étaient très-petites.

256. En doublant le volume d'air rigoureusement nécessaire à la combustion, quand le combustible ne contient que du carbone, on obtient des volumes qui s'accordent avec ce fait, que l'air qui a servi à la combustion renferme encore 0,10 d'oxygène libre, parce que l'oxygène absorbé est représenté par un égal volume d'acide carbonique. Il en serait encore de même si le combustible renfermait de l'hydrogène, quoique le produit de la combustion de ce corps n'existât plus dans l'air analysé, pourvu toutefois que la quantité d'hydrogène fût très-petite, et c'est ce qui arrive pour tous les combustibles qu'on emploie ordinairement. L'erreur que l'on commet en n'ayant pas égard à l'hydrogène que renferme le combustible est sans importance, et peut être négligée, d'autant plus que la proportion 0,1 d'oxygène qui se trouve ordinairement dans la fumée des chaudières à vapeur, varie cependant dans des limites assez étendues.

257. Alors, en admettant que pour tous les combustibles, excepté pour le bois, la moitié de la quantité d'air qui traverse le foyer n'a point été altérée, et que pour le bois $\frac{1}{3}$ seulement de l'oxygène échappe à la combustion, on formera le tableau suivant des volumes d'air nécessaires à la combustion de 1st des différents combustibles :

	mèt. cubes.
Bois parfaitement desséché.....	6,75
Bois ordinaire à 0,20 d'eau.....	5,40
Charbon de bois.....	16,40
Tourbe parfaitement sèche.....	11,28
Tourbe à 0,20 d'eau.....	9,02
Charbon de tourbe.....	13,20
Houille moyenne.....	18,10
Coke à 0,15 de cendres.....	15,00

Ces nombres représentent les volumes d'air qui doivent entrer dans le foyer pour chaque kilogramme de combustible à brûler.

258. Cherchons maintenant les volumes de gaz produits par la combustion d'un kilogramme de ces combustibles.

259. Si le combustible était formé de carbone pur, comme l'acide carbonique a un volume égal à celui de l'oxygène qui l'a formé, le volume d'air qui sortirait par la cheminée serait égal au volume d'air qui a pénétré dans le foyer, dilaté à la température de la cheminée; c'est ce qui a lieu pour le charbon de bois, de tourbe, le coke et l'antracite.

Quand les combustibles renferment, outre le carbone, de l'eau toute formée ou de l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions nécessaires pour la produire, on ne peut plus regarder le volume de gaz qui se dégage comme égal au volume d'air appelé dilaté à la température de la cheminée, car il en diffère par le volume de vapeur produite. Il en est encore de même quand les combustibles contiennent un excès d'hydrogène, attendu que le volume de vapeur auquel il donne naissance est beaucoup plus grand que le volume d'oxygène qui a servi à sa formation : ces volumes sont à peu près dans le rapport de 2 à 1, et la différence est par conséquent égale au volume d'oxygène employé. Pour le bois et la tannée, l'excès d'hydrogène étant très-petit, on peut négliger l'accroissement de volume de l'air employé à sa combustion; mais, pour les tourbes et les houilles, il faut tenir compte des deux causes d'augmentation du volume d'air qui a traversé le foyer.

Comme 1 kilogramme d'eau produit $1^{\text{m}^{\text{c}}},69$ de vapeur à 100° et sous la pression de 0,76 ou $1,69 : (1 + 0,365) = 1^{\text{m}^{\text{c}}},23$ de vapeur ramené fictivement à 0° , le volume de vapeur que fournira 1 kilogramme de bois sec sera à peu près $0,48 \times 1,23 = 0^{\text{m}^{\text{c}}},59$; celui que donnera 1 kilogramme de bois ordinaire sera $(0,20 + 0,48 \times 0,80) 1,23 = 0^{\text{m}^{\text{c}}},71$. Pour la tannée, le nombre sera sensiblement le même.

1 kilogramme d'hydrogène exige 8 kilogrammes d'oxygène pour former de l'eau; 1 kilogramme d'oxygène à 0° et sous la pression de 0,76 occupe un volume de $0^{\text{m}^{\text{c}}},70$. Par conséquent, pour la tourbe complètement desséchée et contenant un excès de 0,02 d'hydrogène, l'augmentation de volume due à la vapeur produite sera $0,30 \times 1,23 + 0,02 \times 8 \times 0,7 = 0,37 + 0,11 = 0^{\text{m}^{\text{c}}},48$. Pour la tourbe à 20 pour cent d'eau, ce sera $(0,20 \times 1,23 + 0,80 \times 0,48) = 0^{\text{m}^{\text{c}}},63$. Enfin, pour la houille contenant un excès de 0,05 d'hydrogène (252), on trouvera $0,05 \times 1,23 + 0,05 \times 8 \times 0,7 = 0,06 + 0,28 = 0^{\text{m}^{\text{c}}},34$.



260. D'après ce que nous venons de dire, en désignant par t la température des gaz à la partie supérieure de la cheminée, par a le coefficient de dilatation des gaz 0,00365, les volumes de gaz qui se dégageront pour chaque kilogramme de combustible seront :

Pour le bois parfaitement desséché.	$(6,75 + 0,59)(1 + at) =$	$7,34(1 + at)$
Pour le bois ordinaire.....	$(5,40 + 0,71)(1 + at) =$	$6,11(1 + at)$
Pour le charbon de bois.....		$16,40(1 + at)$
Pour la tourbe desséchée.....	$(11,25 + 0,48)(1 + at) =$	$11,73(1 + at)$
Pour la tourbe ordinaire.....	$(9,02 + 0,63)(1 + at) =$	$9,65(1 + at)$
Pour le charbon de tourbe.....		$13,20(1 + at)$
Pour la houille moyenne.....	$(18,10 + 0,34)(1 + at) =$	$18,44(1 + at)$
Pour le coke à 0,15 de cendres		$15,00(1 + at)$

261. Le nombre relatif à la houille suppose que ce combustible ne laisse que 2 à 3 pour cent de résidu ; mais les cendres qu'on obtient dans les grands foyers, excèdent de beaucoup celles que donnent les expériences de laboratoire, parce que ces résidus renferment beaucoup de coke menu. Comme on obtient ordinairement de 10 à 20 pour cent de résidu, on pourrait n'admettre que $16(1 + at)$ pour une houille moyenne. Les nombres 6 pour le bois, et 16 pour la houille, s'accordent avec des expériences faites à Vesserling, sur une même chaudière successivement alimentée par du bois et de la houille qui a donné de 14 à 20 pour cent de cendres, en moyenne 16 ; car dans une heure on a brûlé 140^k de houille ou 375^k de bois ; par conséquent il est sorti de la cheminée des volumes de gaz et de vapeurs qui, ramenés à 0, étaient $140 \times 16 = 2240^{m.c.}$, et $375 \times 6 = 2250^{m.c.}$, nombres sensiblement égaux.

§ 10. — COMPARAISON DES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES.

262. En récapitulant ce que nous avons dit dans les différents paragraphes de ce chapitre, nous formerons le tableau suivant, qui renferme les puissances calorifiques et les pouvoirs rayonnants des différents combustibles, ainsi que les volumes d'air nécessaires à leur combustion et ceux qui se dégagent par les cheminées.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	PUISSANCES CALORIFIQUES.	POUVOIRS RAYONNANTS.	VOLUMES D'AIR froid nécessaires pour brûler 1 kil. de combustible.	VOLUMES DE GAZ qui se dégagent pour 1 kil. de combustible.
Bois sec.....	3600	0,28	6,75	7,34 (1 + at)
Bois ordinaire à 0,20 d'eau.	2800	0,25	5,40	6,11 (1 + at)
Charbon de bois.....	7000	0,50	16,40	16,40 (1 + at)
Tourbe sèche.....	4800	0,25	11,28	11,73 (1 + at)
Tourbe à 0,20 d'eau....	3600	0,25	9,02	9,65 (1 + at)
Charbon de tourbe.....	5800	0,50	13,20	13,20 (1 + at)
Houille moyenne.....	7500	<small>Plus que le charbon de bois.</small>	18,10	18,44 (1 + at)
Coke à 0,15 de cendres..	6000	<small>Plus que le charbon de bois.</small>	15,00	15,00 (1 + at)

D'après ce tableau, lorsqu'on connaîtra les prix des différents combustibles dans une même localité, ainsi que les poids des différentes mesures quand les combustibles ne sont pas vendus au poids, on trouvera facilement leurs valeurs relatives.

263. A Paris, par exemple, où la houille vaut ordinairement 4,50 l'hectolitre ras, le coke 2,25 l'hectolitre comble, le bois 35 francs la voie de 2 stères, et l'hectolitre de charbon de bois 4 francs,

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par la houille est de :

$$4.50 \cdot \frac{1000}{7500 \cdot 84} = \frac{0,45}{63} = 0,0072.$$

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par le coke est de :

$$2.25 \cdot \frac{1000}{6000 \cdot 35} = \frac{0,22}{21} = 0,0097.$$

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par le bois est de :

$$35 \cdot \frac{1000}{2800 \cdot 750} = \frac{0,35}{21} = 0,017.$$

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par le charbon de bois est de :

$$4 \cdot \frac{1000}{7000 \cdot 22} = 0,026.$$

Ainsi, à Paris, le chauffage par la houille est le plus économique de tous; le chauffage par le coke est moins cher que le chauffage au bois; et le chauffage par le charbon de bois est le plus cher de tous.



Tableau des valeurs relatives de différents combustibles, estimés en volumes sous le rapport de la quantité de chaleur qu'ils produisent dans leur combustion.

1 hectolitre de houille moyenne.....			630
1 corde de bois (4 mètres cubes) de noyer d'une année de coupe.....			7742
1	<i>idem</i>	de chêne blanc	<i>idem</i> 6846
1	<i>idem</i>	de frêne	<i>idem</i> 5974
1	<i>idem</i>	de hêtre	<i>idem</i> 5603
1	<i>idem</i>	d'orme	<i>idem</i> 4487
1	<i>idem</i>	de bouleau	<i>idem</i> 4102
1	<i>idem</i>	de châtaignier	<i>idem</i> 4035
1	<i>idem</i>	de charme	<i>idem</i> 5572
1	<i>idem</i>	de pin	<i>idem</i> 4263
1	<i>idem</i>	de peuplier d'Italie	<i>idem</i> 3069
1 hectolitre de charbon de noyer.....			292
1	<i>idem</i>	de chêne.....	255
1	<i>idem</i>	de frêne.....	219
1	<i>idem</i>	de hêtre.....	176
1	<i>idem</i>	d'orme.....	167
1	<i>idem</i>	de bouleau.....	153
1	<i>idem</i>	de châtaignier.....	146
1	<i>idem</i>	de charme.....	176
1	<i>idem</i>	de pin.....	160
1	<i>idem</i>	de peuplier d'Italie.....	109
1 hectolitre comble de coke.....			230
1 corde de tourbe de Beauvais, deuxième qualité (177) 2000 ^k			7200

Ces nombres ont été obtenus en multipliant le nombre de kilog. de matière contenue dans la mesure par le nombre d'unités de chaleur que développe en brûlant un kilog. de combustible, et supprimant les trois derniers chiffres.

Nous remarquerons cependant, que les nombres du tableau précédent qui représentent les valeurs relatives des différents combustibles, sous les volumes ordinairement employés dans le commerce, ne peuvent être considérés que comme des approximations assez grossières, car le poids d'un même volume de combustible éprouve de grandes variations suivant son état hygrométrique, la grosseur des morceaux, et la manière de mesurer. Il faudra toujours, dans chaque localité, déterminer directement le poids moyen de la mesure, et ramener les prix aux poids.

264. *Choix du combustible.* Le choix du combustible dépend, 1° de la

nature de l'effet qu'on veut produire; 2° du prix du combustible comparé à la quantité de chaleur qu'il développe.

Quand on doit produire une température très-élevée dans une étendue considérable, et à une grande distance du foyer, le bois est le combustible le plus avantageux, parce qu'il donne beaucoup de flamme; et, de tous, ceux qui paraissent préférables sont les bois légers qui laissent peu de braise.

Quand, au contraire, la température, quoique très-élevée, doit être produite à une petite distance du foyer, le bois et la houille peuvent également être employés; et même, dans certains cas, la tourbe présente de grands avantages, du moins dans les localités voisines des tourbières. C'est ce qui a lieu, d'après les expériences de M. Garnier, pour les chaudières à vapeur. Outre l'avantage de l'économie de prix, ce combustible a sur la houille plusieurs autres avantages importants: 1° les feux sont plus faciles à diriger, parce qu'il ne se forme point, sur les grilles, de scories qui obstruent le passage de l'air; 2° la température étant moins élevée, les grilles, les parois du fourneau, les tubes bouilleurs et les chaudières, résistent plus longtemps. Nous devons cependant ajouter que M. Garnier a observé qu'il fallait d'abord chauffer le fourneau pendant une heure avec la houille, avant de l'alimenter avec de la tourbe.

Dans le choix de la houille, il faut préférer celles qui sont seulement assez collantes, pour que le menu ne passe pas à travers la grille, comme le flenu de Mons, car celles qui sont trop collantes interceptent rapidement le courant d'air, brûlent les grilles et exigent trop de soin de la part du chauffeur. On obtiendrait certainement de très-bons résultats par le mélange des houilles sèches et des houilles grasses dans des proportions convenables.

Mais si la température doit être très-élevée et seulement dans le foyer, comme pour la fusion des métaux, la houille, le coke et le charbon de bois doivent être préférés; le bois et la tourbe ne pourraient pas être employés, du moins avec le même avantage.

Si la chaleur ne doit pas être très-forte, et ne doit être portée qu'à une petite distance du foyer, tous les combustibles peuvent être employés, mais d'une manière plus ou moins avantageuse.

La tourbe me paraît surtout devoir être préférée quand il s'agit de produire une température peu élevée et longtemps prolongée, comme



pour le chauffage des étuves, des séchoirs, etc. On peut cependant l'employer aussi, comme nous l'avons déjà dit, pour la production de la vapeur et les distillations. Dans tous les cas il serait très-utile de dessécher complètement la tourbe par la chaleur perdue des fourneaux.

Quand différents combustibles peuvent être également employés, le choix ne dépend plus que de la comparaison des prix des masses qui ont le même pouvoir calorifique. Il est évident que si la chaleur rayonnante seule devait être utilisée, il faudrait avoir égard à la fois, et à la puissance calorifique, et au pouvoir rayonnant.

265. Examinons maintenant les autres combustibles simples ou composés, qui, à cause de leurs prix élevés, ne sont pas généralement employés dans l'industrie. Le tableau suivant renferme les puissances calorifiques d'un certain nombre de ces corps, déterminées par différents physiciens :

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	PUISSANCES CALORIFIQUES déduites de l'expérience et exprimées en unités de chaleur pour 1 kil.	
Carbone pur.....	M. Despretz.....	7800
	Laplace.....	23400
Hydrogène pur.....	Clément.....	22115
	M. Despretz.....	23640
Hydrogène proto-carboné.....	Dalton.....	6375
Hydrogène bi-carboné.....	Dalton.....	6600
Oxyde de carbone.....	Dalton.....	1857
Huile d'olive.....	Rumfort.....	9044
	Lavoisier.....	11196
Huile de colza épurée.....	Rumfort.....	9307
Éther sulfurique $d = 0,728$ à 20°	Rumfort.....	8030
Alcool à 42° à $15,5$ de température..	Rumfort.....	6195
Alcool à 35° à $15,5$ de température..	Rumfort.....	5261
Suif.....	Rumfort.....	8639
	Laplace.....	7186
Cire blanche.....	Rumfort.....	9679
	Laplace.....	10500
Naphte $d = 0,827$	Rumfort.....	7338
Phosphore.....	Laplace.....	7500
Essence de térébenthine.....	Dalton.....	4500

266. M. Velter a émis le premier l'hypothèse que les quantités de chaleur produites par les différents combustibles simples ou composés étaient proportionnelles aux quantités d'oxygène absorbées. Cette hypothèse fut appuyée par les expériences de M. Despretz sur le carbone et l'hydrogène, d'après lesquelles les quantités de chaleur produites sont sensiblement dans le rapport de 1 à 3, qui est aussi celui des poids d'oxygène absorbé par les mêmes poids de ces combustibles. Cette loi était cependant peu probable, car la quantité totale de chaleur développée doit certainement dépendre de l'état et de la capacité calorifique des corps produits par la combustion, et on devait présumer que les corps qui, par leur combustion, produisent des corps solides, dégageraient plus de chaleur que ceux dont la combustion ne donne naissance qu'à des gaz.

Cette hypothèse a cependant été admise par les chimistes, et M. Berthier a imaginé une méthode très-facile et très-expéditive fondée sur ce principe, pour déterminer les puissances calorifiques des combustibles formés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, et qui est applicable aux bois dans les différents états de dessiccation et de carbonisation, aux tourbes et aux combustibles fossiles. Cette méthode consiste à évaluer la quantité de plomb produite en calcinant ces matières avec un excès de litharge. Voici la marche de l'opération : on prend un gramme de combustible réduit en particules aussi ténues que possible ; si c'est du charbon, de la houille ou du coke, on le porphyrise pour l'amener à l'état de poudre impalpable ; si c'est du bois, on se procure de la sciure très-menue au moyen d'une scie extrêmement mince, ou bien en le râpant avec une lime à grains serrés. On mêle la poudre avec une quantité de litharge plus grande que celle qu'elle peut réduire, 20 grammes au moins, 40 grammes au plus : on connaît toujours cette quantité approximativement d'après la nature et l'aspect du combustible. On introduit le mélange avec soin au fond d'un creuset de terre, et l'on met par-dessus 20 à 30 grammes de litharge pure. Ce creuset doit être à moitié rempli tout au plus ; on le place sur un fromage, dans un fourneau de calcination déjà échauffé et rempli de charbon bien allumé ; on met dessus un couvercle, et on chauffe graduellement. Il y a ramollissement, bouillonnement et quelquefois boursoufflement. Lorsque la fusion est complète, on couvre le creuset de charbon, et on donne



un coup de feu, que l'on maintient pendant un temps suffisant pour que l'excès de litharge forme un verre en dissolvant une portion de la silice du creuset, mais en ayant soin cependant de ne pas le prolonger assez pour que celui-ci risque d'être percé. Le creuset étant refroidi, on le casse, et le culot de plomb s'en sépare au premier choc; il n'adhère pas non plus à la scorie, parce qu'elle est silicatée, tandis que la litharge pure, non-seulement y adhérerait, mais encore y pénétrerait en certaine quantité et en augmenterait le poids notablement (*Annales de chimie et de physique*, tome 59). Le carbone pur réduisant un poids de litharge correspondant à 34 fois son poids de plomb, en divisant le poids du culot de plomb par 0,34, son poids étant estimé en grammes, on aura l'équivalent du combustible en carbone.

267. Mais les expériences de Dulong renversent complètement l'hypothèse sur laquelle cette méthode est fondée, savoir, que les quantités de chaleur développées par les combustibles sont proportionnelles aux quantités d'oxygène absorbées; car il résulte de ces expériences que, pour le même poids de carbone et d'hydrogène, les quantités de chaleur produites sont dans le rapport de 7170 à 34742, ou de 1 à 4,84. Quoique l'on ne connaisse pas les détails des expériences de Dulong, l'exactitude que ce célèbre physicien a apportée dans tous ses travaux, ne permet pas de douter que dans ceux dont il est question il n'ait mis tous les soins désirables.

268. *Résultats des expériences de Dulong.* Le compte rendu des séances de l'Académie des sciences, tome 7, renferme un extrait des registres de Dulong, où se trouvent les résultats des expériences qu'il a faites sur les quantités de chaleur développées par la combustion d'un grand nombre de corps. Nous rapporterons tous ces résultats en prenant seulement la moyenne de ceux qui ont été obtenus pour le même corps. Dulong avait pris pour unité de chaleur celle qui est nécessaire pour échauffer 1 gramme d'eau de 1°; nous ramènerons les nombres de Dulong à l'unité que nous avons toujours employée jusqu'ici (56).

Hydrogène.

	Moyenne.
1 litre d'hydrogène à 0° et à 0,76, donne en brûlant (3,07 à 3,12)	3,106
1 litre d'oxygène dans sa combustion avec la quantité convenable d'hydrogène	6,172



COMBUSTIBLES.

Gaz des marais.

	Moyenne.
1 litre de gaz des marais (9,948 à 9,317).....	9,587
1 litre d'oxygène.....	4,793

Oxyde de carbone.

1 litre d'oxyde de carbone (3,069 à 3,202).....	3,130
---	-------

Gaz oléfiant.

1 litre de gaz oléfiant (15,05 à 15,57).....	15,33
--	-------

Alcool absolu.

1 litre de vapeur d'alcool (14,310 à 14,441).....	14,44
---	-------

Charbon.

1 litre de vapeur de charbon (8,009 à 7,540).....	7,858
---	-------

Essence de térébenthine.

1 litre de vapeur.....	70,607
1 gramme.....	10,836

Huile d'olive.

1 gramme.....	9,862
---------------	-------

Éther sulfurique.

1 litre (32,733 à 33,968).....	33,353
1 gramme (9,257 à 9,604).....	9,430

Cyanogène.

1 litre (12,080 à 12,602).....	12,270
--------------------------------	--------

Hydrogène et oxyde d'azote.

1 litre d'hydrogène.....	5,220
--------------------------	-------

Oxyde de carbone et oxyde d'azote.

1 litre d'oxyde de carbone.....	5,549
---------------------------------	-------

Dans ces deux expériences il se produit de l'acide nitreux en quantité sensible.

Soufre dans l'oxygène.

1 gramme de soufre (2,452 à 2,719).....	2,601
---	-------

Il se produit de l'acide sulfurique anhydre.

Fer.

1 litre d'oxygène (6,152 à 6,281).....	6,216
--	-------

Étain.

1 litre d'oxygène (6,325 à 6,790).....	6,557
--	-------

*Protoxyde d'étain.*

	Moyenne.
1 litre d'oxygène (6,343 à 6,611).....	6,477
<small>Dulong pensait que dans ces expériences il s'est formé une combinaison entre le protoxyde et le deutoxyde.</small>	
Une troisième expérience a donné.....	6,262

Cuivre.

1 litre d'oxygène (3,742 à 3,503).....	3,720
--	-------

Protoxyde de cuivre.

1 litre d'oxygène.....	3,130
------------------------	-------

Antimoine.

1 litre d'oxygène (5,259 à 5,875).....	5,484
<small>La quantité d'oxygène absorbée correspond exactement à l'acide antimonieux.</small>	

Zinc.

1 litre d'oxygène (7,378 à 7,753).....	7,577
--	-------

Cobalt.

1 litre d'oxygène.....	5,721
------------------------	-------

Nickel.

1 litre d'oxygène.....	5,333
------------------------	-------

269. D'après quelques lignes écrites sur une feuille volante, Dulong paraît avoir soupçonné l'existence d'un rapport simple entre les chaleurs spécifiques et les quantités de chaleurs dégagées par l'absorption d'une même quantité d'oxygène dans la combustion. Les nombres renfermés dans le tableau précédent paraissent favorables à cette idée.

Il résulte d'abord de ces expériences, que la quantité de chaleur développée par 1 litre d'oxygène n'est pas constante, car

Avec l'hydrogène elle est de.....	6,172
Avec le gaz des marais de.....	4,793
Avec le carbone de.....	3,929
Avec le fer de.....	6,216
Avec le cuivre de.....	3,720
Avec le cobalt de.....	5,721

C'est d'ailleurs ce qui est exprimé dans la note qui termine les observations de Dulong.



270. Déduisons maintenant de ces différents résultats les puissances calorifiques des corps combustibles généralement employés.

Le poids de 1 litre d'hydrogène.....	= 0,0688	× 1,2991	= 0,0894
Le poids de 1 litre de vapeur de carbone.....	= 0,4219	× 1,2991	= 0,543
Mais M. Dulong a admis un poids double.....			1,096
Le poids de 1 litre d'oxyde de carbone.....	= 0,96783	× 1,2991	= 1,258
Le poids de 1 litre d'hydrogène proto-carboné...	= 0,5595	× 1,2991	= 0,7267
Le poids de 1 litre d'hydrogène bi-carboné.....	= 0,9814	× 1,2991	= 1,274
Le poids de 1 litre de vapeur d'alcool.....	= 1,613	× 1,2991	= 2,0969

On trouve, d'après cela, pour l'hydrogène,

Valeurs extrêmes.....	}	3070:0,0894 = 34340
		3120:0,0894 = 34900
Valeur moyenne de toutes les expériences.		3106:0,0894 = 34742

pour le carbone,

Valeurs extrêmes.....	}	8009:1,096 = 7307
		7540:1,096 = 6880
Valeur moyenne de toutes les expériences.		7858:1,096 = 7170

pour l'oxyde de carbone,

Valeurs extrêmes.....	}	3069:1,258 = 2439
		3202:1,258 = 2545
Valeur moyenne de toutes les expériences.		3130:1,258 = 2488

pour l'hydrogène proto-carboné,

Valeurs extrêmes.....	}	9,948:0,7267 = 13702
		9,317:0,7267 = 12833
Valeur moyenne de toutes les expériences.		9,587:0,7267 = 13205

pour l'hydrogène bi-carboné,

Valeurs extrêmes.....	}	15050:1,274 = 11813
		15570:1,274 = 12221
Valeur moyenne de toutes les expériences.		15330:1,274 = 12032

pour l'alcool,

Valeurs extrêmes.....	}	14310:2,097 = 6824
		14441:2,097 = 6886
Valeur moyenne.....		6855



271. Il résulte de la puissance calorifique du carbone et de celle de l'oxyde de carbone, que, quand un kilogramme de carbone passe d'abord à l'état d'oxyde de carbone et ensuite à l'état d'acide carbonique, quoique la quantité d'oxygène absorbé soit la même, il se dégage beaucoup plus de chaleur dans la seconde partie de la combustion que dans la première. En effet, l'oxyde de carbone étant formé de 0,43 de carbone et de 0,57 d'oxygène, 1 kilogramme de carbone produit $1:0,43 = 2^k325$ d'oxyde de carbone qui, par leur combustion, développent $2,325 \times 2488 = 5784$ unités de chaleur, et par conséquent le carbone, en se transformant en oxyde, développe seulement $7170 - 5784 = 1386$ unités.

272. Vérifions si, comme nous l'avons déjà supposé, la quantité de chaleur produite par un composé est égale à la somme des quantités de chaleur qui seraient produites par chacun de ses éléments.

En partant de cette supposition, on trouve :
pour l'hydrogène proto-carboné,

$$\begin{array}{r} 0,7517 \times 7170 = 5389 \\ 0,2483 \times 34742 = 8626 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,7517 \times 7170 = 5389 \\ 0,2483 \times 34742 = 8626 \end{array}} \right\} 14015$$

pour l'hydrogène bi-carboné,

$$\begin{array}{r} 0,858 \times 7170 = 6151 \\ 0,142 \times 34742 = 4933 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,858 \times 7170 = 6151 \\ 0,142 \times 34742 = 4933 \end{array}} \right\} 11084$$

pour l'essence de térébenthine, formée de 88 kilogrammes de carbone et de 11,6 d'hydrogène,

$$\begin{array}{r} 0,884 \times 7170 = 6352 \\ 0,116 \times 34742 = 4030 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,884 \times 7170 = 6352 \\ 0,116 \times 34742 = 4030 \end{array}} \right\} 10382$$

pour l'alcool formé de 51,98 de carbone, 13,70 d'hydrogène et 34,32 d'oxygène,

$$\begin{array}{r} 0,5198 \times 7170 = 3726 \\ 0,941 \times 34742 = 3279 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,5198 \times 7170 = 3726 \\ 0,941 \times 34742 = 3279 \end{array}} \right\} 7005$$

pour l'éther sulfurique composé de 65,31 de carbone, 13,33 d'hydrogène et 21,36 d'oxygène,

$$\begin{array}{r} 0,6531 \times 7170 = 4682 \\ 0,1066 \times 34742 = 3703 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,6531 \times 7170 = 4682 \\ 0,1066 \times 34742 = 3703 \end{array}} \right\} 8385$$

pour l'huile d'olive composée de 77,21 de carbone, 13,36 d'hydrogène et 9,43 d'oxygène,

$$\begin{array}{r} 0,7721 \times 7170 = 5535 \\ 0,1218 \times 34742 = 4231 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,7721 \times 7170 = 5535 \\ 0,1218 \times 34742 = 4231 \end{array}} \right\} 9766$$

pour le suif formé de 79 de carbone, 9,3 d'oxygène et 11,7 d'hydrogène,

$$\begin{array}{r} 0,79 \times 7170 = 5664 \\ 0,106 \times 34742 = 3474 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,79 \times 7170 = 5664 \\ 0,106 \times 34742 = 3474 \end{array}} \right\} 9138$$

pour la cire composée de 81,6 de carbone, de 13,9 d'hydrogène et de 4,5 d'oxygène,

$$\begin{array}{r} 0,816 \times 7170 = 5850 \\ 0,1285 \times 34742 = 4464 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{r} 0,816 \times 7170 = 5850 \\ 0,1285 \times 34742 = 4464 \end{array}} \right\} 10314$$

Les nombres trouvés par Dulong pour les premiers corps, sont

hyd. proto-carb.	hyd. bi-carb.	essence	alcool	éther	huile
13205	12032	10836	6855	9430	9862

Ceux qu'on obtient en prenant la somme des effets produits par les éléments, sont pour les mêmes corps

14015	11084	10382	7005	8385	9766
-------	-------	-------	------	------	------

Ces derniers nombres sont assez rapprochés des résultats de l'expérience pour justifier le principe d'après lequel ils ont été calculés.

273. D'après tout ce qui précède, nous admettrons, pour les puissances calorifiques des corps dont il a été question, les nombres suivants :

Hydrogène.....	34742
Carbone passant à l'état d'oxyde.....	1386
Pour le poids de l'oxyde de carbone renfermant 1 ^k de carbone.	5784
Pour le carbone passant à l'état d'acide carbonique.....	7170
Oxyde de carbone.....	2488
Hydrogène proto-carboné.....	13205
Hydrogène bi-carboné.....	12032
Soufre.....	2601
Éther sulfurique.....	9430
Essence de térébenthine.....	10836
Huile d'olive.....	9862
Alcool.....	6855

274. Nous admettrons, en outre, 1° que la quantité de chaleur développée par un combustible composé est égale à la somme des quantités



de chaleur produites par ses éléments, en diminuant toutefois la quantité d'hydrogène de celle qui est absorbée par l'oxygène du combustible; 2° que la quantité de chaleur développée est la même quand la combustion a lieu immédiatement ou successivement; 3° que la quantité de chaleur développée est indépendante de la température du corps combustible et de celle de l'air; 4° et enfin, que cette quantité est indépendante de la pression du gaz comburant et de la proportion d'oxygène qu'il renferme. La première loi nous paraît suffisamment démontrée par la comparaison des résultats obtenus par Dulong et de ceux que donne le calcul. La seconde a été démontrée par M. Hess, du moins pour la chaleur dégagée par la combinaison de l'eau avec l'acide sulfurique et la chaux, et tout porte à croire qu'elle se vérifierait dans les autres combinaisons. La troisième, suivant M. Hess, paraît avoir été vérifiée par Dulong. Enfin, la dernière résulte de ce que M. Despretz a trouvé la même puissance calorifique pour le carbone brûlé dans l'air et dans l'oxygène pur.

275. Nous devons dire cependant qu'il reste encore beaucoup à faire relativement aux quantités de chaleur développées par la combustion, et en général par les actions chimiques: cette partie de la science n'est encore qu'ébauchée. Mais, pour l'objet qui nous occupe, nous pensons que les nombres connus présentent une approximation suffisante, et que si les lois énoncées ne sont pas rigoureusement exactes, elles s'approchent assez de la vérité pour ne pas conduire à de graves erreurs dans les applications industrielles.

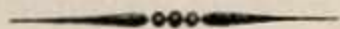
276. *Observations sur le pouvoir rayonnant des combustibles.* Il résulte des expériences faites sur le bois et le charbon de bois, que le pouvoir rayonnant est plus petit pour les combustibles qui brûlent avec flamme que pour ceux qui brûlent sans flamme; cette conséquence est appuyée par les résultats qu'on obtient pour les huiles brûlées dans les becs d'éclairage; on trouve que leur pouvoir rayonnant est beaucoup plus petit que ceux des combustibles qui brûlent, au moins en partie, à l'état solide. Pour l'huile de colza, le pouvoir rayonnant est seulement de 0,18.

277. Les expériences sur les huiles ont été faites au moyen de l'appareil figure 2, planche 1^{re}. Voici les données et les résultats d'une expérience faite sur l'huile de colza épurée.

La température de l'air était de 26° ; l'eau introduite était à $23^{\circ},5$. Par la combustion de 50 grammes d'huile, la température de l'eau a été élevée à 29° .

Par conséquent, la quantité de chaleur rayonnante absorbée était égale (133) à $(11^{\text{k}},29 + 2^{\text{k}}223 \times 0,11) 5^{\circ},5 = 63$ unités; et la quantité de chaleur rayonnante était égale (108) à $63 \times 1,36 = 85,68$. Or, les 50 grammes d'huile qui ont été brûlés ont produit $50 \times 9307 : 1000 = 465,3$ unités (265); par conséquent la chaleur rayonnée est à la chaleur produite comme $85,68 : 465,3 :: 1 : 5,42$.

278. Après avoir étudié les différentes propriétés des combustibles, nous allons examiner les lois des mouvements de l'air. La connaissance de ces lois est indispensable pour la disposition des appareils de chauffage et de ventilation; car dans tous, quel que soit le but qu'on se propose, on a toujours de l'air à mettre en mouvement. Les mouvements de l'air sont produits tantôt par la force ascensionnelle de l'air chaud, tantôt par des machines mues par différents moteurs. Nous nous occuperons successivement des mouvements de l'air produits par la pression, des mouvements de l'air produits par la chaleur, et de ceux qui résultent des actions mécaniques.





CHAPITRE III.

ÉCOULEMENT DES GAZ COMPRIMÉS.

279. Nous examinerons successivement le cas où l'écoulement a lieu par des orifices percés dans les surfaces des réservoirs, et celui où les gaz s'écoulent par des tuyaux de conduite. Nous décrirons ensuite le meilleur moyen qu'on puisse employer pour mesurer la vitesse des gaz en mouvement.

§ 1. — VITESSE D'ÉCOULEMENT D'UN GAZ COMPRIMÉ, QUI S'ÉCOULE PAR UN ORIFICE PERCÉ EN MINCE PAROI OU PAR UN COURT AJUTAGE.

280. Lorsqu'un gaz comprimé s'échappe par une ouverture quelconque, percée en mince paroi, la vitesse d'écoulement dépend de la différence des pressions intérieure et extérieure et de la densité du gaz qui s'écoule. On peut calculer la vitesse d'écoulement en considérant le gaz comme un liquide de même densité, qui serait soumis à une pression égale à celle qui résulte de sa force élastique, diminuée de celle du milieu ambiant. Alors, pour avoir la vitesse, il faut trouver la hauteur d'une colonne liquide de même densité que le gaz, d'une section égale à celle de l'orifice, et dont le poids ferait équilibre à la pression qui produit l'écoulement : la vitesse d'écoulement cherchée est alors égale à celle qu'acquerrait un corps en tombant de cette hauteur. Cherchons, par exemple, avec quelle vitesse de l'air à 0°, sous la pression ordinaire, s'échapperait dans un espace vide. La pression, étant de 0^m,76, sera de 10^m,33 estimée en eau; et comme la densité de l'air est 0,0013 de celle de l'eau, il s'ensuit qu'une colonne d'air équivalente en poids

à 0^m,76 de mercure aurait $\frac{10^{m},33}{0,0013}$ de hauteur ou 7946^m. Or, un corps en tombant de cette hauteur, acquerrait une vitesse de 394^m,81 par seconde. Ce serait donc là la vitesse avec laquelle l'air, sous la pression ordinaire, s'écoulerait dans le vide.

281. Il résulte de ce qui précède plusieurs conséquences importantes : 1° A la même température, et quelle que soit la pression, un même gaz s'écoule dans le vide avec la même vitesse. En effet, les densités d'un même gaz à la même température sont proportionnelles aux pressions; les hauteurs des colonnes fluides dont les poids sont équivalents aux pressions sont aussi proportionnelles aux pressions, et ces mêmes hauteurs sont en raison inverse des densités; d'où il suit que, quelle que soit la force élastique d'un même gaz, la vitesse d'écoulement dans le vide sera constante à la même température. Ainsi, en renfermant de l'air dans un ballon, et le comprimant à 1, 2, 3, 1000 atmosphères, et le laissant s'échapper par un petit orifice dans un espace vide, la vitesse, pendant toute la durée de l'écoulement, sera la même. Mais la quantité de gaz qui s'échappera dans le même temps ne sera point constante : elle sera évidemment proportionnelle à la densité du gaz, et par conséquent à la pression. Cette permanence de la vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé quand il s'échappe dans le vide n'existe plus quand l'écoulement a lieu dans un gaz, parce qu'alors la hauteur de la colonne génératrice de la vitesse est proportionnelle à la différence de force élastique de l'air intérieur et de l'air extérieur, et en raison inverse de la densité, et que la densité du gaz est proportionnelle à la pression totale que le gaz éprouve.

2° Les vitesses d'écoulement des gaz dans le vide sont en raison inverse des racines carrées des densités, car les hauteurs génératrices des vitesses sont en raison inverse des densités, et les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées de ces hauteurs. Il en est encore de même quand les gaz ont la même force élastique, et s'écoulent dans le même milieu; mais quand la différence des pressions du gaz et du milieu extérieur sont seulement les mêmes, les vitesses sont en outre en raison inverse des racines carrées des forces élastiques des gaz, comme on peut le voir dans l'article suivant.

282. Représentons par v la vitesse, et par h la hauteur d'une colonne



liquide de même densité que le gaz, et dont le poids serait équivalent à la pression qui produit le mouvement : nous aurons $v = \sqrt{2gh}$.

Pour déterminer h en fonction de la densité, de la pression et de la température, désignons par p et p' les forces élastiques de l'air extérieur et du gaz comprimé estimées en mercure; par d la densité du gaz à 0° sous la pression de $0^m,76$, et par d' sa densité sous la pression p' et à la température t .

La pression qui produit le mouvement est $p' - p$; pour estimer cette pression en eau, il faut la multiplier par la densité du mercure 13,59, et, pour l'obtenir en air atmosphérique à 0° , et sous la pression $0^m,76$, il faut encore diviser ce produit par la densité de l'air rapportée à l'eau, c'est-à-dire par 0,0013; ainsi la pression estimée en air sera $\frac{(p' - p)13,59}{0,0013}$.

Mais il faut que cette pression soit estimée en gaz dont la densité est d' ; la hauteur de la colonne sera alors $\frac{(p' - p) \cdot 13,59}{0,0013} \cdot \frac{1}{d'}$. Mais la densité d'un même gaz est proportionnelle à la pression quand la température est la même, et quand elle change, la pression restant la même, la densité varie en raison inverse du volume. Or, nous avons vu (36) que tous les gaz se dilatent également, et de 0,00365 de leur volume à zéro, pour chaque degré du thermomètre; nous aurons donc

$$d' = d \frac{p'}{0^m,76} \left(\frac{1}{1 + t(0,00365)} \right).$$

D'après cela

$$h = \frac{13,59 \times 0^m,76}{0,0013} \frac{(p' - p)}{p'd} [1 + t(0,00365)].$$

Alors on aura

$$v = \sqrt{\frac{13,59 \times 0^m,76}{0,0013} 2g \frac{(p' - p)}{p'd} [1 + t(0,00365)]}.$$

Substituant pour g sa valeur 9,8088, il vient

$$v = 394^m \sqrt{\frac{p' - p}{p'd} [1 + t(0,00365)]}.$$

Si on fait $p = 0$, on trouve

$$v = 394^m \sqrt{\frac{1}{d} [1 + t(0,00365)]}.$$

Ainsi, à la même température, et quelle que soit la pression, la vitesse

d'écoulement d'un gaz dans le vide est en raison inverse de la racine carrée de sa densité.

Dans la théorie que nous venons d'exposer, nous avons considéré les gaz comme des liquides de même densité; par conséquent nous n'avons point tenu compte de leur élasticité; il était alors indispensable de vérifier si l'expérience confirme les résultats du calcul.

283. En 1822, M. Lagerhgelm fit des observations sur l'écoulement de l'air atmosphérique par des orifices pratiqués en mince paroi, et sur l'aspiration qui a lieu à la paroi d'un tuyau court par lequel de l'air s'écoule sous des pressions déterminées. Le travail de M. Lagerhgelm fut communiqué à l'Institut, par M. Olivier: c'est du rapport des commissaires chargés de rendre compte de ce travail que nous avons extrait ce qui suit.

L'appareil de M. Lagerhgelm se compose d'une cloche cylindrique en cuivre battu, plongée dans une cuve pleine d'eau. Lorsqu'on abandonne cette cloche à son propre poids, ou qu'on la presse par un poids additionnel, l'air qu'elle contient est comprimé, et l'excès de pression est exactement mesuré par la différence de niveau de l'eau en dedans et en dehors de la cloche.

Si l'on conçoit maintenant qu'on ait fixé au fond de la cuve un tuyau recourbé, dont une branche traverse l'eau et vienne s'élever sous la cloche au-dessus de son niveau, et dont l'autre branche, après avoir traversé l'épaisseur de la cuve, s'élève verticalement et ait son embouchure recouverte d'une lame mince percée d'une ouverture, il est évident que l'air comprimé s'échappera par cette dernière ouverture, sous une pression mesurée par la différence de niveau. On a fait varier les diamètres des orifices depuis $\frac{4}{100}$ jusqu'à $\frac{11}{100}$ de pied, et les différences de niveau depuis $\frac{19}{100}$ jusqu'à $\frac{161}{100}$. On a tenu compte de la pression barométrique et de la température.

Après avoir mesuré le nombre de pieds cubes d'air comprimé qui s'était écoulé dans un temps déterminé, sous une pression connue et par un orifice donné, on a calculé la quantité d'eau qui se serait écoulée dans le même temps, sous la même pression et par le même orifice, et on a trouvé que ce volume d'eau était au volume d'air dans le rapport moyen de 100 à 2875, c'est-à-dire en supposant que la densité de l'air soit à celle de l'eau comme 1 est à 840, dans le rapport inverse des racines carrées de



ces densités, ce qui s'accorde avec la formule de l'écoulement des fluides incompressibles. En effet, il faut estimer la pression en fluide de même densité : or, une colonne d'air a une hauteur 840 fois plus grande qu'une colonne d'eau de même poids, et comme les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées des hauteurs, on voit que l'écoulement d'un fluide incompressible de même densité que l'air devrait, sous la même pression, acquérir une vitesse plus grande que celle de l'eau dans le rapport inverse des racines carrées des densités de ces deux fluides.

Cependant le rapport devrait être un peu plus petit, parce que ce n'est pas de l'air sous la pression de 0^m,76 qui s'écoule, mais de l'air comprimé dont la densité est plus grande. Si l'auteur n'a pas trouvé de différence sensible, cela tient à ce que la compression n'avait jamais été assez forte pour changer notablement la densité de l'air. Ce résultat avait déjà été obtenu par Banks.

L'auteur plaça ensuite des tuyaux additionnels sur les orifices, et obtint des résultats tout à fait semblables à ceux qui se manifestent dans l'écoulement des fluides incompressibles.

284. En 1826, Daubuisson, ingénieur des mines, fit de nouvelles expériences sur l'écoulement de l'air comprimé, et la comparaison de plus de cent cinquante expériences, faites avec un appareil semblable à celui que nous venons de décrire, a confirmé les résultats obtenus par M. Lagerhgelm, savoir, que la vitesse d'écoulement des gaz peut s'obtenir comme celle des fluides incompressibles. Il résulte, en outre de ces expériences, qu'il y a, pour les gaz comme pour les liquides, une contraction de la veine, et que les coefficients de contraction sont

- 0,65 pour un orifice percé en mince paroi.
- 0,93 pour un ajutage court et cylindrique.
- 0,95 pour un ajutage court, peu évasé.

Ainsi, pour avoir la dépense dans ces différents cas, il faut multiplier la dépense théorique par le coefficient correspondant.

285. Il résulte de là, que si nous désignons par v la vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé, par h la hauteur génératrice de la vitesse, c'est-à-dire la hauteur d'une colonne de ce fluide qui ferait équilibre à l'excès de la pression intérieure sur celle de l'atmosphère, on aura.

$$v = \sqrt{2gh};$$

et en désignant par a la surface de l'orifice, et par Q la dépense par seconde, on a

$$\begin{aligned} \text{Pour un orifice en mince paroi} & Q = 0,65 a \sqrt{2gh}. \\ \text{Pour un ajutage court et cylindrique} & Q = 0,93 a \sqrt{2gh}. \\ \text{Pour un ajutage court, peu évasé} & Q = 0,95 a \sqrt{2gh}. \end{aligned}$$

286. Il est important de remarquer que les dépenses sont relatives à l'air ou au gaz qui s'écoule, sous la pression qui existe dans le réservoir. Si on voulait avoir le volume écoulé sous la pression de l'atmosphère, en désignant par p cette pression estimée en gaz comprimé, il est évident qu'il faudrait multiplier les valeurs de Q par le rapport de h à p .

Occupons-nous maintenant des mouvements de l'air dans les longs tuyaux de conduite.

§ 2. VITESSE D'ÉCOULEMENT D'UN GAZ COMPRIMÉ, LORSQU'IL S'ÉCOULE PAR DE LONGS TUYAUX DE CONDUITE.

287. Lorsque l'air froid est poussé dans des tuyaux de conduite par des appareils de ventilation, il doit nécessairement éprouver, suivant la longueur et le diamètre du canal, des résistances qui diminuent sa vitesse.

288. La détermination de cette résistance est d'un grand intérêt pour l'exploitation des mines et dans les usines métallurgiques, car il est important de connaître quel peut être l'effet utile de certains procédés d'aérage, jusqu'à quel point on peut éloigner les fourneaux des machines soufflantes, et la perte de vitesse qu'éprouve l'air, suivant leur distance et les diamètres des tuyaux de conduite.

289. Examinons d'abord ce qui se passe dans un long tuyau cylindrique, rectiligne, communiquant par une extrémité avec un réservoir renfermant un gaz comprimé et entièrement ouvert à l'autre extrémité. Il est évident que si le tuyau n'opposait aucune résistance, la vitesse de l'air serait la même dans toute l'étendue du tuyau, qu'elle serait égale à celle qui résulterait de la pression, comme lorsque l'écoulement a lieu par un orifice percé en mince paroi, augmentée de celle qui résulterait de la détente du gaz, et que la force élastique du gaz serait partout celle de l'atmosphère. Mais la résistance que les tuyaux de conduite opposent au



mouvement diminue la vitesse, de sorte qu'elle ne sera plus celle qui correspond à la pression P dans le réservoir, mais celle qui résulterait d'une pression p plus petite que P . Alors $P - p$ serait la perte de hauteur due à la résistance de la conduite. L'expérience seule peut faire connaître comment cette perte varie avec la longueur du tuyau, son diamètre, la vitesse d'écoulement, avec la nature du tuyau et avec celle du gaz, si ces deux dernières circonstances ont de l'influence.

290. En 1821, Girard fit plusieurs expériences avec l'appareil d'éclairage au gaz de l'hôpital Saint-Louis, et reconnut, 1° que la résistance est proportionnelle à la longueur du tuyau et au carré de la vitesse; 2° que le coefficient de résistance varie avec la nature des tuyaux; 3° que pour le même tuyau il est le même quand celui-ci est parcouru par l'air ou par le gaz de l'éclairage, ce qui rend très-probable qu'il est le même pour tous les gaz.

291. Les expériences de Girard sur l'écoulement de l'air atmosphérique et du gaz de l'éclairage ont été faites avec des tuyaux de conduite en fonte de 0,10 de diamètre, dont la longueur a varié de 128^m à 622^m, et sous une charge à peu près constante de 0^m,033 d'eau; et avec des tuyaux de fer de 0^m,0158, dont la longueur a varié de 37^m à 126, et sous des charges comprises entre 0^m,033 à 0,036 d'eau. Les tuyaux de conduite communiquaient avec un gazomètre à pression constante, et l'écoulement avait lieu librement dans l'air.

292. En 1827, Daubuisson a fait une nombreuse suite d'observations pour déterminer la résistance que l'air éprouve dans les grands tuyaux de conduite.

La grande conduite sur laquelle les expériences ont été faites avait près de 400 mètres de longueur. En la prenant par partie, on mettait en évidence l'effet de la longueur, et pour chaque longueur on faisait varier la pression qui mettait l'air en mouvement; on changeait aussi la vitesse, en mettant, à l'extrémité, des ajutages de différents diamètres; enfin, pour observer l'influence des diamètres des tuyaux, on a opéré sur 2 petites conduites de 55 mètres de longueur, ayant l'une la moitié, l'autre le quart du diamètre de la grande.

La machine soufflante était une trompe à peu près semblable à celle qu'on emploie dans les forges des Pyrénées; elle consistait en un tronc de sapin évidé de 8^m,40 de long, et aboutissait à une simple

barrique de 1^m,15 de diamètre au bouge, et de 1^m,32 de hauteur; qui était entièrement ouverte par le fond inférieur, et plongeait dans un petit bassin de 0^m,85 de profondeur. Cette trompe recevait l'eau d'un petit ruisseau voisin, roulant 0,025 à 0,030 mètres cubes d'eau par seconde. On avait disposé avec soin un réservoir garni d'une vanne, afin de connaître exactement la quantité d'eau employée pour mettre en jeu la machine.

Cette machine plongeant de 0^m,85 dans l'eau, pouvait comprimer l'air qui en sortait, jusqu'au point de lui donner sur l'air atmosphérique un excès de force élastique mesurée par une colonne d'eau de 0^m,85 de hauteur ou par une colonne de mercure de 0^m,0624. La vitesse de l'air correspondante à une semblable pression est à peu près de 109 mètres par seconde.

La conduite qui était destinée à aérer une galerie d'écoulement consistait en tuyaux de fer-blanc de 0^m,10 de diamètre, soudés bout à bout; à son origine elle présentait deux coudes de 90°, mais bien arrondis; à 80 mètres de distance, elle entrait dans la galerie, et se poursuivait en ligne droite jusqu'à 387 mètres. On s'était assuré qu'elle ne présentait aucune issue à l'air.

Les ajutages ou buses que l'on adaptait à son extrémité avaient 0^m,05, 0^m,03, et 0^m,02 de diamètre à leur orifice. Pour la conduite de 0^m,05 de diamètre ils avaient 0^m,03; 0^m,02; 0^m,01. La conduite de 0^m,025 les avait de 0^m,02, et 0^m,01.

Chaque ajutage portait une virole destinée à recevoir un manomètre à eau; un autre manomètre était placé à l'origine de la conduite. Ces appareils indiquaient la pression de l'air aux deux extrémités de la conduite.

Il est évident que la différence de hauteur des deux manomètres mesurait la perte de pression occasionnée par le frottement; car, si la résistance avait été nulle, la pression aurait été exactement la même aux deux extrémités du canal.

La pression à l'extrémité du canal servait à calculer la vitesse de l'air à sa sortie, par les formules de l'écoulement des fluides incompressibles, et la dépense en tenant compte de la contraction de la veine fluide quand l'écoulement avait lieu par des orifices percés en mince paroi, ou par de courts ajutages.



293. Daubuisson a trouvé ainsi les lois suivantes :

- 1° La résistance est proportionnelle à la longueur du canal.
- 2° La résistance croît proportionnellement au carré de la vitesse.
- 3° La résistance est en raison inverse du diamètre du canal.

Les deux premières avaient déjà été reconnues par Girard.

Ces lois conduisent à des formules très-simples pour déterminer la vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé, à l'extrémité d'un canal.

294. Désignons par P la pression dans le vase, estimée en liquide de la densité du gaz comprimé ; par p , la hauteur génératrice de la vitesse effective estimée de la même manière ; par L la longueur du canal, par D son diamètre, et par d le diamètre de l'orifice d'écoulement que nous supposerons terminé par un petit ajutage, et par k le coefficient de frottement. La vitesse moyenne de l'air dans le canal sera à très-peu près $v \frac{d^2}{D^2}$, et nous aurons

$$v = \sqrt{2gp} \quad \text{et} \quad P - p = k \cdot \frac{L \cdot v^2 d^4}{D^5}.$$

En éliminant p entre ces deux équations il vient,

$$v = \sqrt{\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{d^2} \sqrt{\frac{PD^5}{L + \frac{1}{2gk} \frac{D^5}{d^4}}}}$$

295. Si on voulait avoir la dépense Q , comme $Q = \frac{v\pi d^2}{4}$, et que le coefficient de contraction est 0,93, on trouverait

$$Q = 0,93 \frac{3,1415}{4} \sqrt{\frac{1}{k} \sqrt{\frac{PD^5}{L + \frac{1}{2gk} \frac{D^5}{d^4}}}}$$

La formule donnée par Daubuisson est

$$Q = 2279 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42 \frac{D^5}{d^4}}},$$

dans laquelle P est estimé en mercure. Si P était estimé en air, il faudrait évidemment diviser le coefficient par la racine carrée de 10467, rapport de la densité du mercure à celle de l'air, c'est-à-dire, par 102; et la formule deviendrait

$$Q = 22,34 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42 \frac{D^5}{d^4}}} \quad (1)$$

Alors, pour déterminer la constante k , on a l'une des deux équations

$$0,93 \times \frac{3,1415}{4} \sqrt{\frac{1}{k}} = 22,34, \quad \text{et} \quad \frac{1}{2gk} = 42.$$

Ces deux équations donnent à peu près $k = 0,0012$, et on a par suite

$$v = 29 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42 \frac{D^5}{d^5}}}. \quad (2)$$

Si $D = d$, la formule devient

$$v = 29 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42D}}.$$

296. D'après Eytelwein, la vitesse d'écoulement de l'eau dans les mêmes circonstances est représentée par la formule

$$v = 26,44 \sqrt{\frac{PD^5}{L + 54D}}.$$

297. Les formules (1) et (2) donnent la dépense et la vitesse d'écoulement de l'air froid dans les circonstances ordinaires, avec une approximation qui est suffisante pour tous les cas qui peuvent se présenter. Elles présentent cependant un peu d'incertitude, parce que le coefficient de frottement doit certainement varier avec la nature du tuyau de conduite.

298. D'après les expériences faites par Daubuisson sur des tuyaux de conduite en fer-blanc, la constante k est égale à 0,0012. D'après les expériences de Girard, cette même constante est égale à 0,00088 pour des tuyaux en fonte, et à 0,00128 pour des tuyaux de fer. Les tuyaux de fonte servaient depuis longtemps et étaient tapissés de goudron intérieurement, et les tuyaux de fer étaient rouillés; ces circonstances sont importantes à remarquer, car il est probable que les coefficients dépendent de l'état des surfaces (1).

(1) Dans le mémoire de Girard, la vitesse d'écoulement est donnée par la formule

$$\frac{gDP}{4L} = bv^2,$$

et il a trouvé pour la fonte

$$b = 0,002247,$$

et pour les tuyaux en fer

$$b = 0,0032.$$



299. Dans ce qui précède nous avons supposé que la conduite était rectiligne; si elle avait des coudes brusques et nombreux, la vitesse serait beaucoup diminuée. Voici à ce sujet les propres expressions de Daubuisson :

« Les coudes des conduites, lorsqu'ils sont brusques et forts, augmentent considérablement la résistance au mouvement : ainsi, dans mes nombreuses expériences sur des conduites coudées, sept angles de 45° ont réduit d'un quart la dépense.

« Dans ces expériences, j'ai vu la résistance croître, de même que pour les conduites menant de l'eau, sensiblement comme le carré de la vitesse, et à très-peu près comme le carré du sinus des angles. Mais, et à ma grande surprise, elle n'augmentait plus proportionnellement au nombre des angles; au delà d'un certain nombre, elle diminuait même : ainsi, 15 angles ont un peu moins réduit la dépense que 7 de même grandeur. Ce phénomène et quelques autres circonstances ont rendu vaines les tentatives que j'ai faites pour établir, même approximativement, la résistance des coudes.

« Dans la pratique, on évitera leur mauvais effet en arrondissant bien ceux que l'on serait obligé de faire. »

§ 3. APPAREIL DESTINÉ A MESURER DIRECTEMENT LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DES GAZ.

300. Dans un grand nombre de circonstances, il est nécessaire de

Pour déduire de ces résultats les valeurs de k de notre formule, remarquons que nous avons

$$v^2 = \frac{2gPD}{D + 2gkL},$$

ou à peu près

$$v^2 = \frac{2gPD}{2gkL} = \frac{PD}{kL};$$

ainsi

$$\frac{gPD}{4L \cdot b} = \frac{PD}{kL};$$

d'où

$$k = \frac{4b}{g} = \frac{4}{9,81} b = 0,4 \cdot b.$$

Alors on a : pour la fonte, $k = 0,4 \cdot 0,002247 = 0,00088$

pour le fer, $k = 0,4 \cdot 0,0032 = 0,00128.$

mesurer la vitesse d'un gaz qui s'écoule. On a essayé à plusieurs reprises d'employer pour cela un appareil analogue au moulinet de Woltmann dont on se sert pour mesurer la vitesse des grands cours d'eau; mais on ne connaissait pas la relation entre la vitesse de rotation et la vitesse de l'air. En 1820, M. Kallsténus employa un moulinet à douze ailes pour mesurer la vitesse de l'air qui sortait de la cheminée d'un four à réverbère, et il fit usage d'une formule qu'il n'avait point vérifiée par l'expérience, et qui d'ailleurs est inexacte. En 1838, M. Combes s'est de nouveau occupé de cette question, et il a fait construire un appareil d'un usage très-commode, dans lequel la relation entre la vitesse v de l'air et le nombre N de tours de la roue est donnée par la formule

$$v = a + bN$$

a et b étant des constantes. Cette formule, qui résulte de considérations purement théoriques, a été confirmée par l'expérience.

301. Cet instrument est représenté en élévation, vu de face et en plan, dans les figures 4, 5 et 6 (planche 1^{re}). Il se compose d'un axe très-délié A , terminé par deux pivots très-fins tournant dans des chapes d'agate B , et sur lequel sont montées les quatre ailettes planes C, C, C, C également inclinées sur un plan perpendiculaire à l'axe. Au milieu de l'axe est taillée une vis sans fin a , laquelle conduit une roue de 100 dents D , de sorte que celle-ci avance d'une dent pour chaque révolution de l'axe A . L'axe de la roue D porte une petite came b qui peut agir sur les dents d'un rochet E de 50 dents; ce rochet est maintenu par un ressort en acier très-flexible F , attaché sur la plaque horizontale G sur laquelle est monté l'instrument. A chaque révolution complète de la roue D , la came fait sauter une dent du rochet; les deux roues sont numérotées de 10 en 10 dents, la première de 1 à 10, et la seconde de 1 à 5. Des aiguilles indicatrices H, H' , fixées au montant I qui porte l'une des chapes de l'arbre des ailettes, servent à marquer le nombre de dents dont chaque roue a avancé, et, par suite, à indiquer le nombre de révolutions de l'axe A . Au moyen d'une détente K et de deux cordons L, L qui servent à la faire mouvoir, on peut, à distance, arrêter le mouvement de rotation des ailes ou leur permettre de tourner sous l'impulsion du courant d'air qui les frappe; ces cordons attachés aux extrémités de la lame cc , fixée sous la plaque, servent à la faire tourner sur le bouton d ; cette lame fait mouvoir la détente K au moyen d'une tige de communication



e qui traverse la plaque G par l'ouverture f . M est une tige verticale fixée sur la plaque G , et servant à porter l'anémomètre et à le maintenir dans la boîte.

302. Pour se servir de cet instrument, on amène d'abord le zéro de chacune des roues vis-à-vis des deux aiguilles indicatrices, puis on place l'instrument sur un support dans la section transversale du canal où circule l'air, l'axe des ailettes étant dans la direction du courant, et l'arrêt étant placé de manière à s'opposer au mouvement. Alors, on s'éloigne de l'instrument, on lâche la détente à un instant donné, et on laisse l'instrument deux ou trois minutes en mouvement, on tire alors le cordon qui doit arrêter le mouvement, et on lit sur l'instrument le nombre des tours effectués pendant la durée de l'expérience. Il ne reste plus qu'à déduire de la formule correspondante à l'instrument qu'on a employé la vitesse d'écoulement de l'air.

303. Pour chaque appareil on détermine les constantes a et b de la formule en le fixant à l'extrémité d'une barre horizontale, qui reçoit un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe vertical, au moyen d'un mécanisme d'horlogerie dont on règle la vitesse en faisant varier l'inclinaison des ailes du volant. C'est en déterminant ainsi les constantes a et b d'un même appareil, par un grand nombre d'expériences, que M. Combes a vérifié l'exactitude de la formule.

304. L'anémomètre de M. Combes est un appareil d'un usage très-commode, et qui est indispensable à tous les ingénieurs qui s'occupent de chauffage; car, ainsi que nous le verrons dans la suite, il n'y a presque point de chauffage qui ne doive être accompagné d'une certaine ventilation, et l'instrument dont nous venons de parler est réellement le seul jusqu'ici qu'on puisse employer pour déterminer directement la ventilation produite.

(1) M. Newman, horloger, rue de Seine, n° 56, construit ces appareils avec beaucoup de soins, et il donne la formule qui convient à chacun d'eux; il vend aussi des petits compteurs à arrêts très-commodes pour les expériences anémométriques.

CHAPITRE IV.

MOUVEMENTS DE L'AIR CHAUD.

§ 1. — VITESSE DUE A LA PRESSION.

305. Lorsqu'une masse d'air isolée est à une température supérieure à celle de l'air environnant, elle tend à s'élever en vertu d'une force égale à l'excès du poids de l'air déplacé sur son propre poids.

306. La même chose a lieu quand l'air chaud est renfermé dans un tuyau vertical ouvert par les deux bouts. En effet, considérons un tuyau AB (fig. 7, Pl. 1) ouvert par les deux bouts, et renfermant de l'air à t'' , l'air extérieur étant à t' ; représentons par P la pression de l'atmosphère en kilogrammes à la hauteur du point A, sur une surface égale à celle de la section du tuyau; par p et p' , les poids de deux colonnes d'air à t'' et t' ayant la hauteur AB et la section du tuyau. Il est évident que la pression exercée au point B de bas en haut sera $P + p$, et que la pression en sens contraire sera $P + p'$; ainsi, si t' est plus grand que t , la colonne d'air chaud tendra à s'élever en vertu de l'excès de pression $p - p'$. Ce serait avec la vitesse correspondante à cette pression que l'air s'écoulerait dans le tuyau AB, si, par un moyen quelconque, l'air y était maintenu à une température constante t' ; par exemple, si on le faisait passer sur une plaque échauffée, placée au bas de la cheminée (fig. 8, Pl. 1).

307. Il résulte de là que la pression qui produit le mouvement de l'air chaud est la même que celle qui s'exercerait dans un siphon renversé ABCD (fig. 9, Pl. 1), à branches égales entre elles et à la hauteur du tuyau d'air chaud, placé dans le vide, et dont une des branches renfermerait un liquide ayant une densité égale à celle de l'air chaud, et l'autre un liquide ayant pour densité celle de l'air froid. L'ef-



fet serait encore le même, si la branche CD renfermait un liquide de même densité que l'air chaud, et si sa hauteur CE était telle que le poids ne fût pas changé. Mais alors, en désignant par h la différence de hauteur des deux colonnes, la vitesse d'écoulement serait celle qu'acquerrait un corps qui tomberait de la hauteur h .

Alors, en désignant par g le nombre 9,8088 qui représente l'intensité de la pesanteur, et par v la vitesse d'écoulement, on aurait

$$v = \sqrt{2gh}.$$

La hauteur h est facile à déterminer; car c'est évidemment la dilatation qu'une colonne d'air d'un diamètre constant éprouverait en passant de la température de l'air extérieur à celle de l'air chaud. Alors, en désignant par t' la température de l'air chaud, par t celle de l'air froid, on aura (37), $h = Ha(t' - t)$, et par suite

$$v = \sqrt{2gHa(t' - t)}. \quad (\text{A})$$

Par exemple, si la colonne d'air chaud avait 10 mètres de hauteur, et si l'air extérieur était à 15° et l'air chaud à 150, la vitesse d'écoulement serait

$$v = \sqrt{19,62 \times 10 \times 0,00365 \times (150 - 15)} = 9^m,9.$$

La formule (A) n'est pas rigoureusement exacte, car la hauteur génératrice de la vitesse est

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

Mais comme t dépasse rarement 20°, $1 + at$ est toujours plus petit que 1,073, et peut par conséquent, sans erreur sensible, être pris pour l'unité.

Il est important de remarquer que g étant estimé en mètres, H doit être également estimé en mètres, que la valeur de a est relative à un degré du thermomètre centigrade, et que la vitesse v représente l'espace parcouru pendant une seconde sexagésimale.

Si on voulait employer toute autre unité que le mètre, et une autre échelle thermométrique, la formule (A) serait applicable, mais les valeurs de g et de a différeraient de celles que nous avons employées; dans l'échelle de Fahrenheit, on aurait $a = 0,00257$.

308. Il semble, au premier abord, que l'expression de la vitesse de l'air chaud puisse s'obtenir en supposant que dans le siphon (fig. 9)

L'air chaud se contracte de manière à acquérir la densité de l'air extérieur, et en prenant la diminution de hauteur pour la hauteur génératrice de la vitesse. Mais on obtiendrait ainsi la vitesse d'écoulement de l'air froid sous la même pression que celle de l'air chaud, et non la vitesse d'écoulement de l'air chaud.

309. Il est évident, d'après ce qui précède, que si le canal d'air chaud était contourné, la vitesse ne dépendrait que de la différence de hauteur des extrémités, et que la longueur du canal serait sans influence, puisque nous n'avons point égard aux frottements.

310. Tout ce qui précède suppose nécessairement que l'air qui s'écoule est de même nature que l'air extérieur; s'il n'en était pas ainsi, les formules précédentes devraient être modifiées; et il est facile de voir que cette modification consisterait à introduire sous le radical un facteur représentant le rapport inverse de la densité tabulaire du gaz à celle de l'air; car, dans les mêmes circonstances, les hauteurs génératrices des vitesses sont évidemment en raison inverse des densités des gaz. Nous examinerons seulement le cas où l'air qui s'écoule a servi à alimenter la combustion.

311. Lorsque de l'air a servi à la combustion du charbon, son oxygène est transformé en acide carbonique, et l'azote n'a éprouvé aucune altération; par conséquent, comme l'air atmosphérique est composé de 79 parties d'azote et de 21 d'oxygène, et comme l'oxygène donne naissance à un égal volume d'acide carbonique, de l'air complètement brûlé sera composé de 79 d'azote et de 21 d'acide carbonique, et on obtiendra évidemment la densité du mélange en multipliant les quantités de ces gaz par leur densité, faisant la somme des produits et divisant par 100; ainsi, la densité de l'azote étant de 0,9757, et celle de l'acide carbonique étant 1,5245, la densité du mélange sera $(21 \times 1,5245 + 0,9757 \times 79) : 100 = 1,09$.

Mais dans tous les foyers, jamais l'air n'est complètement brûlé, toujours une portion s'échauffe sans avoir éprouvé d'altération, et cette quantité est très-variable, car elle dépend de la disposition de l'appareil de combustion, de la grosseur des morceaux de combustible, de leur arrangement, des dimensions de la masse en ignition, et, toutes choses égales d'ailleurs, elle dépend encore de l'activité du foyer, et par conséquent du tirage; elle est en général très-petite pour les combustions vives



et très-grande pour celles qui sont languissantes. Cependant, pour des foyers bien disposés et un tirage convenable, on peut, sans erreur sensible, estimer à moitié la quantité d'air qui échappe à la combustion, et négliger les matières combustibles qui sont entraînées, attendu qu'elles ne sont en quantité appréciable que pendant des instants très-courts, lorsqu'on charge les foyers. D'après cela, la densité de l'air à moitié brûlé sera $(1 + 1,09) : 2 = 1,045$, et on aura pour la vitesse d'écoulement

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t' - t)}{1,045}} \quad (b)$$

La formule exacte serait

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t' - t)}{(1 + at)1,045}} \quad (c)$$

Cette dernière formule diffère trop peu de la première pour qu'il soit nécessaire de l'employer. La formule (b) diffère elle-même si peu de la formule (A), que l'erreur qui peut résulter de l'emploi de cette dernière, pour déterminer la vitesse d'écoulement de l'air qui a servi à la combustion, est tout à fait négligeable, relativement au degré d'approximation qu'on peut espérer. Ainsi, désormais nous employerons la formule (A) pour l'air pur et pour l'air qui a servi à la combustion.

§ 2. — VITESSE D'ÉCOULEMENT DE L'AIR CHAUD DANS UN CANAL CYLINDRIQUE COMPLÈTEMENT OUVERT PAR SES DEUX EXTRÉMITÉS.

312. Dans ce qui précède, nous avons considéré les mouvements de l'air chaud comme étant parfaitement identiques avec ceux d'un liquide de même densité, et nous n'avons point eu égard aux frottements qui se manifestent dans les tuyaux de conduite, et qui dépendent à la fois de leur longueur, de leur diamètre, et de la vitesse du courant. L'assimilation du mouvement de l'air à celui des liquides est autorisée par un grand nombre d'expériences, et surtout par celles qui ont été faites par Girard et par Daubuisson. Quant au frottement, on conçoit qu'il doit produire des résistances qui peuvent avoir une grande influence sur la vitesse.

313. En comparant les résultats de l'expérience avec ceux de la formule précédente, on trouve, en effet, de très-grandes différences surtout quand la température t' est très-élevée. Ces différences avaient d'abord été attri-

buées à l'action des vents, à la suie qui s'accumule dans les cheminées, mais elles résultent évidemment du frottement de l'air dans les tuyaux de conduite.

314. En admettant que les lois du frottement de l'air chaud et de l'air froid soient les mêmes; en désignant par P la pression statique exprimée en air chaud, par p la pression également en air chaud qui produit la vitesse effective, par H la hauteur de la cheminée, par D son diamètre, et par K le coefficient de frottement, on aurait pour une cheminée complètement ouverte à ses deux extrémités

$$P - p = \frac{KH}{D} v^2;$$

et comme $p = v^2 : 2g$, cette expression devient

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KHv^2}{D}; \quad \text{d'où} \quad v^2 = \frac{2gPD}{D + 2gKH} \quad (\text{B})$$

315. J'ai essayé, il y a un grand nombre d'années, de vérifier l'exactitude de cette formule et de déterminer la valeur de K pour différentes substances. J'ai opéré sur des cheminées circulaires en terre cuite, dont les hauteurs ont varié de 3^m,65 à 13^m,38, et les diamètres de 0,08 à 0,21; sur des cheminées en tôle d'une hauteur comprise entre 4^m,11 et 16^m,78; enfin sur une seule cheminée en fonte de 17,05 de hauteur et de 0,20 de diamètre. Toutes ont été montées successivement sur le même fourneau, représenté en coupe par la figure 10, planche 1. Cette précaution était nécessaire pour que les appareils ne différassent que par la cheminée. L'air brûlé se rendait directement dans la cheminée, afin que l'espace parcouru fût seulement la hauteur de la cheminée. La grille avait une très-grande surface relativement à la section de la plus grande cheminée, et le combustible ne la couvrait qu'en partie, afin que l'air n'éprouvât pas de résistance sensible en traversant la grille. L'ouverture du cendrier était aussi très-grande. On ne brûlait dans le foyer que du charbon de bois exempt de fumerons. Les températures aux deux extrémités de la cheminée étaient indiquées par des thermomètres dont les réservoirs étaient placés dans l'axe de la cheminée. Pour déterminer la vitesse d'écoulement, on introduisait rapidement sous la grille par l'orifice du cendrier une mèche imbibée d'essence de térébenthine enflammée, fixée à l'extrémité d'une tige de fer, et on la retirait aussitôt; on produisait ainsi dans le foyer une petite quantité de fumée que l'air chaud entraînait avec lui;

alors, en observant l'instant de l'introduction de la fumée dans le foyer et celui de son apparition au sommet de la cheminée, on avait le temps qu'elle employait à parcourir la cheminée, et on en déduisait facilement la vitesse de l'air.

316. Les résultats de ces expériences sont représentés d'une manière satisfaisante par la formule (B), et ils ont donné pour le coefficient K les valeurs suivantes : 0,0127 pour les cheminées en poterie, 0,0050 pour les cheminées en tôle, 0,0025 pour la cheminée en fonte.

Les tuyaux en terre cuite et en tôle qui ont été employés n'avaient jamais servi, et ils n'ont point été recouverts de noir de fumée pendant la durée des expériences. La cheminée de fonte, au contraire, servait depuis longtemps; elle était tapissée de suie et de noir de fumée. D'après cela, le coefficient relatif à la fonte conviendrait probablement à toute autre substance recouverte de suie, et c'est par conséquent celui qu'il faudrait admettre pour les cheminées ordinaires.

317. L'inégalité des valeurs de K pour les différentes substances m'a d'abord surpris, car il n'en est pas ainsi dans l'écoulement de l'eau. Mais il est très-probable que l'égalité de résistance des tuyaux de différente nature au mouvement de l'eau provient de ce que la substance du tuyau est mouillée par l'eau, qu'il en reste à la surface une couche très-mince, et que réellement l'eau s'écoule dans un tube de ce liquide. Or, rien n'indique que les choses se passent ainsi dans l'écoulement des gaz, et il est au contraire beaucoup plus probable que pour ces corps le frottement a lieu entre le gaz et la surface même du tuyau. Nous avons d'ailleurs signalé une différence semblable dans les mouvements de l'air froid, lorsque nous avons rapporté les expériences faites par Girard (298). Cet ingénieur a trouvé que le coefficient de frottement n'était pas le même pour la fonte que pour le fer.

Si le frottement des gaz dans les tuyaux provient réellement du frottement de ces corps contre les surfaces des tuyaux, comme tout semble l'indiquer, il n'est pas douteux que le coefficient de frottement dépendra non-seulement de la nature de la substance dont le tuyau est formé, mais encore de l'état de sa surface.

318. Il serait fort à désirer que ces expériences fussent reprises, en employant des tuyaux de même nature, mais dont les surfaces soient dans des états différents. On pourrait produire le mouvement de l'air

au moyen d'un gazomètre dans lequel on ferait varier la pression, ou par une cheminée d'appel; mais, dans ce dernier cas, on arriverait à des résultats beaucoup plus exacts en mesurant la vitesse par l'anémomètre de M. Combes. En employant des tuyaux d'une très-grande longueur, on obtiendrait aussi une évaluation plus précise des coefficients de frottement.

319. Il est important de remarquer que l'équation (B), qui a été établie dans l'hypothèse d'une cheminée cylindrique, conviendrait également aux cheminées carrées dont le côté serait égal au diamètre du cercle. En effet, nous verrons bientôt que, pour un canal prismatique d'une forme quelconque, le frottement est proportionnel au contour de la section et en raison inverse de sa surface; or, le rapport du contour à la surface est le même pour le cercle et pour le carré circonscrit.

320. *Influence de la longueur et de la courbure des tuyaux.* En plaçant sur le fourneau dont j'ai déjà parlé, des tuyaux de tôle différemment contournés (fig. 12, pl. 1), j'ai trouvé que les vitesses observées étaient représentées d'une manière satisfaisante par l'équation

$$v^2 = \frac{2gPD}{D + 2gKL} \quad (C)$$

dans laquelle P est égal à *Hat*, et L représente la longueur développée du tuyau.

Ainsi les changements de direction du tuyau n'ont pas d'influence sensible.

321. J'ai aussi vérifié ce dernier fait en plaçant des tuyaux à l'orifice du cendrier (fig. 11, pl. 1). Dans les mêmes circonstances et pour la même longueur du tuyau, la vitesse d'écoulement était la même, quel que fût le nombre des coudes.

322. Si un circuit était composé d'une longueur L parcourue par l'air chaud, et d'une longueur L' parcourue par l'air froid, en désignant par δ la densité de l'air froid relativement à l'air chaud, comme le coefficient de frottement est indépendant de la densité du gaz, on aurait

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D} v^2 + \frac{KL'}{D\delta} v^2. \quad (D)$$

323. *Observations sur les variations de vitesse de l'air en parcourant les tuyaux de conduite.* Les variations de vitesses résultent de deux causes différentes: du décroissement de pression et du refroidissement. L'une tend à augmenter la vitesse, l'autre à la diminuer. On peut facilement ap-



précier les effets produits en remarquant que le poids de l'air qui passe dans un même temps par une section quelconque du canal, doit toujours être le même, et par conséquent que les vitesses dans deux sections égales doivent être en raison inverse des densités de l'air qui les traverse.

324. L'effet qui résulte du décroissement de pression est inappréciable dans presque tous les cas. En effet, considérons une cheminée de 40 mètres de hauteur renfermant de l'air chaud à 300° . Supposons que la pression de l'atmosphère au sommet soit de $0^{\text{m}},76$. Cette pression en air froid sera de 7950 mètres, et en air à 300° de 16655 mètres. Au bas de la cheminée elle sera de $16655 + 40 (1 + 0,00365 \times 300) = 16739$. Ainsi aux deux extrémités de la cheminée les densités seront dans le rapport des nombres 16739 et 16655, ou dans celui des nombres 1,005 et 1.

Dans les appareils de ventilation des mines, dans les grandes conduites de gaz et même dans les souffleries de cubilots, la pression étant toujours inférieure à $0^{\text{m}},20$ d'eau, le rapport des pressions est plus petit que celui de 1033 à 1053, c'est-à-dire plus voisin de l'unité que 0,98. Ainsi, dans tous ces cas, la variation de vitesse due à la variation de pression est toujours négligeable.

325. Mais il n'en est pas ainsi de la variation de vitesse due au refroidissement. Dans deux sections égales où les excès de la température de l'air chaud sur celle de l'air extérieur seraient t' et t'' , les vitesses seraient dans le rapport de $1 + at''$ à $1 + at'$; et la première serait égale à la seconde multipliée par $(1 + a(t'' - t'))$. Ainsi, pour une différence de 100, le rapport des vitesses serait celui de 1 à 1,365.

326. Il semble, d'après cela, que dans la formule du mouvement de l'air dans les cheminées, il faille tenir compte des variations de résistance qui proviennent du refroidissement, et que la formule que nous avons établie en prenant seulement la résistance correspondante à la température moyenne, doive s'éloigner beaucoup de la réalité. Mais il n'en est pas ainsi. En faisant le calcul dans l'hypothèse que la température décroisse uniformément, et en faisant la somme des résistances dans tous les éléments, on trouve en effet une vitesse plus petite que celle qu'on obtient en calculant la résistance d'après la température moyenne; mais cette plus petite vitesse correspond à la température au sommet de la cheminée, et en la ramenant à ce qu'elle serait à la température moyenne de l'air dans la cheminée, température qui est celle de l'air écoulé, dans

l'hypothèse que nous avons admise, on trouve des nombres qui diffèrent très-peu de ceux qu'on obtient par la formule (B).

Par exemple, en calculant la vitesse d'écoulement de l'air à l'extrémité d'une cheminée ayant 20 mètres de hauteur, 0,5 de diamètre, en supposant l'air extérieur à 0°, la température au bas de la cheminée de 100, et un refroidissement complet au sommet, on trouve $v = 2,25$, tandis que la formule (B) donne $v = 2,63$, en prenant 50° pour la température moyenne. Mais la première vitesse est celle de l'air à 0°, et la seconde le suppose à 50°. Alors, en désignant par s la section de l'orifice de la cheminée, les volumes de gaz à 50° écoulés dans une seconde seraient, dans le premier cas, $s \times 2,25 (1 + 0,00365 \times 50) = s \times 2,65$; et, dans le second, $s \times 2,63$. Ainsi on voit que, dans les deux cas, les volumes d'air écoulés diffèrent bien peu. Il est fort heureux qu'il en soit ainsi, car des formules qui dépendraient de la loi de décroissement de la température dans une cheminée, ne pourraient servir à rien.

327. *Vitesse d'écoulement de l'air chaud dans un canal composé de deux branches verticales renfermant de l'air à des températures différentes et réunies par un canal horizontal, toutes les parties ayant le même diamètre. Il y a deux cas à considérer : celui où la branche horizontale est à la partie inférieure, et celui où elle réunit les parties supérieures. Occupons-nous d'abord du premier (fig. 13, pl. 1).*

Désignons par H et H' les hauteurs AB et CD , et par t et t' les excès des températures de l'air qu'elles renferment sur celle de l'air extérieur, par L la longueur de la partie horizontale, et par h la hauteur d'une colonne d'air froid équivalente à la pression de l'atmosphère au point D .

La pression verticale de haut en bas au point C sera

$$h + \frac{H'}{1 + at'}$$

Cette pression se transmettra horizontalement contre la tranche mn . Cette même tranche recevra une pression en sens contraire qui sera représentée par

$$h + H - H + \frac{H}{1 + at}$$

Alors l'excès de cette dernière pression sur la première, en négligeant dans le numérateur les termes qui renferment a^2 , sera

$$\frac{a(H't' - Ht)}{(1 + at)(1 + at')}$$



Ainsi l'écoulement aura lieu par le point D ou par le point A, suivant qu'on aura

$$H't' > Ht, \text{ ou } H't' < Ht.$$

Supposons que la première condition soit satisfaite. Pour avoir la hauteur motrice, il faudra estimer la pression en une colonne d'air chaud à t' ; elle sera alors

$$\frac{a(H't' - Ht)}{1 + at},$$

et, pour obtenir la vitesse d'écoulement, il faudra, en négligeant les variations de vitesses qui résultent des variations de température dans le circuit, remplacer dans la formule (B), P par l'expression précédente, et L par $H + H' + L$, alors il viendra

$$v^2 = \frac{2ga(H't' - Ht)D}{(1 + at)(D + 2gK(H + H' + L))}.$$

328. Supposons maintenant que le canal ait la forme représentée par la figure 14 (pl. 1), et cherchons d'abord la pression en air froid qui produirait l'écoulement par l'extrémité D. En conservant les mêmes dénominations que précédemment, la pression de bas en haut au point C sera $h - H' : (1 + at')$. Cette pression se transmettra horizontalement contre la tranche mn . La pression exercée en sens contraire contre cette tranche sera évidemment

$$h - (H' - H) - \frac{H}{1 + at},$$

et la différence entre cette pression et la précédente sera

$$h - H' + H - \frac{H}{1 + at} - h + \frac{H'}{1 + at'},$$

expression qui se réduit à

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

Et pour obtenir la vitesse d'écoulement, il faudra, comme précédemment, transformer cette colonne d'air froid en une autre de même poids à la température t' ; ce qui s'obtiendra en la multipliant par $(1 + at')$; alors la vitesse d'écoulement sera

$$v^2 = \frac{2ag(Ht - H't')D}{(1 + at)(D + 2gK(H + H' + L))}.$$

Il est important de remarquer que l'écoulement de l'air chaud par

l'extrémité D située au-dessous du point A, peut se réaliser par le seul fait du refroidissement progressif de l'air; et pour cela il faudrait ralentir autant que possible le refroidissement de l'air dans la branche AB, et, au contraire, favoriser autant que possible le refroidissement des branches BC et CD.

329. On trouverait facilement, d'après cela, la vitesse d'écoulement de l'air qui circulerait dans un tuyau composé d'un nombre quelconque de branches ascendantes et descendantes, dont on connaîtrait les hauteurs et pour chacune d'elles la température moyenne de l'air.

§ 3. — VITESSE D'ÉCOULEMENT DE L'AIR CHAUD DANS UNE CHEMINÉE RÉTRÉCIE SUPÉRIEUREMENT.

330. Lorsqu'une cheminée est rétrécie par la partie supérieure, la vitesse de l'air dans le canal est diminuée, et par suite le frottement; alors une plus grande partie de la pression génératrice est conservée, et par conséquent la vitesse d'écoulement par l'orifice doit être d'autant plus grande que l'orifice est plus petit par rapport à la section de la cheminée et à la limite on doit arriver à la vitesse qui aurait lieu s'il n'y avait pas de frottements. J'ai vérifié ces indications de la théorie sur un grand nombre de cheminées, et elles s'accordent parfaitement avec les expériences faites par Daubuisson sur l'écoulement de l'air froid produit par une pression directe.

331. Pour obtenir l'expression de la vitesse en fonction des divers éléments dont elle dépend, conservons la notation déjà employée, et désignons par S la section de la cheminée, par s la surface de l'orifice, et par φ le coefficient de contraction de la veine, coefficient qui varie suivant que l'écoulement a lieu par un orifice percé en mince paroi, par un ajutage court et cylindrique ou évasé (284). En observant que les vitesses sont en raison inverse des sections, puisque le même volume de gaz doit passer à chaque instant par une tranche horizontale quelconque, nous aurons

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KH}{D} \cdot \frac{s^2 \varphi^2}{S^2} v^2; \quad \text{d'où} \quad v^2 = \frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gKHs^2\varphi^2} \dots \quad (E)$$

332. En substituant à K dans cette équation les valeurs relatives aux



cheminées en terre cuite, en tôle et en fonte, et pour φ ses différentes valeurs, on aura les formules qui conviennent à tous les cas.

333. En supposant le coefficient de contraction égal à l'unité, ce qui est suffisamment exact quand l'orifice n'est pas percé dans une mince paroi, on a

$$v^2 = \frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gKHs^2} \dots \quad (F)$$

334. Si on suppose le rapport $S:s$ très-grand, le terme $2gKHs^2$ pourra être négligé devant DS^2 , et l'équation (F) deviendra

$$v = \sqrt{2gP}.$$

Ce résultat était prévu, parce que, dans la circonstance supposée, la vitesse de l'air dans la cheminée étant nulle, il n'y a pas de frottement.

335. Comparons maintenant la vitesse dans une cheminée rétrécie par la partie supérieure, à celle qui se produirait dans une cheminée de même hauteur qui aurait pour diamètre celui de l'orifice. En désignant par v' cette dernière vitesse, on aura

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{\frac{DS^2(2gKH + d)}{d(DS^2 + 2gKHs^2)}}.$$

Si on suppose S très-grand par rapport à s , on pourra négliger $2gKHs^2$, et cette expression deviendra

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{1 + \frac{2gKH}{d}}. \quad (G)$$

Elle représente le maximum du rapport $\frac{v}{v'}$. Mais, pour l'obtenir, il n'est pas nécessaire de donner à $S:s$ une valeur extrêmement grande, car quand on fait croître ce rapport, celui de v à v' augmente d'abord très-rapidement, et ensuite avec une prodigieuse lenteur; c'est ce qui résulte de la forme de l'expression (G). Un exemple particulier fera mieux voir la loi de ces accroissements. Supposons une cheminée en terre cuite de 10 mètres de hauteur, et supposons $d=0,20$, le maximum du rapport de v' à v donné par la formule (G) est 3,53; et en donnant successivement les valeurs 2, 3, 4, 5 au rapport $S:s$, on trouve pour $v:v'$; 3,07; 3,42; 3,52; 3,53. Ainsi, en donnant à la cheminée un diamètre deux ou trois fois plus grand que celui de l'orifice, on obtient sensiblement le maximum d'effet. C'est une circonstance importante dans la pratique.

336. Si l'air froid parcourait un canal de même diamètre que la cheminée avant d'y pénétrer, en désignant par L la longueur totale du circuit, et en négligeant l'influence des variations de vitesses résultant des variations de température, on aurait

$$v^2 = \frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gKLS^2};$$

et si on supposait que tout le circuit augmentât de diamètre de manière que la vitesse de l'air y fût insensible, l'orifice supérieur restant constant, on trouverait pour le rapport de $v:v'$ de la vitesse dans le second cas à la vitesse dans le premier

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{1 + \frac{2gKL}{d}}.$$

§ 4. — VITESSE DE L'AIR CHAUD DANS UN CANAL RÉTRÉCI A LA PARTIE INFÉRIEURE.

337. En général, dans des tuyaux d'une forme quelconque qui conduisent de l'eau, on admet que, pour chaque rétrécissement brusque du canal dans le sens du mouvement du liquide, la perte de hauteur motrice est égale à $(v''^2 - v'^2):2g$, v' et v'' étant les vitesses dans les tuyaux qui se succèdent; et que pour chaque rélargissement brusque, toujours dans le sens du mouvement, et pour chaque étranglement par un diaphragme, la perte de hauteur motrice est égale à $(v'' - v')^2:2g$, v' et v'' ayant la même signification que précédemment. Alors en supposant que ces lois subsistent pour les gaz et en désignant par v' la vitesse dans l'orifice inférieur de la cheminée, et en conservant les notations déjà employées, on aurait pour l'écoulement de l'air par une cheminée rétrécie à la partie inférieure

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KHv^2}{D} + \frac{(v' - v)^2}{2g}.$$

Et en représentant par S et s les sections de la cheminée et de l'orifice, et par φ le coefficient de contraction, on aurait $vS = v's\varphi$, et par suite

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KHv^2}{D} + \frac{v^2}{2g} \left(\frac{S - s\varphi}{s\varphi} \right)^2;$$

d'où

$$v^2 = \frac{2gPDS^2\varphi^2}{Ds^2\varphi^2 + 2gKHS^2\varphi^2 + D(S - s\varphi)^2}. \quad (H)$$



338. Cette formule ne s'accorde pas avec l'expérience. Nous rapporterons d'abord quelques faits qui en démontrent l'inexactitude avec évidence.

339. Dans les grands systèmes de chaudières à vapeur, dans lesquels la cheminée a 30 mètres de hauteur, 1 mètre de côté au sommet, le circuit total de 50 à 60 mètres, et où la température de l'air dans la cheminée est à peu près de 300°, on brûle par heure 700 kilog. de houille, consommation qui correspond à une vitesse d'écoulement de $700 \times 18 \times (1 + 0,00365 \times 300) : 3600 = 7^m,33$; tandis que la vitesse due à la hauteur motrice est de $25^m,33$. Ainsi, il y a à peu près les 0,70 de la vitesse perdus par toutes les résistances qui se rencontrent dans le trajet. Cependant, les grilles ont une surface libre très-peu différente de celle de la section de la cheminée, et cette surface est toujours couverte d'une couche épaisse de combustible, dont les fragments, plus ou moins agglutinés, produisent un rétrécissement énorme dans la section totale du passage de l'air, et occasionnent une résistance beaucoup plus considérable encore par la division des veines d'air. En outre, les grandes cheminées sont toujours coniques et ont ordinairement un diamètre deux ou trois fois plus grand à la partie inférieure qu'à la partie supérieure. Enfin, à ces deux espèces de résistances il faut encore ajouter les frottements dans tout le trajet.

Or, le passage de l'air dans la cheminée rélargie, en admettant la loi du mouvement des liquides, et le frottement, réduiraient à eux seuls la vitesse à moins de moitié. Car en n'ayant égard qu'à ces deux circonstances, on aurait

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KLv^2}{D} + \frac{(v' - v)^2}{2g}; \quad \text{et par suite } v = \frac{\sqrt{2gP}}{2,13}.$$

Il résulterait de là que l'influence de la grille serait très-petite; conséquence inadmissible, car s'il y a réellement une grande perte de hauteur motrice par les changements de vitesse, elle doit être incomparablement plus grande pour le passage de l'air à travers la grille que pour toutes les autres résistances.

340. Dans les appartements chauffés par des feux de cheminée, l'air pénètre par les fissures des portes et des fenêtres; or, la somme totale des surfaces de ces orifices est très-petite relativement à la section transversale de la cheminée, et ces orifices, par leur forme étroite et

allongée, souvent capillaire, doivent occasionner une résistance beaucoup plus grande qu'un orifice circulaire de même surface. En outre, l'air est souvent appelé à travers plusieurs pièces, et à chaque passage d'une section très-petite dans une autre très-grande, on perdrait toute la charge correspondante à la vitesse dans l'étranglement. Alors, en admettant que les mouvements des gaz soient soumis aux mêmes lois que ceux des liquides, on ne peut plus rendre compte de la quantité énorme d'air appelé par nos foyers domestiques, quantité qui, pour la même consommation de combustible, est souvent dix fois plus grande que dans les foyers fermés et à grilles, parce qu'une très-petite partie de l'air appelé traverse le combustible.

341. J'ai fait d'ailleurs un grand nombre d'expériences directes dont les résultats ne permettent pas de douter que les formules admises pour l'écoulement de l'eau ne conviennent pas à l'écoulement des gaz.

Les expériences dont il est question ont été faites sur des cheminées en poterie, en tôle et en fonte, de différentes hauteurs et de différents diamètres. Les diaphragmes étaient des feuilles de tôle percées de petits orifices et appliquées, tantôt à l'ouverture du cendrier, tantôt directement au bas de la cheminée. Dans le premier cas, les bords des plaques étaient parfaitement lutés contre le cadre du cendrier. Dans le second, les plaques étaient introduites dans une petite caisse en briques ABCD (fig. 10, pl. I), ouverte en avant et d'environ 0^m,1 de hauteur; la plaque était posée sur le fond de la caisse où se trouvait une large ouverture communiquant avec le foyer; on lutait avec soin les bords de la plaque et on fermait la caisse avec des briques et de la terre.

342. D'abord, dans toutes ces expériences j'ai obtenu sensiblement la même vitesse quand la plaque était placée à l'ouverture du cendrier ou au bas de la cheminée, tandis que dans l'hypothèse que les mouvements de l'air suivent les lois observées pour l'écoulement de l'eau, la différence aurait dû être très-grande.

343. En outre, j'ai toujours obtenu des vitesses au sommet de la cheminée beaucoup supérieures à celles qui résultent de la formule (H), en supposant le coefficient de contraction égal à 0,65, et ces différences étaient d'autant plus grandes pour la même cheminée et dans les mêmes circonstances, que le diamètre de l'orifice était plus petit relativement à celui de la cheminée. Ces différences étaient d'ailleurs trop grandes pour



que la variation du coefficient de contraction ou celle de la hauteur à laquelle la veine d'air pouvait être portée dans la cheminée, pussent en rendre compte.

Je rapporterai seulement des expériences faites à la même température sur une cheminée de fonte de 17 mètres de hauteur et de 0^m,20 de diamètre. La cheminée étant d'abord tout ouverte et ensuite fermée successivement à la partie inférieure par des plaques percées d'ouvertures circulaires de 0^m,11; 0^m,055 et 0^m,0275 de diamètre, les vitesses observées ont été de

$$4^{\text{m}},73; 2^{\text{m}},84; 1^{\text{m}},70; \text{et } 0^{\text{m}},81.$$

344. Dans ces expériences, la vitesse due à la colonne d'air chaud était égale à 10^m,74; la résistance due au frottement était de 0,21 v^2 ; la surface de la section de la cheminée était égale à 0,031, et par conséquent en désignant par s la surface de l'orifice et en prenant 0,65 pour coefficient de contraction, la formule (H) donne d'abord

$$v^2 = \frac{2gP}{1 + \frac{2gKH}{D} + \left(\frac{s - \varphi s}{\varphi s}\right)^2} = \frac{2gP}{2 + \frac{2gKH}{D} + \frac{s}{\varphi s} \left(\frac{s}{\varphi s} - 2\right)};$$

et par suite

$$v = \frac{10,74}{6,16 + \frac{0,031}{0,65s} \left(\frac{0,031}{0,65s} - 2\right)}.$$

Alors en substituant successivement pour s , 0,0094; 0,0023; et 0,0006, on trouve pour les trois dernières vitesses, les nombres

$$2,33; 0,56; \text{et } 0,13.$$

On voit que les résultats du calcul diffèrent beaucoup de ceux que donne l'expérience. Les observations faites sur les autres cheminées en poterie conduisent à la même conséquence.

345. Il résulte de ce qui précède, que toute la hauteur due au changement de vitesse n'est pas perdue; or, en cherchant à quelle partie de cette hauteur correspondent les vitesses observées, on trouve que, pour les trois diaphragmes qui ont été employés, les pertes effectuées sont 0,37; 0,27, et 0,03 de celles que suppose la formule (H). Ainsi les pertes

ne sont pas représentées par une fraction constante de la hauteur d'air correspondante à la différence des vitesses.

346. En supposant que les pertes de hauteur soient représentées par

$$\frac{s}{S} \left(\frac{v'^2 - v^2}{2g} \right),$$

on trouve, pour les vitesses d'écoulement, les nombres

$$3,1; 1,8; \text{ et } 0,98;$$

qui n'excèdent ceux qui résultent de l'observation que d'une quantité assez petite. Cette même hypothèse, appliquée aux expériences faites sur les autres cheminées, a donné des résultats analogues.

347. On doit conclure de tout ce que nous venons de dire, 1° que, dans un canal parcouru par l'air, la perte de hauteur motrice occasionnée par un étranglement, est beaucoup plus petite que la hauteur qui correspond à la différence des vitesses dans l'étranglement et après; 2° que la perte réelle est un peu plus grande que la différence des hauteurs correspondantes aux vitesses multipliée par le rapport de la surface de l'orifice à celle du canal qui suit l'étranglement; 3° que le rélargissement brusque d'un canal, du moins dans une certaine étendue et dans de certaines limites, a peu d'influence.

348. Les phénomènes qui se produisent dans le cas dont il s'agit sont très-complicés et n'ont point encore été étudiés par les géomètres; mais on comprend facilement que l'absence de toute élasticité dans l'eau et l'élasticité complète de l'air doivent produire, dans certaines circonstances, de grandes différences dans les phénomènes qui accompagnent l'écoulement de ces deux fluides. On sait, par exemple, que, pour les corps dépourvus d'élasticité, il y a dans le choc une très-grande perte de force vive; tandis que quand les masses sont parfaitement élastiques, il n'y a point de force vive perdue. On ne peut pas assimiler les phénomènes qui se passent dans le choc des corps à ceux qui se produisent quand une veine d'air sort d'un petit orifice pour pénétrer dans un tuyau beaucoup plus large; mais il est très-probable que les veines d'air qui sortent des petits orifices compriment les tranches qui se trouvent devant elles, et que celles-ci, par leur détente, restituent au moins en partie l'excès de force vive que la veine possédait dans l'orifice.

349. D'après ce qui précède, dans une cheminée rétrécie par la partie



inférieure, en supposant l'orifice percé dans une paroi épaisse, la vitesse d'écoulement sera comprise entre celles qui résultent des deux équations

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KHv^2}{D} + \frac{(S-s)^2}{2gs^2} v^2 \dots (1); \text{ et } P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KHv^2}{D} + S \cdot \frac{S^2 - s^2}{2gs^2} v^2 \dots (2).$$

Les vitesses d'écoulement qui résultent de la première équation sont beaucoup plus petites que les vitesses réelles; celles qui se déduisent de la seconde sont plus grandes, mais elles s'en rapprochent beaucoup plus.

350. Les vitesses d'écoulement par l'orifice supérieur de la cheminée, déduites de ces deux équations, sont

$$v^2 = \frac{2gPDs^2}{Ds^2 + 2gKHs^2 + D(S-s)^2}; \text{ et } v^2 = \frac{2gPDSs^2}{Ss^2(D + 2gKH) + Ds(S^2 - s^2)}.$$

351. Lorsqu'on supposera S très-grand par rapport à s , on pourra négliger au dénominateur de la première équation les termes qui renferment s , et elle deviendra

$$v^2 = \frac{2gPs^2}{S^2};$$

et la vitesse dans l'orifice sera

$$v^2 = 2gP.$$

352. Ainsi, dans l'hypothèse sur laquelle est fondée cette équation, si on augmente progressivement le diamètre d'une cheminée dont l'orifice inférieur reste constant, la vitesse dans l'orifice augmentera jusqu'à une certaine limite qui est la vitesse due à la hauteur de la colonne d'air chaud; ainsi on ne gagnerait par l'accroissement de diamètre que la hauteur motrice correspondante aux frottements, et cet effet s'obtiendrait sensiblement en donnant à la cheminée un diamètre trois ou quatre fois plus grand que celui de l'orifice inférieur, attendu que les frottements étant proportionnels aux carrés des vitesses, ils diminuent suivant une loi très-rapide à mesure que les diamètres augmentent.

353. D'après l'équation (2) qui, comme nous l'avons dit, s'approche beaucoup plus de la réalité que la première, les vitesses dans l'orifice vont en croissant indéfiniment à mesure que le diamètre de la cheminée augmente, et cette vitesse peut devenir beaucoup plus grande que la vitesse due à la hauteur de la colonne d'air chaud. Cette circonstance se trouve vérifiée dans la dernière des expériences rapportées (346): la

vitesse due à la hauteur était $10^m,73$; la vitesse observée à la partie supérieure était de $0^m,81$ lorsque la surface du diaphragme était égale à $0^m,0006$; or, comme la section de la cheminée était de $0^m,0314$, la vitesse dans l'orifice était de $0,81 \times 0,0314 : 0,0006 = 42^m,12$, vitesse à peu près quatre fois plus grande que celle qui est due à la hauteur.

354. L'accroissement de vitesse dans l'orifice inférieur serait encore beaucoup plus considérable si, à partir des bords de l'orifice, la section de la cheminée augmentait progressivement et d'une manière continue jusqu'à une certaine hauteur, car on sait qu'alors il n'y aurait point de hauteur motrice perdue par les changements de vitesse, il ne resterait que la perte qui résulte des frottements.

355. Cette influence du rélargissement d'une cheminée sur l'appel qu'elle produit, est un fait très-important dans la construction des appareils de chauffage et de ventilation, car elle permet, avec la même dépense de chaleur, de vaincre de plus grandes résistances ou de produire le même effet en abaissant la température de l'air brûlé ou de l'air chaud.

356. Si l'orifice communiquait avec un canal de même section, et c'est ce qui arrive toujours dans les fourneaux, la vitesse d'écoulement, en supposant qu'il n'y eût pas d'autres résistances que celles dont il a été question, se calculerait au moyen de la formule

$$P - \frac{v^2}{2g} = v^2(A + B + C),$$

dans laquelle A représenterait le frottement dans le tuyau d'appel, B la perte de hauteur due au changement de section du canal, et C les frottements dans la cheminée. En supposant le canal et la cheminée carrés ou circulaires, les quantités A et C seraient de la forme $KLv'^2 : D$; K étant le coefficient de frottement, L la longueur du canal, D son diamètre ou son côté, et v' la vitesse de l'air; ainsi, dans ce cas, on calculerait facilement leurs valeurs.

Si le changement de section du canal avait lieu d'une manière continue dans une étendue suffisante pour que la veine d'air la remplît complètement, la quantité B se réduirait à la perte due au frottement dans la partie évasée du canal, perte analogue à celle qui est produite par le passage de l'air dans un canal ayant la forme d'un tronc de cône ou de pyramide, et dont nous donnerons l'expression dans le paragraphe suivant. Mais si le changement de section était brusque, on obtiendrait une ap-



proximation suffisante de la perte de hauteur motrice en lui supposant la valeur indiquée (346), et en admettant qu'il n'y ait pas de contraction de la veine; la formule se réduirait alors à

$$\frac{v'^2 - v^2}{2g} \cdot \frac{s}{S} = \frac{S^2 - s^2}{2gs^2} \cdot \frac{s}{S} v^2 = \frac{S^2 - s^2}{2gsS} v^2.$$

357. On obtiendra ainsi des vitesses qui seront un peu trop grandes, mais qui s'approcheront beaucoup plus de la réalité que si on prenait pour la perte due au changement de section, l'expression $(v' - v)^2 : 2g$ qui convient aux liquides.

§ 5. — MOUVEMENT DE L'AIR DANS DES CHEMINÉES DE DIFFÉRENTES FORMES.

358. Les formes de cheminées que nous avons examinées jusqu'ici ne sont point celles qui sont généralement employées; toujours les cheminées, du moins les grandes cheminées d'usine, ont une forme pyramidale tantôt continue, tantôt composée de prismes de diamètres décroissants; souvent aussi elles sont coniques. Nous examinerons successivement ces différentes formes.

359. *Cheminées composées de parties cylindriques ou prismatiques.* Dans ces sortes de cheminées, les diamètres des parties cylindriques ou prismatiques vont toujours en augmentant à partir du sommet. En désignant par D le diamètre du prisme ou du cylindre qui termine la cheminée, par D' , D'' , D''' , etc., les diamètres des autres cylindres, par L , L' , L'' , etc., leurs longueurs, par v , v' , v'' , etc., les vitesses de l'air dans chacun d'eux, on aura

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D} v^2 + \frac{KL'}{D'} v'^2 + \frac{KL''}{D''} v''^2 + \text{etc.} + Rv^2.$$

Rv^2 représentant la somme des pertes de charge dues aux résistances que l'air éprouve avant d'arriver à la cheminée, et à celles qui résultent des changements brusques de vitesse dans la cheminée, et qui serait exactement pour chacun, $(v'^2 - v^2) : 2g$.

360. *Cheminées coniques ou pyramidales.* Supposons d'abord la cheminée conique, et désignons par H sa hauteur, par D le diamètre à la base, par d celui du sommet, et posons $D = md$. On trouve par le calcul

que la résistance due au frottement est représentée par

$$\frac{KHv^2}{4d(m-1)} \cdot \frac{m^4 - 1}{m^4} \cdot \frac{1}{\cos \varphi}.$$

361. Quand m dépassera 2 ou 3, et que la cheminée formera un cône très-allongé, circonstances qui se rencontrent toujours dans les grandes cheminées d'usine, on pourra prendre pour la résistance, $KHv^2 : 4d(m-1)$.

En désignant par Rv^2 la somme des résistances que l'air éprouve avant de pénétrer dans la cheminée, on aura

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KH}{4D(m-1)} \frac{m^4 - 1}{m^4 \cos \varphi} v^2 + Rv^2.$$

362. Si la cheminée était une pyramide à quatre faces, la vitesse d'écoulement serait exactement la même que celle qui aurait lieu dans le cône inscrit; c'est ce qui résulte de ce que nous avons dit (319). Ainsi les formules précédentes conviennent aux deux cas.

363. Si la cheminée était formée d'une série de cônes ou de pyramides tronqués, on arriverait à une approximation bien suffisante, en la considérant comme formée par la pyramide ou la surface conique qui passerait par les bases supérieures des cônes ou des pyramides tronqués.

364. *Cheminée d'une forme prismatique, mais d'une section quelconque.* Lorsqu'un liquide ou un gaz se meut dans un canal prismatique d'une forme quelconque, les molécules de la circonférence de chaque tranche, en frottant contre les parois du tuyau, éprouvent une résistance qui se transmet de proche en proche aux molécules de la tranche, et il en résulte une force retardatrice constante proportionnelle à la surface du canal, au carré de la vitesse et en raison inverse de la section. Cette force est alors représentée par

$$\frac{K'CHv^2}{S},$$

expression dans laquelle K' représente un nombre constant, C le contour d'une tranche, S sa surface, H la longueur du cylindre, et v la vitesse d'écoulement.

365. Pour appliquer cette formule à un tuyau circulaire, il faut faire $C = \pi D$, et $S = \pi D^2 : 4$; il vient alors

$$\frac{4K'Hv^2}{D},$$



tandis que la formule que nous avons employée dans le cas dont il s'agit est

$$\frac{KHv^2}{D},$$

ainsi $4K' = K$, donc $K' = K : 4$. Alors en prenant pour K les nombres rapportés précédemment, la résistance dans un tuyau prismatique sera

$$\frac{KCHv^2}{4S}.$$

366. Le cercle étant la figure qui, pour une étendue superficielle constante, a le moins de contour, il sera toujours avantageux d'employer des sections circulaires. Par exemple, pour une section carrée ayant l'unité de surface $C : S = 4$, et pour un cercle de même surface, le même rapport est $2\sqrt{\pi} = 3,54$. Mais, comme nous l'avons déjà dit, la résistance serait la même pour un cercle et pour le carré circonscrit.

367. Pour faire voir combien la forme de la section a d'influence sur le frottement, comparons deux cheminées de même section, l'une carrée, l'autre rectangulaire; supposons, par exemple, que la section commune soit de $0^m,20$, et que l'une ait $0^m,44$ de côté, et l'autre 1 mètre sur $0^m,20$. Le contour de la première sera $0^m,44 \times 4 = 1^m,76$, et celui de la seconde sera $2^m,40$, et par conséquent pour l'unité de longueur la résistance de la première section sera $\frac{K}{4} \cdot \frac{1,76}{0,20}$, et celle de la seconde $\frac{K}{4} \cdot \frac{2,4}{0,2}$; résistances qui sont entre elles comme 176 : 240.

§ 6. — DÉTERMINATION DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DE L'AIR DANS UNE CHEMINÉE PRÉCÉDÉE D'UN CIRCUIT D'UNE FORME QUELCONQUE.

368. Dans tous les cas qui pourront se présenter, la hauteur motrice sera $P = Ha(t' - t)$, H étant la hauteur de la cheminée, a le coefficient de dilatation des gaz 0,00365, t' la température moyenne de l'air chaud dans la cheminée, et t , celle de l'air extérieur. Et la vitesse d'écoulement s'obtiendra au moyen de l'équation

$$P - \frac{v^2}{2g} = (M + N)v^2;$$

équation dans laquelle v est la vitesse d'écoulement à la partie supérieure de la cheminée, Mv^2 la somme des hauteurs d'air qui repré-

sentent les frottements dans toute l'étendue du circuit, et N la somme des hauteurs d'air qui correspondent aux changements brusques de vitesse.

Pour toutes les parties prismatiques à base carrée ou circulaire, la résistance sera représentée par

$$\frac{KL}{D} v'^2.$$

Et pour les parties prismatiques d'une section quelconque la résistance sera exprimée par

$$\frac{KCL}{4S} v'^2.$$

Quant à la valeur de N , elle serait complètement nulle, si la section du canal était constante ou si les variations de section avaient lieu d'une manière continue. Mais s'il y a des changements brusques de section, il y aura une perte de hauteur correspondante qu'il est impossible d'évaluer avec exactitude. En la supposant la même que dans le mouvement des liquides, elle sera sans aucun doute beaucoup trop grande, et le calcul donnera une vitesse trop petite. Si on admet pour la perte relative aux rétrécissements brusques l'évaluation approximative de l'article 346, la vitesse sera trop grande, mais cependant beaucoup plus voisine de la vérité que la première. D'après cela, il sera convenable de faire le calcul dans les deux hypothèses, pour obtenir deux limites entre lesquelles se trouvera la vitesse réelle.

§ 7. EFFETS PRODUITS PAR LA RENCONTRE DES COURANTS.

369. Lorsque plusieurs tuyaux débouchent dans un même canal, les veines d'air se prolongent au delà des orifices, et dans certaines circonstances elles peuvent par leur action mutuelle modifier les vitesses d'écoulement de l'air dans les tuyaux. Si, par exemple, deux tuyaux A et B (fig. 15, pl. 1^{re}) débouchaient par des orifices en regard dans un tuyau C, l'influence des veines serait nulle si les deux courants avaient la même vitesse, parce que tout se passerait comme si les veines venaient choquer un plan fixe placé entre elles; mais si les vitesses étaient inégales, celle qui aurait la plus grande vitesse diminuerait la vitesse de l'autre, et fermerait plus ou moins l'orifice par lequel celle-ci s'écoule. Un grand nombre



de phénomènes ne permettent pas de douter de ce fait; d'ailleurs, ces veines doivent agir les unes sur les autres à peu près comme des veines d'eau, et on sait, d'après les expériences de Savart, que quand deux veines de même section agissent en sens contraire, et que l'une d'elles a un très-petit excès de vitesse sur l'autre, cette dernière est refoulée jusqu'à l'orifice du vase, et que l'écoulement cesse complètement. On éviterait les effets qui résultent de ces chocs en plaçant dans le tuyau un diaphragme MN, comme l'indique la figure 1, (pl. 2.)

370. Des phénomènes du même genre se produiraient si les deux tuyaux étaient à angle droit, comme l'indique la figure 2, (pl. 2), et ils se trouveraient en outre compliqués de l'effet résultant des pressions latérales. Mais on éviterait complètement ces effets au moyen du diaphragme MNP. Si le tuyau était évasé comme dans la figure 3, le rétrécissement du tuyau en avant de l'orifice du tuyau latéral produirait l'effet d'un diaphragme; l'influence du choc des veines pourrait être négligée, mais celle qui proviendrait de la diminution de pression due au rélargissement du tuyau pourrait être très-grande.

371. Dans le cas où un courant d'air chaud déboucherait horizontalement dans une cheminée d'appel verticale, il pourrait arriver que l'appel fût tout à fait anéanti, quoique la section de la cheminée fût plus grande que celle du courant d'air chaud, si la vitesse de ce dernier était très-grande, parce qu'alors il fermerait la cheminée comme une soupape.

C'est un fait que j'ai eu l'occasion de remarquer un grand nombre de fois, et notamment dans une grande cheminée d'appel que j'avais fait construire dans une fabrique de soude et qui faisait partie d'un appareil de condensation. La cheminée avait 13^m,30 de hauteur et près de 0^m,75 de section; le canal à fumée d'un four à soude y débouchait horizontalement (fig. 4, pl. 2). Lorsqu'on commença à allumer le feu du four à soude, l'appel eut lieu: il augmenta pendant quelque temps, diminua ensuite, et finit par être complètement nul quand le fourneau commença à travailler. Je reconnus bientôt la cause de ce phénomène singulier, et j'y remédiai au moyen d'une cloison MN placée dans l'intérieur de la cheminée d'appel, de manière que l'air chaud ne fût mis en liberté, dans la cheminée, qu'après avoir pris une direction verticale (fig. 5, pl. 2).

372. Ainsi, il faut avoir le plus grand soin, dans toutes les cheminées

d'appel qui reçoivent le courant d'air chaud perpendiculairement à leur direction, de diriger le jet d'air chaud parallèlement à la cheminée.

§ 8. PRESSIONS EXERCÉES PAR LES GAZ EN MOUVEMENT CONTRE LES TUYAUX DE CONDUITE.

373. Les pressions dont il est question sont importantes à examiner, car c'est le signe de la différence entre la pression intérieure et la pression extérieure qui fait connaître si on peut, sans dépense de travail, faire une prise d'air chaud dans un tuyau, ou l'employer pour produire un appel d'air extérieur.

374. On doit à Daniel Bernouilli la méthode suivante pour trouver la pression intérieure dans un tuyau de conduite d'eau. Si on représente par p la pression de l'atmosphère en eau, par P la pression statique en un certain point de la conduite, et par P' la hauteur d'eau correspondante à la vitesse d'écoulement dans le point que l'on considère; la pression de l'eau, dans tous les sens, sera représentée par $p + P - P'$. Ainsi l'excès de la pression intérieure sur celle de l'air sera $P - P'$; elle sera positive quand P sera plus grand que P' , et négative dans le cas contraire.

375. Il est très-probable que cette loi s'appliquerait aux tuyaux de conduite de gaz quand ils ont une section constante dans toute leur étendue, ou qu'ils sont seulement rétrécis à l'orifice d'écoulement. En admettant qu'il en soit ainsi, on trouve 1° que dans une cheminée complètement ouverte à son sommet et communiquant avec un canal ayant la même section dans toute son étendue, la pression extérieure au bas de la cheminée est plus grande que la pression intérieure, et que cette différence décroît uniformément jusqu'au sommet de la cheminée où elle est nulle; 2° que, dans une cheminée rétrécie à la partie supérieure seulement, à une certaine hauteur la pression intérieure est égale à la pression extérieure; que, pour des points plus élevés, la pression intérieure l'emporte sur la pression extérieure; que le contraire a lieu pour des points situés plus bas, et que la différence des deux pressions augmente à mesure que l'on s'éloigne du point où les pressions sont égales.

376. Mais quand il y a des changements de sections dans la conduite, et surtout des rétrécissements brusques, la loi de Bernouilli n'est plus



applicable, et c'est le cas où il serait le plus important de connaître la valeur de la pression intérieure. On doit cependant regarder comme très-probable qu'à chaque étranglement la différence entre la pression intérieure, avant et après l'étranglement et à une petite distance de l'étranglement, doit peu différer de la hauteur d'air qui correspond à l'accroissement de vitesse.

377. Cette considération seule suffit pour indiquer que, toutes les fois qu'on a une prise d'air à faire dans une cheminée, il faut que l'orifice d'appel soit suivi d'un étranglement; et que, quand on veut au contraire introduire de l'air extérieur dans une cheminée, il faut que l'orifice d'accès soit placé après un étranglement. A la vérité, rien n'indique quelle doit être l'étendue du rétrécissement qu'on doit produire; mais comme on l'effectue toujours avec des plaques mobiles au moyen desquelles on fait varier à volonté le rétrécissement de la cheminée, on peut toujours le rendre tel, que la différence entre la pression intérieure dans la cheminée et celle qui existe dans le canal qui doit amener l'air extérieur ou qui doit conduire l'air chaud, soit favorable à l'effet qu'on veut produire. Mais comme dans tous les cas la cheminée doit encore conserver une certaine puissance de tirage, l'ouverture du registre se trouve déterminée par cette circonstance; ainsi la connaissance des pressions latérales dans les cheminées serait réellement sans utilité pour la pratique.

§ 9. — MAXIMUM DE TIRAGE DES CHEMINÉES.

378. Nous avons examiné, dans ce qui précède, les moyens de calculer la vitesse d'écoulement de l'air chaud à l'extrémité libre d'une cheminée; en multipliant cette vitesse par la section de la cheminée, on aura le volume d'air chaud dépensé par seconde, et par suite son poids en multipliant le volume par la densité. Ce poids est ce qu'il y a de plus important, car c'est d'après ce poids qu'on pourra déterminer celui du combustible qu'on pourra faire brûler dans le foyer.

379. L'équation qui donne la vitesse d'écoulement de l'air chaud dans une cheminée d'une forme quelconque est toujours de la forme

$$v = \sqrt{\frac{H\sigma(t' - t)}{M}}, \quad (1)$$

dans laquelle H représente la hauteur de la cheminée, t' et t les températures de l'air chaud et de l'air extérieur, a le nombre 0,00365, et M une quantité qui varie avec la forme et les dimensions du canal. En supposant que la section au sommet de la cheminée soit carrée et que son côté soit D , le volume d'air écoulé par seconde sera

$$D^2 \sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}}, \quad (2)$$

et le poids de l'air écoulé par seconde sera

$$\frac{1^k,3}{1+at'} D^2 \sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}} = 1^k,3 D^2 \sqrt{\frac{Ha}{M} \cdot \frac{t'-t}{(1+at')^2}}$$

380. On voit d'abord à l'inspection de cette dernière expression que la dépense d'air en poids, dans la même cheminée, dépend uniquement de la fraction

$$\frac{t'-t}{(1+at')^2} \dots \quad (3)$$

et, par conséquent, que cette dépense est bien loin de croître proportionnellement à la vitesse, comme il était d'ailleurs facile de le prévoir.

381. En cherchant par les règles ordinaires du calcul différentiel si cette quantité est susceptible de prendre une valeur maximum pour une certaine valeur de t' , on trouve que cela a lieu pour

$$t' = \frac{1}{a} + 2t = 274^\circ + 2t.$$

Ce fait est d'une très-haute importance dans la pratique, car il en résulte que la puissance d'une cheminée ne croît que jusqu'à une certaine limite de température, et qu'au delà de cette température la chaleur entraînée par l'air brûlé occasionne une diminution d'effet.

382. La température qui correspond au maximum de tirage est réellement variable avec la température extérieure; car, si l'air extérieur était à -10 , elle serait de 254° ; et si l'air extérieur était à 15° , elle serait de 304° . Mais comme l'effet produit n'éprouve que des variations insensibles pour toutes les températures extérieures quand l'excès de température de l'air chaud est compris entre 250 et 350° , on peut prendre la température de 300° comme étant celle qui correspond dans tous les cas au maximum d'effet.

383. Pour faire voir de quelle manière le tirage varie avec la température, j'ai renfermé dans le tableau suivant les valeurs de l'expres-



sion (3) pour un grand nombre de valeurs de t' comprises entre 30° et 1000° , en supposant $t = 0$.

TEMPÉRATURES DE L'AIR CHAUD.	VALEURS DE $\sqrt{\frac{t'}{(1+at')^2}}$.	TEMPÉRATURES DE L'AIR CHAUD.	VALEURS DE $\sqrt{\frac{t'}{(1+at')^2}}$.
30°	4,93	260	8,273
40	5,51	270	8,278
50	5,98	275	8,279
60	6,35	280	8,276
70	6,66	290	8,275
80	6,92	300	8,27
90	7,13	310	8,26
100	7,33	320	8,25
110	7,48	350	8,21
120	7,62	400	8,13
130	7,73	450	8,03
140	7,83	500	7,92
150	7,92	550	7,80
160	7,98	600	7,62
170	8,05	650	7,56
180	8,09	700	7,44
190	8,14	750	7,33
200	8,17	800	7,22
210	8,21	850	7,11
220	8,23	900	7,00
230	8,25	950	6,90
240	8,26	1000	6,8
250	8,27		

384. On voit à l'inspection de ce tableau que le tirage augmente d'abord très-rapidement avec la température, et ensuite beaucoup plus lentement, qu'il est sensiblement constant de 250° à 300° , qu'au delà il diminue, et qu'à 1000° il est plus petit qu'à 100° .

385. D'après ce qui précède, il est évident que le maximum d'effet produit par la cheminée dont la vitesse est représentée par la formule (1), est

$$1,3 \times D^2 \times 8,27 \sqrt{\frac{aH}{M}} = 0,64 D^2 \sqrt{\frac{H}{M}}.$$



CHAPITRE V.

DES CHEMINÉES.

386. Les appareils de chauffage varient de forme et de disposition, non-seulement avec l'effet qu'on veut produire, mais encore avec la nature du combustible employé, et suivant qu'on doit utiliser seulement la chaleur rayonnante, ou celle qui est emportée par l'air brûlé, ou à la fois ces deux espèces de chaleur. Il y a cependant trois parties distinctes dans tous les appareils de chauffage : le foyer, le lieu où la chaleur est utilisée, et la cheminée. Les deux premières se confondent quelquefois, comme dans les foyers domestiques, dans les fourneaux à fondre certains métaux; mais la dernière est toujours distincte et ne manque jamais, excepté dans les appareils où le renouvellement de l'air dans le foyer est produit par une action mécanique.

387. Les cheminées remplissent deux fonctions : 1° elles rejettent à de grandes hauteurs dans l'atmosphère l'air qui a servi à la combustion, et qui, chargé d'acide carbonique et de vapeurs combustibles, serait toujours incommode et souvent nuisible s'il se dégageait à de petites hauteurs; 2° elles produisent dans le foyer l'appel d'air nécessaire à la combustion.

§ 1. — DÉTERMINATION DES DIMENSIONS DES CHEMINÉES.

388. L'effet que doit produire une cheminée est toujours donné, car il se réduit à effectuer la combustion d'un poids connu de combustible dans un certain temps, ou à faire sortir par l'extrémité de la cheminée, dans le même temps, un volume donné d'air. Nous avons déterminé (260) les



volumes d'air qui proviennent de la combustion de 1 kilogramme des différents combustibles.

389. La puissance d'une cheminée dépend de sa hauteur, de la température moyenne que l'air brûlé y conserve, et de sa section.

390. La hauteur de la cheminée a une grande influence sur l'effet qu'elle produit. Considérons une cheminée communiquant avec un canal d'une longueur L de même diamètre, la vitesse d'écoulement sera représentée par la formule

$$v = \sqrt{\frac{2gH\alpha D}{D + 2gK(L + H)}}$$

Si le canal avait une autre section que celle de la cheminée, et si l'air éprouvait dans son mouvement des résistances quelconques, cette même formule pourrait encore représenter la vitesse d'écoulement, pourvu qu'on donnât à L une valeur déterminée; car toute résistance, quelle qu'elle soit, peut être remplacée par celle que présenterait un tuyau d'un diamètre donné, mais d'une longueur convenable.

On voit, à l'inspection de cette formule, que, quand on augmente H , le numérateur de la fraction placée sous le radical augmente dans une proportion plus grande que le dénominateur, et d'autant plus grande que L est lui-même plus grand, et que si L était très-grand relativement à H , la vitesse croîtrait à peu près proportionnellement à la racine carrée de H . Cette circonstance se rencontre quelquefois, comme dans la ventilation des mines; mais, dans les cas les plus ordinaires, l'influence de la hauteur de la cheminée est très-grande à cause de la résistance que présente le foyer. Par exemple, pour une grande chaudière à vapeur, si on avait $L = H$, $D = 1$ et $H = 30$, la valeur de L se trouverait rendue quatre fois plus grande par la résistance de la grille, et le dénominateur de la fraction serait représenté par

$$1 + 0,04 (120 + 30) = 1 + 4,80 + 1,20.$$

Alors, en doublant la hauteur de la cheminée, le dernier terme seulement de l'expression précédente serait doublé, et la somme des termes qui était 7,00 deviendrait 8,20; le dénominateur ne serait donc augmenté que dans le rapport de 8,2 à 7, tandis que le numérateur de la fraction serait doublé.

391. Il n'y a réellement qu'un seul cas où la hauteur de la cheminée

soit sans influence sensible, c'est celui où tout le circuit est réduit à la cheminée, ou, par conséquent, $L=0$, quand toutefois la cheminée est assez élevée pour qu'on puisse négliger D relativement à $2gKH$. Ces circonstances se sont présentées dans les expériences que j'ai rapportées précédemment, parce que la grille n'était couverte de combustible qu'en partie, et que les diamètres des cheminées étaient très-petits, relativement à la hauteur.

392. Ainsi, il faut toujours donner aux cheminées la plus grande hauteur possible; on obtient par là un puissant élément de tirage, qui ne coûte qu'un accroissement de dépense peu considérable, et qui est souvent d'une grande utilité.

393. La température moyenne de l'air chaud dans une cheminée dépend de la température de l'air à la sortie du foyer, du refroidissement que l'air a éprouvé en parcourant les surfaces de chauffe, et enfin du refroidissement qu'il a éprouvé dans la cheminée elle-même pendant son trajet. Ces causes sont si compliquées et dépendent d'un si grand nombre de circonstances, qu'il est réellement impossible d'en calculer l'influence et de déterminer, du moins avec une approximation suffisante, la température moyenne de la fumée dans un appareil donné.

Lorsqu'un appareil est construit et fonctionne, on peut obtenir la température moyenne de la fumée en prenant celles de la partie supérieure et de la partie inférieure de la cheminée, ou seulement celle de la partie inférieure quand la cheminée est en briques.

394. Mais quand un appareil est à construire, on peut d'abord avoir une limite inférieure de la température de l'air à son entrée dans la cheminée, en remarquant qu'elle doit toujours être supérieure à celle du corps à chauffer, et on peut obtenir une valeur approximative de la température moyenne de l'air dans la cheminée en la supposant égale à celle des appareils analogues. C'est ce dernier parti qu'il faut toujours prendre. Par exemple, pour les fourneaux des chaudières à vapeur, bien disposés, il faut compter sur 300° pour la température moyenne de l'air chaud dans la cheminée: c'est le nombre que donnent les expériences faites sur les fourneaux dont les chaudières ont les dimensions convenables, c'est-à-dire, qui présentent assez de surface de chauffe pour utiliser convenablement la chaleur développée dans le foyer, et qui cependant laissent à l'air, à son entrée dans la cheminée, une température suffi-



sante pour produire un bon tirage. Dans les autres cas, nous indiquerons la température moyenne qu'il faut supposer à la fumée dans la cheminée.

Mais il est bien important de remarquer que le tirage variant très-peu avec la température moyenne de l'air chaud dans la cheminée, comme on a pu le voir dans le tableau de la page 167, une erreur même considérable dans l'estimation de cette température aurait peu d'influence, surtout si la température moyenne était voisine de 300°. Par exemple de 100 à 300°, et 300 à 500°, la variation de tirage est plus petite que $\frac{1}{20}$ du tirage maximum.

395. Il résulte du tableau que nous venons de citer, que dans tous les cas où les corps doivent être chauffés à une très-haute température, et où, par conséquent, la fumée doit être abandonnée à une température très-élevée, il y aura toujours de l'avantage à refroidir la fumée jusqu'à 300°, même en perdant complètement la chaleur; car c'est à cette température que les cheminées possèdent le maximum de tirage réel, c'est-à-dire, qu'elles appellent le plus grand volume d'air froid, et, par conséquent, c'est à cette température qu'on obtiendra l'appel demandé avec le minimum de section de la cheminée. Mais il est bien rare que dans une usine on n'ait pas l'emploi utile de la chaleur qu'on obtiendrait en abaissant la température de la fumée jusqu'à 300°.

396. Les deux premiers éléments de tirage d'une cheminée, la hauteur et la température moyenne de l'air brûlé, étant connus d'après ce qui précède, il ne reste plus qu'à déterminer la section de la cheminée. Mais cette section dépend de toutes les résistances que la colonne d'air chaud doit vaincre dans son trajet, et il est nécessaire d'examiner quelle peut être celle qui résulte du foyer.

397. Dans tous les foyers où des circonstances particulières n'exigent pas une combustion lente et une très-grande surface rayonnante, la surface totale de la grille sur laquelle la combustion s'opère, excède de beaucoup la section de la cheminée, et la somme des surfaces libres que laissent les barreaux la dépasse peu; mais comme les grilles sont toujours couvertes d'une couche épaisse de combustible, ces orifices sont obstrués en grande partie, de sorte que le foyer produit toujours un rétrécissement dans le canal, et par suite une résistance, même en supposant qu'il n'y ait pas d'autre perte de hauteur motrice que celle qui

est due au passage de l'air dans les canaux étroits formés par les fragments du combustible. Il ne faudrait pas croire que la haute température du foyer compensât même en partie la résistance que l'air éprouve à traverser le combustible, car la colonne d'air chaud qui se trouve au-dessus du combustible produit moins de tirage que si cet air se trouvait à la température moyenne de la cheminée.

398. D'ailleurs, deux faits bien constatés démontrent avec la dernière évidence que les foyers produisent une grande résistance; c'est, d'une part, la suppression complète du passage de l'air à travers la grille quand on ouvre la porte d'un foyer; et, de l'autre, la grande différence qui existe entre la vitesse d'écoulement de l'air chaud, calculée en ayant égard à toutes les résistances, excepté celle de la grille, et la vitesse réelle d'écoulement.

399. J'ai insisté sur l'influence des grilles, parce qu'on a prétendu qu'elles ne produisaient point de résistance, et qu'on pouvait, sans changer la quantité de combustible consommé, les rendre quatre fois plus grandes ou quatre fois plus petites.

On peut en effet, dans certains cas, faire varier l'étendue d'une grille dans des limites assez étendues, sans diminuer sensiblement la consommation de combustible, mais il s'en faut de beaucoup que ces limites soient aussi grandes qu'on l'a prétendu, et cette circonstance ne provient pas de ce que les grilles n'opposent pas de résistance, mais de ce que la combustion peut s'effectuer avec des volumes d'air très-différents.

400. Considérons un foyer dans lequel on brûle une certaine quantité de combustible, et supposons que la moitié de l'air échappe à la combustion, c'est ce qui arrive ordinairement, du moins dans les foyers bien disposés. Si l'on diminue l'étendue de la grille, en conservant la même épaisseur de combustible, la résistance de la grille augmentera, il passera moins d'air à travers le combustible, mais il passera plus vite, la combustion sera plus vive, il y aura moins de perte de chaleur par rayonnement, et une plus petite quantité d'air échappera à la combustion; alors cette dernière circonstance compensant, au moins en partie, la diminution du volume de l'air qui traverse le foyer, la consommation de combustible diminuera peu. Au delà de la limite à laquelle tout l'oxygène sera transformé en acide carbonique, il se formera de l'oxyde de carbone, et la quantité d'air allant toujours en dimi-



nuant à mesure qu'on diminue l'étendue de la grille, on conçoit que jusqu'à ce que le produit de la combustion ne soit plus que de l'oxyde de carbone, la réduction de la grille, et par suite celle du volume d'air qui la traverse, ne produiront pas dans la consommation du combustible une diminution correspondante à celle du volume d'air. Mais quand ce volume sera réduit à $\frac{1}{4}$ de ce qu'il était d'abord, la consommation de combustible sera proportionnelle à celle du volume d'air; cette consommation décroîtra même plus rapidement à cause de l'abaissement de température de l'air brûlé par suite d'une combustion incomplète. Si on suppose maintenant qu'on augmente l'étendue de la grille, des phénomènes opposés se produisent : la résistance de la grille diminue, le volume d'air appelé augmente, mais il traverse le combustible avec moins de vitesse, il y a plus de perte par rayonnement, la température du foyer s'abaisse, et par suite il y a plus d'air et de gaz combustibles qui s'échappent dans la cheminée sans altération, et l'accroissement de consommation de combustible augmente suivant une loi beaucoup moins rapide que celui du volume d'air appelé par la cheminée. Les mêmes phénomènes se produiraient par la variation d'épaisseur du combustible : en l'augmentant on obtiendrait exactement les effets qui résultent de la diminution de surface de la grille ; en la diminuant, on produirait ceux qui accompagnent l'augmentation de surface de la grille.

On voit, d'après cela, que dans un foyer d'où l'air s'échapperait à moitié brûlé, on pourrait, sans faire varier beaucoup la consommation de combustible, diminuer la surface de la grille ou augmenter l'épaisseur du combustible, ou augmenter l'étendue de la grille ou diminuer l'épaisseur du combustible ; mais ces variations, lorsqu'elles dépasseraient certaines limites, diminueraient beaucoup l'effet produit ou par la formation de l'oxyde de carbone, ou par l'abaissement de la température de l'air brûlé par le mélange d'une trop grande quantité d'air qui aurait échappé à la combustion.

401. La condition la plus importante à remplir dans un foyer, serait de transformer en acide carbonique tout l'oxygène de l'air qui a traversé le combustible.

Cette condition ne peut pas évidemment être réalisée pour les combustibles qui brûlent avec flamme, parce que la combustion des gaz exige que l'air qui a traversé la masse de combustible renferme encore une



certaine quantité d'oxygène; et comme le volume des gaz qui se dégagent est très-variable pendant la combustion, si le volume d'air introduit était suffisant lorsqu'il s'en dégage le plus, il se trouverait trop grand plus tard. Elle pourrait l'être pour les combustibles qui brûlent sans flamme, si on donnait à la surface de la grille une étendue suffisante, et à la couche de combustible une épaisseur convenable; mais il y aurait toujours des filets d'air qui parcourraient de plus longs circuits que les autres, et qui pourraient former de l'oxyde de carbone, et la plus légère augmentation d'épaisseur produirait infailliblement cet effet. Or, comme la formation de l'oxyde de carbone diminue dans une proportion énorme la quantité de chaleur développée par le combustible, on conçoit qu'il est important de l'éviter, et qu'il est beaucoup plus avantageux de produire la combustion en employant un excès d'air.

402. On a reconnu par expérience que les foyers les plus avantageux sont ceux d'où l'air se dégage seulement à moitié brûlé, c'est-à-dire renfermant encore 10 pour cent d'oxygène, et que pour les foyers de chaudières à vapeur cette condition est remplie lorsque les grilles ont une surface telle que la quantité de houille brûlée par heure et par décimètre carré soit à peu près de 1^h,0 à 1^h,2, l'épaisseur du combustible étant environ de 6 à 8 centimètres. Nous admettrons ces résultats pour les grilles des foyers.

403. La surface des grilles et l'épaisseur du combustible étant ainsi fixées, il reste à déterminer la résistance que l'air éprouve à traverser le foyer. Mais cette détermination par des considérations théoriques est impossible, car on ne connaît pas l'influence du passage de l'air à travers les intervalles des fragments du combustible, celle de l'échauffement subit de l'air par la combustion, et celle des jets de gaz combustibles qui se produisent pour certains combustibles, au moins pendant un certain temps; d'ailleurs, si ce calcul était possible, il serait sans aucune utilité, parce que l'état d'un foyer change à chaque instant. Ainsi on ne peut avoir une évaluation approximative de la résistance que présentent les foyers que par l'expérience.

404. En assimilant la résistance que l'air éprouve en traversant un foyer au frottement de l'air dans des tubes d'un petit diamètre, cette résistance pour chacun des petits conduits parcourus par l'air sera de la forme mv^2 , m étant un nombre constant pour le même état du canal,



et v la vitesse d'écoulement de l'air à la partie supérieure de la cheminée, et la somme des résistances pourra être représentée par Rv^2 , R étant un nombre à déterminer par l'expérience. Alors, en désignant par D le diamètre du sommet de la cheminée, par L la longueur d'un canal ayant le diamètre D qui produirait la même résistance que la totalité du circuit, excepté le foyer, on aura évidemment

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D} v^2 + Rv^2; \quad \text{d'où} \quad v^2 = \frac{2gP}{1 + \frac{2gKL}{D} + 2gR}. \quad (1)$$

405. Supposons maintenant qu'on calcule la vitesse d'écoulement de l'air à l'extrémité d'une cheminée, en partant de la consommation du combustible, du volume d'air nécessaire à la combustion, et de la température de l'air brûlé dans la cheminée, en mettant cette vitesse à la place de v dans l'équation précédente, on en déduira la valeur de R .

En faisant ces calculs pour des cheminées de chaudières à vapeur ayant un bon tirage, et dans lesquelles l'effet utile produit ne permettait pas de douter que la combustion n'eût lieu dans des conditions favorables, et dont les grilles avaient des surfaces telles que la consommation de combustible par heure correspondait à peu près à 1 kilog. ou 1^k,2 de houille par décimètre carré, j'ai trouvé à peu près $2gR = 12$.

406. D'après cela on peut facilement déterminer les dimensions les plus convenables d'une cheminée. En désignant par Q le poids du combustible à brûler par heure, par n le volume d'air froid nécessaire à la combustion de chaque kilogramme de combustible, par t la température de l'air chaud dans la cheminée, et enfin par A le volume d'air chaud qui doit s'écouler par seconde, on aura

$$A = \frac{Qn(1 + 0,00365t)}{3600},$$

en supposant carrée la section de la cheminée et en prenant pour K , 0,0025, on aura

$$A = vD^2; \quad \text{et} \quad v^2 = \frac{2gPD}{D + 0,05L + 12.D},$$

et par suite

$$D^5 = \frac{A^2(13D + 0,05L)}{2gP} \dots \quad (2)$$

Pour résoudre cette équation, on négligera d'abord le terme $0,05L$; on



aura alors l'équation

$$D^4 = \frac{13A^2}{2gP}, \tag{3}$$

dont on tirera facilement la valeur de D. On la substituera ensuite dans le second membre de l'équation (2). On aura une seconde valeur de D plus approchée que la première. En substituant cette dernière dans la même équation (2), on obtiendra une troisième valeur de D plus approchée encore que la seconde, et on pourra, en continuant le même mode de calcul, obtenir une approximation aussi grande qu'on pourra le désirer. Mais la seconde valeur ainsi obtenue est toujours suffisante. Il est évident qu'en s'arrêtant à une valeur quelconque de D, l'erreur que l'on commet est toujours inférieure à une unité de l'ordre du dernier chiffre commun à la dernière et à l'avant-dernière valeur de D.

407. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de déterminer le minimum de section d'une cheminée ayant 20 mètres de hauteur, dans laquelle l'air chaud se trouve à 300°, et qui doit appeler dans le foyer l'air nécessaire à la combustion de 50 kilog. de houille à l'heure, la longueur totale du circuit étant de 40 mètres, on aura $2gP = 19,62 \times 20 \times 0,00365 \times 300 = 441,45$; $A = 50 \times 18(1 + 0,00365 \times 300) : 3600 = 0,52$, et

$$D^5 = \frac{0,27(13D + 2)}{441,45}.$$

En négligeant 2 au numérateur du second membre de l'équation, on a $D^4 = 3,51 : 441,45$; et $D = 0,98$. En mettant cette valeur de D dans l'équation précédente, on trouve $D = 0,3235$; et ensuite $D = 0,3272$. Ainsi on voit que la seconde approximation était suffisante.

408. Lorsque le rapport de L à D est à peu près égal à 60, $2gKL : D = 3$, le dénominateur de l'expression (1) se réduit à 16, et la vitesse d'écoulement est égale à $\frac{1}{4}$ de la vitesse due à la hauteur; il est alors très-facile de calculer la section de la cheminée. Par exemple, en supposant la même hauteur à la cheminée que dans le cas précédent, la même température au bas de la cheminée, la vitesse d'écoulement sera égale à $\sqrt{441,45} : 4 = 5,25$, et on aurait $D^2 \times 5,25 = 0,52$, et $D = 0^m,31$.

Dans la supposition que $L : D = 60$, en désignant par Q le poids du combustible brûlé par décimètre carré de section de la cheminée et par heure; comme le volume d'air brûlé à 300° qui doit s'écouler pour cha-



que kilogramme de houille brûlé par heure est à peu près de 36 mètres cubes, on aura

$$\frac{1}{4} D^2 \sqrt{2gP} \cdot 3600 = Q \cdot 36 \cdot 100 \cdot D^2; \text{ d'où } Q = 0,25 \sqrt{2gP}.$$

409. Lorsque la cheminée a 10, 20 et 30 mètres de hauteur, on trouve pour $\sqrt{2gP}$, 14,66; 20,73; et, 25,39; et pour les valeurs de Q , 3,66; 6,18, et 6,34.

410. Lorsque le rapport de L à D s'éloignera peu de 60, on pourra prendre ces nombres pour déterminer la section de la cheminée; c'est ce qui arrive en général pour les chaudières à vapeur. Mais il vaut mieux se servir de la règle générale qui est applicable à tous les cas.

411. Les dimensions des cheminées, calculées comme je viens de l'indiquer, s'accordent très-bien avec celles des cheminées des chaudières à vapeur qui produisent le plus d'effet utile, et dont les grilles brûlent de 1^s à 1^s,2 de houille par décimètre carré et par heure. On rencontre des fourneaux dans lesquels les sections des cheminées sont plus petites; mais ces appareils produisent moins d'effet utile, tantôt parce que les grilles sont trop grandes et qu'il s'échappe beaucoup d'air et de gaz combustibles sans altération; d'autres fois, parce que les grilles sont trop petites et qu'il se forme beaucoup d'oxyde de carbone.

412. La même méthode de calcul s'applique encore d'une manière assez satisfaisante aux cheminées des fourneaux dont les foyers sont alimentés par le bois, quoique les grilles soient beaucoup moins obstruées que par l'emploi de la houille; mais ordinairement, pour des consommations équivalentes, les grilles à bois sont quatre fois plus petites que les grilles à houille.

413. Quoique les sections des cheminées déterminées par la méthode que je viens d'exposer soient toujours suffisantes pour produire l'effet demandé, du moins quand la surface de la grille a les dimensions convenables, il est toujours avantageux de donner à la cheminée une plus grande section, sans changer pourtant celle des carneaux. On donne ainsi à la cheminée un excès de puissance que l'on réduit à volonté à l'aide d'un registre, et qui peut être utile dans plusieurs circonstances; par exemple dans le cas où la nature du combustible employé exigerait qu'il fût traversé par un courant d'air animé d'une plus grande vitesse, et par conséquent qu'il fût brûlé sur une plus petite grille, ou que

sur la même grille la couche de combustible fût plus épaisse, et enfin dans le cas où, par une circonstance imprévue, il serait important d'augmenter l'effet produit par les fourneaux, et par conséquent la quantité de combustible consommé dans le même temps.

414. Pour toutes les chaudières à vapeur, excepté celles des locomotives, on arrive à des résultats suffisamment exacts, en supposant que tout le circuit du foyer au sommet de la cheminée ait la même section, et que, partout, la résistance soit la même que si le canal avait une section carrée ou circulaire, et en n'ayant aucun égard au rélargissement de la cheminée à sa partie inférieure. Les résultats du calcul s'accordent d'une manière satisfaisante avec l'expérience, parce qu'en général, la forme des carneaux, quand ils ont la section de la cheminée, n'augmente que très-peu leur résistance, et que cet accroissement est d'ailleurs compensé, au moins en partie, par la plus grande largeur de la cheminée dans une très-grande partie de sa hauteur, et enfin parce que le rélargissement de la cheminée à sa partie inférieure paraît être sans influence pour diminuer la vitesse d'écoulement. Mais cela n'arriverait certainement pas si la section des carneaux n'était pas partout la même, et si cette section était trop allongée; il faudrait alors avoir recours à la méthode générale que nous avons exposée d'abord.

415. Il résulte de tout ce que nous avons dit sur l'influence des grilles, que, dans un fourneau établi, on pourrait augmenter la quantité de combustible consommé en augmentant la surface de la grille; mais cet accroissement de consommation produirait, en général, peu d'effet utile, d'abord parce que l'air brûlé, passant avec trop de rapidité contre les surfaces qui doivent en absorber la chaleur, arriverait à la cheminée à une trop haute température, ensuite parce que la combustion étant beaucoup moins vive, une partie des gaz combustibles qui se dégagent ne serait pas brûlée, et enfin parce qu'une plus grande quantité d'air traverserait inutilement le foyer.

416. Dans la première édition de cet ouvrage, j'avais donné une autre méthode pour déterminer le minimum de section d'une cheminée: elle consistait à ne pas avoir égard à la résistance de la grille, mais à prendre pour le coefficient de frottement le nombre 0,012, au lieu de celui qui convient aux surfaces enduites de noir de fumée et qui est cinq fois plus petit. Cette méthode conduit à des résultats qui s'accordent bien



avec la pratique quand il s'agit de chaudières à vapeur; ils sont même identiques avec ceux qui résultent de la méthode générale exposée (406), quand le rapport de la longueur du circuit au diamètre du canal est égal à 60. Mais, pour des circuits plus longs, elle donne des sections trop grandes, et dans le cas contraire des sections trop petites. La nouvelle méthode qui sépare l'influence de la grille de celle des carneaux, a l'avantage de s'appliquer à tous les cas et de donner des résultats qui s'accordent d'une manière très-satisfaisante avec ce qui se pratique ordinairement.

417. Tout ce qui précède suppose que les grilles ont des dimensions telles que la quantité de houille brûlée par décimètre carré et par heure soit à peu près de 1^k à $1^k,2$, et que l'épaisseur de la couche de combustible soit environ de 7 à 8 centimètres. Ce sont les circonstances qui paraissent avoir été reconnues les plus avantageuses par l'expérience pour les foyers des chaudières à vapeur, où il est important de produire une bonne combustion et d'avoir une surface rayonnante d'une grande étendue. Mais, dans d'autres circonstances, il peut être utile de brûler le combustible sur des grilles plus grandes ou plus petites : dans le premier cas, pour avoir encore une plus grande surface rayonnante; dans le second, pour en avoir une plus petite et pour donner à l'air brûlé une plus haute température.

Lorsqu'on emploie des combustibles qui brûlent avec flamme, il est impossible de prévoir ce qui arriverait, sous le rapport de l'effet utile produit, si on se servait de grilles ayant des surfaces beaucoup plus grandes ou beaucoup plus petites que celles qui sont généralement usitées. Mais il n'en est pas ainsi pour les combustibles qui brûlent sans flamme, et on conçoit facilement qu'on pourrait obtenir une bonne combustion dans des foyers dont les dimensions différeraient beaucoup de celles des foyers des chaudières à vapeur, si le tirage de la cheminée était convenable. Je ne connais point d'expériences sur les foyers à grilles de différentes grandeurs traversés par le même volume d'air, mais je pense qu'on peut admettre, sans crainte de s'écarter beaucoup de la réalité, que, pour le même combustible, les résistances sont proportionnelles à l'épaisseur de la couche de combustible, et en raison inverse de l'étendue de la grille.

418. D'après ce que nous avons dit dans le chapitre précédent sur l'influence du rélargissement des cheminées, on conçoit facilement qu'en

donnant à une cheminée une hauteur et une largeur convenables, on pourrait toujours brûler dans un foyer donné une quantité de combustible également donnée, surtout si le rélargissement de la cheminée avait lieu d'une manière lente et continue; car on pourrait produire une vitesse quelconque dans l'orifice inférieur. Il y a cependant une limite, parce que la hauteur d'une cheminée ne pourrait pas dépasser 30 à 40 mètres sans de grandes dépenses de construction, et que sa largeur doit toujours être très-petite relativement à sa hauteur, afin que l'écoulement ait lieu à plein tuyau. Mais dans ces limites il y a souvent un très-grand avantage à employer des cheminées très-hautes et très-larges qui reçoivent l'air brûlé à une température peu élevée. En examinant les différents appareils de chauffage, nous verrons les circonstances dans lesquelles ces dispositions pourraient être utiles, et les dimensions qu'il faudrait alors donner aux cheminées.

419. *Différentes méthodes qui ont été proposées pour calculer la section des cheminées.* Montgolfier est le premier physicien qui se soit occupé de la détermination de la section d'une cheminée, en partant de sa hauteur, du volume d'air nécessaire à la combustion, et de la température de l'air brûlé; mais il n'avait eu égard ni au frottement de l'air contre les parois du canal, ni à la résistance que présentent les grilles.

Alors, en représentant par A le volume d'air chaud qui devait sortir par seconde de la cheminée, et par D le diamètre de la cheminée supposée carrée, on avait

$$D^2 = \frac{A}{\sqrt{H_{at}}}$$

420. Clément, dans son cours au Conservatoire, donnait la méthode de Montgolfier; mais il disait qu'il fallait supposer la vitesse d'écoulement de l'air cinq fois plus petite, ce qui revient à

$$D^2 = \frac{5A}{\sqrt{H_{at}}}$$

421. La méthode de Montgolfier donne évidemment des résultats trop petits; celle de Clément donne des diamètres trop grands, mais qui se rapprochent assez de ceux qu'on emploie pour les chaudières à vapeur.

422. Tredgold, dans son traité des machines à vapeur, donne une méthode très-simple pour trouver la section d'une cheminée d'une chaudière à vapeur; elle consiste, pour une machine à basse pression dont



la puissance excède dix chevaux, à diviser quatre fois la force de la machine en chevaux par la racine carrée de la hauteur de la cheminée; on obtient ainsi la section en décimètres carrés; et comme il admet qu'un cheval-vapeur consomme 5 kilogrammes de houille à l'heure, la recette revient à diviser les $\frac{4}{5}$ du nombre de kilogrammes de houille à consommer par heure, par la racine carrée de la hauteur de la cheminée. Pour les cheminées à haute pression, la fraction $\frac{4}{5}$ doit être remplacée par $\frac{1}{5}$; et dans tous les cas il conseille de doubler la section. Il applique ses calculs à une chaudière de 40 chevaux, et trouve pour la section 36 décimètres carrés, et il propose de la doubler en la portant à 72. Cette section est alors à peu près celle qu'on emploie.

Pour apprécier la méthode de Tredgold, il faut examiner les calculs qu'il a faits pour y arriver. Dans le même ouvrage, page 176, on voit qu'il calcule la section d'une cheminée en divisant le volume d'air qui doit s'écouler dans une seconde, par la vitesse obtenue, sans avoir égard aux frottements; seulement, il multiplie cette vitesse par le coefficient 0,65 qui convient à l'écoulement de l'air par un orifice percé dans une paroi épaisse, et il suppose que la température de la fumée dans la cheminée est égale à celle de la vapeur, c'est-à-dire, de 105° pour les chaudières à basse pression.

423. D'après M. Darcet, les cheminées doivent avoir 10 mètres de hauteur; une section telle que chaque décimètre carré corresponde à une consommation de houille de 3,0 à 3,3 par heure, et la surface de la grille doit être trois fois plus grande que la section de la cheminée. Ces résultats se rapprochent beaucoup de ceux que nous avons indiqués (409).

424. *Cheminées communes à plusieurs fourneaux.* Dans la plupart des grandes usines, on ne construit qu'une seule cheminée pour tous les fourneaux; on y trouve deux avantages: 1° une économie dans les frais de construction; 2° une uniformité de tirage qui n'existe point dans une cheminée qui ne correspond qu'à un seul foyer. L'économie est évidente, car une seule cheminée coûte moins de construction que plusieurs, en supposant même la section de la cheminée unique égale à la somme des sections des autres. Quant au second avantage, il faut remarquer que, dans un fourneau ayant une cheminée spéciale, le tirage est très-variable; il est faible au commencement de la charge, il s'élève à mesure que

section des
par Darcet.

la combustion devient plus active, et s'affaiblit ensuite; mais il diminue surtout par l'ouverture des portes du foyer. Mais si plusieurs fourneaux communiquent avec une cheminée commune, et si on a soin de ne charger les foyers que successivement, il s'établira dans la cheminée un tirage moyen qui sera d'autant plus régulier que les fourneaux seront plus nombreux.

On peut encore ajouter au nombre des avantages que présentent les cheminées communes, celui de produire un plus faible refroidissement de la fumée, et par conséquent de produire un plus grand tirage quand la température de la fumée qui y pénètre est au-dessous de celle qui correspond au maximum d'effet.

425. On donne ordinairement pour section à une cheminée commune la somme des sections des cheminées partielles qui correspondraient à chaque fourneau. La section ainsi obtenue est certainement trop grande, parce que la résistance est beaucoup plus petite que la somme des résistances dans les cheminées partielles qu'elle remplace. Mais cet excès de tirage, qu'on peut toujours modérer à volonté, ne présente aucun inconvénient.

Il serait difficile de calculer les dimensions d'une cheminée commune avec la condition qu'elle produisît exactement le tirage demandé, et en outre ces calculs seraient sans utilité, car il faut toujours, comme nous l'avons déjà dit, qu'une cheminée ait un grand excès de tirage; la méthode simple généralement employée conduit à ce résultat, et sans pourtant que la cheminée ait une section qui dépasse beaucoup celle qui serait rigoureusement nécessaire.

§ 2. — CHALEUR PERDUE PAR L'AIR BRÛLÉ.

426. La quantité de chaleur perdue par les cheminées est en général très-considérable, car l'air brûlé est presque toujours abandonné à une température élevée: dans les fourneaux de chaudières à vapeur, cette perte excède le quart de la quantité totale de chaleur produite par le combustible consommé. Dans tous les cas, la quantité de chaleur perdue par les cheminées varie avec la température de l'air brûlé, avec le volume d'air qui pénètre dans le foyer et avec le volume de vapeur produite.



427. La détermination de la valeur de cette perte ne présente aucune difficulté. Prenons, par exemple, un foyer à houille : nous avons vu qu'un kilogramme de houille moyenne peut développer 7500 unités de chaleur, c'est-à-dire, que la chaleur développée peut élever 7500 kilogrammes d'eau de 1°, et que ce poids de combustible exige 18,44 mètres cubes d'air, ou plutôt que la combustion fournit à peu près 18,44 mètres cubes de mélange de gaz et de vapeurs, à la température ordinaire, dont la densité diffère peu de celle de l'air. En admettant, de plus, que la chaleur spécifique de ce mélange soit égale à celle de l'air, et que toute la chaleur développée soit entraînée par ces gaz, cherchons la température qu'ils prendront. Or, nous savons que l'air a une chaleur spécifique quatre fois plus petite que celle de l'eau ; par conséquent, 1 kilog. de houille pourra élever 1 kilogramme d'air à une température de $7500 \times 4 = 30000^\circ$; mais si la chaleur est reçue dans 18,44 mètres cubes d'air dont le poids égale $18,44 \times 1,3 = 24$ kilogrammes, il est évident que la température de cet air sera $\frac{30000}{24} = 1250$.

D'après cela, si la fumée s'échappe à 100°, 200° 300°, les pertes seront

$$\frac{100}{1250} = 0,080; \quad \frac{200}{1250} = 0,160; \quad \frac{300}{1250} = 0,240.$$

Elles seraient évidemment deux, trois, quatre fois plus grandes s'il passait deux, trois, quatre fois plus d'air à travers le combustible.

428. Des calculs analogues sur les différents combustibles conduisent aux résultats suivants :

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	PUISSANCES calorifiques.	VOLUME de gaz et de vapeur produits. m. c.	TEMPÉRATURE de la fumée.
Bois parfaitement desséché.....	3600	7,34	1509°
Bois ordinaire à 20 pour cent d'eau..	2800	6,11	1400
Houille moyenne.....	7500	18,43	1250
Coke à 15 pour cent de cendres.....	6000	15,00	1230
Tourbe complètement desséchée.....	4800	11,73	1263
Tourbe ordinaire à 20 pour cent d'eau.	3600	9,65	1152
Charbon de bois.....	7000	16,40	1313

Perte de chaleur par une cheminée, le foyer étant alimenté par de la houille, la quantité totale de chaleur développée étant représentée par 1, et la température de l'air étant à 0°.

TEMPÉRAT. à l'origine de la cheminée.	L'AIR étant totalement brûlé.	L'AIR étant brûlé à moitié.	L'AIR étant brûlé au tiers.	L'AIR étant brûlé au quart.	L'AIR étant brûlé au cinquième.	L'AIR étant brûlé au sixième.
50	0,021	0,043	0,063	0,086	0,105	0,126
100	0,043	0,086	0,126	0,172	0,210	0,252
150	0,063	0,129	0,189	0,258	0,315	0,378
200	0,086	0,172	0,252	0,344	0,420	0,504
250	0,105	0,215	0,315	0,430	0,525	0,630
300	0,129	0,248	0,378	0,516	0,630	0,756
350	0,147	0,331	0,441	0,602	0,735	0,882
400	0,172	0,344	0,504	0,688	0,840	»
440	0,189	0,387	0,567	0,774	0,945	»
500	0,215	0,430	0,630	0,86	»	»

429. On voit d'après cela combien il est important de ne faire passer à travers le combustible que la quantité d'air seulement nécessaire à la combustion. Mais si on n'en laissait passer qu'une quantité insuffisante, ou même si on voulait approcher trop près de la limite, une partie du charbon se transformerait en oxyde de carbone, et cette circonstance occasionnerait une grande perte de chaleur, car 1 kilog. de charbon qui se transforme en acide carbonique produit 7170 unités de chaleur, quantité qui se réduit à 1386 quand le produit de la combustion est de l'oxyde de carbone (271).

§ 3. — CONSTRUCTION DES CHEMINÉES.

430. Toutes les dimensions des cheminées pouvant être déterminées par les considérations qui précèdent, il ne nous reste plus qu'à examiner la nature des matériaux, les épaisseurs et les dispositions les plus favorables. C'est ce que nous allons faire, en considérant successivement les cheminées d'usines et les cheminées d'habitation.

*Cheminées d'usines.*

431. Quand les cheminées sont destinées à des fourneaux, elles sont promptement tapissées de suie; alors, de quelque nature qu'elles soient, elles produisent la même résistance dans les mêmes circonstances, et par conséquent, elles se comportent de la même manière. Il ne pourrait y avoir de différence entre le tirage des cheminées métalliques et le tirage des cheminées en briques, que celle qui résulte de l'inégal refroidissement de l'air brûlé dans ces différentes espèces de cheminées, mais l'influence de ce refroidissement est très-faible (383).

432. Mais si les cheminées étaient destinées à évacuer de l'air ou des gaz qui ne contiendraient pas de fumée, il y aurait de l'avantage à employer des cheminées métalliques, du moins dans les mêmes circonstances et pour la même pression, elles débiteraient plus d'air; mais elles coûteraient plus cher, de sorte que généralement et dans presque tous les cas on préfère les conduits en poterie, en briques ou en plâtre.

433. Pendant quelques années on a construit des cheminées isolées en cuivre, mais on y a renoncé, parce que ce métal s'altère rapidement à l'extrémité supérieure de la cheminée, du moins quand on emploie la houille pour combustible. Une cheminée en cuivre établie dans une raffinerie était déjà très-altérée après 18 mois de service. Il paraît que les gaz qui se dégagent n'agissent pas sur le cuivre à une haute température, c'est ce qui est d'ailleurs démontré par le long usage des chaudières à vapeur en cuivre, et que l'action est au contraire très-énergique à une température peu élevée. On ne connaît pas la cause de ce fait singulier.

On construit encore des cheminées en tôle, mais de petite dimension, et on les enduit extérieurement d'une couche de chaux pour les préserver de l'oxydation.

434. Quant à la forme de la section, il est évident, d'après ce qui précède, que la plus convenable est celle qui, pour une surface donnée, a le minimum de contour; c'est par conséquent la forme circulaire, et ensuite, les formes polygonales d'un grand nombre de côtés. On donne toujours la forme circulaire aux sections des cheminées métalliques, et à celles qui sont en poteries; mais les cheminées qui sont en briques ont ordinairement pour section un carré ou un rectangle, parce que les cheminées de cette forme sont plus faciles à construire. On fait aussi

des cheminées en briques cylindriques ou coniques; mais l'avantage qu'elles présentent se trouve bien compensé par le prix de la main-d'œuvre.

435. Examinons maintenant la forme de la section verticale qui passe par l'axe. Quand les cheminées n'ont qu'une petite hauteur, on les fait prismatiques intérieurement, en donnant aux murailles une épaisseur plus grande au bas qu'au sommet (fig. 6 et 7, pl. 2). Mais quand les cheminées doivent avoir une grande hauteur, on leur donne toujours une forme pyramidale en dedans et en dehors (fig. 8, 9 et 10, pl. 2), afin qu'elles résistent à l'action des vents. Il est impossible de calculer les pentes intérieures et extérieures, parce que le calcul devrait reposer sur un trop grand nombre d'éléments inconnus, tels que le maximum d'action des vents, la force de liaison des matériaux, l'élasticité de l'ensemble. Nous nous contenterons de rapporter les pentes qui ont été reconnues suffisantes par l'expérience.

436. Dans les grandes cheminées d'usine, la pente intérieure par mètre courant est d'environ 0^m,015 à 0,018; et la pente extérieure varie de 0^m,024 à 0,030. L'épaisseur de la maçonnerie au sommet est de 0,10, la largeur d'une brique ordinaire. D'après cela, si on désigne par d le diamètre intérieur du sommet d'une cheminée, par d' son diamètre extérieur, et par D et D' les diamètres intérieur et extérieur, au bas de la cheminée, on aura

$$D = d + 2Hm; \quad \text{et} \quad D' = (d + 0,20) + 2Hm',$$

m étant compris entre 0,015 et 0,018; et m' entre 0,024 et 0,030.

Supposons, par exemple, une cheminée de 20 mètres de hauteur et de 0,60 de diamètre intérieur au sommet, le diamètre intérieur D au bas sera, en prenant $m = 0,018$, de 1^m,32; le diamètre extérieur d' au sommet sera de $0,60 + 0,20 = 0^m,80$; et le diamètre extérieur en bas, en prenant $m' = 0,03$, sera de 2^m.

On peut alors facilement tracer le profil de la cheminée dans chaque cas particulier.

La cheminée de la manufacture des tabacs de Paris, qui est destinée à brûler 700 kilogrammes de houille à l'heure, ce qui correspond à près de 150 chevaux, a 29 mètres de hauteur, intérieurement 1^m,03 de diamètre au sommet, 2^m,15 à la base, et extérieurement au sommet 1^m,30, et à la base 3^m,45. Les deux pentes sont un peu trop fortes.



437. Si on voulait construire des surfaces coniques intérieures et extérieures, l'exécution serait assez difficile, et on serait obligé d'entamer beaucoup de briques, ce qui exigerait une main-d'œuvre coûteuse; d'ailleurs, les briques résistent beaucoup moins quand elles sont cassées que quand elles sont entières, parce que leur croûte extérieure a une bien plus grande ténacité que les parties intérieures.

On pourrait construire les cheminées coniques ou prismatiques par une suite de cylindres ou de prismes, qui produiraient des retraits brusques à l'intérieur et à l'extérieur; mais on préfère la disposition représentée (fig 9, pl. 2). La cheminée est conique ou pyramidale à l'extérieur, et l'épaisseur de la maçonnerie varie par sauts brusques; ordinairement les retraits ont lieu par 10 centimètres.

438. Les cheminées en briques ont des formes extérieures très-variées. La figure 11, (pl. 2), représente une cheminée anglaise; les figures 12, 13 et 14, (pl. 2), représentent des extrémités de cheminées de différentes formes. La figure 15 est une cheminée ayant la forme d'un obélisque. La figure 16 représente sur une plus grande échelle la partie supérieure; elle est formée d'une plaque de fonte horizontale (figure 17) sur laquelle sont placées, verticalement et diagonalement, deux plaques de fonte (fig. 18 et 19) qui se pénètrent mutuellement. On donne ordinairement à ces cheminées les proportions de l'obélisque de Louqsor. Les dimensions de cet obélisque sont : hauteur 20^m,90, largeur en bas 2^m,423, largeur en haut 1^m,54, hauteur du chapiteau 1^m,94.

439. Si, dans les tuyaux de conduite, les gaz se comportaient exactement comme les liquides, il y aurait un grand inconvénient à augmenter la section des cheminées à leur partie inférieure, car ce rélargissement occasionnerait une grande perte de hauteur motrice; il en serait de même des variations brusques de section. Mais ces circonstances ne paraissent avoir que peu d'influence. Cependant il serait plus convenable de donner à la surface intérieure la forme d'un cylindre, et de faire porter toute la pente sur la surface extérieure.

440. Les cheminées en briques sont ordinairement montées sur des socles prismatiques percés de deux ouvertures opposées : l'une est destinée à recevoir le canal qui doit amener la fumée dans la cheminée; l'autre, qui est ordinairement fermée par une porte en fer ou par des briques réunies par de la terre crue, sert à introduire de temps en temps

dans la cheminée l'ouvrier qui doit la nettoyer. Pour cet objet, la cheminée est garnie dans un des angles de barres de fer horizontales espacées de 0,80, et qui forment une échelle au moyen de laquelle on s'élève facilement jusqu'au sommet.

441. Il est bien important de n'établir une cheminée que sur des fondations bien solides et qui ne cèdent pas sous son poids, car l'affaissement se fait toujours inégalement; et, quand il a lieu, il en résulte sinon la chute de la cheminée, au moins une déviation nuisible et dangereuse. C'est un point auquel les constructeurs n'attachent pas en général assez d'importance. En Belgique, par exemple, il est rare de trouver une cheminée verticale.

442. Dans les cheminées qui doivent recevoir de l'air à une température très-élevée, comme celles des fourneaux à réverbère, il faut employer des briques réfractaires et les lier entre elles avec de la terre à briques. Dans les cheminées qui, comme celles des chaudières à vapeur, ne doivent recevoir que des fumées à une température rarement supérieure à 300°, on peut employer des briques ordinaires réunies par du mortier de chaux et de sable siliceux; il serait cependant utile d'employer des briques réfractaires pour le revêtement de la partie intérieure du bas de la cheminée. Le plâtre ne doit jamais être employé quand la température de la fumée doit dépasser 100°, parce qu'à cette température le plâtre commence à perdre l'eau hygrométrique qu'il renferme, et par suite sa ténacité.

443. Les grandes cheminées isolées peuvent se construire sans échafaudage extérieur quand leur diamètre est assez grand; l'ouvrier s'élève progressivement sur des étais qu'il place dans des cavités qu'il ménage. Un bon ouvrier habitué à ces sortes de constructions, aidé d'un garçon qui lui donne les briques et le mortier, peut élever ainsi en quinze jours une cheminée rectangulaire pyramidale de 13 à 14 mètres de hauteur, de 2^m et 1^m de diamètre extérieur et intérieur à sa base, et de 0,80 et 0,60 de diamètres extérieur et intérieur au sommet.

444. Les cheminées sont ordinairement terminées par une partie d'un plus grand diamètre, et qui ressemble au chapiteau d'une colonne; cette partie de la cheminée est principalement destinée à lui donner une forme plus élégante. Souvent le chapiteau est en briques (fig. 20, pl. 2) comme le reste de la cheminée; d'autres fois il est formé d'une seule



Pierre; d'autres fois, enfin, il est en fonte ou en fer (fig. 21 et 22, pl. 2).

Les chapiteaux en briques ont l'inconvénient de laisser pénétrer les eaux pluviales à travers la maçonnerie et d'en faciliter la détérioration; tous les autres n'ont pas cet inconvénient. Mais ceux qui sont en fonte ont celui d'augmenter par leur poids l'amplitude des oscillations que fait la cheminée par l'influence des vents. La meilleure disposition consiste dans l'emploi d'un chapiteau en briques recouvert d'une épaisse feuille de tôle qui s'étend sur toute sa partie horizontale, et qui se replie de 0,10 à 0,15 en dedans et en dehors.

445. Les cheminées d'usines isolées et très-élevées provoquent la chute de la foudre et par leur élévation et par la grande conductibilité de la suie qui recouvre leur surface intérieure; aussi les arme-t-on d'un paratonnerre. Les figures 23 et 24 (pl. 2) représentent les dispositions généralement employées. Dans la première, quatre tiges rivées au chapeau de tôle qui enveloppe le chapiteau, supportent la tige du paratonnerre, une des tiges se prolonge horizontalement et se termine par un anneau auquel est attachée la corde métallique dont l'autre extrémité plonge au-dessous des plus basses eaux d'un puits. La seconde représente un paratonnerre d'une cheminée en tôle. La tige du paratonnerre est supportée par deux tiges rivées sur les bords de la cheminée qui sert elle-même de conducteur, et la chaîne destinée à établir la communication avec un puits, peut être fixée à sa partie inférieure.

446. Quand les cheminées isolées sont minces et très-élevées, il est nécessaire de les armer pour augmenter leur résistance. Le meilleur mode d'armature consiste à placer dans les assises des bandes de fer plat, recourbées par les deux bouts de la hauteur d'une ou deux briques, et qui se croisent alternativement, comme l'indiquent les figures 25 et 26 (pl. 2).

447. Les figures de la planche 3 représentent les élévations et les coupes de plusieurs cheminées en briques et en tôle qui ont été construites et qui n'ont éprouvé aucun accident.

Les figures 1 et 2 représentent l'élévation et la coupe verticale d'une cheminée conique; les figures 3 et 4 les coupes horizontales par les plans *ab* et *cd*. L'orifice *m* donne accès à la fumée; l'orifice *n*, ordinairement fermé, sert à introduire un ouvrier dans la cheminée pour la ramoner.

448. Les figures 5 et 6 représentent la coupe verticale et l'élévation à des échelles différentes d'une cheminée en tôle de 20 mètres de hauteur. La cheminée est fixée par des écrous ou seulement des rivets à un socle en fonte *abcd*, fixé lui-même sur un massif de maçonnerie au moyen de quatre tiges qui traversent le massif et qui sont terminées par des écrous. Lorsque ces sortes de cheminées sont très-élevées, on les maintient souvent par des haubans en fils de fer amarrés dans le sol ou dans des constructions voisines. Pour s'opposer à l'oxydation du métal, on recouvre la cheminée d'une couche de goudron de houille, substance qui supporte une température assez élevée sans s'altérer, ou mieux d'une couche de chaux. Si la cheminée ne devait pas recevoir de l'air à une température élevée, il serait bien préférable d'employer la tôle recouverte de zinc, ou d'une couche de peinture faite avec l'alliage pulvérulent de fer et de zinc.

449. Les figures 7 et 8 représentent l'élévation et la coupe verticale d'une grande cheminée en briques carrée; la figure 9 représente la projection horizontale du chapeau en fonte qui la termine; les figures 10 et 11 sont des coupes horizontales faites par les plans *ab* et *cd*.

450. *Disposition des carneaux.* Dans les grandes usines où l'on emploie des cheminées communes à plusieurs fourneaux, il est important de disposer le canal qui doit recevoir l'air brûlé de tous les fourneaux, de manière que les veines de gaz n'agissent pas les unes sur les autres. La figure 1 (pl. 4) représente la disposition qu'il faudrait employer lorsque l'air brûlé des différents fourneaux déboucherait à différentes distances dans un canal commun qui communiquerait avec la cheminée. La figure 2 (pl. 4) est relative au cas où les canaux partiels déboucheraient au même point d'un canal commun; et enfin la figure 3 représente la disposition qu'il faudrait employer dans le cas où trois canaux d'air brûlé pénétreraient dans une cheminée par trois faces différentes. Il est évident que, dans tous les cas, les diaphragmes doivent être placés de manière à laisser à chaque courant la section qui lui convient.

451. Il faut aussi éviter avec soin les rélargissements et les étranglements, parce que ces deux circonstances diminuent toujours l'effet produit par la cheminée, quoique leur influence soit beaucoup moindre que dans les conduites d'eau.

452. *Registres.* Dans tous les appareils de chauffage, quelles que soient



d'ailleurs leurs dimensions et leurs destinations, il est toujours nécessaire de placer au bas ou au sommet des cheminées une plaque de tôle ou de fonte au moyen de laquelle on puisse, à volonté, diminuer le tirage, et que l'on ferme pour éteindre le foyer. Les registres sont très-utiles dans les appareils qui ne fonctionnent que par intermittence; parce que, le courant d'air étant intercepté, le fourneau se refroidit très-lentement.

453. On peut les disposer d'un grand nombre de manières différentes. Dans les appareils d'une petite dimension dont les cheminées sont en tôle ou en fonte, on règle l'ouverture de la cheminée par une plaque circulaire *abcd* (fig. 4 et 5, pl. 4) mobile autour de l'axe *ab*, qui traverse les parois opposées du tuyau et que l'on fait mouvoir par la clef extérieure *mn*.

454. Cette disposition pourrait également être employée dans les appareils d'une grande dimension; mais comme le frottement seul de l'axe contre les tourillons qui le supportent ne serait pas suffisant pour maintenir la plaque dans sa position, il faudrait fixer à l'axe, et en dehors de la cheminée, une tige perpendiculaire à sa direction, percée à son extrémité d'un trou par lequel on ferait passer une clavette qui pénétrerait dans une série de trous disposés circulairement dans une plaque de fonte fixée contre la cheminée (fig. 6 et 7, pl. 4); la plaque mobile devrait être en fonte, parce que la tôle serait bientôt oxydée, et même, si cette dernière n'avait pas une grande épaisseur, elle serait sujette à se voiler, surtout si la température de la fumée était très-élevée.

455. On emploie quelquefois des trappes glissantes, horizontales (fig. 8 et 9). Mais, dans les grands appareils, on préfère celles qui se meuvent verticalement et qui sont soutenues par un contre-poids. La figure 10 (pl. 4) est une coupe de l'appareil suivant la longueur du canal, et la figure 11 une coupe en travers. *ab*, plaque en fonte; *cdef*, coulisse en fonte fixée dans la maçonnerie; *gg*, chaîne de suspension de la plaque; M, poulie de renvoi; P, contre-poids de la plaque. Ce contre-poids doit avoir un poids égal à celui de la plaque; le frottement de la poulie est alors suffisant pour maintenir la plaque à la hauteur à laquelle elle est abandonnée.

456. Cette dernière disposition est généralement employée; elle a cependant un grand inconvénient provenant de ce qu'il existe toujours un intervalle assez considérable entre les bords de la plaque et les rainures

du cadre en fonte dans lequel elle se meut; d'où il résulte qu'une grande quantité d'air froid est appelée dans la cheminée, et diminue d'une manière notable le tirage du foyer. La disposition indiquée dans les figures 12 et 13 (pl. 4) éviterait complètement cet inconvénient. Le registre est formé par une plaque verticale mobile autour d'un axe vertical; on pourrait le faire battre contre des arrêts en fonte qui permettraient une fermeture complète.

457. Quand la température de l'air chaud dépasse 5 à 600°, on ne peut pas employer les appareils que nous venons de décrire, parce que la fonte et le fer seraient trop promptement déformés ou oxydés. La meilleure méthode de régler le tirage de la cheminée est alors de placer la plaque mobile à l'orifice supérieur de la cheminée; parce que la plaque, étant toujours refroidie d'un côté par l'air, s'échauffe peu. La figure 14 (pl. 4) représente cette disposition; *ab* est une plaque de fonte soutenue par une tige verticale *cd*, fixée à genoux, à l'extrémité du levier *efg*, mobile autour du point *f*; l'extrémité *e* reçoit une chaîne *mn*, au moyen de laquelle on règle la distance de la plaque *ab* à l'orifice de la cheminée. Cette disposition a l'inconvénient d'exiger qu'un ouvrier monte au sommet de la cheminée quand la bascule vient à se déranger.

458. Il résulte de ce que nous avons dit dans le chapitre précédent, que les diaphragmes destinés à arrêter la circulation de l'air dans une cheminée sont beaucoup plus efficaces quand ils sont placés à la partie supérieure de la cheminée que quand ils traversent les canaux qui amènent l'air brûlé dans la cheminée, du moins quand la somme des surfaces des petits orifices qui restent ouverts sur leurs contours reste la même.

Cheminées d'habitations.

459. Les dimensions des cheminées d'habitations ont été fixées par deux ordonnances de 1712 et de 1723. Elles étaient dans œuvre, pour les appartements, de 3 pieds de largeur sur 10 pouces de profondeur; et pour les cuisines des grandes maisons, de 4 pieds et demi à 5 pieds, sur 10 pouces de large. Elles devaient être construites en briques, avec des fantons en fer de distance en distance.



460. Ces dimensions excessives avaient de grands inconvénients; car, indépendamment de la place inutilement occupée par le tuyau de cheminée, la grande section du canal et sa forme aplatie étaient très-favorables à l'établissement des doubles courants, et par suite à l'introduction de la fumée dans les pièces. Depuis, on y a remédié en rétrécissant la cheminée aux deux extrémités ou dans une partie de leur longueur par les ventouses, ce qui produit le même effet qu'une diminution de diamètre dans toute l'étendue du canal. Ainsi, sous ce rapport, les ordonnances ne sont point exécutées; elles ne le sont pas davantage sous celui de la construction, car la plupart des cheminées sont en plâtre. Ainsi ces ordonnances de police sont complètement tombées en désuétude.

461. Quand on compare les dimensions des tuyaux de poêle avec celles des tuyaux de cheminée, et qu'on remarque que dans les gros poêles, on brûle souvent beaucoup plus de combustible que dans les cheminées, on est étonné qu'on ait laissé si longtemps entre eux une si grande disproportion. A la vérité, pour la même quantité de combustible à brûler dans le même temps, les tuyaux de cheminée doivent être plus grands que ceux des poêles, parce que, par la disposition des foyers, les cheminées appellent un grand volume d'air qui n'alimente pas la combustion; mais, en ayant égard à cette circonstance, la disproportion est encore énorme. L'habitude prise de faire ramoner les cheminées par des enfants qui les parcourent dans toute leur longueur, est probablement la cause qui a fait conserver aux cheminées des dimensions inutiles; mais, comme on peut facilement employer des moyens beaucoup plus simples pour ramoner les cheminées, comme nous le verrons plus bas, il est très-avantageux de ne leur donner que les dimensions seulement suffisantes au dégagement de la fumée et à la ventilation. La forme circulaire est toujours préférable à toutes les autres formes, parce que la résistance étant uniforme sur toute la surface intérieure, les doubles courants s'y établissent beaucoup moins facilement que dans les tuyaux carrés, et surtout dans ceux dont la largeur dépasse beaucoup la profondeur, parce que les résistances étant plus grandes dans les bouts, les courants descendants ont une plus grande facilité à se former. On a reconnu par expérience que, pour une cheminée d'appartement ordinaire, un tuyau circulaire de 15 à 20 centimètres de diamètre ou

de toute autre forme ayant 3 à 4 décimètres de surface, était presque toujours suffisant.

462. Le plâtre est peut-être de tous les matériaux qu'on puisse employer pour la construction des cheminées, celui qui présente les plus graves inconvénients, d'autant plus qu'on ne lui donne qu'une très-petite épaisseur, et qu'on en approche imprudemment les poutres; car, le plâtre est attaqué par l'eau qu'entraîne la fumée et par celle qui tombe de l'atmosphère, la chaleur lui fait éprouver un commencement de calcination qui détruit insensiblement l'adhérence de ses parties, et les variations de température occasionnent souvent des fentes par lesquelles la fumée peut se dégager.

On a été conduit à construire des cheminées d'habitation en plâtre, non-seulement parce que leur établissement coûtait moins qu'avec les briques, mais encore parce que le dévatement des cheminées s'exécutait beaucoup plus facilement, et sans l'emploi d'armatures en fer.

L'usage du plâtre doit être proscrit dans la construction des cheminées; du moins il ne doit être employé que pour lier entre eux des matériaux plus résistants.

463. Les tuyaux de fonte employés pour les conduites de fumée ont aussi de graves inconvénients quand ils sont engagés dans la maçonnerie, à cause des dilatations et des contractions qui résultent des changements de température. On ne peut les employer utilement que pour des cheminées qui sont isolées ou adossées aux murs extérieurs.

464. Les cheminées en poteries ont en général trop peu d'épaisseur, et sont trop fragiles; elles ne doivent être encore employées que pour des conduits extérieurs.

465. La meilleure de toutes les constructions est celle en briques; et la manière la plus convenable de les disposer est celle qui a été imaginée par M. Gourlier: elle a été d'abord adoptée dans la construction du palais de la Bourse, et elle est maintenant généralement employée. Dans cette nouvelle disposition, les cheminées sont placées dans l'épaisseur des murailles dont elles n'augmentent pas l'épaisseur et dont elles ne diminuent pas la solidité; elles sont formées par des briques d'une plus grande épaisseur que les briques ordinaires, et qui ont des formes appropriées à la forme et aux dimensions du canal qu'elles doivent former. Les figu-



res 1, 2, 3 et 4 (pl. 5) représentent deux assises consécutives de briques destinées à former 1, 2, 4 ou 6 tuyaux de cheminée. La figure 5 représente une disposition dans laquelle les tuyaux ont une section rectangulaire arrondie sur les angles. La différence entre les formes des briques de deux assises qui se suivent, résulte de la nécessité de ne pas placer les joints des briques les uns sur les autres. Ce mode de construction présente une grande solidité; mais il a l'inconvénient d'exiger un grand nombre de modèles de briques, non-seulement à raison des différents diamètres des cheminées et du nombre des tuyaux groupés, mais pour chaque grandeur et chaque groupement.

466. Ces cheminées ne peuvent pas se ramoner par les procédés ordinaires; mais cette opération s'exécute bien plus facilement au moyen d'un fagot d'épines auquel on attache deux cordes de la longueur du canal, et au moyen desquelles on le promène facilement dans toute son étendue. Le mode de construction dont nous venons de parler est maintenant généralement adopté à Paris.

§ 4. — INFLUENCE DE L'ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE SUR LE TIRAGE DES CHEMINÉES.

Influence des vents.

467. Les vents ont, comme tout le monde sait, une très-grande influence sur le tirage des cheminées; leur action se manifeste souvent, et à l'orifice d'écoulement de l'air chaud, et à l'entrée de l'air froid, c'est-à-dire au sommet de la cheminée et à l'ouverture du cendrier ou du canal d'alimentation; c'est pourquoi nous examinerons successivement l'influence des vents aux deux extrémités du canal.

468. *Influence des vents à l'extrémité supérieure de la cheminée.* Pour étudier complètement cette question qui est importante, surtout quand le tirage est très-faible, il faut considérer l'influence du vent dans toutes les directions possibles.

469. Supposons d'abord que le vent soit perpendiculaire à la direction de la cheminée, et par conséquent qu'il soit horizontal. Lorsque le vent est dirigé horizontalement, il résulte de l'observation que la dépense n'est pas sensiblement changée; or, comme la veine est fortement inclinée, il faut alors nécessairement que l'augmentation de la vitesse d'écoulement compense la diminution de la section, du moins à peu près. On peut se rendre compte de cet effet en considérant la veine qui s'écoule comme possédant la vitesse verticale qui résulte de la force ascensionnelle due à la cheminée, et la vitesse horizontale du vent; on trouve alors qu'il y a compensation exacte. En effet, si ab (fig. 6, pl. 5) représente la vitesse verticale de la fumée, ac la vitesse du vent, ad sera la vitesse et la direction de la veine. ap et pq seront proportionnels à la section de la cheminée et à la section de la veine; et en désignant par v la vitesse verticale, par V la vitesse ad , les dépenses seront proportionnelles à $ap \times v$ et à $pq \times V$. Or, on a $pq = ap \cos \varphi$, et $v = V \cos \varphi$; et par suite $v \times ap = V \times pq$.

470. Quand le vent est dirigé verticalement de haut en bas, l'effet produit dépend des vitesses relatives du vent et de l'air brûlé. Si les deux courants ont une vitesse égale, tous deux sont arrêtés; par conséquent, l'ascension de l'air dans la cheminée cesse complètement, et l'air brûlé qui se dégage continuellement du combustible reflue dans l'appartement; si, au contraire, le vent a une vitesse plus grande que celle de l'air brûlé, l'air extérieur s'introduira par le tuyau, et l'air brûlé qui se trouvait dans le canal, celui qui se dégage du combustible, ainsi que l'air extérieur, sortiront par la porte du foyer, et cela avec une vitesse d'autant plus grande, que celle du vent sera plus grande relativement à celle de l'air brûlé dans un air calme. Il est évident que si la vitesse du vent était plus petite que celle de l'air brûlé, la vitesse de ce dernier serait seulement ralentie.

471. Mais si on suppose que le vent soit dirigé de bas en haut, son influence sur la vitesse de dégagement de la fumée sera nulle toutes les fois que sa vitesse sera égale ou plus petite que celle de la fumée, et dans le cas contraire elle sera toujours favorable; alors le vent accélérera la vitesse d'écoulement de la fumée.

La cause de cette influence du vent dirigé de bas en haut est facile à reconnaître; en effet, toutes les fois qu'un courant d'air frappe un



obstacle *ab* (fig. 7, pl. 5), l'air qui se trouve derrière est en partie entraîné ; il se forme alors derrière l'obstacle un vide partiel, et un baromètre qui y serait placé descendrait d'une quantité notable ; cet effet étant indépendant de la forme et de l'épaisseur du corps que l'air vient choquer, on conçoit que si le corps avait la forme d'un cylindre, l'effet serait encore le même ; et si ce cylindre était creux et laissait échapper un courant d'air dans la direction du vent, le courant d'air chaud recevrait une accélération plus ou moins grande.

472. Les courants d'air ont rarement les directions que nous venons d'examiner, car ils ne sont presque jamais horizontaux ou verticaux, toujours ils ont une inclinaison plus ou moins grande à l'horizon ; mais on peut facilement ramener ce cas général à ceux que nous avons examinés d'abord ; car on peut considérer un courant incliné comme résultant de deux courants, l'un horizontal et l'autre vertical (fig. 8 et 9, pl. 5), et on peut facilement conclure de ce qui précède, que l'influence du vent pourra être favorable quand il tendra à s'élever, et qu'il sera toujours défavorable dans le cas contraire.

Les vents ayant, en général, des directions peu inclinées à l'horizon, leur influence est très-petite sur les cheminées élevées et isolées ; mais il n'en est plus ainsi lorsque les cheminées dépassent peu les toits des bâtiments, et quand elles sont dominées par des édifices ou des montagnes, parce que les courants d'air prennent la direction des surfaces qu'ils rencontrent, et qu'ils peuvent avoir alors des directions très-inclinées à l'horizon, ou dans un sens, ou dans l'autre. Le fait que nous venons d'énoncer, que les courants d'air qui rencontrent des surfaces immobiles en suivent la direction et ne se réfléchissent pas, résulte de l'expérience ; on peut facilement le constater en dirigeant le vent d'un soufflet obliquement contre une surface plane : le courant prend exactement la direction de la surface. Si le courant est lancé contre un cylindre perpendiculairement à sa direction et de manière que l'axe de la veine d'air et celui du cylindre soient dans un même plan, la veine d'air se divise en deux parties qui suivent les contours du cylindre et qui se réunissent sur le point du cylindre opposé à celui qui reçoit le choc de la veine.

473. Il résulte de ce qui précède, que la diminution de tirage des cheminées occasionnée par les vents est d'autant plus grande, que ce tirage est plus petit, que la vitesse du vent est plus considérable, et que sa di-



rection est plus inclinée à l'horizon de haut en bas (1). Mais on n'est pas toujours libre de donner à la fumée une vitesse suffisante pour qu'elle ne soit pas sensiblement modifiée par les vents dans les circonstances les plus ordinaires; car l'économie du combustible, et un grand nombre d'autres circonstances particulières, obligent souvent à ne laisser à la fumée qu'une faible vitesse; il est alors nécessaire d'armer les orifices supérieurs des cheminées de différents appareils destinés à détruire l'influence du vent, et même à l'utiliser pour le tirage. Nous donnerons une description succincte de ces appareils, après avoir examiné l'influence du vent sur l'autre extrémité de la cheminée, et celle des autres circonstances atmosphériques.

474. *Influence du vent sur les foyers.* Considérons le canal courbé à angle droit ABC (fig. 10, pl. 5), qui représente la disposition d'un foyer ordinaire avec sa cheminée. A est l'ouverture par laquelle entre l'air froid qui doit alimenter la combustion; C est celle de l'écoulement de la fumée.

Si nous supposons le canal rempli d'air froid à la température ordinaire, et un vent horizontal perpendiculaire à la direction du tuyau ABC, il est évident que l'air renfermé dans le canal n'éprouvera aucun mouvement. Mais si le courant est parallèle au tuyau AB, il déterminera un écoulement d'air par le canal ABC, dans le sens du mouvement de l'air extérieur; c'est-à-dire, que si le vent est dans la direction BA, l'air s'introduira par C et sortira en B; et si le vent est dirigé suivant AB, le courant entrera par A pour sortir en C.

475. Supposons maintenant que le canal soit rempli d'air chaud qui

(1)

Vitesse des vents.

0 ^m ,5 (par seconde)	vent à peine sensible.
1.....	— sensible.
2.....	— modéré.
5,5.....	— assez fort.
10.....	— fort.
20.....	— très-fort.
22,5.....	— tempête.
27.....	— grande tempête.
36.....	— ouragan.
45.....	— ouragan qui déracine les arbres et renverse les édifices.



s'écoule par l'orifice C avec une certaine vitesse; il est évident que si le vent est dirigé suivant AB, et que sa vitesse soit plus grande que celle du courant d'air chaud, la vitesse de ce dernier sera accélérée; et qu'au contraire, si le vent se meut dans la direction BA, le courant d'air chaud sera toujours diminué. Ainsi, dans un appareil disposé comme l'indique la figure, le vent soufflant dans la direction AB, active le tirage, et le diminue lorsqu'il est dirigé en sens contraire.

C'est un phénomène que j'ai eu très-souvent l'occasion d'observer, principalement dans les fabriques de soude. Toutes les fois que le vent est dirigé en sens contraire du mouvement de l'air chaud dans les fourneaux, il y a toujours ralentissement du tirage. J'ai encore constaté ce fait dans un grand appareil de ventilation dont le tirage était très-faible, tirage qu'on était obligé de rendre tel, par économie, et qui était produit artificiellement par une combustion dans une cheminée d'appel; l'influence du vent était beaucoup plus considérable que dans les fourneaux à soude où le tirage est très-grand.

Influence de la température de l'atmosphère.

476. Quand la température de l'air brûlé dans une cheminée reste constante, et que la température extérieure augmente ou s'abaisse, le tirage varie en sens contraire. Mais l'influence de ces variations résulte principalement des phénomènes qui se produisent dans le foyer. La combustion est d'autant plus active, il y a d'autant moins d'air qui échappe à la combustion, que l'air a une plus grande densité, et par conséquent il faut moins d'air pour brûler la même quantité de combustible quand l'air extérieur est à une basse température que quand cette température est élevée. Ainsi tout concourt à rendre le tirage des cheminées plus grand dans l'hiver que dans toute autre saison.

477. On a cependant reconnu, comme nous le verrons plus tard en parlant des foyers, que dans les hauts fourneaux il y a un grand avantage à employer de l'air chaud au lieu d'air froid; mais les circonstances sont très-différentes de celles des foyers ordinaires: l'air est injecté sur le combustible avec une grande vitesse.

Influence de la pression de l'atmosphère.

478. En supposant l'air brûlé à la même température dans la chemi-

née, lorsque l'air extérieur est à différentes pressions, la vitesse d'écoulement resterait la même, quelle que soit la pression extérieure; mais le poids de l'air appelé, diminuant avec la pression, dans le même appareil, on brûlerait des quantités de combustible qui varieraient proportionnellement à la pression extérieure. Mais l'influence des variations du baromètre se manifeste principalement dans les foyers, la combustion est d'autant moins vive, il s'échappe d'autant plus d'air sans altération que la pression extérieure est plus faible. Cette influence est si grande, que quand la pression est réduite à 0,57, aux $\frac{3}{4}$ de la pression ordinaire, la combustion devient si languissante que la chaleur qu'elle dégage ne suffit plus pour la maintenir. Sur le Mont-Blanc, où le baromètre ne s'élève qu'à 0^m57, M. de Saussure a observé que la combustion du charbon ne pouvait se maintenir qu'en l'alimentant par un soufflet.

Influence de l'état hygrométrique de l'air.

479. Comme les variations de pression et de température extérieure, la variation de l'état hygrométrique de l'air est sans influence sensible sur la vitesse d'écoulement, et le tirage ne devrait éprouver qu'une légère diminution par l'accroissement de l'état hygrométrique de l'air. Mais encore ici, comme dans les deux cas déjà examinés, l'effet produit sur le foyer l'emporte beaucoup sur le premier. A mesure que la quantité de vapeur d'eau en dissolution dans l'air augmente, une plus grande quantité d'air échappe à la combustion, les foyers languissent, et l'effet utile du combustible diminue.

480. On voit, d'après cela, que dans les temps lourds, et qu'on devrait désigner par l'épithète contraire, où l'on trouve à la fois une faible pression, une température élevée, et de l'air presque saturé de vapeur d'eau, le tirage des cheminées doit être beaucoup plus faible que dans les temps froids et secs, qui sont toujours accompagnés d'une grande hauteur de la colonne barométrique.

C'est aussi ce qu'on observe dans toutes les usines : les foyers languissent dans les temps chauds et humides. L'influence est alors la même sur les appareils de combustion et sur l'organe de la respiration, et il doit en être ainsi, car les phénomènes qui se produisent ont la plus grande analogie. L'effet produit sur les foyers est alors tel, que, dans la



plupart des verreries on est obligé de suspendre le travail pendant l'été, et qu'il en est de même dans d'autres usines où l'on n'a pas le moyen de produire l'excès de tirage que les circonstances atmosphériques exigeraient.

481. Il y a cependant, relativement à l'influence de l'humidité de l'air, quelques faits qui semblent en opposition avec ce que nous venons de dire. Depuis quelques années on a imaginé d'introduire de la vapeur dans l'air d'alimentation des foyers, ou en la faisant arriver librement dans le cendrier, ou en la faisant pénétrer dans des grilles creuses, d'où elle s'échappe par de nombreux orifices latéraux. Dans l'un et l'autre cas, l'air traverse cette vapeur et l'entraîne avec lui sur le combustible. Or, dans ces différents cas, la combustion est très-active et ne ressemble pas à ces combustions languissantes qui ont lieu par les temps humides. La raison de cette différence me paraît provenir uniquement de ce que, dans les appareils dont il est question, il y a un grand tirage qui compense l'effet résultant du mélange de la vapeur à l'air, car il est bien constaté qu'avec un accroissement convenable de tirage on peut toujours détruire l'effet provenant des circonstances atmosphériques nuisibles dont nous avons parlé.

Influence des rayons solaires.

482. Lorsque les rayons solaires pénètrent dans une cheminée dont la température est peu élevée, comme, par exemple, dans les tuyaux des cheminées d'appartements, on sait par expérience que la fumée reflue par le foyer. Il est probable que cet effet provient principalement de ce que les corps voisins, principalement les toits, étant fortement échauffés, donnent naissance à des courants d'air chaud dirigés de bas en haut, et par suite à des courants dirigés en sens contraire au-dessus des corps moins échauffés, et par conséquent autour des tuyaux de cheminée. On évite complètement ces effets en recouvrant les tuyaux de cheminée de mitres en terre cuite ou en métal.

§ 5. — APPAREILS DESTINÉS A SOUSTRAIRE LE TIRAGE DES CHEMINÉES
A L'INFLUENCE DES VENTS ET DE LA PLUIE.

Appareils pour le sommet des cheminées.

483. Les appareils qu'on a proposés pour remplir l'objet dont il est question sont très-nombreux; nous décrirons seulement les principaux. Ces appareils peuvent se diviser en deux classes, ceux qui sont fixes et ceux qui sont mobiles.

484. *Appareils fixes.* Dans la plupart des cheminées d'habitation on se contente de rétrécir l'orifice supérieur de la cheminée au moyen d'un tuyau conique, ou par la disposition indiquée fig. 11 (pl. 5). Par là on augmente la vitesse d'écoulement de la fumée et les chances de son refoulement par les vents. La petite étendue de l'orifice d'écoulement obvie aussi en grande partie à l'influence de la pluie et des rayons solaires.

485. Parmi les appareils fixes, le plus simple et en même temps le plus efficace, du moins dans les circonstances ordinaires, consiste en un chapeau en tôle, de forme variable, qui recouvre à une certaine hauteur l'ouverture supérieure du tuyau de cheminée, et dont les bords, d'un plus grand diamètre que celui du tuyau, descendent au niveau de l'orifice de ce tuyau ou plus bas, fig. 14 (pl. 5). Il est évident que par cette disposition on obvie complètement à l'influence de la pluie, des rayons solaires, et des courants d'air plus ou moins inclinés à l'horizon, mais de haut en bas. Mais cet appareil n'éviterait pas l'action des courants inclinés à l'horizon et dirigés de bas en haut. Il est cependant toujours suffisant pour les cheminées isolées.

486. L'appareil que nous venons de décrire a été modifié de plusieurs manières. La figure 12 (pl. 5) représente une élévation des mitres que l'on place le plus souvent sur les cheminées des habitations. Elles sont formées de deux larges tuiles ou plaques de plâtre, placées sur les bords de la cheminée, et disposées de manière à se réunir par leurs arêtes supérieures. Elles n'obvient qu'en partie seulement aux inconvénients qui résultent de la pluie et des vents, puisque l'appareil est ouvert des deux côtés. A la vérité, on place les deux plaques dans une direction



perpendiculaire à celle du vent le plus fréquent; mais cette disposition ne remplit qu'incomplètement son but et ne présente aucune solidité.

487. Les figures 13 et 14 (pl. 5) représentent une mitre en tôle qui a la plus grande analogie avec celle que nous venons de décrire; elle est formée d'une plaque de tôle ayant la forme d'un demi-cylindre, que l'on place horizontalement au-dessus du tuyau. On rend cet appareil beaucoup plus efficace en plaçant aux deux bouts du cylindre, à distance et perpendiculairement à sa direction, deux plaques de tôle (fig. 16 et 17, pl. 5).

488. La disposition indiquée par la figure 18 est encore souvent employée; elle serait très-efficace dans tous les cas si, en avant des quatre orifices, se trouvaient des plaques de tôle destinées à empêcher les courants d'air de pénétrer dans les tuyaux verticaux.

489. La figure 19 représente un appareil beaucoup plus simple, et qui est préférable sous tous les rapports; il serait beaucoup plus efficace s'il était pourvu d'un second tuyau horizontal perpendiculaire au premier et disposé de la même manière.

490. La figure 20 représente une disposition souvent employée; elle consiste en une calotte de tôle placée au-dessus du tuyau, comme dans la figure 15. Mais le chapeau est trop petit et placé trop haut, et il ne préserve le tirage que d'une partie des inconvénients auxquels il doit remédier. Il semble que dans la construction de ces appareils on ait craint de gêner le mouvement vertical de la fumée; mais la vitesse de sortie est entièrement indépendante de la direction de l'orifice d'écoulement. Il est toujours plus avantageux de faire des chapeaux larges et dont les bords descendent au-dessous de l'orifice de la cheminée.

491. La figure 21 (pl. 5) représente le même appareil avec une modification qu'on a crue avantageuse: le chapeau est garni inférieurement d'une calotte placée en sens contraire. On pensait que par cette disposition on ferait réfléchir en dehors les courants d'air qui viendraient en dessous; mais cette addition est complètement inutile, car, comme nous l'avons dit (472), les courants d'air suivent les surfaces qu'ils rencontrent et ne se réfléchissent pas.

492. Les appareils représentés par les figures 22 et 23 sont connus sous le nom de bonnets de prêtre. Il paraît que dans la plupart des circonstances ils obviennent complètement à l'action des vents.

493. La figure 1^{re} (pl. 6) représente un appareil formé d'un cylindre ouvert par les deux bouts et environnant le tuyau à fumée, qui est fermé à la partie supérieure, et garni latéralement de quatre grandes ouvertures; il produirait un très-mauvais effet, car les vents inclinés à l'horizon auraient une grande action sur le tirage de la cheminée. Cet appareil ne deviendrait efficace qu'autant que l'on ouvrirait la partie supérieure du tuyau à fumée, et qu'on placerait un chapeau au-dessus; mais alors il deviendrait analogue aux derniers que nous avons décrits.

494. L'appareil représenté figure 2 (pl. 6), qui est dû à M. Delisle-Saint-Martin, produirait les mêmes effets que ceux que nous avons décrits précédemment (492).

495. Enfin la figure 3 (pl. 6) représente une mitre imaginée par M. Millet, et qui est peut-être de toutes la plus efficace; elle est formée d'un tambour en tôle fermé à la partie supérieure, communiquant par le bas avec le tuyau à fumée, et percé d'un grand nombre d'orifices carrés percés de dedans en dehors, et dont les ébarbures forment autour de petites pyramides tronquées saillantes sur la surface extérieure. Cette mitre, placée sur un tuyau de poêle dans lequel on brûlait de la paille mouillée, et recevant, dans différentes directions, un courant d'air très-violent lancé par un ventilateur à force centrifuge, n'a jamais laissé refluer la fumée par la porte du poêle. L'efficacité de cette mitre provient probablement des remous qui se forment autour des orifices et qui empêchent l'air de pénétrer dans le tambour. Cette mitre devrait être préférée à toutes les autres sans un inconvénient grave qui oblige à un fréquent nettoyage: les matières solides entraînées par la fumée forment, dans l'intérieur, des pellicules minces, analogues aux toiles d'araignée, et qui bouchent bientôt les orifices.

496. De tous les appareils que nous venons de décrire, le meilleur et le plus simple, pour les cheminées isolées, est celui de la figure 15 (pl. 5). Pour les cheminées qui s'élèvent peu au-dessus des toits des maisons et pour lesquelles on a à craindre des remous dirigés dans tous les sens, l'appareil de Millet doit être préféré, quand les gaz n'entraînent pas des matières qui puissent boucher les orifices; dans le cas contraire, on peut employer les appareils figures 19, 22 et 23 (pl. 5).

497. *Appareils mobiles.* Examinons maintenant les appareils mobiles. Tous ont pour objet de diriger l'ouverture de sortie du côté opposé au



vent, de sorte que la fumée tende à prendre la même direction; alors non-seulement le vent ne s'oppose pas à la sortie de la fumée, mais il augmente toujours le tirage quand sa vitesse est plus grande que celle de la fumée (471).

498. Les figures 4 et 5 (pl. 6) représentent les dispositions les plus simples des appareils mobiles; le tuyau de cheminée se termine par un tuyau de tôle circulaire, enveloppé par un tuyau court, mobile autour de son axe, fermé supérieurement et garni latéralement d'une large ouverture avec ou sans rebord. La partie supérieure du manchon est garnie d'une girouette placée dans le plan vertical du diamètre qui divise l'ouverture latérale en deux parties égales, et sur le rayon ou le prolongement du rayon qui se trouve du côté de l'ouverture.

499. On a proposé à ces derniers appareils une modification qui au premier abord paraît devoir être très-efficace; cette nouvelle disposition est représentée (fig. 6, pl. 6); le tuyau d'écoulement est traversé par un tuyau concentrique d'un petit diamètre, d'une moindre longueur, et qui se termine extérieurement par un entonnoir. Il est évident que quand l'appareil est dirigé par le vent, l'air qui pénètre par le tube intérieur augmente le tirage; mais l'effet provenant de l'air en mouvement qui environne le tuyau est diminué, parce qu'il ne se manifeste que dans l'espace compris entre les deux tuyaux; de sorte qu'il n'est pas bien certain que cet appareil soit plus efficace que celui que nous avons décrit d'abord, à moins qu'il n'y ait un accroissement de vitesse du vent dans le tuyau intérieur, provenant de l'entonnoir par lequel l'air y pénètre, accroissement que l'expérience n'a pas constaté.

500. Les appareils mobiles seraient évidemment les meilleurs de tous, si l'on pouvait donner une mobilité parfaite au manchon; mais, comme le frottement est toujours assez considérable, il arrive quelquefois, lorsque le vent est très-faible, que l'ouverture latérale se trouve dirigée du côté du vent, et par conséquent, si le tirage est très-faible, que la fumée sort par le foyer. Ce cas peut arriver d'autant plus fréquemment, que dans cette position le vent n'a aucune action sur la girouette. A la vérité l'équilibre est instantané, c'est-à-dire, pour peu que la girouette soit dérangée, elle abandonne cette position pour ne plus y revenir; mais on conçoit facilement que les frottements peuvent, pour des vents très-

faibles, la faire persister même sous un angle assez grand. Cependant on peut toujours diminuer beaucoup les chances d'inefficacité de l'appareil, en donnant de plus grandes dimensions aux girouettes, et le plus de liberté possible aux mouvements.

501. Ces appareils se construisent toujours en tôle, et par conséquent seraient de peu de durée si on ne prenait pas les précautions nécessaires pour s'opposer à l'oxydation du fer. Le meilleur vernis que l'on puisse employer, est le goudron qui provient de la distillation du bois; je l'ai souvent employé pour des objets analogues, et j'ai reconnu qu'il résistait bien à l'air, et même à une température de plus de 200 degrés. Je pense que le goudron qui provient de la distillation de la houille pourrait être également employé avec avantage. Mais l'emploi du fer galvanisé, c'est-à-dire, couvert d'une lame mince de zinc, serait encore préférable. Le zincage du fer s'exécute par un procédé analogue à l'étamage.

502. La figure 7 représente une autre disposition qui me paraît préférable à toutes celles qui précèdent. Cet appareil consiste en un cône en tôle qui embrasse l'orifice de la cheminée et qui est mobile autour de son sommet; il est évident qu'il serait efficace, quand même le vent ne l'inclinerait pas; mais on peut le rendre très-mobile en plaçant son centre de gravité très-près du point de rotation, au moyen d'un anneau métallique placé au delà du sommet du cône.

503. On emploie quelquefois une disposition plus simple que les précédentes, et qu'on désigne sous le nom de bascule turque: elle est représentée figure 8 (pl. 6). Cet appareil se compose d'une plaque mobile autour d'un axe horizontal fixé contre les parois de la cheminée; la plaque ayant son diamètre horizontal égal à celui de la cheminée qui lui correspond, et son diamètre mobile étant plus grand que l'autre diamètre de la cheminée, il est évident que le vent, en agissant sur la partie supérieure de la plaque, l'inclinera de manière que la fumée sorte toujours dans la direction du vent. Cet appareil est très-simple, mais il a l'inconvénient d'être sans influence quand le vent est dirigé dans le plan vertical qui passe par l'axe de rotation. Cependant on peut l'employer avec avantage en dirigeant l'axe horizontal perpendiculairement à la direction des vents dominants.

504. On a encore proposé d'employer des cages à 2, 4, 6 ou 8 pans,



fermées supérieurement, et garnies sur chaque face d'une ouverture munie d'une porte à charnière horizontale et supérieure; ces portes sont maintenues deux à deux à un degré d'ouverture convenable, par une tringle qui les unit (fig. 9 et 10, pl. 6), de sorte que quand le vent souffle d'un côté, il ferme lui-même l'ouverture par laquelle il se serait introduit et agrandit l'ouverture opposée. Cette disposition pourrait facilement s'appliquer à de larges cheminées, et serait bien plus sûre et bien moins dispendieuse que les autres, parce qu'il suffirait de ménager vers le haut de la cheminée et dans la maçonnerie un certain nombre d'ouvertures que l'on fermerait par des portes liées entre elles par des tringles. Il serait plus commode et plus sûr de construire toute la lanterne en fer, et dans tous les cas les volets devraient être équilibrés par des contrepoids. On a employé, dans quelques circonstances, des lanternes à 6 ou 8 faces garnies de jalousies fixes ou mobiles. Je ne sais pas jusqu'à quel point ces appareils seraient efficaces, mais ils sont certainement beaucoup plus compliqués et plus dispendieux que les précédents.

505. En résumé, les appareils mobiles sont tous compliqués; dans certaines circonstances ils peuvent ne pas fonctionner, et je pense qu'on doit toujours leur préférer les appareils fixes.

506. *Appareils destinés à soustraire les foyers à l'influence des vents.* Les vents étant rarement dirigés de bas en haut, si la prise d'air qui alimente le foyer se faisait dans un lieu découvert et par un orifice horizontal pratiqué dans le sol et communiquant par un canal avec le foyer, ce dernier ne serait jamais influencé par les vents, quelle que fût d'ailleurs leur direction; et en faisant le canal très-large, de manière que la vitesse de l'air y soit très-petite, le canal ne diminuerait pas sensiblement le tirage. D'ailleurs, en prenant l'air en dehors de l'atelier, il y aurait toujours, même par les temps calmes, un avantage pour le tirage, surtout quand la température des ateliers est très-élevée, parce que, l'air de l'atelier étant plus chaud que l'air extérieur, la pression qui détermine le mouvement est plus petite quand le cendrier s'ouvre dans l'atelier que quand il communique directement avec l'air extérieur.

507. Dans certaines circonstances on peut disposer la prise d'air de manière à faire concourir le vent à l'augmentation du tirage. Il suffit évidemment pour cela de faire la prise au niveau du sol et de garnir l'orifice d'une trappe inclinée à 45° mobile autour de l'orifice, de manière

à pouvoir l'opposer au vent. J'ai eu plusieurs fois l'occasion d'établir cette disposition dans des appareils dont le tirage était presque anéanti par les vents dirigés en sens contraire du mouvement de l'air dans le foyer, et ils ont toujours complètement réussi.

508. On peut aussi employer le vent pour diriger des appareils analogues à ceux que nous avons décrits pour les cheminées.

509. L'appareil mobile le plus simple est représenté figures 11 et 12 (pl. 6). Il consiste en une calotte métallique mobile AB, armée d'une girouette disposée de manière que la calotte présente toujours son ouverture au vent, afin qu'il se dirige dans le canal.

510. Celui qui est représenté figures 14 et 15 (pl. 6), serait tout aussi efficace. Il est formé d'une tour carrée, percée sur chaque face d'une ouverture, fermée par un volet en bois ou en tôle, mobile autour d'une charnière horizontale, placée de manière que le plus faible effort puisse faire ouvrir le volet et livrer passage à l'air.

§ 6. APPAREILS DANS LESQUELS LE TIRAGE A LIEU AVANT QUE L'EFFET UTILE DE LA CHALEUR SOIT PRODUIT, OU PENDANT QUE LA CHALEUR PASSE DANS LE CORPS QUI DOIT ÊTRE ÉCHAUFFÉ.

511. Dans les appareils généralement employés, le tirage nécessaire à la combustion est produit par une cheminée dans laquelle se rend la fumée, lorsqu'elle a passé sur les corps qui doivent être échauffés. La cheminée, pour produire son effet, exige que l'air brûlé ait une température assez élevée, et de là une perte de chaleur considérable. Mais dans un grand nombre de cas on peut éviter cette perte par une disposition convenable de l'appareil. Ici nous nous bornerons à indiquer les principes de ces dispositions, et nous donnerons les détails de ces constructions plus tard, lorsqu'il sera question des différents emplois de la chaleur.

512. Imaginons qu'au-dessus d'un foyer bien encaissé s'élève une cheminée de 3 à 4 mètres de hauteur, à parois épaisses et peu conductrices, l'air brûlé aura dans cette cheminée une très-haute température et acquerra une très-grande vitesse d'ascension, beaucoup plus grande que celle qui est nécessaire pour la combustion. Supposons maintenant qu'au-dessus de cette cheminée, dans son prolongement ou à côté, se



trouve la chaudière ou le corps qu'il faut échauffer, on pourra prolonger le parcours de la fumée de manière à la refroidir complètement ou presque complètement, et en quittant les surfaces de chauffe, elle pourra être abandonnée immédiatement dans l'air, ou introduite dans une cheminée qui n'aura d'autre effet que de la rejeter à la hauteur convenable dans l'atmosphère. C'est une disposition analogue qui existe dans les fours à fondre le verre destiné à la gobeletterie; la cheminée de tirage a seulement pour hauteur la distance de la grille à la voûte du fourneau, et l'air brûlé pourrait se refroidir complètement dans l'arche, si celle-ci avait une longueur suffisante.

513. Au premier abord, cette méthode ne semble applicable qu'autant que les corps qu'on veut chauffer ne doivent être portés qu'à une température qui excède peu la température ordinaire, puisque l'air brûlé ne peut pas être abandonné à une température plus basse que celle de ces corps. Mais en faisant mouvoir le corps à chauffer en sens contraire du mouvement de l'air brûlé, il est évident que, dans tous les cas, on pourrait utiliser la totalité de la chaleur de cet air, et le refroidir jusqu'à la température de l'atmosphère.

514. Cette méthode qui consiste, comme on voit, à placer la cheminée avant la chauffe, par conséquent à pousser l'air chaud dans les carneaux au lieu de l'y appeler, a un inconvénient que nous ne devons pas dissimuler. Les surfaces de chauffe doivent être beaucoup plus grandes que dans les dispositions ordinaires, parce que ces surfaces ne sont pas chauffées directement par le rayonnement du combustible, et que la chaleur n'y est apportée que par l'air brûlé; mais malgré cet inconvénient, il est beaucoup de cas, comme nous le verrons plus tard, dans lesquels cette méthode présenterait une très-grande économie de combustible.

515. On pourrait aussi disposer les appareils de manière à produire le tirage pendant la chauffe. La disposition consisterait à placer la cheminée au-dessus du foyer, et dans la cheminée le corps qui doit être échauffé. Si les canaux de circulation sont assez étroits, les surfaces de chauffe assez étendues, l'air brûlé parviendra au sommet de la cheminée à une température peu supérieure à celle du corps qui doit être échauffé, quoique le tirage soit très-puissant, parce que la vitesse d'ascension dépendra de la température moyenne de l'air brûlé dans les canaux de circulation, et que la température à la partie inférieure sera



celle du foyer. Cette disposition se rencontre dans les fours à chaux et dans les fours à plâtre.

Dans ces différentes dispositions, le diamètre de la cheminée se calculerait par les mêmes formules que nous avons données pour le cas où les cheminées sont placées après l'appareil de chauffage.





CHAPITRE VI.

MOUVEMENTS DE L'AIR PRODUITS PAR DES MACHINES OU PAR DES JETS DE VAPEUR.

§ 1. COMPARAISON DES EFFETS UTILES PRODUITS DIRECTEMENT PAR LA CHALEUR ET PAR LES MACHINES.

516. L'effet d'une cheminée consiste à appeler à l'extrémité du canal avec lequel elle communique, un certain volume d'air avec une certaine vitesse, à le faire circuler dans le canal, et à le verser plus ou moins altéré et plus ou moins échauffé dans l'atmosphère, par son orifice supérieur. Cet effet qui résulte de la force ascensionnelle de l'air chaud, et qui exige que l'air, à son entrée dans la cheminée, conserve une température assez élevée, pourrait évidemment être produit par une action mécanique directe; on pourrait employer des pompes, des ventilateurs de différentes espèces, et des moteurs quelconques; les machines pourraient être placées à l'une des extrémités ou en un point quelconque du circuit.

517. Les mouvements des gaz produits par la chaleur exigent beaucoup de combustible; par exemple, pour les fourneaux des chaudières à vapeur, la dépense, pour l'appel d'air dans le foyer, excède le quart de la consommation totale de combustible. Ainsi, si on avait un emploi utile de la chaleur de l'air brûlé, quand il est refroidi à 300°, et si, en même temps, le tirage mécanique coûtait moins que le tirage par la chaleur, il serait avantageux d'employer le premier moyen.

518. Or, dans un grand nombre de cas, on peut utiliser la chaleur perdue, et nous allons voir que le tirage mécanique dans les cheminées coûte beaucoup moins que le tirage par la chaleur. Je rapporterai

d'abord deux expériences qui établissent ce fait d'une manière évidente.

519. Dans un des bains Vigier établis sur la Seine, la fumée, après avoir circulé autour de la chaudière à eau chaude, se répartit dans douze tuyaux d'un petit diamètre, et de 20 mètres de longueur, plongés dans le réservoir d'eau froide; par cette circulation, la fumée se refroidit complètement, et à son entrée dans la cheminée elle a sensiblement la température de l'eau froide du réservoir. Entre l'extrémité des conduits et la cheminée se trouve un ventilateur qui aspire la fumée et la jette dans la cheminée. Le tambour du ventilateur a 0^m,80 de diamètre, 0,40 de largeur; le tuyau d'écoulement a 0,20 de diamètre; les ailes font quarante tours à la minute, et la machine est mise en mouvement par un seul homme. Il résulte de plusieurs expériences, que, par ce travail mécanique, on a brûlé en deux heures 0st,44 de bois pelard, pesant 390 kilogrammes le stère; ainsi on a brûlé $0,44 \times 390 = 171$ kilogrammes de bois en deux heures, ou 85 kilogrammes par heure. En admettant que 1 kilogramme de bois soit équivalent à $\frac{1}{2}$ kilogramme de houille, du moins pour la quantité d'air nécessaire à la combustion, ce qui s'éloigne peu de la vérité, le travail d'un homme suffirait à la combustion de 42 kil. de houille, dans les circonstances les plus défavorables, puisque la fumée passait dans des tuyaux d'un petit diamètre et d'une grande longueur. Or, le tirage par la chaleur coûterait au moins $\frac{42k}{4} = 10^k,5$ de houille; ce qui correspond à la force de 2,5 chevaux-vapeur; mais comme un cheval vaut sept hommes, il en résulte que le tirage mécanique qui s'effectue par un seul homme coûte réellement 2,5 chevaux ou 17 hommes, quand ce tirage est produit par la chaleur de l'air dans une cheminée ordinaire, dans laquelle la fumée arrive à 300°.

520. Dans la brasserie belge de Louvain, un ventilateur qui emploie un travail mécanique de 6 chevaux suffit pour produire l'appel des fourneaux dans lesquels on brûle par heure 1000 kilogr. de houille, ce qui équivaut à peu près à une machine de 200 chevaux. Ainsi, dans cette usine, le travail de 6 chevaux-vapeur équivaut au travail de l'air chaud dans la cheminée, qui exigerait au moins 250 kilogr. de houille, ce qui correspond à 50 chevaux.

521. Ainsi il y a un grand avantage à remplacer le tirage à l'air chaud par une action mécanique, malgré l'accroissement de résistance qu'entraîne le refroidissement complet de la fumée. Il est évident que, dans



l'appareil des bains Vigier, le rapport du travail produit par la chaleur perdue au travail effectif aurait été beaucoup plus grand, si on avait eu égard à la résistance de la fumée dans les longs tuyaux qu'elle parcourt (1).

522. Proposons-nous maintenant de déterminer d'une manière générale le rapport entre le travail produit par l'air chaud qui s'élève dans une cheminée, et le travail qu'on pourrait effectuer par la vapeur qui serait engendrée au moyen de la chaleur que renferme la fumée.

523. On sait qu'un cheval-vapeur consomme moyennement 4 kilogr. de houille à l'heure, ou $4.7500 = 30000$ unités de chaleur, et par seconde $30000 : 3600 = 8,33$. Or, comme la force d'un cheval est de 75 kilogrammètres, le travail de 1 kilogrammètre consomme $8,33 : 75 = 0,11$ unité de chaleur.

Cela posé, la quantité de chaleur perdue par une cheminée $= pt : 4$; p désignant le poids de l'air qui s'écoule par seconde, et t l'excès de la température de l'air chaud sur celle de l'air extérieur. Alors la quantité

(1) Les douze tuyaux qui traversent le réservoir d'eau froide ont une longueur commune de 20 mètres, et ensemble une section de $0^m,1$. On peut facilement trouver la longueur d'un tuyau unique de même section, qui produirait la même résistance; en effet, désignons par r les rayons des petits tuyaux, et par R le rayon du cercle dont la section est égale à la somme des sections des douze petits cercles, nous aurons

$$r = R \sqrt{\frac{1}{12}}$$

Le rapport de la somme des circonférences des douze petits cercles à la somme de leurs surfaces sera

$$\frac{12 \cdot 2\pi R \sqrt{\frac{1}{12}}}{\pi R^2} = \frac{12 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{12}}}{R} = \frac{6,85}{R};$$

pour le cercle dont le rayon est R , ce rapport sera

$$\frac{2\pi R}{\pi R^2} = \frac{2}{R}.$$

Alors, pour que la longueur du tuyau unique compense le moindre rapport entre sa circonférence et la surface de la section, cette longueur doit être égale à

$$20 \times \frac{6,85}{R} : \frac{2}{R} = 20 \cdot 3,425 = 68^m,50.$$

de kilogrammètres que cette chaleur pourra produire sera

$$\frac{pt}{4} \cdot \frac{1}{0,11} = \frac{pt}{0,44} = 2,27pt.$$

524. Le travail produit par l'air chaud que renferme une cheminée, sera $pv^2 : 2g$, en désignant par p le poids de l'air froid appelé à sa partie inférieure, ou celui de l'air chaud qui s'écoule par sa partie supérieure, et par v la vitesse d'écoulement.

Dans une cheminée ordinaire, la surface de l'orifice supérieur diffère peu de celle de la section des carneaux, et la vitesse qu'elle imprimerait à l'air, s'il n'éprouvait pas de résistance avant de pénétrer dans la cheminée, est plus petite que celle qui correspond à la hauteur de la colonne d'air chaud; en la supposant égale, la vitesse qu'elle imprimerait à l'air froid, serait

$$v = \frac{\sqrt{2gHat}}{(1+at)},$$

et le travail nécessaire pour l'appel d'un poids p d'air froid serait

$$\frac{pv^2}{2g} = \frac{pHat}{(1+at)^2}.$$

Alors le rapport R du travail qui pourrait être produit par la chaleur perdue au travail effectif est

$$R = \frac{2,27pt(1+at)^2}{pHat} = \frac{2,27(1+at)^2}{aH}.$$

525. En prenant $t = 300$, $H = 30$, circonstances qui se rencontrent ordinairement dans les grandes cheminées d'usines, on trouve $R = 97$. Ce nombre serait beaucoup plus grand si on avait égard au frottement de l'air dans la cheminée. Il serait plus petit si la cheminée avait une section très-grande relativement à celle des carneaux; mais cette circonstance se rencontre rarement; d'ailleurs, quand même ce rapport serait celui de 4 à 1, dans l'hypothèse la plus défavorable, le rapport précédent ne serait pas diminué de moitié.

Ainsi, dans tous les cas, il y a un grand avantage à remplacer le tirage à l'air chaud par une action mécanique, quand on peut utiliser toute la chaleur de l'air brûlé.

526. Mais il faut bien remarquer que l'avantage dont il est question n'est aussi considérable qu'autant que l'action mécanique est produite par la vapeur; il serait beaucoup plus petit si l'action mécanique était



produite par des hommes. En effet, le travail d'un cheval-vapeur coûte 4 kilogr. de houille par heure, ou 40 kilogrammes dans 10 heures, ou à peu près 2 francs au prix de la houille à Paris; et comme un cheval-vapeur équivaut à 7 hommes, il s'ensuit que le travail d'un homme-vapeur coûte pendant 10 heures environ 30 cent., tandis que la journée d'un manœuvre est de 2 francs. Mais comme il faudrait nécessairement 2 hommes, attendu qu'un seul ne pourrait pas soutenir sans interruption le même travail pendant dix heures, il faudrait estimer le travail en argent au moins à 4 francs, et, par conséquent, le travail par des hommes coûterait au moins 14 fois plus que par la vapeur. D'après les nombres précédents, le travail d'un homme coûterait autant que celui de deux chevaux-vapeur, du moins à Paris.

527. La machine, quelle qu'en soit la nature, devrait avoir évidemment, outre la puissance suffisante pour suppléer à la cheminée, celle qui serait nécessaire pour vaincre les frottements dans l'appareil où la chaleur devrait être utilisée. Dans tous les cas qui pourront se présenter, il sera facile de déterminer le travail qu'elle doit effectuer, en partant des lois et des formules données dans le chapitre précédent.

Les machines employées sont le ventilateur à force centrifuge, la vis d'Archimède et les pompes. On emploie aussi des jets de vapeur; nous examinerons successivement ces différents modes de tirage.

§ 2. — VENTILATEUR A FORCE CENTRIFUGE.

528. Considérons un tambour fixe fermé de toute part, dont l'axe de figure soit occupé par un axe métallique mobile, garni de plusieurs ailes planes ou courbes, qui dans leur mouvement de rotation parcourent la capacité intérieure du tambour. Par la rotation des ailes, l'air sera mis lui-même en mouvement, et, par l'effet de la force centrifuge, il s'accumulera à la circonférence du tambour et se dilatera au centre. Mais si les deux joues du tambour sont percées à leur centre d'un orifice, et si la circonférence du tambour est ouverte, l'air sera aspiré par le centre du tambour et rejeté à sa circonférence. On conçoit alors que si les orifices des joues ou la circonférence du tambour étaient en communication avec un tuyau, ou si ces deux circonstances avaient lieu en

même temps, l'air serait aspiré ou poussé dans le tuyau, ou en même temps aspiré dans l'un et poussé dans l'autre.

529. Quoique à la rigueur tous les ventilateurs soient à la fois aspirants et soufflants, nous désignerons sous le nom de *ventilateurs aspirants* ceux qui jettent l'air aspiré dans l'espace environnant par tous les points de la circonférence du tambour; sous celui de *ventilateurs soufflants*, ceux qui aspirent directement l'air environnant pour le faire écouler par un tuyau qui communique avec la circonférence du tambour; et sous celui de *ventilateurs aspirants et soufflants*, ceux qui appellent l'air par des tuyaux de conduite plus ou moins longs, et le versent dans un canal, comme les ventilateurs soufflants.

Ventilateurs aspirants.

530. Les figures 1 et 2 (pl. 7) représentent l'élévation et une projection horizontale d'un ventilateur aspirant. ABC est un tambour en tôle ou en bois dont les joues sont réunies par des barres transversales; DF est un patin en fonte fixé au tambour et au sol. GIKL est un tuyau bifurqué qui aboutit d'une part aux deux joues du tambour, et de l'autre à la prise d'air. M est une poulie fixée à l'arbre. NO le support en fonte de l'arbre. PQ une roue en bois ou en fonte garnie d'une manivelle R, dont le mouvement se transmet à l'arbre par la courroie ST qui passe sur la poulie M.

531. Les ailes des ventilateurs peuvent être planes ou courbes, et, dans tous les cas, on peut établir une relation quelconque entre la somme des surfaces par lesquelles l'air entre dans l'appareil et celles par lesquelles il s'échappe. Quand les ailes sont planes, et qu'il en est de même des faces du tambour, l'air s'échappe par toute la circonférence, et, par conséquent, à moins que le tambour n'ait qu'une très-petite épaisseur, les surfaces de sortie sont plus grandes que les surfaces d'entrée; mais en donnant aux joues du ventilateur la forme de deux troncs de cône, et aux ailes une forme trapézoïdale, on fera varier à volonté l'étendue de la surface totale des orifices de sortie. Lorsque les ailes sont courbes, les orifices de sortie sont les sections faites dans les canaux, à leur extrémité, perpendiculairement à leur axe. Il est évident



qu'en donnant aux joues du ventilateur la forme de deux surfaces de révolution, et aux ailes des largeurs convenables aux différentes hauteurs, on pourra, de même que pour les ventilateurs à ailes planes, établir une relation quelconque entre les surfaces des orifices d'entrée et de sortie de l'air.

532. Les phénomènes qui se produisent dans les ventilateurs sont très-complicés; mais on peut se faire une idée assez nette du mouvement général que l'air y éprouve, en regardant l'air comme un fluide incompressible, et en admettant que les molécules d'air aient la même vitesse dans tous les points d'une même section.

Nous supposerons d'abord que les canaux du ventilateur aient la même section dans toute leur étendue, et que la somme des surfaces des orifices de sortie soit égale à la somme des surfaces des orifices d'accès.

533. On démontre, en mécanique, que si un tuyau AB (fig. 3, pl. 7) cylindrique, et complètement ouvert à ses deux bouts, tourne autour d'une ligne O, perpendiculaire à son axe, l'air sort par l'extrémité A du tuyau avec une vitesse égale à la vitesse de rotation à cette extrémité. La vitesse d'écoulement est la même quand le tuyau est plus ou moins long, pourvu que la distance AO reste constante; elle est encore la même quand le tuyau est courbe. Si on suppose que l'orifice A soit fermé, dans tous les cas possibles, la pression exercée par l'air contre la surface intérieure de la cloison, sera égale à la hauteur d'air correspondante à la vitesse de rotation du point A.

534. Il résulte de là, que si les canaux d'un ventilateur avaient partout la même section, et si l'air n'éprouvait point de résistance pour y pénétrer, l'air entrerait dans le ventilateur et en sortirait avec une vitesse égale à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes, du moins elle n'en différencierait que d'une quantité très-petite due au frottement de l'air dans la machine. Mais les ventilateurs sont toujours destinés à appeler de l'air à travers des tuyaux plus ou moins longs, dans lesquels il éprouve une certaine résistance, ou par les frottements ou par les rétrécissements. Le calcul indique qu'alors la hauteur d'air $V^2 : 2g$ qui correspond à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes, est égale à la hauteur d'air H qui représente la dilatation à l'extrémité du canal d'appel qui communique avec le ventilateur, augmentée des hauteurs d'air h et h' qui correspondent à la vitesse d'écoulement et aux frottements de l'air



dans le ventilateur; ainsi on a

$$\frac{V^2}{2g} = H + h + h'.$$

La valeur de H est aussi égale à la hauteur d'air qui produirait l'écoulement dans le tuyau d'appel; ainsi on pourra facilement la calculer d'après ce que nous avons dit (368). Si le canal était cylindrique d'une longueur L et d'un diamètre D , et si sa section avait une surface égale à la somme des surfaces des sections des canaux du ventilateur, la vitesse dans le canal correspondrait à la hauteur d'air h , et on aurait

$$H = h + \frac{KLv^2}{D}.$$

La valeur de h' pourrait s'obtenir en calculant le frottement de l'air dans chaque canal, et en faisant la somme de ces résistances.

535. Quant au travail dépensé, il se compose du travail relatif à l'appel, de celui qui provient du frottement de l'air dans la machine et de celui qui résulte de la vitesse imprimée à l'air à la sortie du ventilateur. En désignant par p le poids de l'air appelé par seconde, le travail de l'appel sera pH ; celui qui est absorbé par le frottement sera ph' ; et celui de la sortie sera $pv'^2 : 2g$, en désignant par v' la vitesse absolue de l'air qui s'écoule; or, l'air s'écoule avec une vitesse relative correspondante à la hauteur d'air h , et il possède en même temps une vitesse de rotation égale à celle de l'extrémité des ailes; aussi sa vitesse absolue est la résultante de ces deux vitesses qui sont rectangulaires dans le cas dont il s'agit; elle sera par conséquent égale à

$$\sqrt{V^2 + 2gh}; \quad \text{et on aura} \quad \frac{pv'^2}{2g} = p \left(\frac{V^2}{2g} + h \right).$$

Alors le travail total sera

$$pH + p \frac{V^2}{2g} + ph + ph'; \quad \text{ou,} \quad 2p \frac{V^2}{2g},$$

536. Mais à ce travail, qui résulte seulement du mouvement imprimé à l'air, et des frottements, il faudrait ajouter celui qui provient du choc de l'air contre les palettes, et des vibrations qui se produisent toujours dans les appareils qui se meuvent avec une grande vitesse, et en outre le travail absorbé par les transformations de mouvement. Nous reviendrons plus tard sur ces différents points. Maintenant nous dirons seulement



que la perte de travail due au choc des veines d'air par les ailes lorsqu'elles pénètrent dans les canaux, doit être très-faible; car on sait qu'il n'y a point de perte de travail dans le choc des corps parfaitement élastiques, et on doit regarder les veines d'air et les ailes des ventilateurs comme étant dans ce cas, car l'air est parfaitement élastique et les lames de bois ou de métal dont les ailes sont formées peuvent être assimilées aux corps parfaitement élastiques, du moins pour les faibles compressions que les chocs contre l'air leur font éprouver. D'ailleurs, le travail perdu dans le choc de deux corps dont l'un seulement est élastique, résulte uniquement de celui qui est employé à déformer d'une manière permanente le corps qui n'est pas élastique; or, on ne trouve pas dans les ventilateurs qui ont fonctionné longtemps, d'altération dans la forme des ailes qui permette de supposer une perte de travail notable dans leur choc contre les veines d'air.

537. Si on faisait abstraction de l'influence de l'air environnant, tout ce qui précède serait applicable à un ventilateur dans lequel l'air aurait partout la même vitesse, mais dont les canaux seraient courbes. Alors, pour deux machines ayant les mêmes dimensions, qui tourneraient avec la même vitesse, et dont l'une aurait ses canaux dirigés dans le sens des rayons du tambour, et dont l'autre aurait ses canaux courbes, la convexité dans le sens du mouvement, et desquelles l'air s'échapperait tangentiellement au cercle du tambour, la vitesse absolue de l'air sortant serait pour la première $\sqrt{V^2 + v^2}$, et pour la seconde $V - v$; et, dans ces deux cas, le travail dépensé pour l'écoulement serait

$$p \frac{V^2 + v^2}{2g}; \quad \text{et} \quad p \left(\frac{V - v}{2g} \right)^2.$$

La première quantité excède la seconde de $2Vv:2g$. Mais cette différence devient très-petite et négligeable quand V est très-grand par rapport à v ; ce qui arrive presque toujours quand les résistances à vaincre sont très-grandes. D'ailleurs le cas que nous avons supposé ne peut pas se réaliser: toujours les ailes coupent la circonférence sous un angle assez grand, et par conséquent la différence entre la vitesse absolue de l'air dans ces machines et dans les ventilateurs à ailes planes est toujours plus petite que $2Vv:2g$. En outre, il faudrait avoir égard au plus grand frottement dans les canaux courbes, à cause de leur plus grande longueur.

538. Cependant, si les ventilateurs à ailes courbes se comportaient sous

tous les autres rapports comme ceux qui sont à ailes planes, on devrait les employer de préférence. Mais les phénomènes qui se produisent dans les ventilateurs à ailes courbes sont beaucoup plus compliqués que ceux qui se manifestent dans les ventilateurs à ailes planes, et les premiers donnent naissance à des résistances qui font disparaître les avantages qu'on pourrait en espérer.

539. Considérons un canal *abc* (fig. 6, pl. 7) mobile autour du point *o*, recourbé à angle droit à son extrémité et tournant dans le sens *ab*. Il est évident que pendant le mouvement, l'air se comprimera contre le coude du tuyau et qu'il se dilatera devant l'ouverture; le premier effet augmentera seulement le travail produit, mais le second changera toutes les conditions du mouvement. Ces changements ne peuvent pas être négligés, car la dilatation de l'air devant l'orifice tend seule à donner à l'air la même vitesse que la force centrifuge elle-même, du moins quand le tuyau est disposé comme l'indique la figure. Les mêmes effets doivent se produire dans les ventilateurs à ailes courbes, car si on conçoit les canaux fermés par des cloisons perpendiculaires à leur axe, l'air extérieur placé devant les cloisons se dilatera nécessairement par le mouvement, jusqu'à ce que la vitesse de l'air environnant, pour suivre ces cloisons, soit égale à leur vitesse absolue; et l'air qui se trouve au-dessus des parties libres des ailes sera mis en mouvement (fig. 16, pl. 6). Quand les orifices des canaux seront libres, que l'écoulement de l'air appelé s'effectuera, une partie de la dilatation subsistera; car, pour qu'elle fût nulle, il faudrait que la vitesse relative d'écoulement fût égale à la vitesse de rotation, et c'est ce qui n'existe jamais. Cette dépression de l'air derrière les orifices augmentera nécessairement l'effet produit, de sorte qu'il faudra donner une moindre vitesse à la machine pour obtenir le même appel et la même vitesse d'écoulement; mais la dépense de travail sera augmentée de l'effet produit par l'air sur les orifices, et du mouvement que les parties libres des ailes imprimeront à l'air environnant.

540. De tout cela il résulte que les ventilateurs à ailes courbes, qui ont si peu d'avantages sur les autres, même en négligeant les effets qui proviennent du contact de l'air extérieur, et en n'ayant point égard au plus grand frottement de l'air qui les parcourt, du moins quand les résistances dans les tuyaux d'appel sont très-grandes relativement aux vitesses imprimées à l'air, doivent avoir en réalité un désavantage marqué



sur ceux qui sont à ailes planes et dont les canaux sont dirigés suivant les rayons.

541. Dans ce qui précède, nous avons supposé que le ventilateur à ailes planes avait des canaux à section constante, et par conséquent que les joues étaient coniques. Mais si les joues étaient planes, et c'est ce qui arrive ordinairement, les canaux seraient évasés; alors la partie du travail dépensé relative à la vitesse imprimée à l'air dans le tuyau d'aspiration et dans les canaux, serait beaucoup diminuée; car on sait que, quand un liquide s'écoule par un tuyau évasé, il n'y a point de perte de hauteur motrice due à l'étranglement, quand la variation de section a lieu d'une manière continue. Ainsi cette disposition serait plus avantageuse que celle que nous avons supposée, et à plus forte raison préférable à celle dans laquelle les ailes sont courbes.

542. En n'ayant point égard à la résistance du milieu environnant, M. Combes a été conduit à une disposition nouvelle des ventilateurs aspirants, qu'il regarde comme préférable de beaucoup à celles qui sont généralement employées.

M. Combes admet que, dans tous les cas, la vitesse d'écoulement de l'air par la circonférence du tambour est égale à la résultante de la vitesse relative de l'air dans les canaux et de la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes. D'après cela, l'air doit s'écouler par des canaux courbes dont la convexité soit tournée dans le sens du mouvement, et disposés de manière que la direction de la dernière tangente à l'axe de chaque canal se rapproche le plus possible de la tangente à la circonférence du tambour; mais comme les canaux doivent être d'autant plus nombreux que l'on veut se rapprocher davantage de la limite en question, et qu'alors le frottement de l'air dans les canaux augmente, M. Combes s'est borné à prendre douze canaux, et il donne à l'orifice d'accès un rayon égal à la moitié de celui du tambour.

La courbure des ailes étant arbitraire, M. Combes la suppose circulaire, et il détermine le rayon et les positions des ailes par ces deux conditions: qu'elles soient tangentes au cercle extrême du tambour, et qu'elles coupent la circonférence de l'orifice d'accès de manière à éviter le choc de l'air contre leur extrémité. Pour satisfaire à cette dernière condition, il prend la résultante de la vitesse de l'air à son entrée dans les canaux et de la vitesse de rotation prise dans une direction opposée, et il

donne la direction de cette résultante à la tangente des ailes au point où elles coupent la circonférence du cercle d'accès.

Les ailes sont fixées sur la joue pleine du ventilateur qui par conséquent est elle-même mise en mouvement. La largeur des ailes est deux fois plus grande à l'extrémité qu'au centre, et avec ces dimensions la somme des surfaces des orifices de sortie de l'air est égale à la moitié de la surface de l'orifice d'accès.

543. La figure 16 (pl. 6) représente une section de l'appareil par un plan perpendiculaire à l'axe de rotation; la figure 17 (pl. 6) une section méridienne; la figure 18 le disque circulaire qui porte les ailes; la figure 19 une vue de face et de profil du support monté à l'extrémité de l'arbre tournant, du côté de l'arrivée de l'air, avec les deux traverses *aa* sur lesquelles sont vissés les diaphragmes ou feuilles de tôle mince dont la figure 20 offre une élévation. Ces feuilles aboutissent au disque *CC*, mais sans le toucher. La figure 21 est une vue de face et de profil des pièces qui fixent les ailes sur le disque *DD*; pour cet effet, des boulons filetés, rivés sur les bords des ailes, passent à travers le disque sur lequel ils sont serrés par des écrous.

A est l'axe du ventilateur, en fer forgé; il peut avoir de 27 à 30 millimètres de diamètre, et peut être placé horizontalement ou verticalement. Dans l'appareil décrit, il est horizontal.

CC, figure 17, est une plaque en bois, circulaire ou carrée, posée dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine et percée d'une ouverture circulaire dont le centre est sur l'axe, et dont le rayon = $0^m,30$. A cette ouverture est adapté le conduit évasé *E*, qui met le tarare en communication avec l'espace dans lequel on veut renouveler l'air, ou avec des conduites qui communiquent avec cet espace.

DD, fig. 18, est un disque circulaire en bois, cerclé en fer mince. Ce disque a la forme d'un solide de révolution dont la figure 17 représente un méridien; il est invariablement fixé à l'axe *A*, et les ailes courbes du tarare *y* sont attachées. Son diamètre est assez grand pour qu'il déborde les ailes de 2 ou 3 centimètres.

Les ailes courbes sont en tôle de fer, d'une épaisseur de 2 millimètres au plus; elles sont au nombre de douze, toutes fixées, comme il a été dit, au disque *DD*. La figure 16 représente la section de ces ailes par un plan normal à l'axe du ventilateur.



L'axe horizontal A est supporté à une de ses extrémités par la traverse horizontale en fer *aa* (fig. 19, pl. 6), placée suivant le diamètre horizontal de l'ouverture circulaire. Cette traverse, qui doit être amincie pour ne pas gêner l'entrée de l'air dans le ventilateur, peut être soutenue dans son milieu par un support vertical F appuyé sur le bord inférieur de l'ouverture circulaire. GG sont deux feuilles de tôle mince fixées à la traverse *aa*, et découpées de manière à s'approcher très-près des arêtes intérieures des ailes, de la face interne du disque DD, et de la surface cylindrique de l'axe A. Ces feuilles, uniquement destinées à empêcher le mouvement giratoire de l'air et à l'obliger à pénétrer dans les canaux mobiles formés par les ailes courbes, avec une vitesse absolue dirigée suivant les rayons du ventilateur, ne doivent frotter contre aucune des parties mobiles de la machine, mais doivent s'en approcher le plus près possible.

La seconde extrémité de l'axe A porte sur un mur ou sur un appui convenablement disposé pour la recevoir. Dans la figure elle porte sur une partie du mur du bâtiment. Y est un écrou qui serre fortement le disque D contre l'embase de l'arbre A.

Entre le disque mobile DD et le support de l'axe, en dehors du ventilateur, se trouve une poulie P, fixée à l'arbre A et destinée à transmettre le mouvement de rotation au moyen d'une courroie.

544. Le ventilateur de M. Combes n'a point encore été exécuté sur une grande échelle, et les avantages qui résultent des calculs de l'auteur n'ont point encore été constatés par l'expérience; mais il me paraît peu probable que ces machines soient plus avantageuses que les anciennes.

D'abord la disposition qui a pour objet de diminuer la vitesse absolue de l'écoulement dans l'air, doit être plus que compensée par le mouvement que les parties libres des ailes impriment à l'air environnant; par l'accroissement de frottement de l'air dans le ventilateur, résultant de l'allongement des canaux; et enfin par une plus grande vitesse relative de l'air à l'extrémité des canaux.

Quant à la disposition qui a pour objet d'éviter le choc de l'air dans l'appareil, elle ne peut convenir évidemment que pour une seule vitesse de la machine; ainsi, en supposant qu'elle obviât complètement à l'inconvénient dont il est question, cet avantage disparaîtrait, au moins en partie, quand la vitesse de la machine deviendrait

plus grande ou plus petite que celle qui a été supposée lors de la construction.

Ainsi cette disposition ne pourrait être utile que pour les machines qui ne devraient éprouver que de faibles variations de vitesse. Mais je regarde comme peu probable que les chocs produisent une perte notable de travail, et, par conséquent, que, sous ce rapport, la courbure des ailes, à leur origine, ait une influence bien sensible sur l'effet utile de la machine. Cette disposition aurait cependant un très-grand avantage si elle évitait les vibrations de l'air dans l'appareil, vibrations qui occasionnent, sans aucun doute, une grande perte de travail. Mais il n'en est probablement pas ainsi; car on sait que les lames minces, placées dans le sens des courants, produisent dans l'air des vibrations plus grandes que quand elles sont placées obliquement; et d'un autre côté, la plaque fixe, destinée à empêcher le mouvement giratoire de l'air, pourrait bien à elle seule occasionner plus d'ébranlement qu'on n'en veut éviter. On sait, d'après les belles expériences de Savart, que quand une barre passe rapidement entre deux autres barres fixes, mais sans les toucher, il en résulte dans l'air un ébranlement qu'on peut assimiler à celui d'un violent coup de marteau; une seule barre fixe produit un effet analogue mais plus faible. Il est fort douteux, d'après cela, que le passage rapide des bords intérieurs des ailes dans le voisinage des bords de la plaque fixe ait lieu sans provoquer d'ébranlement.

Ainsi des expériences directes seraient nécessaires pour reconnaître si la disposition de M. Combes évite réellement les ébranlements. Ces expériences seraient d'ailleurs très-simples, car elles consisteraient à vérifier si, pour les grandes vitesses, les appareils de M. Combes résonnent comme les appareils ordinaires. Et, dans tous les cas, il serait nécessaire de faire avec les appareils dont il est question, et avec les ventilateurs à ailes planes, des expériences comparatives, qui seules pourraient décider si réellement les nouveaux appareils ont de l'avantage sur les anciens.

545. D'après tout ce qui précède, je pense qu'il faut, du moins jusqu'à ce que la question ait été complètement éclaircie par l'expérience, s'en tenir aux ventilateurs à ailes et à joues planes, qui, suivant toutes les probabilités, sont encore les plus avantageux.

Occupons-nous maintenant des détails de construction de ces appareils



et des dimensions qu'il convient de leur donner dans les différents cas qui peuvent se présenter.

546. *Dispositions des ventilateurs à ailes planes et à joues planes.* Les dimensions des canaux formés par les ailes doivent évidemment être telles que l'air ait sensiblement la même vitesse dans tous les points d'une même section, et que l'écoulement ait lieu à plein orifice. Des ailes trop courtes et en trop petit nombre pourraient avoir l'inconvénient de produire derrière elles un appel de dehors en dedans par la circonférence. Des canaux trop longs relativement à leur section auraient seulement l'inconvénient d'augmenter le frottement de l'air dans la machine. Mais comme, en général, ce frottement est très-petit comparé aux autres résistances, il vaut mieux employer des canaux trop longs que des canaux trop courts. Je pense qu'en donnant au tambour un diamètre double de celui de l'orifice d'appel, en prenant 6 grandes ailes ayant pour hauteur la distance des bords de l'orifice d'appel à la circonférence du tambour, et en plaçant entre elles, au milieu des intervalles qui les séparent, 6 autres ailes d'une hauteur 2 fois plus petite, mais terminées comme les premières à la circonférence du tambour, on satisfera aux conditions exigées.

547. Pour éviter les variations brusques de vitesse, qui occasionnent toujours une certaine perte de travail, il sera convenable de donner à la somme des surfaces des orifices d'appel la surface du cylindre par lequel l'air pénètre dans les canaux formés par les ailes. Ainsi, lorsque le ventilateur aspire par les deux joues, la distance de ces joues doit être égale au rayon de l'orifice, et seulement à la moitié de ce rayon quand l'appel a lieu par une seule joue.

548. D'après la théorie du ventilateur, il semble qu'il soit important que les bords latéraux des ailes s'approchent le plus près possible des joues; mais il n'en est pas ainsi: cette distance pourrait être très-grande sans que l'effet de la machine fût notablement modifié, pourvu toutefois que les deux cercles extrêmes des faces latérales fussent très-voisins des cercles décrits par les extrémités des bords extérieurs des ailes; seulement une partie de l'air appelé entrerait latéralement dans les canaux; mais pour la même vitesse de rotation on obtiendrait la même vitesse dans le canal d'appel, et on dépenserait le même travail.

549. Au lieu de rendre les joues du ventilateur immobiles, et de faire



parcourir leurs surfaces intérieures par les côtes des ailes, on pourrait fixer les ailes à une des joues, et faire mouvoir le système contre l'autre joue maintenue immobile (fig. 22 et 23, pl. 6).

550. On pourrait aussi fixer les ailes aux deux joues du ventilateur, et faire tourner à la fois tout le système; mais comme l'air d'appel est toujours obligé de parcourir un canal avant d'arriver au ventilateur, ce dernier devrait tourner autour de ce tuyau, et il faudrait empêcher l'air extérieur de passer dans le tambour; mais les différents modes de jonction occasionneraient des frottements qui pourraient être assez considérables, surtout pour de grandes vitesses. Le moyen qui présenterait probablement le moins d'inconvénient, consisterait à placer le ventilateur horizontalement, à fixer un cylindre court en métal à l'orifice d'appel, et à le plonger dans l'eau qui remplirait une rigole annulaire fixée au tuyau d'appel; le joint serait toujours étanche pendant le mouvement, à la condition pourtant que la hauteur du cylindre plongé dans l'eau fût plus grande que la dépression en eau qu'éprouve l'air dans le tuyau d'appel.

Ces deux dispositions, qui sont plus compliquées que celles que l'on emploie ordinairement, me paraissent sans avantage.

551. On a proposé récemment de donner aux ventilateurs aspirants la forme indiquée par la figure 7 (pl. 7). Les joues sont formées par deux cônes tronqués, qui s'appuient sur les cercles décrits par les extrémités des ailes, et ces dernières sont rectangulaires. On a prétendu que cette disposition était plus avantageuse que les dispositions ordinaires, mais je ne vois aucune raison pour qu'il en soit ainsi.

552. Les ventilateurs destinés à recevoir de l'air froid, et qui ne doivent pas tourner avec une très-grande vitesse, peuvent être en bois. Dans toutes les autres circonstances ils doivent être en métal.

553. Quant aux dimensions à donner au ventilateur, il faut remarquer qu'elles sont sans influence sur le travail de l'aspiration; mais qu'elles en ont une très-grande sur celui qui est consommé pour l'expulsion de l'air, car plus l'appareil sera petit, plus il faudra donner de vitesse à l'air à sa sortie. D'ailleurs, quand les appareils ont de petites dimensions, il faut donner à l'axe une plus grande vitesse de rotation, et la perte de travail qui provient des appareils employés dans ce but est très-grande; ainsi, sous tous les rapports, il est important de ne pas employer des



appareils trop petits. En général, il est utile que la somme des orifices d'appel ne diffère pas beaucoup de la surface de la section du tuyau d'appel, à moins que cette dernière ne soit très-grande.

554. On pourra déterminer avec une suffisante exactitude la vitesse qu'on doit donner à l'appareil, par la formule que nous avons donnée (535), pour les ventilateurs renfermant des canaux à section constante; on obtiendra ainsi une vitesse un peu trop grande; mais malgré cela il faudra encore calculer les engrenages et les diamètres des poulies, de manière à obtenir une vitesse relative plus grande, ou placer sur l'arbre plusieurs poulies de diamètres différents, attendu que les courroies qu'on emploie de préférence aux engrenages pour produire de très-grandes vitesses, glissent toujours plus ou moins sur les poulies, et produisent des vitesses réelles beaucoup plus petites que celles qui résulteraient du rapport des diamètres. La différence s'élève quelquefois à un tiers de la vitesse calculée.

555. On pourra évaluer approximativement le travail qui sera consommé par la machine, en le supposant égal à celui que dépenserait un ventilateur dont les canaux auraient une section constante: cette estimation dépassera certainement la réalité; mais comme il faudra ajouter à ce travail celui qui est absorbé par les appareils destinés à transmettre le mouvement du moteur, à produire l'accroissement de vitesse, et celui qui provient des ébranlements de l'air et des parties solides de la machine, sur lesquels on n'a que des indications bien vagues, l'erreur que l'on commettra sera réellement sans importance.

556. Les courroies qu'on emploie généralement pour augmenter la vitesse de rotation imprimée directement par le moteur, consomment beaucoup de travail employé à produire les flexions rapides de la lame autour des poulies. Les ingénieurs qui ont l'habitude des constructions des machines à grandes vitesses, estiment pour des vitesses de rotation de 1000 à 1500 tours par minute, la perte totale de travail, du moteur au dernier axe de rotation, à un quart du travail total.

557. Relativement à la perte de travail qui résulte de l'ébranlement de l'air et des parties solides de la machine, on ne sait absolument rien.

On peut cependant avoir une limite de la dépense totale de travail, due aux deux causes dont nous venons de parler, en la comparant à celle qu'exigent les ventilateurs soufflants, employés à alimenter les tuyè-