

res des cubilots; car il n'est pas douteux que dans ces machines, qui sont disposées d'une manière très-défavorable, les pertes de travail de toute espèce ne soient plus grandes que dans les ventilateurs aspirants. Or, il résulte de l'expérience, que ces machines utilisent à peu près un tiers du travail dépensé, en comprenant dans l'effet utile, non-seulement le travail dû au mouvement de l'air, mais encore celui qui provient du frottement de l'air dans le tuyau de conduite. Ainsi, on peut estimer que le travail effectif  $pV^2:2g$  sera au plus le tiers du travail dépensé.

558. Nous prendrons un exemple pour montrer comment, dans chaque cas particulier, on pourra calculer et la vitesse de rotation et le travail total.

Supposons un ventilateur ayant 1<sup>m</sup> de diamètre, 0<sup>m</sup>,12 de largeur, un seul orifice d'appel de 0<sup>m</sup>,50 de diamètre, et communiquant avec un tuyau de tôle, ayant 50<sup>m</sup> de longueur et 0,40 de diamètre, par lequel la machine doit appeler 1<sup>m<sup>3</sup></sup> d'air par seconde.

La section du canal étant de 0<sup>m</sup>,125, la vitesse que l'air y prendra sera égale à  $1:0,125=8$ . Alors on aura

$$H = \frac{8^2}{2g} + \frac{KLv^2}{D} = 3,26 + \frac{0,0025 \times 50 \times 64}{0,4} = 23,26.$$

En considérant les canaux du ventilateur comme ayant une section constante, la somme des surfaces des orifices de sortie sera 0<sup>m</sup>,19; la vitesse relative de l'air dans les canaux sera  $1:0,19=5,26$ , et la hauteur d'air correspondante sera  $(5,26)^2:2g=1,37$ . Alors, en négligeant les frottements dans la machine elle-même, on aura

$$\frac{V^2}{2g} = H + h = 23,26 + 1,37 = 24,63,$$

d'où l'on tire

$$V^2 = 483,24; \quad \text{et} \quad V = 22.$$

Le nombre de tours sera alors de 7 par seconde et de 420 par minute. Le travail dépensé par la machine sera

$$\frac{2pV^2}{2g} = \frac{2 \times 1,3 \times 483,24}{19,62} = 64^{\text{k. m.}};$$

ce qui correspond à 0,85 de la force d'un cheval-vapeur; sans y comprendre le travail perdu par les appareils de transmission du mouvement et par les ébranlements; il faudrait alors estimer le travail à dépenser à 2,5 chevaux-vapeur.



Dans cet exemple nous avons négligé le frottement de l'air dans le ventilateur; mais il est facile de voir qu'il est réellement peu important; car en considérant les canaux comme ayant dans toute leur étendue la section qu'ils ont à l'origine, et en les supposant au nombre de 6, on trouve que la hauteur d'air correspondante au frottement est seulement de 1<sup>m</sup>, et le travail de 1<sup>k.m.</sup>,3.

*Ventilateurs soufflants.*

559. Ces ventilateurs sont uniquement employés à remplacer les soufflets et les machines soufflantes à piston dans les cubilots. Ils sont disposés de la même manière que les ventilateurs aspirants dont nous venons de parler; seulement, les orifices du centre s'ouvrent dans l'air, et la circonférence du tambour est fermée de toute part, excepté dans une certaine étendue en communication avec le tuyau qui conduit l'air comprimé au fourneau.

560. Les figures 8, 9, 10, 11, 12, 13 et 14 (pl. 7) représentent un ventilateur soufflant appliqué à des fourneaux destinés à fondre la fonte dans les ateliers de MM. Sudds Barker et compagnie, de Rouen. La plateforme et les joues du ventilateur sont en fonte. Sur les deux joues se trouvent des barres qui supportent les paliers. L'arbre est en fer, les bras en fonte d'une seule pièce, qui s'ajuste sur l'axe au moyen d'une rainure intérieure qui embrasse une saillie correspondante de l'axe. Les palettes sont en fer forgé, de 8 millimètres d'épaisseur. Les six bras sont consolidés par un anneau en fer fixé sur chaque bras par un boulon rivé. Ces palettes sont inclinées sur les rayons.

AB (fig. 8, 9 et 10), massif en charpente ou en maçonnerie servant de base ou de plate-forme au ventilateur. D, forte plaque en fonte fixée sur le massif AB par les quatre boulons *d*. EFG, portion circulaire du contour des joues formant les parois latérales de la caisse du ventilateur. *efg*, ouvertures circulaires ménagées au centre de chacune des joues de la caisse, par lesquelles se fait l'aspiration. E'G', ouverture par laquelle l'air comprimé s'échappe dans le canal destiné à le recevoir pour le distribuer aux foyers. I, support à nervures réservé à la fonte, contribuant à soutenir les consoles KK, et à leur donner plus de stabilité. KK, consoles à nervures saillantes réservées à la fonte dans les ouvertures circu-

lares *efg.* LL, paliers fixés avec des coins sur les consoles KK. MM, arbre de la roue. *m*, poulie montée sur le prolongement de l'arbre MM. N, moyeu portant les six bras P avec lesquels il est fondu. *n*, rainure taillée dans le trou intérieur du moyeu N et servant à le fixer sur l'arbre MM. P, bras de la roue (fig. 13 et 14). *pp'*, extrémité des bras; elle est élargie pour que les palettes puissent y être fixées plus solidement, et en même temps elle est inclinée dans un plan perpendiculaire à l'arbre, pour que le plan des palettes ne passe pas par le centre. Q, anneau en fer forgé qui se fixe sur les six bras de la roue pour les lier et les consolider.

Le ventilateur fait 1000 tours à la minute; ainsi les extrémités des palettes parcourent environ 3000 mètres par minute ou 50 mètres par seconde. La force nécessaire pour faire mouvoir le ventilateur est estimée à 4 chevaux. Le vent qu'il produit suffit pour alimenter deux fourneaux qui fondent chacun 2000 kilogrammes à l'heure; l'air arrive à chacun des foyers par quatre orifices de 10 à 11 centimètres de diamètre.

561. M. Combes, en partant des formules qu'il a établies pour déterminer les formes et les dimensions des ventilateurs aspirants, a été conduit à de nouvelles dispositions de ventilateurs soufflants. Dans le ventilateur soufflant de M. Combes, les palettes sont courbes, et leur courbure est déterminée par les mêmes conditions que pour les ventilateurs aspirants. L'air s'écoule constamment par les canaux formés par les ailes, dans un canal annulaire qui règne autour du cylindre décrit par les extrémités des ailes, et qui s'agrandit progressivement et dans le sens de la rotation des ailes, de l'un des bords du tuyau de départ jusqu'à l'autre, où il a une section égale à celle de ce tuyau; enfin, le tuyau d'écoulement est tangent au cylindre décrit par les extrémités des ailes.

562. La courbure des ailes à leur origine a pour objet d'éviter leur choc contre les veines d'air; la courbure des ailes à leur extrémité a pour objet de verser l'air dans le canal annulaire avec la plus petite vitesse possible, attendu que le travail dû à cette vitesse est complètement perdu; enfin, le canal annulaire a pour effet de produire un écoulement constant et continu de l'air par les canaux pendant toute la rotation.

563. Mais comme il est peu probable que le choc de l'air contre les



ails à leur origine augmente notablement le travail dépensé; que d'ailleurs l'économie de travail qui pourrait résulter de la courbure des ailes à la partie centrale de la machine, disparaîtrait en grande partie pour des vitesses de rotation plus grandes ou plus petites que celles pour lesquelles la courbure a été calculée; et qu'enfin il est fort douteux, par les mêmes raisons que pour les ventilateurs aspirants, que la courbure des ailes à l'autre extrémité soit réellement avantageuse; je pense que, jusqu'à ce que des expériences aient bien constaté l'avantage de l'emploi des ailes courbes, il faut s'en tenir à l'ancienne disposition, mais en adoptant l'excentricité de l'enveloppe, attendu que l'efficacité de cette disposition ne peut pas être mise en doute. D'après cela, le ventilateur aurait la forme indiquée par les figures 15 et 16 (pl. 7).

564. On pourrait déterminer les dimensions du ventilateur par les mêmes considérations que pour les ventilateurs aspirants (535).

565. Pour déterminer la vitesse de rotation qu'il faudrait donner à la machine pour produire un effet donné, désignons par  $H$  la hauteur d'air qui produirait l'écoulement dans le tuyau de conduite, et remarquons que dans ces sortes d'appareils la vitesse de l'air dans le canal annulaire est toujours très-petite relativement à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes; alors, en négligeant les frottements de l'air dans le ventilateur, on aura sensiblement  $V^2 : 2g = H$ . Quant au travail dépensé, il se composera de celui qui résulte de la compression produite dans le canal annulaire, qui est représenté par  $pV^2 : 2g$ , et de celui qui provient de la vitesse tangentielle imprimée à l'air, et qui est aussi  $pV^2 : 2g$ ; ainsi le travail total consommé par la machine sera  $2pV^2 : 2g$ , comme dans les ventilateurs aspirants. Et à ce travail consommé par la machine, il faudra encore ajouter celui qui est absorbé par les transformations de mouvement et par les ébranlements de toute espèce produits dans l'air et dans les parties solides. En ayant égard à toutes ces circonstances, il ne faudrait pas compter sur un travail effectif  $pV^2 : 2g$  qui dépassât le tiers du travail moteur.

*Ventilateurs aspirants et soufflants.*

566. Ces ventilateurs ne diffèrent des derniers que nous venons d'étudier, qu'en ce que l'air d'appel, au lieu d'entrer librement dans le ven-

tilateur, parcourt un canal plus ou moins long avant d'y arriver.

C'est, par exemple, le cas d'un ventilateur qui serait employé à remplacer l'action d'une cheminée. L'appareil, placé au bout du fourneau, appellerait l'air qui aurait passé à travers la grille et dans le canal qui circule autour du corps à chauffer, et le pousserait dans ceux où l'air brûlé doit être refroidi, et de là dans la cheminée.

567. En plaçant une cheminée tangente à la circonférence du tambour, les figures 1<sup>re</sup> et 2 (pl. 7) représenteraient un ventilateur destiné à produire un tirage mécanique. Il serait avantageux de donner au ventilateur la forme représentée par les figures 15 et 16 (pl. 7).

568. Les ventilateurs aspirants et soufflants doivent être disposés comme ceux dont nous avons parlé précédemment, en évitant les changements brusques de section dans les tuyaux d'appel et de sortie de l'air, ainsi que les changements brusques de direction.

569. Du reste, la vitesse de rotation et la dépense d'air seraient exactement les mêmes que si le ventilateur était soufflant et placé à l'extrémité d'appel de la conduite. Ainsi, en désignant par  $H$  et  $H'$  les hauteurs d'air nécessaires pour produire le mouvement de l'air dans le tuyau d'appel et dans celui par lequel l'air s'écoule, en supposant que ces quantités soient très-grandes relativement à la hauteur d'air correspondante à la vitesse de l'air dans le ventilateur, on aura à peu près  $V^2 : 2g = H + H'$ , et pour le travail dépensé,  $2pV^2 : 2g$ ; et pour ces machines, comme pour celles que nous avons déjà examinées, il ne faudrait pas compter sur un travail utile qui dépassât le tiers de celui qui est fourni par le moteur.

570. Les ventilateurs soufflants et aspirants ne sont certainement pas de bonnes machines, du moins sous le rapport de l'effet utile qu'ils produisent; mais leur simplicité, l'absence de tout ajustement les font préférer à d'autres machines qui consommeraient moins de travail, mais qui exigeraient plus de soins, plus de réparations, et qui seraient d'un prix plus élevé. Ces machines sont surtout très-utiles quand le travail nécessaire au mouvement de l'air est très-petit, car alors ces machines sont presque les seules qu'on puisse employer.



## § 3. — VIS D'ARCHIMÈDE.

571. La vis d'Archimède peut être employée de différentes manières. Lorsqu'une vis, disposée comme celles qui servent aux épuisements, plonge dans l'eau par sa partie la plus basse, et qu'on donne à la vis un mouvement de rotation opposé à celui qui élèverait l'eau, l'air descend sous l'eau et se dégage autour de l'orifice plongé. Alors, si la surface de l'eau qui se trouve au-dessus de l'extrémité inférieure de la vis était recouverte d'une cloche, l'air y serait comprimé et pourrait être dirigé dans le lieu où il devrait être utilisé. Une machine semblable est établie dans les ateliers de M. Kœchlin de Mulhausen; elle est destinée à donner le vent à un cubilot.

572. On peut aussi employer, pour aspirer et pousser l'air, un tuyau renfermant un seul pas de vis mobile; chaque tour de la vis fait sortir de l'appareil un volume d'air ayant pour base la section du cylindre et pour hauteur celle du pas de la vis. Cette machine est extrêmement simple, mais le frottement de l'air y est beaucoup plus grand que dans les ventilateurs à force centrifuge. Une machine de ce genre a été récemment appliquée à la ventilation d'une mine de houille, mais elle a donné de très-mauvais résultats, comme il était facile de le prévoir.

573. On pourrait cependant employer des machines analogues dans certaines circonstances où la dépense de travail est peu importante, et où il est nécessaire de placer l'appareil dans le tuyau même d'écoulement. Le mouvement de rotation imprimé à l'air au sortir de l'appareil pourrait même être très-avantageux quand l'air doit communiquer sa chaleur à l'enveloppe ou être échauffé par elle, parce que toutes les parties de la veine d'air seraient mises successivement en contact avec la surface du tuyau, ce qui n'arrive pas quand la vitesse de chaque veine élémentaire est parallèle à l'axe, et cette circonstance favoriserait évidemment le refroidissement ou l'échauffement de l'air.

574. Indépendamment des ventilateurs à force centrifuge et de la vis d'Archimède, on emploie comme machines aspirantes et soufflantes, des appareils à membranes flexibles, des trompes et des pompes. Nous ne décrirons point ces appareils qui sont du domaine de la métallurgie; mais quand il sera question de la ventilation des mines, nous nous oc-

cupérons des grandes machines à piston qui sont employées dans quelques mines de houille de la Belgique.

§ 4. — MOUVEMENT DE L'AIR PRODUIT PAR UNE INJECTION DE VAPEUR.

575. Lorsqu'on introduit un jet de vapeur dans un tuyau ouvert par les deux bouts, de manière que le jet soit dirigé suivant l'axe, la vapeur produit une circulation plus ou moins rapide de l'air dans le tuyau. Manoury-Dectot paraît avoir employé le premier les jets de vapeur pour produire la ventilation; depuis, ce même moyen a été employé dans diverses circonstances par M. Pelletan. C'est au moyen d'un jet de vapeur dans la cheminée des chaudières des locomotives qu'on est parvenu à produire le tirage nécessaire à l'énorme consommation de combustible de ces machines.

576. On n'a fait encore aucune expérience pour déterminer le rapport entre le travail du jet de vapeur et celui qu'exige le mouvement de l'air qu'il produit; mais il est probable que tout le travail résultant du jet de vapeur est utilisé, moins cependant celui qui provient de la détente, car la détente a lieu dans tous les sens. D'après cela, en désignant par  $p$  le poids de la vapeur écoulee par seconde, par  $v$  la vitesse d'écoulement, le travail de la vapeur sera  $pv^2:2g$ , l'unité étant le kilogramètre. On voit alors que le travail produit augmentera très-rapidement avec  $v$ , et qu'il sera toujours avantageux d'employer la vapeur sous une grande pression, attendu que la quantité de chaleur absorbée par la vaporisation de 1 kilogramme d'eau, paraît être indépendante de la pression de la vapeur. Supposons, par exemple, que l'on brûle 5 kilog. de houille par heure, et qu'on produise par heure 25 kilog. de vapeur à deux atmosphères; l'orifice d'écoulement ayant une surface convenable, ainsi que la section du tuyau de conduite, la vapeur sortira sous une pression de deux atmosphères; la densité de la vapeur à deux atmosphères étant de 0,00111, la hauteur génératrice de la vitesse sera de  $10^m,32 : 0,00111 = 9297^m$ , le poids de vapeur écoulé par seconde étant  $25^k : 3600 = 0,007$ , et le travail produit sera égal à  $9297.0,007 = 65^{km}$ , un peu moindre que le travail d'un cheval-vapeur dans une machine ordinaire. Le tableau suivant renferme le travail produit par l'écoulement de 25 kilog. de vapeur par heure sous différentes pressions :

| PRESSIONS<br>en atmosphères. | TEMPÉRATURE<br>de la vapeur. | DENSITÉ<br>de la vapeur. | HAUTEUR<br>génératrice<br>de la vitesse. | TRAVAIL<br>produit.<br><small>k. m.</small> |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------|--|---|
| 1 1/2                        | 112                          | 0,00085                  | 6070                                     | 42  |
| 2                            | 121                          | 0,00111                  | 9297                                     | 65  |
| 2 1/2                        | 129                          | 0,00136                  | 11907                                    | 83  |
| 3                            | 135                          | 0,0016                   | 12900                                    | 90  |
| 3 1/2                        | 140                          | 0,00185                  | 14383                                    | 100   |
| 4                            | 145                          | 0,0021                   | 14743                                    | 103   |
| 4 1/2                        | 149                          | 0,0023                   | 15904                                    | 109   |
| 5                            | 153                          | 0,0025                   | 16512                                    | 115   |

On voit, d'après cela, qu'à la pression de  $2\frac{1}{2}$  atmosphères l'effet produit commence à dépasser celui qu'on obtiendrait avec une machine consommant 5 kilog. de houille par heure et par cheval.

577. Ce mode de tirage, qui est en même temps économique et d'une extrême simplicité, puisqu'il n'exige qu'une chaudière à vapeur, doit être souvent préféré à tous les autres moyens, d'autant plus que, par son usage, on sera plus maître de faire varier le tirage que quand on emploie des machines dont l'effet ne peut croître que par une augmentation de vitesse qui n'est pas toujours sans inconvénients, et qui est très-bornée. D'ailleurs, pour produire un puissant tirage momentané, on pourra faire fonctionner la chaudière en activité et celle de rechange, et on pourra en outre se ménager pour chacune les moyens de produire beaucoup plus de vapeur en brûlant plus de combustible, quoique moins utilement.

578. S'il n'y avait pas d'inconvénients à mettre l'air appelé en communication avec le foyer, on pourrait alimenter la combustion par l'air d'appel et rejeter la fumée dans la cheminée.

579. Il serait important de conduire la vapeur à l'orifice de dégagement par un tuyau d'un grand diamètre, afin que dans le trajet la vapeur n'éprouvât que peu de frottement, et que l'orifice d'écoulement eût les dimensions convenables pour que la vapeur, à sa sortie, prît sensiblement la vitesse qui correspond à la pression dans la chaudière.

580. Il serait aussi très-important d'introduire la vapeur dans la che-

minée par plusieurs jets espacés de manière que la vapeur dilatée remplit toute la cheminée à une petite distance des orifices. On conçoit facilement qu'il est indispensable que la vapeur agisse dans toute la section, autrement il se ferait un appel de haut en bas dans la partie de la cheminée sur laquelle la vapeur n'agirait pas directement.

581. On a prétendu que, dans le tirage par la vapeur, on n'obtenait tout l'effet qui résulte de la force vive de la vapeur, qu'autant que l'air était à une température assez élevée pour qu'il n'y ait pas condensation de vapeur; mais je ne pense pas que cette circonstance ait une influence bien sensible; cependant il serait utile de faire quelques expériences à ce sujet.

582. On a prétendu aussi, d'après des expériences faites sur les locomotives, que, par l'intermittence du jet, on produisait un plus grand effet utile que par un jet continu; en supposant que cela fût exact, il faudrait voir si, dans les expériences qui ont été faites, la tension de la vapeur n'était pas plus grande avec les intermittences qu'elle ne l'eût été par un jet continu.

On a reconnu, par des expériences faites sur des locomotives, qu'il est avantageux de faire sortir la vapeur par des orifices percés en minces parois dans des surfaces planes.

583. Le tirage à la vapeur serait surtout avantageux dans les circonstances où l'air devrait être complètement refroidi après l'injection de vapeur, parce qu'alors on retrouverait une partie de la chaleur employée à produire la vapeur.

584. Il y aurait un grand avantage à chauffer la vapeur après sa formation, en la faisant circuler dans des tuyaux placés dans le canal qui conduit l'air brûlé de la chaudière à la cheminée; on obtiendrait ainsi un grand accroissement de vitesse avec une moindre dépense de vapeur en poids. Cette disposition serait surtout très-avantageuse pour la ventilation des mines.

---



---

## CHAPITRE VII.

### DES FOYERS.

---

585. Les premiers foyers qui ont été employés consistaient simplement dans un espace plus ou moins étendu, placé au-dessous du corps qu'on voulait échauffer, et dans lequel on accumulait le combustible. Plus tard, lorsqu'on reconnut la nécessité d'envelopper le foyer pour économiser le combustible, les foyers se composèrent d'un espace fermé, pourvu d'une seule ouverture pour l'introduction de l'air et du combustible. Ce ne fut que longtemps après qu'on imagina les grilles sur lesquelles on place le combustible. Il est probable que leur découverte a été provoquée par l'emploi de la houille, qui brûle mal sans grille.

586. Un foyer se compose maintenant de l'ouverture qui donne accès à l'air, d'un espace où se réunissent les cendres, de la grille sur laquelle on place le combustible, et d'un espace plus ou moins étendu, dans lequel se développe la flamme. Ces différentes parties ne sont cependant pas toujours distinctes, comme nous le verrons plus tard.

Les foyers ont des formes très-variées, non-seulement à cause des qualités différentes des combustibles, mais pour un même combustible, suivant l'effet qu'on veut obtenir. Nous les avons divisés en différentes classes que nous examinerons successivement.

#### § 1. — DES FOYERS A FLAMME DROITE.

587. Les foyers à flamme droite, sans grille, ont un très-grand désavantage sur les foyers à grille, parce que le courant d'air arrivant latéralement, une grande partie de cet air ne traverse pas le combustible, et diminue infructueusement la température de l'air chaud qui a servi



à la combustion. Ainsi, ces foyers, quoique d'une construction beaucoup plus simple que les autres, doivent être entièrement proscrits toutes les fois que l'économie du combustible doit être prise en considération, ou que d'autres circonstances ne rendent pas leur emploi indispensable; d'ailleurs, ils ne pourraient point servir pour la houille, du moins la combustion y serait toujours languissante et imparfaite.

588. *Ouverture qui donne accès à l'air.* On donne ordinairement à l'orifice d'accès de l'air une section égale à celle des carneaux; mais il n'y a jamais d'inconvénient à la rendre beaucoup plus grande, surtout si la prise d'air est extérieure, et si l'air n'arrive dans le foyer qu'après avoir parcouru un long canal.

Il est toujours utile de garnir l'ouverture du cendrier d'une porte qui puisse fermer hermétiquement. Cette porte et le registre de la cheminée, dont nous avons parlé (452), permettent d'empêcher l'air de passer à travers le fourneau pendant la cessation du travail, de s'opposer ainsi au refroidissement du fourneau, et par conséquent de faire une économie notable de combustible.

589. En général, on peut donner aux ouvertures d'accès une position et une direction quelconques. La prise d'air peut avoir lieu en dedans ou en dehors de l'atelier; le premier cas est le plus général. L'orifice du cendrier est alors placé au-dessous de la porte du foyer, ou sur une autre face du fourneau; quelquefois il est placé au niveau du sol, et il est fermé par une grille en fer; mais cette disposition n'est jamais employée que pour les foyers à bois, attendu qu'elle ne permet pas de nettoyer les grilles.

Quelquefois on introduit l'air par plusieurs ouvertures pratiquées sur les faces du fourneau; cette disposition compliquée est sans aucun avantage lorsque le fourneau se trouve dans un atelier clos, et que les orifices s'ouvrent dans l'atelier même.

590. Lorsque la prise d'air se fait au dehors de l'atelier, il en résulte plusieurs avantages importants: 1° le tirage, toutes choses égales d'ailleurs, est plus fort, parce qu'en général la température des ateliers étant plus élevée que celle de l'air extérieur, la pression sur l'ouverture d'un canal débouchant au dehors est plus grande que celle qui se manifesterait sur une ouverture située dans l'atelier; 2° lorsque la prise d'air est intérieure, les vents dirigés en sens contraire de l'introduction de l'air dans l'atelier



diminuent le tirage, et cette diminution est d'autant plus grande que le tirage est plus faible, tandis que, par une prise d'air extérieure, on peut détruire complètement cette influence. Lorsqu'on peut prendre l'air dans un lieu bien découvert, à une distance suffisante des bâtiments, les vents sont sans influence sur le tirage. Dans le cas contraire, il faudrait multiplier les prises de manière que dans toutes les directions possibles des vents, il y en eût une qui fût favorable : quatre suffiraient; mais comme il est rare que dans un même lieu les vents violents aient plus de deux directions différentes, en général deux prises suffisent, et si l'ouverture de l'atelier était déjà dans une de ces directions, une seule serait nécessaire, avec une prise dans l'intérieur de l'atelier. Nous avons décrit (509-510) des appareils qui rendent toujours les vents favorables à l'introduction de l'air dans les foyers par un seul canal. Quand la prise d'air est extérieure, le canal doit avoir une grande section, surtout s'il est très-long, afin que l'air n'y prenne qu'une faible vitesse, et que le tirage ne soit pas sensiblement diminué.

591. *Du cendrier.* Le cendrier est l'espace libre qui se trouve au-dessous de la grille; il est pourvu d'un large orifice par lequel s'introduit l'air froid nécessaire à la combustion. La grandeur de cet espace est entièrement arbitraire, il faut seulement qu'il ne soit point étranglé, et que sa plus petite section soit suffisante pour fournir la quantité d'air froid nécessaire à la combustion.

592. Depuis quelque temps on a introduit dans la construction des cendriers une innovation qui est utile dans certaines circonstances. Le fond du cendrier est recouvert d'une couche d'eau de quelques centimètres; un petit tuyau amène constamment l'eau froide jusqu'au fond du bassin, et un autre de même diamètre conduit au dehors le liquide de la surface, qui est le plus échauffé. Ce petit bassin d'eau, en absorbant la chaleur rayonnante du foyer de haut en bas, diminue beaucoup la température de la partie inférieure des grilles, ce qui les conserve plus longtemps, et empêche qu'elles ne soient obstruées aussi fortement par l'adhérence des scories; de plus, la vapeur d'eau qui se dégage et qui est décomposée en traversant le foyer, donne plus de longueur à la flamme, et la maintient lorsque le charbon, transformé en coke, n'en produirait plus par un courant d'air sec : cette disposition a déjà été employée avec avantage dans plusieurs usines.

593. *Des grilles.* Les grilles sont formées de barres de fer ou de fonte placées parallèlement. Leur épaisseur dépend de leur longueur; et leur écartement de la grosseur des morceaux de combustible, car ces intervalles ne doivent laisser passer que les cendres. Pour les grands foyers, on donne généralement aux barreaux une largeur de 3 centimètres et on laisse entre eux un intervalle d'environ 1 centimètre: il est cependant avantageux de diminuer beaucoup l'écartement des barreaux quand on doit brûler des combustibles qui se divisent dans le foyer à mesure que la combustion fait des progrès et dont une partie pourrait tomber avec les cendres.

594. *Dimensions des grilles.* Tredgold, dans son traité des machines à vapeur, indique 9 décimètres carrés de grille par force de cheval; ce serait, en comptant 5 kilogr. de houille par cheval,  $5:9 = 0^k,55$  par décimètre carré. Il arrive au résultat que nous venons d'énoncer par un calcul fort extraordinaire. Je rapporterai à ce sujet les propres expressions de M. Millet, traducteur de l'ouvrage de Tredgold, qui a cru devoir mettre une note à l'étrange article dont il est question. « Dans ce « calcul, Tredgold paraît prendre la hauteur du cendrier comme la « hauteur génératrice de la vitesse; ce qui est évidemment erroné, « puisque le tirage est principalement produit par la cheminée et par « la colonne d'air brûlé qu'elle contient, et qui s'y trouve à une tem- « pérature beaucoup plus élevée que celle du cendrier. Il arrive cepen- « dant à un résultat assez conforme à la pratique; mais c'est en faisant, « dans le cours du calcul, des hypothèses non moins fautives, qui forment « une compensation en sens contraire. »

595. Dans la plupart des chaudières à vapeur, alimentées par la houille, les grilles ont des surfaces qui correspondent à peu près à une consommation de 1 kilogramme de combustible par décimètre carré et par heure. Cependant il existe des foyers à grilles beaucoup plus petites et d'autres à grilles beaucoup plus grandes; les limites extrêmes correspondent à des consommations de houille de  $1^k,5$  à  $0^k,3$  par décimètre carré et par heure, et on n'a pas reconnu de différences notables dans les effets utiles produits par ces foyers. Il paraîtrait, d'après cela, qu'il en serait des combustibles qui brûlent avec flamme comme de ceux qui brûlent sans flamme, qu'en modifiant convenablement le tirage, on pourrait produire le même effet utile



en brûlant ces combustibles sur des grilles d'une étendue quelconque.

Il y a même quelques faits qui semblent favorables aux foyers à grandes grilles. Dans les petites chaudières de Lemare, dont les résultats rapportés (228-229) sont si satisfaisants, les grilles étaient très-grandes; dans les grandes chaudières à vapeur du Cornwall, qui produisent de très-bons effets, les grilles sont énormes.

596. Les ingénieurs qui ont acquis une grande expérience dans la construction des foyers, admettent, en général, que les grandes grilles sont favorables à l'économie du combustible, mais qu'elles sont plus difficiles à diriger, et qu'elles présentent plus d'inconvénients que les autres, lorsque le chauffage n'est pas uniforme.

Il serait bien à désirer que des expériences, faites avec soin et sur une grande échelle, décidassent la question. En attendant, je pense que pour les grands foyers, et surtout pour ceux dans lesquels on ne doit pas brûler constamment la même quantité de houille, il est prudent de s'en tenir aux dimensions habituelles. Mais il n'est pas douteux que pour les foyers à coke, à houille sèche et à anthracite, on obtiendra le même effet utile avec des foyers de dimensions très-différentes, pourvu que le tirage et l'épaisseur de la couche de combustible soient convenables.

Les grandes grilles deviennent indispensables dans deux circonstances: 1° quand, par la nature du métal de la chaudière, les foyers ne doivent pas avoir une température très-élevée; 2° quand le combustible laisse sur la grille des résidus volumineux qui doivent être enlevés après un certain temps.

597. Pour les grilles ordinaires et pour la houille, l'épaisseur de la couche de combustible est à peu près de 0,05 à 0,08, suivant la grosseur des morceaux. Pour les foyers à combustibles qui brûlent sans flamme, et dont les grilles correspondent à une consommation de 0<sup>k</sup>,6 à 0,75 par décimètre carré et par heure, l'épaisseur de la couche varie de 0<sup>m</sup>,20 à 0<sup>m</sup>,30.

598. Pour les foyers à bois, les grilles doivent être beaucoup plus petites que pour les foyers à houille, d'abord parce qu'il faut moins d'air pour brûler 1 kilogramme de bois que pour brûler 1 kilogramme de houille, ensuite parce que les ouvertures ne sont pas sujettes à s'obstruer. D'après les observations de M. Édouard Kœchlin, il faut 1 mètre carré de grille, ayant un quart d'intervalle libre, pour brûler 350 kilog.

de chêne vieux par heure, ce qui fait à peu près 3 décimètres carrés pour 10 kilogrammes de bois; c'est le nombre que nous admettrons.

599. Examinons maintenant la construction des grilles. Généralement les barreaux sont en fonte et ont la forme indiquée par les figures 1, 2, 3, 4, 5 (pl. 8); leur hauteur est plus grande au milieu que vers les extrémités, afin qu'ils résistent mieux à la flexion; leur épaisseur va en diminuant de haut en bas, afin de faciliter l'accès de l'air, la chute des scories et le dégorgement de la grille par une barre de fer plate et recourbée qu'on introduit en dessous à travers les barreaux; ils sont garnis aux deux extrémités et au milieu d'appendices, dont l'épaisseur est égale à la moitié de l'intervalle qui doit les séparer, et qui ont de 2 à 5 millimètres; souvent on ne met des appendices que d'un côté (fig. 3). La figure 4 représente l'ajustement des barreaux; ils reposent par leurs extrémités sur des barres de fonte ou de fer fixées dans la maçonnerie. L'épaisseur de chaque barreau à la partie supérieure varie de 15 à 30 millimètres, et, pour 1 mètre de longueur, la hauteur au milieu est de 8 à 10 centimètres.

600. Ordinairement les grilles sont horizontales, mais on les incline quelquefois vers le fond du foyer; cette disposition est utile pour les combustibles qui produisent beaucoup de flamme (fig. 14 et 18, pl. 8).

601. Pour faciliter le dégagement des scories, on a imaginé la disposition indiquée figure 14. La grille est inclinée, et au delà de son extrémité se trouve une espèce de trémie, dans laquelle on repousse les scories qu'on fait tomber à volonté dans le cendrier, au moyen d'une coulisse que le chauffeur manœuvre facilement.

602. Lorsque les charbons sont très-collants, et qu'ils encrassent trop facilement les grilles, on emploie la disposition indiquée par les figures 11, 12, 13 (pl. 8); la grille est formée de barreaux de fer carrés qui dépassent la face du fourneau; on peut alors, en ouvrant la porte, agiter successivement chacun d'eux, séparer ou faire tomber dans le cendrier les scories qui y sont attachées. Cette disposition est principalement employée pour les foyers des fourneaux à réverbère, dans lesquels la température est plus élevée que dans ceux des chaudières à vapeur, et dont les grilles s'encrassent plus facilement.

603. On a imaginé d'employer des grilles mobiles qui sont chargées d'une manière continue; des grilles creuses, dans lesquelles on chauffe

l'air qui doit alimenter la combustion, ou qui reçoivent de la vapeur qui se mêle à l'air d'alimentation; nous parlerons de tous ces appareils après avoir décrit les foyers fumivores.

604. *Du foyer proprement dit.* L'espace qui est au-dessus de la grille doit avoir une étendue suffisante pour contenir le combustible, et pour permettre à la flamme de se développer.

La quantité de combustible que l'on doit accumuler sur la grille est très-difficile à déterminer, car on se trouve entre deux écueils qu'il faut également éviter : si la quantité de combustible est trop petite, l'air qui passera à travers la grille ne sera pas assez divisé, une grande partie échappera à la combustion, et en outre il faudra alimenter le foyer à de plus courts intervalles, circonstances qui toutes deux concourent à diminuer l'effet utile du combustible; d'un autre côté, si l'épaisseur de la couche de combustible est trop grande, l'air la traversera difficilement, et il se dégagera beaucoup de fumée, beaucoup de gaz combustibles, et seulement de l'oxyde de carbone, quand le combustible ne sera pas décomposable par la chaleur seule.

On conçoit, d'après cela, qu'il est impossible de donner une règle précise sur la hauteur du combustible qu'on peut accumuler sur la grille, attendu que cette hauteur devra dépendre non-seulement de la nature, mais de la grosseur des morceaux de combustible. Dans tous les cas, on devra augmenter l'épaisseur de la couche jusqu'à ce qu'on observe un accroissement de consommation de combustible pour produire le même effet; on obtiendra ainsi deux avantages importants : une alimentation moins fréquente, et un effet utile plus grand.

605. Pour les dimensions de grilles indiquées précédemment, l'épaisseur de la couche de combustible doit être, comme nous l'avons déjà dit, de 5 à 8 centimètres pour la houille, et de 20 à 30 centimètres pour le coke.

606. Quant à l'espace qui doit se trouver au delà du combustible, entre la grille et la chaudière, il n'est point arbitraire : si la chaudière était trop rapprochée, comme elle est à une température beaucoup plus basse que la flamme, elle l'éteindrait et par suite on obtiendrait de la fumée et une mauvaise combustion; si, au contraire, elle était trop éloignée, elle ne recevrait qu'une partie du rayonnement, et il y aurait encore une perte d'effet utile, parce que l'air chaud sortirait à une température trop élevée.

607. On a reconnu par expérience que, pour les foyers à houille, il faut mettre, entre la grille et la chaudière ou le fond des bouilleurs, une distance de 30 à 35 centimètres, et 40 pour les très-grands foyers. Cette distance doit être de 70 à 75 centimètres dans les foyers à bois, de 50 dans les foyers à tourbe, et de 60 dans ceux où l'on brûle du coke.

608. Mais si la chaudière devait être portée à une température très-élevée, peu différente de celle que prend l'air chaud à sa sortie du foyer, il faudrait, au contraire, placer la chaudière au milieu de la flamme, et négliger presque la circulation de l'air chaud qui, même dans certains cas, pourrait la refroidir; la combustion ne serait point ralentie à cause de la haute température de la chaudière. Il y aurait alors une grande perte de chaleur, mais elle serait inévitable, parce que, comme nous l'avons déjà dit, l'air ne peut s'échapper à une température inférieure à celle du corps chauffé, et par conséquent la perte de chaleur serait d'autant plus grande, que la température de la chaudière serait plus élevée.

609. J'ai eu plusieurs fois l'occasion de reconnaître qu'en effet on économise beaucoup de combustible en rapprochant la chaudière de la grille quand elle doit rougir; et qu'au contraire il y a économie à l'éloigner, du moins jusqu'à une certaine limite, lorsqu'elle ne doit atteindre qu'une température peu élevée au-dessus de 100°.

610. M. de Valcourt rapporte que, dans une machine à vapeur qu'il avait établie à la Nouvelle-Orléans pour faire mouvoir des scies, les chaudières étaient chauffées au bois, et que la grille était d'abord à 3 pieds et demi au-dessous de la chaudière; la machine marchait bien, les deux scies donnaient 100 coups par minute, et sciaient chacune 10 pieds de planches d'un pied de largeur en trois minutes; il ajoute qu'il essaya un jour de relever la grille de 6 pouces, et que la machine, avec le plus grand feu qu'on pût faire, ne put alors faire marcher qu'une scie; on redescendit la grille à sa première place, et les deux scies furent mises en mouvement comme auparavant.

611. Les foyers à bois devant avoir une grande hauteur, on les dispose souvent d'une manière particulière. Les figures 15, 16 et 17 (pl. 8) représentent une forme très-commode de foyer à bois; la grille est horizontale et peu élevée au-dessus du sol; l'air s'introduit à travers une grille placée au niveau du sol, en avant du fourneau, et le foyer est



garni de deux portes, l'une supérieure pour alimenter le foyer, l'autre inférieure qui sert à le vider. On emploie aussi très-souvent la disposition indiquée figure 18. On peut prendre 40 centimètres pour la distance de l'origine de la grille à la chaudière, et 80 pour celle de son autre extrémité. Des dispositions analogues peuvent être employées pour les foyers à tourbe et à coke.

612. Les foyers sont toujours encaissés latéralement et au fond. Quelquefois on élève à une assez grande hauteur le mur du fond, afin d'obliger la flamme et l'air brûlé à passer contre la chaudière dans un espace assez étroit. Cette disposition est sans avantage; elle a l'inconvénient de diminuer l'étendue de la partie de la chaudière qui reçoit le rayonnement du foyer, et de produire de promptes dégradations dans la partie de la chaudière qui se trouve au-dessus du feu. Ce dernier inconvénient s'est manifesté d'une manière très-marquée sur les chaudières de la manufacture de tabac à Paris, et depuis que l'on a abaissé le mur au niveau du sol du carneau, les chaudières ont cessé d'éprouver les fréquentes altérations dont on avait longtemps, mais en vain, cherché la cause.

613. *Portes des foyers.* Entre l'extrémité de la grille et la porte du foyer, on doit laisser un intervalle de 30 à 50 centimètres, suivant la grandeur du foyer; quand la distance est trop petite, les portes rougissent, ce qui occasionne une perte de chaleur, et elles se déforment et se brûlent quand elles sont en tôle. Cet espace est ordinairement occupé par une plaque de fonte engagée dans la maçonnerie, ou soutenue par des barres de fer. L'embrasure de la porte doit nécessairement aboutir aux deux extrémités de la grille, afin que le chauffeur puisse facilement et d'un seul coup d'œil en embrasser toute l'étendue. Les portes doivent avoir les dimensions seulement nécessaires pour que le chargement de la grille se fasse avec facilité; on leur donne ordinairement 15 à 30 centimètres de hauteur, et une largeur qui dépend de celle de la grille. Maintenant on les construit toujours en fonte, et elles sont montées sur des plaques de même métal maintenues contre la face antérieure du fourneau par quatre tiges de fer bifurquées, et taraudées en avant, qui pénètrent à une profondeur de 2 ou 3 décimètres dans la maçonnerie. Les portes sont à un ou deux battants, suivant leur grandeur; dans ce dernier cas, elles ne sont jamais dormantes, elles se maintiennent ouvertes ou fermées par le frottement des gonds, et elles

sont garnies chacune d'un crochet au moyen duquel le chauffeur les fait mouvoir. Quand les chaudières sont à bouilleurs, les plaques de fonte sur lesquelles les portes sont fixées servent en même temps à supporter les têtes des bouilleurs.

614. Quand les chaudières sont à basse pression et sans bouilleurs, comme il y a en avant de la chaudière un canal à fumée, il y aurait une trop grande distance de la porte à la grille si on mettait la porte dans le plan de la face du fourneau; alors, pour la rapprocher, on soutient en avant une partie de la maçonnerie par une voûte (fig. 8, 14, 15, 18, pl. 8), ou par une plaque de fonte (fig. 1 et 2, pl. 9), ou en la disposant en retrait (fig. 3, pl. 9), ou enfin on place la porte du foyer dans une embrasure en fonte (fig. 12, pl. 8). La première disposition est préférable aux autres; c'est aussi celle qui est le plus généralement employée.

Les figures 9...16 (pl. 9) représentent les détails de construction de plusieurs portes de foyer.

615. Dans quelques ateliers, j'ai vu employer de simples plaques de tôle de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, percées au centre d'une ouverture circulaire, et posées librement dans l'embrasure de la porte; on les enlève et on les place à l'aide d'une tige de fer qu'on introduit dans l'ouverture. Ce mode de fermeture, qui est à la vérité peu dispendieux d'établissement et d'un service facile, est le plus mauvais que je connaisse. Les plaques ne ferment jamais bien, elles laissent pénétrer beaucoup d'air froid et par les bords et par l'orifice, qui reste toujours ouvert; elles sont presque toujours incandescentes, et par conséquent laissent perdre une grande quantité de chaleur. Ainsi, l'économie apparente de leur construction et de leur service est bien compensée et au delà par les pertes de chaleur qu'elles occasionnent.

Quelquefois on fixe derrière la porte, et parallèlement, à une distance de quelques centimètres, une plaque de fonte maintenue par quatre boulons. Cette disposition empêche la plaque extérieure de rougir, et diminue beaucoup sa température.

Quelquefois aussi les portes sont garnies intérieurement d'un cadre rempli de terre à briques. Cette disposition est très-bonne pour diminuer la perte de chaleur; elle est surtout utile pour les grands foyers, parce qu'elle permet de diminuer la distance de la grille à la porte.



## § 2. — FOYERS A FLAMME RENVERSÉE.

616. Dans un grand nombre de fourneaux la flamme est plus ou moins inclinée, et même renversée au delà du foyer; mais cette circonstance, qui est indépendante de la direction de la flamme dans le foyer même, n'est pas celle dont il s'agit ici: nous voulons parler des foyers dans lesquels la flamme se développe à sa naissance dans une direction opposée à celle qu'elle prend naturellement (fig. 1 et 2, pl. 13).

617. La flamme s'élève verticalement par la légèreté spécifique que la chaleur donne aux gaz combustibles et à ceux qui sont produits par la combustion. Mais cette direction ne peut exister que dans un air calme, ou qui se meut dans le sens que la flamme tend à prendre naturellement. Quand le mouvement de l'air a une direction différente, les gaz combustibles prennent une direction qui est la résultante de leur force ascensionnelle et de la vitesse de l'air; et lorsque la vitesse du courant d'air est très-grande relativement à celle des gaz qui se dégagent, la flamme suit sensiblement la direction de ce courant.

Il résulte de là que si le courant d'air s'introduisait par la partie supérieure du foyer, la flamme se propagerait verticalement du haut en bas.

618. Les foyers à flamme renversée ont l'avantage de brûler plus complètement la fumée que les autres foyers, parce que les gaz combustibles, qui tendent naturellement à s'élever à cause de leur densité plus petite que celle de l'air, vont en quelque sorte à la rencontre du courant d'air; par la même raison, les flammes sont beaucoup plus courtes. Mais ces foyers ne peuvent être employés pour la houille (622): les grilles se trouveraient sur la surface incandescente du combustible, et seraient bientôt détruites; cet inconvénient n'existe pas dans les foyers ordinaires, parce que les grilles sont continuellement refroidies par l'air qui vient alimenter la combustion, et, d'ailleurs, la combustion n'est bien active qu'à une certaine distance au-dessus de la grille.

619. M. Nivelles avait proposé, pour les chaudières à vapeur, de brûler la houille à flamme renversée sur des grilles creuses constamment remplies d'eau, et communiquant avec la chaudière. Les barreaux formeraient ainsi un grand nombre de petits bouilleurs qui ne pourraient



pas s'échauffer à une température suffisante pour que le métal fût altéré; mais cette disposition est trop compliquée, elle exigerait de trop fréquentes réparations, et ne présenterait pas des avantages assez importants pour compenser ces inconvénients.

Nous reviendrons sur les foyers à flamme renversée en parlant des foyers fumivores.

### § 3. — DES FOYERS INTÉRIEURS.

620. Nous n'avons parlé jusqu'ici que des foyers extérieurs aux chaudières, mais on brûle souvent le combustible dans l'intérieur même des chaudières; cette disposition est indispensable pour les générateurs des locomotives, et elle est très-commode et presque uniquement employée pour les générateurs des bateaux à vapeur. On avait pensé à l'origine que cette disposition des foyers devait présenter un très-grand avantage, parce que toute la chaleur rayonnante est absorbée; plus tard, on crut qu'une température élevée était indispensable à une bonne combustion, et alors les foyers intérieurs dans lesquels l'absorption de la chaleur rayonnante abaisse la température du combustible au-dessous de celle des autres foyers, parurent devoir favoriser la production de la fumée et furent regardés comme moins avantageux que les foyers extérieurs; de mauvais résultats obtenus dans des générateurs à foyers intérieurs mal construits, dans lesquels surtout les carneaux avaient une trop grande section et les surfaces de chauffe un trop petit développement, confirmèrent cette induction. Mais des expériences récentes, que nous rapporterons bientôt, ont fait voir que les foyers intérieurs peuvent être plus avantageux que les foyers extérieurs; nous reviendrons sur cet objet en parlant de la disposition générale des générateurs.

### § 4. — FOYERS FUMIVORES.

621. Lorsqu'on brûle des houilles grasses, du bois ou de la tourbe, dans les différents foyers que nous venons de décrire, il se dégage beaucoup de fumée, des gaz combustibles non brûlés, et de l'oxygène libre. La présence des gaz combustibles et de l'oxygène libre provient de ce que les veines de ces gaz se propagent parallèlement avec des vitesses



peu différentes. Mais le plus souvent la quantité d'oxygène libre est très-petite, et celle des gaz combustibles est très-grande : aussi aperçoit-on souvent des flammes à l'extrémité de certaines cheminées, et principalement de celles des chaudières de bateaux. La perte de chaleur dans la plupart des foyers à houille est assez considérable pour que l'on trouve de l'avantage, à Paris, à alimenter les foyers des chaudières à vapeur avec du coke, malgré son prix élevé.

On s'est beaucoup occupé de foyers fumivores, non-seulement pour éviter les inconvénients de la fumée, mais aussi dans l'espoir d'obtenir une grande économie de combustible. Les appareils qui ont été proposés sont très-nombreux; nous les décrirons successivement, en indiquant les effets qu'ils ont produits.

622. *Foyers à flamme renversée.* Ces foyers, imaginés par Dalesne, donnent de très-bons résultats; mais ils ne sont employés que pour le bois et la tourbe, parce que des grilles seraient nécessaires à la combustion des autres combustibles, et qu'elles seraient trop promptement détruites. On pourrait cependant brûler tous les combustibles sur grille à flamme renversée, en employant des barreaux en terre réfractaire. Cette disposition a été adoptée pour le bois, et elle a parfaitement réussi. Elle serait très-convenable pour la tourbe; mais pour la houille et le coke, les résidus se vitrifieraient sur les barreaux et les mettraient promptement hors de service.

623. Les figures 4 et 5 (pl. 9) représentent une coupe et une projection d'un foyer à bois, à flamme renversée. L'espèce de trémie dans laquelle le bois est engagé doit être garnie de plaques de tôle ou de fonte. Le bois descend par son propre poids ou par la pression que le chauffeur lui fait éprouver avec ses pieds; il doit être coupé d'une longueur égale à la largeur de la trémie dont la section est égale à celle d'une grille destinée à brûler la même quantité de bois dans le même temps. Ces foyers marchent très-bien sans donner de fumée, et sans produire d'accumulation de cendres dans le foyer proprement dit; toutes celles qui se produisent sont entraînées dans les carneaux; la combustion est si complète que les carneaux sont à peine noircis. Cette disposition est la meilleure qu'on puisse employer pour les foyers à bois. J'ai eu l'occasion de voir plusieurs chaudières à vapeur dont les foyers étaient ainsi disposés, et qui donnaient des résultats très-satisfaisants.



Quoique les foyers pour bois à flamme renversée ne produisent point de suie (du moins tous ceux que j'ai eu l'occasion d'observer sont dans ce cas), il est prudent cependant de se ménager les moyens de nettoyer au besoin les carneaux; et pour cela on doit creuser dans le sol et au delà des chaudières, un espace dans lequel s'ouvrent les portes des carneaux, et par lesquelles on puisse les nettoyer au moyen d'un ringard dont le manche s'allonge par des pièces qui se montent à vis.

624. Cette même méthode pourrait être employée pour brûler la tourbe; mais comme ce combustible produit beaucoup de cendres, il faudrait disposer l'appareil comme il est indiqué dans la figure 6 (pl. 9). En avant de la trémie se trouve un espace recouvert d'un grillage, et dans lequel le chauffeur peut descendre pour dégorger la grille en soulevant successivement les barreaux au moyen d'un ringard. Il serait possible qu'il fût avantageux de laisser passer continuellement un faible courant d'air à travers la grille. Je dois dire cependant que les foyers à flamme renversée appliqués à la tourbe n'ont point encore été essayés, et qu'alors on ne peut rien affirmer de positif sur leur efficacité, quoiqu'il soit bien probable qu'ils réussiraient comme pour le bois.

625. Ces mêmes foyers peuvent être employés pour la tannée en mottes. Mais pour la tannée en poudre, il faudrait se servir de la même disposition que pour la houille; seulement, les grilles devraient avoir une grande surface, les barreaux devraient être très-étroits et très-peu écartés les uns des autres.

626. Dans les foyers à poteries communes on brûle la houille dans des caisses latérales en maçonnerie, fermées de tous côtés, excepté en-dessus, où elles sont garnies d'une porte destinée à introduire le combustible et l'air nécessaire à la combustion; la face adossée au fourneau est percée de plusieurs orifices, par lesquels la flamme pénètre dans le fourneau. Ces foyers produisent peu de fumée; ils seraient cependant remplacés avec avantage par celui qui est indiqué dans la figure 4 (pl. 13). La combustion est alimentée et par l'air qui passe à travers la grille AB, et par celui qui pénètre à travers l'orifice C, qui sert à introduire le combustible, et dont on peut régler à volonté l'ouverture.

627. On a aussi imaginé de renverser la flamme au delà du foyer, en la faisant passer sous une voûte (fig. 4, pl. 12). Dans des expérien-



ces récentes, faites par MM. Thomas et Laurens, sur un foyer disposé ainsi, avec un peu de soin, on évitait complètement la fumée, et on obtenait une économie de combustible de un dixième; mais la voûte était détruite en 3 ou 4 mois.

628. *Foyers à reverbère.* Dans cette disposition, le foyer est surmonté d'une voûte en briques réfractaires, et l'air chaud s'échappe tantôt par des orifices diversement placés dans la voûte, tantôt à la suite quand elle est cylindrique. La figure 1 (pl. 10) représente ce dernier arrangement. Par cette disposition, le foyer se trouve à une très-haute température, et si le combustible est facilement décomposable, comme le bois, la tourbe et les houilles grasses, il se dégage beaucoup plus de fumée que dans les foyers ordinaires; ainsi, ces prétendus foyers fumivores produisent un effet opposé à celui qu'ils promettent. En outre, ils ont le grand inconvénient de diminuer ou de rendre presque nul l'échauffement de la chaudière par rayonnement, et par conséquent d'exiger des surfaces de chauffe beaucoup plus étendues. Cette disposition pourrait cependant être très-utile pour certains anthracites qui ne brûlent bien qu'à une haute température.

629. *Foyers avec introduction d'air froid ou chaud sur la flamme.* Les foyers fumivores à courants d'air froid paraissent avoir été employés pour la première fois par Watt. Mais ce fut Robertson qui prit le premier, en 1801, une patente en Angleterre, pour la construction de ces foyers. Son appareil consistait en une grille un peu inclinée vers le fond du foyer; l'air extérieur arrivait à travers la grille comme dans les appareils ordinaires, mais le foyer était alimenté de combustible par une trémie placée au-dessus de la porte, et au-dessus de la trémie se trouvait une fente étroite par laquelle entraient un courant d'air qui arrivait directement sur la flamme. Ces dispositions ne présentent pas à beaucoup près les avantages qu'on s'en était promis; aussi sont-elles abandonnées. La figure 2 (pl. 10) représente un appareil analogue à celui de Robertson, mais qui est beaucoup plus simple; on étale le combustible sur la grille au moyen d'un ringard, on fait tomber le résidu au moyen d'une coulisse qui se trouve au delà de la grille, et on peut surveiller la combustion par la fente qui laisse arriver de l'air sur la flamme.

630. Les appareils dans lesquels le foyer est alimenté par une trémie

supérieure ou placée au niveau de la grille, ont l'avantage de ne pas produire autant de fumée que les appareils ordinaires, parce que dans ces derniers, la cause la plus efficace de dégagement de fumée est l'ouverture de la porte lors du chargement du foyer; mais il est difficile de gouverner la grille et d'y maintenir constamment le combustible à une hauteur convenable. En outre, l'introduction de l'air froid peut produire un effet contraire à celui qu'on en attend, si cet air est en quantité trop grande; ces appareils ne seraient d'ailleurs pas applicables à de grandes grilles.

631. Depuis, on a imaginé d'introduire de l'air chaud dans la flamme, par une fente longue et étroite disposée comme dans les figures 7 et 8 (pl. 9). Tantôt l'air s'échauffait en passant dans deux carneaux placés de chaque côté du foyer dans lequel il pénétrait par deux ouvertures placées de chaque côté de la porte; d'autres fois il prenait une température plus ou moins élevée en traversant des grilles creuses; d'autres fois, enfin, il était échauffé par son passage dans des tuyaux placés dans les carneaux, et même dans la cheminée; mais tous ces appareils sont peu efficaces et n'ont point été adoptés par l'industrie.

632. Les figures 3 et 4 (pl. 10) représentent une disposition analogue à celle que nous venons de décrire, mais qui, par certaines modifications, pourrait produire de très-bons effets. Le foyer est disposé à la méthode ordinaire, mais au delà, se trouvent des cônes de fonte creux, qui reçoivent de l'air extérieur par un canal M, et le rejettent autour d'eux par un grand nombre de petits orifices percés dans leurs surfaces. Ces cônes étant placés dans le courant d'air brûlé, prennent une température très-élevée, qu'ils communiquent à l'air qui les traverse. Si on plaçait la grille beaucoup plus bas, et si on la couvrait d'une couche très-épaisse de combustible, de manière qu'il ne sortît du foyer que de l'oxyde de carbone et des carbures d'hydrogène, et si en même temps l'air extérieur était foulé dans les cônes par une machine soufflante, de manière que les jets d'air se prolongeassent à une certaine distance des cônes, les remous qu'ils occasionneraient pourraient produire une combustion complète de la fumée, et un accroissement notable d'effet utile, pourvu que la vitesse de l'air et la somme des sections des orifices soient convenables. Mais la vitesse de l'air serait difficile à déterminer, et on pourrait craindre des détonations.



633. *Foyers doubles, dont l'un est alimenté par du coke, et sur lequel passe la flamme du premier.* Cette disposition, imaginée par Watt, est très-efficace quand les portes sont fermées, mais elle l'est très-peu quand elles sont ouvertes, parce qu'il n'y a qu'une petite quantité d'air qui traverse le coke; d'ailleurs, elle exige deux combustibles. On pourrait facilement disposer les appareils de manière à alimenter les deux foyers avec de la houille, et à obtenir cependant le même effet que si l'un d'eux était constamment alimenté avec du coke; il suffit, pour cela, de charger alternativement les deux foyers, et de faire passer la fumée du foyer qu'on charge sur l'autre; car, pendant la seconde moitié de la combustion de la houille, ce combustible est à peu près à l'état de coke. L'appareil pourrait être disposé comme l'indique la figure 5 (pl. 10); la fumée du foyer qu'on vient de charger serait obligée de passer sur l'autre au moyen de deux registres en fonte épaisse qu'on élèverait et qu'on abaisserait successivement. On pourrait aussi employer la disposition figure 6 (pl. 10). La grille est circulaire et mobile de manière à tourner successivement en sens contraire d'un demi-tour. On amènerait toujours du même côté, le plus éloigné de l'ouverture du carneau, la partie de la grille qu'on chargerait de houille. Tous ces appareils ont l'inconvénient de diminuer l'étendue de la surface de la chaudière qui reçoit le rayonnement du foyer, et par conséquent d'exiger une plus grande surface de chauffe.

634. MM. Chanter et compagnie ont eu l'idée d'incliner la grille, de manière à produire naturellement l'écoulement du coke à l'arrière de la grille figure 1 (pl. 14); mais il faut que la chaudière ait la même inclinaison. Ils ont réussi ainsi à brûler complètement la fumée des foyers des machines locomotives, dans lesquels on brûlait  $\frac{3}{4}$  de houille et  $\frac{1}{4}$  de coke. Nous transcrivons l'article du journal le Technologiste relatif à ces nouvelles dispositions :

« La condition imposée sur les chemins de fer, savoir, que les machines à vapeur travaillent sans répandre de fumée, a contraint jusqu'ici les ingénieurs à ne faire usage que du coke; aucun des moyens trouvés jusqu'ici pour brûler la fumée de la houille n'étant suffisamment efficace. Le haut prix du coke en Angleterre, où l'on n'a pas trouvé le moyen d'utiliser la chaleur perdue des fours à coke, a donné naissance à un nombre infini de combinaisons pour essayer d'employer la houille dans

les locomotives, en brûlant complètement la fumée. MM. Chanter et compagnie, ingénieurs anglais, paraissent être parvenus, déjà depuis quelques années, à brûler presque complètement la fumée dans les machines fixes, et un certain nombre de fourneaux sont en activité dans diverses parties de l'Angleterre, où ils paraissent fonctionner à la satisfaction des propriétaires d'usines; mais cette méthode, qui a eu quelques succès pour les machines stationnaires, était considérée par les ingénieurs et les inventeurs eux-mêmes, dans son état primitif, comme complètement inapplicable aux foyers des locomotives.

« Les principales dispositions de l'appareil de MM. Chanter consistent : 1° à placer les barreaux de la grille dans une direction inclinée; 2° à donner à la chaudière à peu près la même inclinaison, et à donner à la grille une inclinaison suffisante pour que le combustible puisse glisser le long des barreaux à mesure qu'il se consume, de manière que la partie inférieure soit toujours occupée par du coke, et la partie supérieure par du charbon neuf. La figure 5 (pl. 14) représente la coupe d'un foyer de MM. Chanter appliqué à une locomotive. A est le foyer. B, B, B, trois grilles placées sous des inclinaisons différentes. C, partie de la chaudière qui descend jusque dans le combustible incandescent. D, porte pour l'introduction de la houille. E, porte pour l'introduction du coke par le tube F. Des expériences multipliées, faites en 1839 sur différentes locomotives, ont démontré qu'en employant  $\frac{3}{4}$  de houille et  $\frac{1}{4}$  de coke, la fumée était complètement brûlée. »

635. La fumée provenant principalement du mode de chargement généralement employé, on a pensé de bonne heure que si l'on parvenait à verser d'une manière continue le combustible sur la grille, on parviendrait à rendre les foyers fumivores. On a imaginé, pour cela, un grand nombre d'appareils différents, dont nous nous contenterons de donner les principaux types.

636. *Foyers à distributeur et à grille tournante.* Dans ces appareils, le combustible est versé sur la grille par une trémie placée au-dessus et à des intervalles très-rapprochés; la grille est circulaire et animée d'un mouvement de rotation très-lent.

La figure 7 (pl. 10) présente une élévation et une coupe transversale; la figure 8 une coupe longitudinale d'une chaudière à basse pres-



sion destinée à une machine de 20 chevaux, de la construction de William Bruton.

AA, chaudières de Watt. BB, appendices à ces chaudières, disposés au-dessus des grilles tournantes; la fumée passe au-dessus et au-dessous des autels *dd*, de là au-dessous des chaudières, et tourne autour dans des carneaux qui peuvent se nettoyer par les portes DD. EE, trémies dans lesquelles on met le charbon brisé en morceaux d'une grosseur convenable; de là il tombe sur la grille par les ouvertures F; la chute est déterminée par un mouvement de va-et-vient imprimé à la plaque qui termine la trémie, et la quantité de combustible versé dans un temps donné sur la grille, dépend de l'orifice F que l'on règle à la main et qu'on peut faire régler par l'appareil de niveau. H, porte qui sert à surveiller la grille. K, axe de la grille qui est mis en mouvement par une roue fixée à cet axe et un pignon placé sur l'arbre N. *h*, briques réfractaires qui environnent la grille; pour que l'air ne passe pas autour de la grille, elle est garnie d'un cercle mince qui se prolonge au-dessous et se meut dans une auge circulaire garnie de sable fin. Dans ces appareils, une grille de 1<sup>m</sup>50 de diamètre brûle de 120 à 150 kilog. de houille à l'heure, ce qui correspond de 7 à 8 kilogr. par 10 décimètres carrés. La grille fait une révolution complète en trois ou quatre minutes; l'injection du combustible a lieu toutes les demi-minutes.

Ces appareils brûlent assez complètement la fumée; mais ils sont compliqués; ils exigent trop de surveillance et de trop fréquentes réparations; aussi sont-ils peu employés.

Un appareil de ce genre a été importé en France il y a vingt ans, et établi aux bains du quai de Gèvres, où il a continué jusqu'à ce jour à fonctionner.

637. *Foyers à grilles fixes alimentées d'une manière continue par un ventilateur.* Les appareils analogues à celui que nous venons de décrire n'eurent pas un grand succès, ou du moins ne furent pas généralement admis par l'industrie, à cause de leur complication et de la faible économie de combustible qu'ils présentaient; d'ailleurs, ils exigeaient des chaudières disposées d'une manière particulière. En 1822, on avait déjà beaucoup amélioré ces appareils, en rendant l'alimentation continue, les grilles fixes, et en disposant les appareils de manière à les appliquer à tous les fourneaux sans aucune modification dans les chaudières. A la fin

de cette même année, M. Collier prit, en France, un brevet d'importation pour un distributeur mécanique ainsi modifié; mais il eut bientôt reconnu que, dans la pratique, l'appareil laissait beaucoup à désirer, et dès lors il se livra à des essais en grand pour le rendre meilleur; et en 1823 il prit trois brevets de perfectionnements pour ces appareils. Depuis, M. Collier a vainement essayé de faire adopter son appareil dans plusieurs établissements; ses efforts ont constamment échoué contre le mauvais vouloir ou la coalition tacite des chauffeurs, qui voyaient que, si l'appareil réussissait, leurs intérêts seraient gravement compromis. Mais les avantages du nouveau distributeur ont été mieux appréciés en Angleterre, et depuis peu de temps deux de ces appareils ont été importés.

Nous décrivons un appareil de M. Collier établi dans ses ateliers pour une machine à haute pression de la force de 6 chevaux.

Tout le mécanisme est appliqué verticalement à la face antérieure du fourneau. Il se compose principalement d'une trémie à débit continu, de deux cylindres broyeurs, horizontaux, à pointes de diamant, et de deux projecteurs circulaires, contigus, placés dans le même plan horizontal, qui tournent en sens inverse et concourent au même effet. La houille, à mesure qu'elle descend par la trémie, est réduite partie en petits éclats, partie en poussier par les broyeurs; ainsi préparée, elle tombe sur les projecteurs, dans l'espace qui est compris entre leurs deux axes, et elle est continuellement lancée par eux sur la chauffe incandescente. La forme des projecteurs est celle d'une roue composée d'une coquille conique droite et de six palettes trapézoïdales, verticales, implantées autour de la coquille. Leur vitesse est de près de 200 tours à la minute, et l'on conçoit qu'un léger effet de ventilation doit se joindre à leur effet principal. Le débit du combustible est facile à régler à l'aide d'une vis de rappel. Tout le système est en fer et se trouve établi sur une grande et forte plaque du même métal, verticale et percée convenablement du côté du fourneau. Cette plaque étant placée sur des roulettes, l'appareil peut alternativement servir deux chaudières.

D'après M. Cordier, à qui nous avons emprunté les détails qui précèdent (Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, 1837), l'appareil dont nous venons de donner une description sommaire fonctionnait depuis six mois. Voici les avantages qu'il y trouve :



1° Le chauffage est parfaitement régulier; 2° toutes les parties du combustible, ou presque toutes, sont brûlées sous les bouilleurs ou sous la chaudière; 3° la fumée qui se dégage au sommet de la cheminée n'excède pas la quantité qui est produite par beaucoup de foyers domestiques alimentés par le bois; elle est d'ailleurs d'une teinte roussâtre très-claire, et elle n'offre aucun des inconvénients qui rendent si incommode le voisinage des grands ateliers chauffés à la houille; 4° on consomme à peu près  $\frac{1}{10}$  de combustible de moins que par les procédés de chauffage ordinaires; 5° on emploie sans difficulté la houille menue; 6° le tisage s'exécute facilement sans qu'on ouvre le fourneau: à cet effet, on se contente, à l'aide d'un ringard à crochet promené sous la grille, de piquer de temps à autre la couche de combustible en ignition, de manière à ce qu'elle ne conserve jamais plus de 3 centimètres d'épaisseur; 7° le chauffeur se trouvant chargé d'une surveillance extrêmement facile, peut donner plus de soin à la machine; il a besoin d'ailleurs d'une moindre habileté que les chauffeurs ordinaires. Enfin, l'appareil peut être appliqué à toute espèce de fourneau; il peut ensuite en être séparé sans perdre de sa valeur, et rentrer dans la circulation commerciale.

Le travail dépensé par la machine a été évalué à  $\frac{1}{2}$  cheval, c'est-à-dire, à  $\frac{1}{12}$  de la force totale. Le prix de l'appareil est d'environ 1000 francs.

638. La planche 11 représente le distributeur fumivore de M. Collier.

A, trémie qui contient la houille.

B, B', cylindres broyeurs. Le cylindre B reçoit son mouvement de la machine à vapeur, à l'aide des moyens de communication suivants :

*a, a'*, tambours sur lesquels passent des courroies qui leur transmettent le mouvement de la machine à vapeur. On se sert de l'un ou l'autre des tambours *a, a'*, suivant que l'appareil est placé devant l'une ou l'autre des deux chaudières. On fait passer la courroie sur l'une des trois portions cylindriques qui forment chaque tambour, selon la vitesse qu'on veut obtenir.

*b, b'*, roues réunies avec chacune des roues *c, c'* par une corde sans fin.

*c, c'*, roues fixées sur les axes *d, d'*.

*d, d'*, arbres verticaux sur lesquels sont montés les projecteurs C, C'. L'arbre *d'* porte une vis sans fin qui transmet le mouvement de rotation à la roue *e*. Cette roue est montée sur un axe qui porte une seconde vis sans fin qui fait tourner la roue *f* fixée à l'axe du cylindre B.

$g, g'$ , roues d'engrenage qui ont pour but de communiquer à la roue  $h$ , montée sur l'axe du cylindre  $B'$ , un mouvement en sens contraire de celui du cylindre  $B$ . L'axe du cylindre  $B'$  peut être à volonté rapproché ou éloigné de celui du cylindre  $B$ , au moyen du mécanisme suivant.

$i$ , point fixe autour duquel peut tourner le bras de levier  $h$  qui porte l'axe du cylindre  $B'$ .

$l$ , vis qui sert à mouvoir le bras de levier  $K$ .

$m, m$ , vis qui servent à faire mouvoir les tourillons de l'axe sur lequel est montée la roue  $e$ , de manière que les divers engrenages aient lieu exactement.

$C, C$ , projecteurs dont on voit le détail sur la figure 5.

$o$ , regard pratiqué dans la boîte où sont contenus les projecteurs.

$nn$ , porte qui forme la paroi antérieure de cette boîte.

$D$ , plaque verticale en fonte, sur laquelle est fixé l'appareil, et qui est portée sur des roulettes.

$p$ , manivelle qui sert, à l'aide d'une roue d'engrenage et d'une crémaillère fixe, à faire mouvoir tout l'appareil.

Une addition importante et ingénieuse a été faite au distributeur fumivore de M. Collier; le tisage du charbon, dont il a été fait mention ci-dessus, a été remplacé par un mouvement oscillatoire de chacun des barreaux qui composent la grille. Les mâchefers qui se forment dans le foyer sont brisés par ce moyen, et s'échappent à chaque instant.

La figure 8 fait voir les détails relatifs à ce perfectionnement.

$E$ , barreaux de fonte; chacune de leurs extrémités  $q$  est arrondie à la partie inférieure, afin de permettre aux barreaux de prendre un mouvement d'oscillation. Chaque barreau porte un appendice  $r$  terminé par un goujon.

$F$ , banc de fonte percé de trous qui reçoivent les goujons des appendices  $r$ .

$G$ , arbre horizontal formé de deux parties réunies par un manchon  $s$ , que l'on fait glisser sur la douille carrée que porte l'arbre, lorsqu'on veut changer de place le distributeur. L'axe  $G$  porte un goujon qui entre dans un anneau fixé à la barre  $F$ , auquel il communique le mouvement de va-et-vient qu'il reçoit lui-même de la bielle.



H, bielle verticale portant à sa partie inférieure un œil dans lequel passe un goujon *u* fixé à l'arbre G.

K, excentrique fixé à l'axe du cylindre fixe B, et qui communique un mouvement d'oscillation à la bielle.

L, tubes bouilleurs.

M, chaudière à vapeur.

639. On trouve dans le journal le Technologiste (décembre 1839) la description d'un appareil analogue construit par Oldham. La grille est animée d'un mouvement oscillatoire, mais l'alimentation n'a pas lieu d'une manière continue; le combustible fourni par la trémie tombe sur une plaque horizontale qui, à certaines époques, se relève brusquement et verse sur le foyer le combustible dont elle est chargée.

640. Malgré tous ses avantages, l'appareil de M. Collier est encore trop compliqué, et il est peu probable qu'il soit adopté par l'industrie, d'autant plus que la disposition suivante, qui produit exactement le même effet, est bien préférable, parce que l'injecteur est entièrement supprimé.

641. *Foyer à grille fixe et à distributeur direct.* Les figures 1, 2, 3 (pl. 12) représentent l'élévation et deux coupes verticales d'un distributeur établi dans l'ancienne fabrique de produits chimiques de M. Payen, à Grenelle, et qui fonctionne avec une grande régularité depuis plusieurs années, sans laisser dégager de fumée.

Figure 1<sup>re</sup>, élévation du fourneau et du distributeur; figure 3, coupe verticale suivant la ligne AB; figure 2, coupe verticale suivant la ligne CD.

A, foyer. B, grille fixe. C, cendrier. D,D, bouilleurs. E,E, obturateurs des bouilleurs, assujettis par des croisillons fixés par des vis et des écrous. F, porte du foyer. G, chaudière. H,H, axes quadrangulaires portant sur leur longueur quatre cylindres dont les dents à rochet *a,a,a*, sont alternées, de sorte que la saillie d'une cannelure correspond aux creux de la cannelure du cylindre suivant. K, trémie à trois compartiments K',K',K', qui reçoit de la houille menue. L,L, murs de soutènement de la plate-forme de la trémie. M,M,M, trois loquets régulateurs glissant le long des plans inclinés qui forment les compartiments de la trémie; ils sont destinés à augmenter à volonté l'espace ménagé pour le passage du combustible; on les fixe à l'aide des écrous *b,b*. O,O, roues dentées sur

les axes des cylindres cannelés H,H, et mues par la vis sans fin P, fixée à l'arbre de couche Q. R, roue dentée recevant, de la machine à vapeur, à l'aide d'une vis sans fin S, fixée à l'arbre N, et des poulies T'T'T', le mouvement qu'elle transmet ensuite à l'arbre Q, et par suite aux cylindres cannelés H,H.

Dans cet appareil, deux moyens ont été ménagés pour accélérer ou ralentir la chute du combustible : l'un consiste dans le resserrement ou l'élargissement du passage, à l'aide des taquets à coulisse M,M,M; l'autre dépend des trois poulies T'T'T' qui, ayant des diamètres différents, impriment des vitesses différentes aux cylindres dentés H,H.

Dans l'appareil établi dans l'ancienne usine de M. Payen, les cylindres dentés font moyennement 45 tours à la minute, et versent 15 kilog. de houille à l'heure sur le foyer. La machine est de Hall; elle est estimée de la force de 6 chevaux, ce qui ferait  $2^k \frac{1}{2}$  de houille par cheval et par heure.

Ce système de distribution, exempt de mécanisme agissant dans le feu, d'une construction simple, solide et ingénieuse, et qui ne laisse dégager aucune fumée appréciable, est beaucoup supérieur aux autres sous tous les rapports.

642. *Foyers fumivores par des remous produits dans la fumée.* L'analyse de la fumée ayant démontré qu'elle renfermait de l'oxygène libre, et presque toujours assez pour brûler toutes les matières combustibles qui s'y trouvent, on imagina d'abord de faire descendre la fumée au-dessous d'une voûte placée au delà du foyer (fig. 4, pl. 12); les veines parallèles d'air et de gaz combustibles étant à des températures différentes, devaient éprouver des retards inégaux, et par suite se mêler. Cette disposition permet de brûler la fumée, mais ne produit réellement que peu d'effet utile (627), car elle a le grand inconvénient de diminuer le rayonnement du foyer sur la chaudière, et par conséquent d'exiger de plus grandes surfaces de chauffe.

643. Il y a quelques années, M. Lefroy a imaginé une nouvelle disposition de foyers qui les rend parfaitement fumivores, et qui a été établie dans un grand nombre d'usines. L'appareil de M. Lefroy se compose d'un petit corps de bâtisse placé en avant du fourneau qui renferme la grille, et d'un appareil placé au-dessus qui permet de jeter sur la grille un volume déterminé de combustible à des intervalles aussi déterminés, sans



établir de communication entre l'intérieur et l'extérieur; au delà de la grille se trouvent quatre ouvertures longues, étroites, percées dans les faces latérales du foyer, dans la voûte et dans la maçonnerie qui se trouve au delà de la grille; elles sont ordinairement fermées, mais elles s'ouvrent simultanément par un mécanisme très-simple après chaque chargement. Les remous et les tourbillonnements qu'éprouve la fumée par ces courants d'air qui arrivent de différents côtés et dans un espace à une très-haute température, produisent une combustion complète de la fumée.

Les figures 5 à 15 (pl. 12) représentent différentes élévations et coupes d'un de ces appareils.

Figure 5, coupe du foyer suivant la ligne 1,1 (fig. 8). Figure 6, plan du foyer au niveau du sol. Figure 7, coupe horizontale à la hauteur de la ligne 3,3 (fig. 5). Figure 8, coupe horizontale à la hauteur de la ligne 4,4 (fig. 5). Figure 9, plan de la partie supérieure du foyer. Figure 10, coupe verticale du foyer suivant la ligne 6,6 (fig. 7). Figure 11, élévation de la face de devant du foyer, ou projection verticale sur le plan 7,7 (fig. 6). Figure 12, élévation latérale, ou projection sur le plan 8,8 (fig. 9).

A, ouverture du cendrier. B, cendrier. C, intérieur du foyer. D, ouverture pour nettoyer la grille du foyer; cette ouverture est fermée par une porte E (fig. 11) à coulisse; elle est formée d'un cadre en fonte, garni de briques réfractaires; aux deux tiers de sa hauteur elle est percée d'un trou F, qui sert à introduire une tige pour remuer la houille en combustion; ce trou est ordinairement fermé par un tampon d'argile; cette porte est fixée à une chaîne G, qui s'enroule sur deux poulies, et dont l'extrémité porte un contre-poids K. I, I, coulisses dans lesquelles glisse la porte. *a* (fig. 5, 9 et 10), passage de la flamme. *bb* (fig. 5, 10), grille de fonte supportée par deux traverses *cc. ss* (fig. 7), ouvertures pour l'introduction de deux traverses de fer servant à supporter la grille. *dd* (fig. 5, 10), ouverture par laquelle le combustible tombe sur la grille.

L'appareil à l'aide duquel on charge le foyer sans le mettre en communication avec l'air extérieur, se compose des pièces suivantes: 1° d'un châssis *ef* de fer forgé ou de fonte, divisé en deux compartiments *gh*: le premier *g*, rempli dans son intérieur par des briques ou un grand carreau de terre à gazette; le second *h*, recouvert par une plaque de tôle évidée dans son milieu pour recevoir un cylindre de forte tôle *i* (fig. 10,

11, 12), fermé dans sa partie supérieure par un couvercle  $k$ , et dans sa partie inférieure par un registre à coulisse  $n$  (fig. 14), également en tôle, et dont la tête est fixée par deux pattes  $m, m$  dans le fer de ceinture  $oo$  (fig. 12) qui couronne le foyer. Ce châssis est armé en outre d'une tige de fer  $p$  (fig. 9, 10, 11, 14), terminée par une poignée  $q$  (fig. 9). 2° D'une tringle de fer  $rr$  (fig. 9), terminée par des pattes fixées avec des vis dans le même fer de ceinture  $oo$ , et liée au châssis par deux conduits ou pitons à œil, et dont l'effet est de guider l'appareil dans son mouvement de translation. Entre les charges, le compartiment  $h$  du châssis sert de fermeture à la trémie, comme on le voit figure 9.

Quand on veut charger, on lève le couvercle  $k$ , on jette la houille dans le cylindre  $i$ , qui se trouve alors fermé dans sa partie inférieure par le registre, et on remet le couvercle en place. Cela fait, l'ouvrier saisit la poignée  $q$  et la pousse jusqu'à ce que la partie antérieure  $e, e$  (fig. 9) de l'appareil soit arrivée en  $t, t$ , où elle se trouve arrêtée par deux points fixes. Par suite de ce mouvement de translation, le second compartiment  $h$  se trouve occuper la place que le premier  $g$  occupait, c'est-à-dire que le cylindre repose sur la trémie  $d$  (fig. 10 et 12); mais comme le registre  $nn$  n'a pu participer à ce mouvement, puisqu'il est fixe, le cylindre s'est ouvert naturellement, et la houille qui n'était plus retenue est tombée sur la grille. La charge ainsi opérée, l'ouvrier ramène l'appareil dans sa position primitive, et le registre se referme de lui-même.

$a', a', a'$  (fig. 5 et 9), ouvertures ménagées dans la partie supérieure et sur les flancs du foyer, et qui ont pour objet de diriger des jets d'air dans le foyer.  $b, b, b$  (fig. 5, 9, 12), registres de tôle forte, destinés soit à intercepter, par leur fermeture, le passage des lames d'air, soit à introduire, par leur plus ou moins grande ouverture, la quantité d'air nécessaire, quantité qui dépend de la grandeur de la charge, de la nature du combustible, du temps qui s'est écoulé depuis le premier instant de la charge, etc. La base de cette colonne d'air varie depuis 4 jusqu'à 30 pouces carrés.

L'appareil pour faire manœuvrer simultanément ces trois registres, manœuvre dans laquelle gît principalement l'action fumivore du foyer, se compose de deux équerres doubles (chacune de deux branches), la première  $c'c'c'$  (fig. 9 et 12) en fer plat, embrassant verticalement le foyer, et à laquelle les trois registres  $b', b', b'$  (fig. 5, 9 et 12) sont solide-



ment attachés par des vis à tête fraisée; la seconde équerre  $d', d', d'$  (fig. 9 et 12), embrassant horizontalement le foyer, fixée à la première équerre en  $e'e'$  par des clous à tête fraisée, à branches en fer rond, glissant dans les yeux des pitons  $f'f'$  vissés dans des écrous scellés dans la maçonnerie, et portant dans son milieu une tige de fer  $g'$  avec poignée, pour faire manœuvrer l'appareil; ledit assemblage d'équerres consolidé de chaque côté de l'appareil (fig. 12) par un double lien en fer  $h', h'$ , dont les extrémités à pattes sont fixées en  $j'j'$  par des vis aussi à tête fraisée, pour pouvoir démonter l'appareil à volonté.  $i, i$  (fig. 9), petite équerre double, graduée sur le côté des deux branches ou sur une seule, et à pattes scellées dans la maçonnerie ou fixées à vis dans un des fers de ceinture du fourneau: elle sert de guide au chauffeur, puisque donnant le degré d'ouverture des registres, elle lui fait connaître la grandeur de la base de la colonne d'air dirigée sur la flamme, et qui est de 1,26 pouce carré par ligne d'ouverture des registres.

644. Ces appareils ont eu à l'origine beaucoup de vogue; on en a construit dans un grand nombre d'ateliers; mais on y a complètement renoncé, d'abord parce que l'effet utile du combustible était diminué par suite de la trop grande quantité d'air introduite dans le foyer à chaque charge; ensuite parce que les chaudières étaient facilement brûlées dans le voisinage du foyer.

645. Il résulte de tout ce que nous venons de dire sur les foyers fumivores, que pour le bois et la tourbe on parvient à brûler complètement la fumée dans les foyers à flamme renversée, et que pour la houille on parvient au même résultat par plusieurs procédés différents, mais qui n'ont point été adoptés, ou parce qu'ils exigent trop de soins de la part du chauffeur, ou des appareils trop compliqués, ou parce qu'en appelant dans le foyer un trop grand excès d'air, ils font perdre, par l'abaissement de la température de l'air brûlé, l'avantage qui pourrait résulter de la combustion complète de la fumée. Les foyers à grilles fixes ou mobiles, mais alimentés d'une manière continue, ont tous d'ailleurs l'inconvénient de s'arrêter ou d'éprouver des accidents, quand il se trouve des pierres dans la houille, ce qui arrive fréquemment.

646. Au reste, il ne faut pas s'exagérer l'importance d'un appareil spécial pour brûler la fumée de la houille. Un foyer bien construit, dont la grille aurait une étendue suffisante, qui serait alimenté par un combus-

tible dont les fragments ne s'agglomèrent pas trop, et qui surtout serait dirigé par un chauffeur intelligent, donnerait en général peu de fumée, et un effet utile peu différent de celui qu'on pourrait obtenir d'un bon appareil fumivore.

§ 5. — FOYERS A INJECTIONS DE VAPEUR OU D'AIR.

647. *Injection de la vapeur.* L'introduction de la vapeur dans les foyers a été faite de deux manières différentes : on l'a fait arriver librement dans le cendrier au-dessous de la grille, ou d'abord dans des grilles creuses, d'où elle s'échappait par de petits orifices percés sur leurs faces latérales (fig. 7 et 8, pl. 13).

Dans la fabrique de M. Clin, à Reims, se trouvait en 1837 une machine de douze chevaux, à haute pression ( $3 \text{ ath. } \frac{1}{2}$ ), à détente et sans condensation, faisant marcher une filature; la grille avait 0<sup>m</sup>,66 de largeur sur 1 mètre de longueur; le cendrier était fermé par une plaque de tôle simplement posée contre l'orifice; la vapeur arrivait sous la grille par un tuyau garni d'un robinet. La machine fonctionnait régulièrement tous les jours pendant treize heures; M. Clin m'assura que quand il travaillait sans vapeur il consommait 550 kilogr. de houille par jour, et quand il employait de la vapeur, la consommation ne s'élevait qu'à 350; que la machine ne travaillait qu'avec la force de dix chevaux, et qu'en été seulement il était obligé d'injecter de la vapeur dans la cheminée pour augmenter le tirage. D'après l'estimation de la force de la machine, un cheval ne consommerait par heure que 2<sup>k</sup>,70 de houille.

A la même époque, dans l'établissement de M. Pradine, où se trouvait une machine de douze chevaux, garnie d'un appareil à grille creuse de M. Dartois, on m'assura que sans vapeur on consommait 700 kilogr. de houille en quatorze heures, et seulement 550 kilog. quand on employait de la vapeur.

Depuis, les détenteurs de brevet pour l'injection de la vapeur sous la grille ont publié plusieurs résultats d'expériences faites dans différents lieux, d'où il semblait résulter de ce nouveau mode de combustion une économie de combustible qui s'élevait de 21 à 30 pour 100. Ces résultats paraissaient fort extraordinaires, car l'introduction de la vapeur pouvait faire produire de la flamme à des combustibles qui brûlent ordinaire-



ment sans flamme; mais comme la quantité de chaleur produite par la formation de l'eau est égale à celle qui est absorbée par sa décomposition, il ne pouvait pas y avoir accroissement de chaleur.

Aussi des expériences faites avec tout le soin convenable par une commission de l'Institut, et d'autres faites à la manufacture des tabacs de Paris, ont-elles nettement démontré que l'introduction de la vapeur n'a aucune influence sur la quantité de chaleur développée.

649. *Injection d'air sous la grille.* Depuis, on a imaginé de fermer les orifices du cendrier et d'injecter sous la grille un courant d'air froid. On a publié qu'on obtenait ainsi une très-grande économie de combustible. On avait même monté un grand atelier pour construire ces appareils, mais l'entreprise n'a pas réussi. On ne comprend pas en effet comment ces courants forcés auraient pu augmenter la puissance calorifique du combustible. Cependant cette disposition pourrait être utile pour les fourneaux mal construits, qui ont un trop faible tirage, provenant ou d'une trop grande étendue des surfaces de chauffe, ou d'une trop petite section des carneaux et de la cheminée; mais elle serait sans influence dans les fourneaux bien disposés, comme l'expérience le démontre.

650. *Injection de vapeur et d'air.* On a enfin imaginé d'introduire dans le cendrier, hermétiquement fermé en avant, un courant de vapeur par un tuyau placé au centre d'un tube s'ouvrant dans le cendrier et à l'extérieur. Le courant de vapeur produit un appel d'air et une pression dans le cendrier, lorsque le jet remplit tout le tuyau. Cette disposition est bonne quand les cheminées n'ont qu'un faible tirage ou quand on refroidit complètement la fumée, et peut remplacer le tirage par une machine. Dans certaines circonstances elle serait même plus commode qu'un ventilateur, mais elle n'est pas plus efficace pour augmenter l'effet utile.

#### § 6. — FOYERS A HOUILLES SÈCHES ET A ANTHRACITES.

651. Les houilles sèches et les anthracites peuvent brûler sur grilles, mais dans des conditions particulières qui dépendent de la manière dont ces combustibles se comportent au feu. Pour tous, l'épaisseur de la couche de combustible doit être considérable, afin que le foyer soit à une haute température, et qu'il ne laisse échapper qu'un petit volume d'air sans altération.

652. Les houilles sèches de Fresnes, de Vieux-Condé et des environs de Valenciennes, sont voisines de l'anthracite, mais elles brûlent plus facilement. Cependant jusqu'ici on ne les a employées que pour la cuisson de la chaux, de la brique, et dans les poêles. Ces houilles brûlent cependant très-bien sur grilles, mais on ne savait pas les employer. Encore maintenant on fait venir à Fresnes des houilles grasses d'Anzin pour les chaudières des machines d'extraction.

C'est M. Évrard, ingénieur civil à Valenciennes, qui paraît avoir réussi le premier à employer les houilles sèches pour l'alimentation des foyers de chaudières à vapeur. L'expérience a été faite sur une chaudière à vapeur de la force de vingt chevaux, destinée à l'exploitation d'une mine de houille sèche des environs de Valenciennes. La grille, qui avait été disposée pour brûler de la houille grasse, a été abaissée de manière à se trouver à 0<sup>m</sup>,50 des bouilleurs, et on lui a donné 1 mètre sur 1<sup>m</sup>,40. Ensuite on a percé, dans une des parois latérales du cendrier, un orifice rectangulaire de 0<sup>m</sup>,15 de hauteur, et dont la largeur pouvait être augmentée ou diminuée à volonté au moyen de deux volets à coulisse; au centre de cet orifice, on a introduit un tuyau à vapeur de 0<sup>m</sup>,015 de diamètre, de 3 mètres de longueur, terminé par une tuyère de 0<sup>m</sup>,005 de diamètre (fig. 5 et 6, pl. 13). En donnant à la couche de combustible une épaisseur de 0<sup>m</sup>,20, en fermant la porte du cendrier, et en réglant convenablement l'orifice d'appel et le jet de vapeur, la combustion s'est très-bien soutenue, et le foyer est resté au rouge blanc. La vapeur se trouvait dans la chaudière à deux atmosphères et demie. On brûlait par heure 55 kilogr. de houille, et, par conséquent, 0<sup>k</sup>,4 par décimètre carré, et par heure. La quantité de vapeur consommée a été estimée à  $\frac{1}{20}$  de celle qui était produite. L'effet utile n'a pas pu être apprécié, à cause de l'irrégularité du travail; mais il n'est pas douteux que quand l'épaisseur du combustible sera réglée de manière à ne point laisser dégager d'oxyde de carbone, et le moins d'oxygène libre possible, et que l'étendue de la surface de chauffe de la chaudière sera suffisante, on obtiendra de très-bons résultats.

Depuis, on a reconnu qu'une cheminée d'une section suffisante produit le même effet que le jet de vapeur. La chaudière dont nous venons de parler fonctionnant régulièrement depuis longtemps, on peut regarder comme bien constaté, que les houilles sèches dont il est question



peuvent très-bien brûler sur grilles, à la condition de donner aux grilles une grande surface, à peu près deux fois plus grande que celle des grilles à houilles ordinaires, d'employer des cheminées à grands tirages, et de donner à la couche de houille une épaisseur de 0,20.

653. Je regarde comme très-probable, que quand ces houilles seront mieux appréciées, qu'on connaîtra mieux les dispositions les plus convenables des foyers dans lesquels elles doivent être brûlées, elles seront préférées aux houilles grasses dans un grand nombre de cas, parce que les foyers à houilles sèches sont plus faciles à diriger que ceux à houilles grasses, et que les houilles sèches peuvent produire un plus grand effet utile sous le même poids que les autres houilles. Les foyers sont plus faciles à diriger, parce que l'épaisseur de la couche de combustible étant considérable, une petite variation d'épaisseur est sans influence, tandis qu'elle est très-grande dans les foyers à houilles qui produisent de la flamme. L'effet utile peut être plus grand, parce que les houilles sèches ne produisent point de carbures d'hydrogène, et qu'en donnant à la couche de combustible l'épaisseur convenable, on peut ne laisser échapper du foyer qu'une très-petite quantité d'oxygène libre.

654. Certains anthracites se comportent comme les houilles sèches dont nous venons de parler; mais la plupart sont d'une combustion plus difficile; ils se délitent sur la grille, et ne peuvent pas être remués, car ils se réduiraient en poussière qui obstruerait la grille ou passerait à travers les intervalles des barreaux; en outre, l'ouverture de la porte, et l'introduction du combustible froid, diminuent beaucoup l'activité de la combustion, et peuvent éteindre le foyer.

655. Lorsque les anthracites ne produisent pas de scories (mâchefer), et que les résidus sont puivérulents, on peut les brûler sur grille comme les houilles sèches, dont nous avons parlé d'abord, en dégageant, de temps en temps, les cendres qui s'accumulent sur la grille, au moyen d'un crochet qu'on introduit par le cendrier entre les barreaux. Mais les barreaux de la grille doivent être minces et très-serrés, et l'épaisseur de la couche de combustible considérable.

656. Lorsque les anthracites produisent, outre les cendres, des scories qui ne peuvent pas passer à travers la grille, il faut la nettoyer de temps en temps, mais seulement en partie, pour qu'en rechargeant la grille le combustible puisse s'allumer.

657. Si le combustible ne produisait que des scories, il faudrait dégager la grille à des intervalles plus ou moins rapprochés; et alors il serait convenable, si le travail ne pouvait pas éprouver d'intermittence, d'employer deux foyers qui seraient nettoyés alternativement.

658. Lorsque l'anhracite brûle difficilement, et que l'on peut ne pas employer la chaleur rayonnante du combustible, il serait avantageux de couvrir le foyer d'une voûte, qui élèverait la température du foyer et favoriserait la combustion.

659. Enfin, dans le cas où le combustible serait en poudre, on ne pourrait le brûler qu'en le mettant en briquettes, après en avoir fait une pâte avec de l'argile.

660. Dans tous les cas, il sera indispensable de déterminer par des analyses de l'air brûlé, quelle doit être l'épaisseur de la couche de combustible, pour qu'il ne se forme point d'oxyde de carbone, et qu'il s'échappe le moins possible d'air sans altération.

661. Pour les anhracites qui donnent peu de résidus et qui se délitent dans le foyer, comme ceux du pays de Galles et d'Amérique, M. Player vient d'imaginer une disposition de foyer qui a parfaitement réussi. Le foyer de M. Player se compose d'une grille à barreaux étroits, au-dessus de laquelle se trouve un tube constamment rempli d'anhracite, qui, à partir de l'orifice inférieur, forme un talus qui s'étend jusqu'aux bords de la grille, de sorte que le combustible descend à mesure qu'il se consomme. Il n'y a point de porte à ouvrir et à fermer, par conséquent point de courant d'air froid sur le combustible, et l'anhracite étant échauffé progressivement à mesure qu'il descend, ne décrépité plus dans le foyer, et n'éteint plus celui qui est en ignition en le refroidissant. L'alimentation est régulière, et le chauffeur n'a d'autre travail à faire que de remplir de temps en temps la trémie qui surmonte le tube d'alimentation et de régler l'activité de la combustion par le registre de la cheminée. La figure 9 (pl. 13) représente cette disposition appliquée à une chaudière à vapeur à basse pression.

662. Une machine à vapeur a travaillé 72 heures consécutives avec un foyer à anhracite disposé comme nous venons de l'indiquer, sans qu'il ait été nécessaire de tisonner, de dégager la grille et de faire tomber les escarbilles. L'anhracite employé était menu sans être en poudre, et on le versait toutes les quatre heures dans la trémie. On avait placé de l'eau



dans le cendrier, pour obtenir un peu de flamme. On a établi, dans la même usine, cinq foyers de forgerons, disposés de la même manière, et un four destiné à fondre la fonte, qui tous ont donné de bons résultats. Depuis, on a appliqué la même disposition de foyers à des poêles et à des calorifères. Dans les foyers de forgerons, et les foyers à réverbère, le canal qui alimente le foyer de combustible, est placé latéralement. Dans les hauts fourneaux, à partir d'une certaine hauteur, il y a des cheminées latérales pour le dégagement des gaz, et on charge par le centre du gueulard. Le numéro 3 du *Technologiste* de 1839 contient des dessins microscopiques des différents appareils de M. Player.

663. Les figures 10 et 11 (pl. 13) représentent deux coupes de la chaudière d'une machine à vapeur pour bateau, de la force de 24 chevaux, à une échelle de  $\frac{1}{20}$ , construite par M. Manby. La grille a une surface égale aux  $\frac{5}{4}$  de celles qui sont ordinairement destinées à brûler le même poids de houille; le tube d'alimentation a une section égale à  $\frac{1}{4}$  de celle de la grille.

Nous rapporterons un extrait d'un rapport de MM. J. Parkes et C. Manby, sur la chaudière du bateau à vapeur l'*Anthracite*, renfermant un foyer à anthracite. (Le *Technologiste*, tome I<sup>er</sup>, page 403.)

« D'abord, il est nécessaire de faire connaître que cette chaudière était disposée peu favorablement pour développer tout l'effet utile qu'on peut obtenir d'un combustible quelconque, attendu que ses dimensions étaient beaucoup trop restreintes, et avaient été établies pour s'accommoder à la grandeur du bâtiment. Nos expériences sur les poids relatifs de l'eau convertie en vapeur, avec des combustions plus ou moins vives, ont en conséquence été limitées par le faible tirage de la cheminée, et par la construction tubulaire de la chaudière. Néanmoins nous avons obtenu des résultats satisfaisants sous plusieurs points de vue, et qui fourniront quelques données utiles, pour établir sur de meilleures proportions les fourneaux des chaudières, et pour déterminer le mode le plus avantageux de construction des générateurs des bâtiments à vapeur, où l'on voudra faire usage de ce combustible. Les expériences qui suivent suffiront pour faire ressortir le pouvoir calorifique de l'anthracite, et en même temps les défauts de la chaudière sur laquelle on a opéré :

| NUMÉROS<br>des expériences. | COMBUSTIBLE<br>brûlé<br>par mètre carré de grille<br>et par heure. | EAU A 100°<br>évaporée par heure. | EAU A 100°<br>évaporée par 1 kilogramme<br>d'anthracite. |
|-----------------------------|--|-----------------------------------|--|
|                             | kilog.   | kilog.                            | kilog.   |
| 1                           | 75   | 800                               | 6,50   |
| 2                           | 64   | 1015                              | 8,25   |
| 3                           | 16   | 378                               | 12,27  |
| 4                           | 14,80  | 393                               | 13,48  |

« L'eau a été mesurée avec soin, au moyen d'un réservoir qui la jaugeait avant de la verser dans la chaudière, et on a noté chaque fois la température de cette eau d'alimentation, température qui a varié dans les différents jours de l'expérience, mais qui, par les calculs, a été ramenée au cas où cette eau d'alimentation aurait été à 100° centigrades, ou au point d'ébullition. Cette précaution de ramener l'eau à une température uniforme nous a paru nécessaire pour comparer avec exactitude le travail fait par l'anthracite avec celui que fournissent des expériences faites sur des houilles bitumineuses, et avec d'autres chaudières où l'eau d'alimentation a été constamment ramenée de même à la température fixe de 100°.

« Avant d'établir une comparaison entre nos expériences et celles qui ont eu lieu sur les houilles bitumineuses, nous ferons remarquer que la deuxième expérience est celle où la combustion et l'évaporation sont nécessaires pour faire marcher la machine du bâtiment. Un essai fait en mélangeant du coke fort de fonderie, provenant de la houille de Pontop, a donné les mêmes résultats, mais avec le désavantage commun à l'emploi du coke en général, quand on le fait brûler rapidement, savoir, de former en grande abondance des escarbilles sur la grille. Sous tous les autres rapports, ce coke s'est montré très-efficace; il a bien descendu avec l'anthracite dans les tuyaux d'alimentation de M. Player, et s'est étendu bien uniformément sur la grille.

« Après nous être assurés que cette chaudière était insuffisante dans ses dimensions pour absorber toute la chaleur du foyer, tandis que la machine était en fonction, nous avons cherché à obtenir par simple



évaporation des résultats propres à déterminer le pouvoir calorifique réel de l'anthracite. Nous croyons avoir, jusqu'à un certain point, atteint ce but, par l'application d'un registre qui, en diminuant à volonté le courant d'air dans le foyer et le tuyau de la cheminée, a permis de conserver plus longtemps autour de la chaudière la chaleur produite. En comparant la première avec la quatrième expérience, on verra que plus de la moitié de la chaleur était générée en pure perte dans le premier cas, et qu'elle passait par les tubes de la chaudière sans produire aucun effet, lorsque la cheminée était entièrement ouverte, tandis qu'il en a été tout autrement dans le second cas, où les deux tiers de la section de la cheminée étaient fermés.

« Un coup d'œil sur le tableau précédent fait donc voir la perte énorme qui a lieu par une combustion rapide, lorsque la chaudière est d'une trop faible longueur, et lorsque, comme dans le cas actuel, les tubes qui conduisent la chaleur de la caisse à feu dans la cheminée, n'ont que 1 mètre de longueur, et que l'espace total parcouru par la chaleur ne s'élève pas au delà de 2 mètres.

« Par suite du séjour peu prolongé de la chaleur autour de la chaudière, dans la première et dans la seconde expérience, les produits de la combustion entraînent dans la cheminée à une température capable de fondre le zinc. Un thermomètre à mercure, introduit de temps à autre dans la cheminée au-dessous du registre, n'est descendu qu'une seule fois à 232°; les produits qui s'échappaient ordinairement étaient au-dessus du point d'ébullition du mercure, même dans les expériences troisième et quatrième.

« En comparant la moyenne des expériences dans lesquelles le résultat est le plus élevé, avec celle des expériences où il l'est le moins, on voit qu'en augmentant la rapidité du tirage dans le rapport de 4,37 à 1, l'évaporation, dans des temps égaux, ne s'est accrue que dans le rapport de 2,50 à 1, tandis que le pouvoir évaporant de poids égaux de combustible a diminué dans le rapport de 1,74 à 1.

« Des expériences faites sur les chaudières des machines du Cornwall avec de la houille du pays de Galles, démontrent qu'avec une consommation semblable à celle de notre expérience n° 4, c'est-à-dire 14 : 80 kilogrammes par mètre carré de grille par heure, le produit de l'évaporation a été de 11,89 litres d'eau à 100° pour 1 kilogramme de combus-

tible. Par conséquent, pour une même consommation, l'anhracite surpasse la houille du pays de Galles dans le rapport de 13,48 à 11,89, ou de 13 pour 100. Mais les aires relatives des surfaces qui doivent absorber la chaleur, la durée du contact de cette chaleur sur ces surfaces, et les conditions de rayonnement des parties extérieures dans les chaudières respectives, circonstances qui toutes, comme on sait, ont la plus grande influence sur la réalisation d'un grand effet utile; tout enfin est tellement en faveur des chaudières du Cornwall, quand on vient à les comparer avec celle du bâtiment l'*Anthracite*, qu'on est autorisé à conclure que si nos expériences eussent été faites dans des circonstances aussi favorables que celles propres aux chaudières du Cornwall, les résultats eussent été considérablement plus élevés que ceux que nous avons obtenus.

« Ce fait sera d'ailleurs évident, en comparant les chaudières qui ont produit ces effets relatifs. Les chaudières du Cornwall présentaient une surface de chauffe de 89,18 mètres carrés, et celle du bateau à vapeur l'*Anthracite* de 31,60 pour recevoir en temps égaux la chaleur générée par des poids égaux de houille dans un cas, et d'anhracite dans l'autre; c'est-à-dire qu'il y avait en faveur des premières le rapport de 2,44 à 1. La rapidité de la combustion, et par conséquent celle du courant de chaleur dégagée sur les grilles, étaient égales. La distance parcourue ou le circuit fait par la chaleur, après avoir abandonné la grille, était de 51 mètres dans les chaudières du Cornwall, et de 1 mètre dans la chaudière de l'*Anthracite*; le temps de la durée du contact de la chaleur sur des surfaces égales, deux fois et demie plus considérable dans les premières que dans la seconde. Enfin, les chaudières du Cornwall étaient revêtues d'une bonne chemise de matières non conductrices, tandis que celle de l'*Anthracite* n'avait aucune enveloppe protectrice contre les pertes par rayonnement.

« En prenant en considération ces différences, et leur influence sur l'économie de l'évaporation, nous croyons que, toutes circonstances égales, l'anhracite surpasse de beaucoup toutes les houilles bitumineuses en valeur calorifique, puisqu'il a déjà présenté, dans des circonstances comparativement défavorables, un résultat de 13 pour 100 au-dessus de celui qu'on a considéré jusqu'ici comme le plus élevé de tous ceux obtenus.

« Avec les houilles de New-Castle et du Staffordshire, le pouvoir



évaporant le plus élevé qu'on ait obtenu est celui observé à Warwick, de 10,32 kilog. d'eau à 100° pour 1 kilog. de houille consommé, et là les chaudières sont conduites avec assez de soin pour qu'on puisse considérer ce résultat, avec le même combustible, comme à peu près impossible à dépasser dans la pratique ordinaire. Or, notre expérience n° 4 avec l'anhracite, malgré tous les désavantages dont il a été parlé plus haut, a surpassé le produit de Warwick de 30 pour cent.

« La construction particulière de la chaudière du bâtiment l'*Anthracite* s'est opposée à ce que nous pussions entreprendre aucune expérience avec des charbons bitumineux, parce que les tubes s'engorgeaient de suie et que le combustible se collait et s'agglomérait de telle sorte, que la colonne qui remplissait le tube d'alimentation ne descendait plus et ne chargeait plus la grille où elle ne pouvait parvenir. Néanmoins, nous nous sommes assurés, dans un petit voyage de courte durée, et en alimentant comme à l'ordinaire par la porte du foyer, que la houille de Pontop produisait assez de vapeur pour le service des machines.

« Quant au mode adopté par M. Player pour alimenter les grilles avec de l'anhracite, nous dirons qu'il ne laisse rien à désirer, qu'il dispense de tout moyen mécanique et du travail du tisonnage si pénible sur les bâtiments à vapeur, et prévient des pertes et des accidents provenant de l'alimentation à la pelle par la porte du foyer. Dans aucune de nos expériences, excepté dans le cas où l'on a cherché à se procurer une combustion excessivement rapide, il n'a été nécessaire de toucher au feu ou de soulever les barreaux de la grille pendant toute la journée. Il ne s'est pas formé de suie par la combustion même la plus vive, et la quantité de cendres a été très-faible.

« Ce mode d'alimentation du foyer jouit encore d'un avantage très-précieux dans la pratique, savoir, une uniformité dans la production de la vapeur que rien ne saurait égaler. Avec le registre, notre réservoir de 200 litres était vide dans des temps si près d'être égaux, qu'ils ne variaient pas d'une seule minute sur plusieurs heures, quand on ne touchait pas à ce registre, et le combustible descendait avec une extrême précision proportionnellement à la rapidité de la combustion qui avait été réglée.

« Quant aux avantages qui résultent de ce que l'anhracite ne produit ni fumée, ni effluve désagréable, qu'il ne couvre pas le pont de particules

de fumée, ils sont trop évidents pour qu'il soit nécessaire d'insister ici sur leur importance.»

664. Les résultats obtenus dans les expériences dont nous venons de parler, relativement à la quantité d'eau vaporisée (page 270), sont certainement beaucoup trop forts, car ils dépassent celui qui proviendrait de la puissance calorifique du combustible, et cependant on n'a pas tenu compte de la quantité de chaleur perdue par la surface extérieure de la chaudière, ni de celle que l'air brûlé entraînait avec lui en pénétrant dans la cheminée. L'accroissement d'effet obtenu lorsque la consommation de combustible était réduite à 14<sup>k</sup>,80 par heure et par mètre carré de grille, que les auteurs du mémoire attribuent à la surface de chauffe, provient beaucoup plus de ce que, pour cette faible consommation, une moindre quantité d'air échappait à la combustion. .

665. Je regarde les foyers de M. Pleyer comme bien préférables à tous les autres pour les combustibles qui brûlent sans flamme, mais il faudrait déterminer, pour une consommation de combustible donnée, quelles devraient être la surface de la grille et l'épaisseur de la couche de combustible, pour qu'il ne se formât point d'oxyde de carbone et pour qu'une faible quantité d'air échappât à la combustion.

§ 7. — FOYERS DANS LESQUELS LA COMBUSTION EST PRODUITE PAR DES COURANTS D'AIR A GRANDE VITESSE.

666. Dans les foyers dont il est question, le mouvement de l'air est produit par de larges et hautes cheminées, ou par des machines. Ces foyers ont toujours pour objet de produire, au milieu de la masse de combustible, une température très-élevée; ils sont toujours alimentés par des combustibles qui brûlent sans flamme, et la couche de combustible a toujours une grande épaisseur.

667. Pour comprendre l'influence des courants d'air à grande vitesse, et celle d'une grande épaisseur de la couche de combustible, examinons d'abord ce qui se passe dans un foyer ordinaire. Supposons la grille couverte d'un combustible qui brûle sans flamme, et le tirage de la cheminée tel que la moitié de l'air échappe à la combustion; c'est, comme on sait, ce qui arrive dans les foyers ordinaires. S'il n'y avait pas de chaleur rayonnée, toute la chaleur se dissiperait par le courant d'air, le com-



bustible et l'air seraient à des températures peu différentes, qui, pour le charbon de bois et le coke, s'éloigneraient peu de 1300°. Mais comme il y a toujours de la chaleur perdue par rayonnement, la température du foyer et de l'air sera beaucoup moins élevée. Supposons maintenant qu'on emploie un foyer à petite grille environné de matières non conductrices et une grande hauteur de combustible, la perte de chaleur par rayonnement sera très-petite; et si l'épaisseur du combustible est telle que l'air, en arrivant à la partie supérieure de la masse en ignition, soit complètement dépouillé d'oxygène, il est facile de voir que la température du foyer et de l'air sera sensiblement double de celle de l'air et du combustible dans les foyers ordinaires, et qu'elle ne devra pas s'éloigner beaucoup de 2000°.

668. Mais on n'obtient jamais ainsi une très-haute température dans un foyer qu'en produisant une certaine quantité d'oxyde de carbone, et par conséquent qu'en utilisant très-mal le combustible consommé, d'autant plus que toujours l'air brûlé est abandonné dans la cheminée à une très-haute température.

#### § 8. — FOYERS A AIR CHAUD.

669. La substitution de l'air chaud à l'air froid dans les hauts fourneaux et dans les forges, a produit partout une très-grande économie de combustible, et en même temps un grand accroissement dans la production journalière. On a d'abord expliqué cet effet par l'élévation de température qui résultait de l'emploi de l'air chaud. M. Berthier en a donné une autre raison généralement admise : elle repose sur l'hypothèse bien probable que l'affinité de l'air chaud pour le charbon est beaucoup plus grande que celle de l'air froid, et que, lorsqu'on emploie de l'air chaud, ce gaz se trouve entièrement dépouillé d'oxygène dans un très-court chemin. D'après cette hypothèse, la combustion se trouve à peu près concentrée dans le creuset; la température y est alors beaucoup plus élevée que par l'emploi de l'air froid, et par suite moins élevée au delà; circonstances qui toutes deux sont favorables à l'économie du combustible; car la haute température qui, dans l'emploi de l'air froid, se produit au-dessus du creuset par la continuité de la combustion, paraît être sans utilité. Cette explication se trouve appuyée par ce

fait bien constaté, que la température de l'air chaud doit être d'autant moins élevée que le combustible a plus d'affinité pour l'oxygène. Ainsi, 150 à 250° suffisent pour les fourneaux chauffés au charbon de bois, tandis qu'il en faut plus de 300 pour ceux qui sont chauffés au coke, et il est probable que l'anhracite exigerait une température encore plus élevée.

670. On ne sait pas quelle serait l'influence de l'air chaud dans les foyers ordinaires, du moins avec injection sous la grille, aucune expérience n'ayant été tentée à ce sujet. D'ailleurs les résultats, fussent-ils aussi avantageux qu'on pourrait l'espérer, ce mode d'alimentation ne devrait pas être employé, à cause de la prompte altération qu'il ferait éprouver aux grilles. Mais l'injection de l'air chaud au delà du foyer dans une direction qui ne serait pas celle de la fumée, aurait certainement l'avantage de brûler les gaz combustibles par son action directe et par le mélange que le mouvement de l'air injecté produirait dans les veines d'air et des gaz émanés du foyer.

§ 9. — FOYERS A GOUDRON.

671. Depuis quelque temps, les fabricants du gaz destiné à l'éclairage ont cherché à employer comme combustible le goudron qui se produit dans la distillation de la houille. On imagina d'abord de verser le goudron sur du coke placé sur la grille (fig. 2, pl. 14). Mais une grande partie du goudron était volatilisée sans être brûlée; et comme la température du foyer était très-grande, la partie de la cornue qui était au-dessus de la grille était promptement altérée. On a alors employé les deux dispositions suivantes, qui toutes deux ont donné de bons résultats. Dans certaines usines, on a muré l'orifice du cendrier, on a enlevé la grille, et on a rempli le cendrier de coke de manière qu'il s'élevât à une hauteur un peu plus petite que l'emplacement de la grille, et on a fait tomber le goudron en filet très-fin sur le coke. L'air nécessaire à la combustion pénètre par un orifice au centre duquel passe le tuyau à goudron (fig. 3, pl. 14). Par cette disposition, 100 kilog. de goudron produisent l'effet de 3 hectolitres combles de coke, ou de 100 kilog. de coke.

672. Dans d'autres usines, on brûle le goudron dans une cuiller de 10 à 15 centimètres de diamètre (fig. 3); le courant d'air s'introduit,



comme dans la première disposition, par une ouverture qui donne passage au tuyau à goudron. En réglant convenablement l'orifice d'entrée de l'air, on parvient à brûler le goudron assez complètement, et l'effet produit est à peu près le même que dans l'appareil précédent.

Il est très-probable que, dans ces deux dispositions, on ne brûle la fumée qu'à la condition de faire passer sur le goudron un grand excès d'air, et qu'on obtiendrait un effet utile beaucoup plus grand si on parvenait à diminuer cet excès.

673. On avait proposé de brûler le goudron dans des appareils analogues aux becs de lampes, en maintenant le goudron à la même hauteur au moyen d'un réservoir à niveau constant (fig. 4, pl. 14); mais les tubes, nécessairement très-étroits, auraient probablement été obstrués, et je doute que, sans un courant d'air forcé, on eût réussi.

674. Je pense que le meilleur moyen de brûler le goudron consisterait à le faire arriver dans un godet en fonte traversé par un large tube vertical du même métal fermé à la partie supérieure, communiquant par la partie inférieure avec une machine soufflante, et percé latéralement d'un grand nombre de petits orifices dirigés horizontalement. L'air n'étant admis que par le tube, sortirait chaud et par des jets horizontaux qui, traversant la fumée, la brûleraient facilement et avec beaucoup moins de dépense d'air que par les procédés employés. L'appareil placé dans le foyer s'altérerait peu, à cause du courant d'air qui refroidirait constamment le métal; d'ailleurs le prix en serait si peu élevé, qu'un remplacement même assez fréquent serait sans inconvénient. A la vérité, cet appareil exigerait l'emploi d'un ventilateur, et par conséquent d'une force motrice, mais celle-ci serait peu considérable, même pour une très-grande usine; d'ailleurs, il y a tant de chaleur perdue dans la fabrication du gaz, qu'il serait très-facile, en utilisant une partie de cette chaleur, d'alimenter de vapeur la petite machine qui ferait mouvoir le ventilateur.

#### § 10. — FOYERS A GAZ.

675. Les gaz qui s'échappent par le gueulard des hauts fourneaux ayant traversé une grande épaisseur de combustible, renferment une très-grande quantité d'oxyde de carbone qui, en se transformant en

acide carbonique, peut développer une grande quantité de chaleur (271).

676. M. Haubertot, habile maître de forge français, est le premier qui ait essayé d'utiliser les gaz combustibles qui s'échappent du gueulard des hauts fourneaux. En 1814, M. Berthier fit sentir toute l'importance de cette découverte. Depuis, ces gaz ont été employés successivement au grillage des minerais, à l'échauffement de l'air d'alimentation des hauts fourneaux, à la formation de la vapeur nécessaire aux machines soufflantes, à la dessiccation du bois, à la fabrication du charbon roux, et enfin, récemment, au chauffage des fours à pudler. Les applications les plus importantes, celles du chauffage des chaudières à vapeur et des fours à pudler, ont été faites par MM. Thomas et Laurens.

677. Pour recueillir les gaz qui se dégagent des hauts fourneaux, on place dans le gueulard un cône en fonte ouvert par les deux bouts, et garni à la partie supérieure d'un rebord qui s'appuie sur ses parois; c'est dans cette trémie qu'on verse les charges de combustible et de minerai. La prise de gaz a lieu dans la paroi supérieure du fourneau, derrière la trémie; les gaz s'échappent librement de cet espace avec une certaine vitesse.

A l'origine, on s'est borné à faire arriver les gaz dans un canal où l'air avait un libre accès; mais beaucoup de gaz échappait à la combustion.

678. Plus tard, MM. Thomas et Laurens employèrent les dispositions représentées par les figures 6, 7 et 8 (pl. 14). La première représente une coupe longitudinale de l'appareil; la seconde sa projection horizontale, et la dernière une coupe horizontale par le plan *mn* (fig. 6). L'appareil de combustion se compose d'une caisse rectangulaire en fonte ABCD, dont la face supérieure MN, inclinée, est percée d'un grand nombre de petits orifices circulaires. Les rangées de trous sont séparées les unes des autres par des plaques de fonte qui forment des espaces fermés à la partie inférieure, et ouverts en dessus et en avant, par lesquels l'air extérieur passe. *ab* est une grille sur laquelle on brûle quelques copeaux pour allumer les gaz. Par cette disposition, les gaz et l'air arrivent dans le foyer en lames minces alternatives. On obtient ainsi de meilleurs résultats que par l'ancienne méthode; mais il y a encore une grande quantité d'air qui échappe à la combustion.

679. Les mêmes ingénieurs ont reconnu depuis que, quelle que soit



la disposition de l'appareil, on n'obtient jamais une combustion complète par le seul effet du tirage d'une cheminée, parce qu'il tend à donner la même vitesse à l'air et aux gaz combustibles; qu'il faut nécessairement injecter directement le gaz dans l'air, ou l'air dans le gaz; qu'une pression de 10 à 15 centimètres d'eau suffit; que le volume d'air nécessaire pour brûler complètement les gaz d'un haut fourneau est à peu près égal aux  $\frac{4}{5}$  du volume d'air introduit dans le haut fourneau; et qu'enfin on obtient de plus grands effets en chauffant préalablement l'air ou les gaz, ou tous les deux.

680. Les figures 9 et 10 (pl. 14) représentent le nouveau foyer à gaz employé par MM. Thomas et Laurens pour le chauffage des fours à pudler, au moyen des gaz qui se dégagent des hauts fourneaux. La première est une coupe verticale de l'appareil; la seconde une coupe horizontale suivant *ab* (fig. 9). L'air extérieur est poussé par une machine soufflante, et parcourt des tuyaux de fonte chauffés par l'air brûlé à sa sortie du fourneau; il arrive par le tuyau AB dans la caisse rectangulaire en fonte BC, d'où il s'échappe par un grand nombre de petits tubes *ab*, *ab*. Le gaz du haut fourneau, après s'être également échauffé, arrive dans une caisse en fonte CD, placée au-dessus de la première, par un tuyau MN; le couvercle de cette caisse est garni d'un grand nombre de tuyaux en fonte *mn* concentriques aux tubes à air, mais dans lesquels les extrémités de ces derniers ne s'élèvent que jusqu'à une certaine hauteur. La pression de l'air est de 15 à 20 centimètres d'eau, celle des gaz combustibles de 5 à 6; la température de l'air est de 400 à 500°, celle des gaz de 200 à 300. Par cette disposition, on obtient une très-bonne combustion, on règle avec une extrême facilité les volumes relatifs d'air et de gaz qui arrivent dans les becs, et on rend à volonté les flammes oxydantes ou désoxydantes. Nous reviendrons plus tard sur ces appareils, en parlant du chauffage des corps solides.

#### § 11. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES FOYERS.

681. Les foyers à grilles fixes horizontales, ou peu inclinées, avec une alimentation intermittente, laissent peu à désirer pour les combustibles qui brûlent sans flamme, tels que le charbon de bois, le coke, les houilles sèches et certains anthracites; pourvu toutefois que

l'épaisseur de la couche de combustible soit convenable. On parviendrait même facilement, par quelques analyses de l'air brûlé, à déterminer l'épaisseur que doit avoir la couche de combustible, pour qu'il ne se forme point d'oxyde de carbone, et pour qu'il ne se dégage que peu d'air sans altération. Mais, pour produire un bon effet utile, il faut que ces foyers brûlent toujours la même quantité de combustible, car des variations dans la consommation, produites par les mouvements du registre, et qui ne peuvent pas être accompagnées des variations qui seraient nécessaires dans l'épaisseur de la couche de combustible, occasionnent toujours ou le passage d'un plus grand volume d'air inutile à la combustion, ou la formation d'une certaine quantité d'oxyde de carbone.

682. Pour les houilles sèches, et les anthracites qui laissent peu de résidus, les foyers à alimentation continue sont aussi parfaits qu'on peut le désirer, quand l'épaisseur de la couche de combustible est convenable.

683. Les foyers à flamme renversée pour le bois et la tourbe, sont faciles à établir et à diriger, ils produisent une bonne combustion et ne laissent point dégager de fumée; mais il est probable qu'ils appellent un grand excès d'air, qu'il est impossible de modérer. Il est probable aussi que, dans ces foyers comme dans les précédents, les variations de tirage, produits par le registre, doivent occasionner des pertes d'effet utile par les mêmes causes, et qu'en définitive ils ne doivent pas avoir un grand avantage sur les foyers à grille, dans lesquels on peut faire varier à volonté la masse de combustible en ignition.

684. Pour les houilles grasses, ou du moins pour les houilles flam-bantes ordinaires, les foyers à grilles fixes et à alimentation intermittente, malgré leurs inconvénients, doivent être préférés aux autres dispositions qui ont presque toutes des inconvénients plus graves que ceux qu'elles évitent. Mais pour ces combustibles, encore moins que pour les autres, on n'obtiendra de bons effets utiles qu'autant que le travail sera uniforme et que la surface de la grille, le tirage et l'épaisseur du combustible seront convenables, et il n'est pas douteux que toutes ces circonstances doivent varier avec la nature de la houille et la grosseur des morceaux de combustible, et qu'elles ne peuvent être déterminées que par des expériences directes.



685. Ces essais seraient très-importants, surtout dans les grands systèmes de chaudières à vapeur; car je suis convaincu que, dans un grand nombre, on perd plus du tiers de la chaleur produite, principalement par l'introduction d'un trop grand excès d'air. C'est évidemment à cette circonstance qu'il faut attribuer ce fait singulier, observé par un grand nombre d'ingénieurs, que, dans certaines chaudières à vapeur, l'effet produit par les surfaces qui ne sont chauffées que par le contact de l'air brûlé, n'est qu'une très-petite partie de celui qui est produit par les surfaces chauffées par rayonnement.

Mais pour les petits appareils, et pour ceux dans lesquels le chauffage n'est pas uniforme, on doit s'en tenir aux dimensions ordinaires des foyers.

686. Il est important de remarquer, comme nous l'avons déjà dit, que les foyers les mieux disposés sous tous les rapports pour produire le meilleur effet utile, perdent complètement leurs avantages, quand on augmente ou quand on diminue la consommation de combustible. Ainsi, il n'y a réellement pas de bons foyers à corps solides, c'est-à-dire, de foyers dans lesquels on puisse régler facilement et immédiatement le volume d'air nécessaire à la combustion. Les foyers à gaz, disposés comme nous l'avons dit (680), jouissent seuls de cette propriété.

687. Les avantages de ces foyers, bien constatés dans le chauffage des fours à pudler, où l'on a employé les gaz qui sortent du gueulard des hauts fournaux, ont conduit MM. Thomas et Laurens à convertir d'abord les combustibles en oxyde de carbone, et à brûler ensuite ces gaz dans les appareils dont ils se sont servis pour brûler ceux qui se dégagent des hauts fournaux. Voici les dispositions auxquelles ils se sont arrêtés:

688. Quand le combustible n'est pas de nature à éprouver au feu de fusion pâteuse, il est placé dans un fourneau ayant la forme d'une tour circulaire, fermée à la partie supérieure par une trémie destinée à y verser le combustible. L'air est lancé dans le fourneau par un ou plusieurs jets de vapeur; des robinets permettent de régler les quantités relatives d'air et de vapeur. On trouve facilement par le calcul qu'en introduisant des poids d'air et de vapeur qui soient dans le rapport de 35 à 1, la chaleur développée par la formation de l'oxyde de carbone est suffisante pour décomposer l'eau et pour donner à tous les gaz la tempé-

rature de 500°. Du fourneau les gaz arrivent directement dans le foyer où ils sont brûlés, par le simple appel d'une cheminée; la quantité de vapeur à 5 atmosphères, qui est introduite avec l'air, étant suffisante pour produire dans les gaz, à la sortie du fourneau, la pression nécessaire à une bonne combustion. La trémie qui se trouve à la partie supérieure du fourneau est garnie de deux soupapes placées l'une au-dessus de l'autre, et qui sont destinées à intercepter toute communication entre l'intérieur du fourneau et l'air extérieur quand on fait tomber le combustible. Pour cela, on commence par remplir de combustible l'intervalle fermé par les deux soupapes; on chasse l'air de cet espace par un jet de vapeur, et en ouvrant la soupape inférieure on fait tomber la charge. Le fourneau doit avoir assez de hauteur pour que tout l'oxygène de l'air soit transformé en oxyde de carbone. A la partie inférieure du fourneau, se trouvent des ouvertures ordinairement fermées, qui servent à enlever de temps en temps les scories qui ont pu se former.

689. Cette disposition est applicable au bois, au charbon de bois, à la tourbe, au coke, aux houilles sèches et aux anthracites en fragments assez volumineux.

690. Pour les houilles sèches et les anthracites en poudre, MM. Thomas et Laurens se proposent de les mouler en briques en les mêlant avec de l'eau et un quinzième d'argile. Ces briquettes, séchées d'abord à l'air, et ensuite par un courant d'air chaud, se comporteront évidemment comme du coke; seulement, elles donneront lieu à des scories plus volumineuses, qu'il faudra enlever plus fréquemment du fourneau.

691. Pour les houilles grasses, qui s'agglomèrent fortement au feu, la disposition indiquée présenterait un grave inconvénient: la houille, à la partie supérieure du fourneau, formerait des masses compactes que l'air traverserait difficilement, et qui pourraient rester suspendues dans le fourneau. Cet inconvénient peut être évité de plusieurs manières: 1° en mélangeant les houilles grasses, dans certaines proportions, avec du coke ou des houilles sèches; 2° en employant des houilles grasses menues, dont on aurait préalablement formé des briquettes, en les mêlant avec une quantité convenable d'argile.

692. Enfin, les combustibles sulfureux sont mêlés avec de la chaux qui donne naissance à des sulfures qui passent dans les laitiers.

693. Si cette nouvelle manière de brûler les combustibles ne présente pas de difficultés imprévues, elle sera d'un grand avantage dans la métallurgie et dans un grand nombre d'industries, car elle permettra d'employer indistinctement tous les combustibles pour les opérations qui exigent de la flamme, une haute température, et des gaz non sulfureux. Elle offrira, en outre, le moyen d'utiliser une immense quantité de houilles sèches et d'antracites menus, sans usage à cause de leur état pulvérulent, et de tourbes et de combustibles fossiles de toute espèce, sans usage à cause de la nature ou de la grande quantité de matières étrangères qu'ils renferment. Avec ce mode de combustion, tous les combustibles auraient réellement la valeur que leur assignent les quantités de carbone et d'hydrogène en excès qu'ils contiennent.

---

## CHAPITRE VIII.

### TRANSMISSION DE LA CHALEUR.

---

694. Dans les chapitres qui précèdent nous avons examiné les différents modes de tirage et les différentes formes de foyers ; il nous reste, pour terminer les considérations générales qui doivent précéder l'examen détaillé des différents usages de la chaleur, à parler de la transmission de la chaleur, rayonnée par le foyer ou entraînée par le courant d'air, dans les corps qui doivent être échauffés.

695. Dans quelques cas, la chaleur de l'air brûlé est absorbée directement par le corps qui doit être échauffé, comme dans les fours à briques, à chaux, et dans les hauts fourneaux. Mais dans un grand nombre de cas, la chaleur ne peut être transmise au corps qu'on veut échauffer que par un corps intermédiaire ; c'est ce qui arrive pour le chauffage de l'air et des liquides, pour la formation de la vapeur. D'autres fois la chaleur passe dans un liquide ou dans de la vapeur, et de ces corps dans d'autres, ou directement, ou à travers des plaques métalliques.

696. Dans tous les cas, lorsqu'il n'y a pas mélange immédiat du corps qui transmet la chaleur et du corps échauffé, le premier s'écoule d'une manière continue ; il est alors important pour l'économie du combustible que l'autre corps marche aussi d'une manière continue, mais en sens contraire ; car il est évident que si les chemins parcourus sont assez longs, il pourra y avoir échange complet de température ; le corps échauffant sortira à la température primitive du corps à échauffer, et ce dernier pourra avoir à sa sortie la température primitive du corps échauffant.

Cet échange complet ne peut presque jamais avoir lieu, parce qu'en



général il exigerait des surfaces de transmission trop étendues, et que toutes les fois que le corps échauffant est de l'air brûlé, il faut qu'il conserve à sa sortie du fourneau une température assez élevée pour produire le tirage nécessaire à la combustion dans le foyer, à moins cependant que le tirage n'ait lieu par une action mécanique.

697. Dans le cas où l'échange complet ne peut pas avoir lieu, il est cependant encore avantageux de faire marcher les deux corps en sens contraire. En effet, par cette disposition, dans tous les points du trajet le corps échauffant est à une température plus élevée que le corps qui s'échauffe, et, par conséquent, il y a transmission de chaleur dans tout le trajet, et toute la surface de chauffe est utilisée. Mais il n'en est plus ainsi quand les deux corps marchent dans le même sens : d'abord, la différence de leurs températures est très-grande, mais elle diminue rapidement par le refroidissement de l'un et le réchauffement de l'autre, et aussitôt que l'équilibre de température est établi, il subsiste pendant tout le reste du chemin, quel qu'il soit d'ailleurs. Ainsi, d'une part, le corps à échauffer ne peut prendre qu'une température beaucoup plus basse que celle du corps échauffant, et au delà d'une certaine limite d'étendue la surface de chauffe est sans utilité.

698. Pour rendre ceci plus clair, supposons qu'il s'agisse de chauffer de l'air au moyen d'un tuyau horizontal parcouru par de la fumée. Supposons que l'air soit renfermé dans un canal enveloppant et qu'il se meuve en sens contraire; il est évident que si la vitesse des deux gaz est convenable et si les tuyaux ont une suffisante longueur, il y aura échange complet de température à la sortie, et que pour une plus petite longueur ou un accroissement de vitesse de l'air brûlé, ce dernier pourra sortir à une température assez élevée pour qu'en se dégageant par une cheminée verticale, sa force ascensionnelle soit suffisante pour déterminer son mouvement dans le canal. Mais si l'air se mouvait dans le même sens que la fumée, bientôt l'air aurait acquis la température de la fumée, refroidie par sa marche antérieure, et les deux gaz chemineraient ensuite en conservant la même température. Il en serait de même pour l'échauffement des gaz, des liquides et des solides, par des gaz ou des liquides chauds.

699. *Influence de la nature et de l'épaisseur des lames destinées à transmettre la chaleur d'un fluide dans un autre.* Lorsqu'une plaque

d'un corps homogène est terminée par deux surfaces planes parallèles, maintenues chacune à une température constante, on admet que la quantité de chaleur qui traverse la plaque est proportionnelle à la différence de température de ses faces, et en raison inverse de son épaisseur; mais ces deux lois n'ont point été vérifiées directement, et on ne connaît la valeur du coefficient de conductibilité pour aucun corps. Il était important cependant de faire cette vérification; car on conçoit facilement que, si les lois dont il est question étaient exactes, elles auraient la plus grande influence sur la forme et les dimensions des appareils destinés à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre à travers des enveloppes métalliques. J'ai fait à ce sujet un grand nombre d'expériences dont je rapporterai un résumé succinct.

Dans les traités de physique on indique un moyen très-simple, du moins en apparence, pour déterminer le nombre d'unités de chaleur qui passent à travers une lame métallique dont les deux surfaces sont maintenues à des températures constantes. Ce moyen consiste à prendre un vase métallique d'une épaisseur uniforme, qu'on environne de glace et dans lequel on fait arriver de la vapeur d'eau; de la quantité de glace fondue on déduit la quantité de chaleur qui a traversé le métal pendant la durée de l'expérience, pour une différence de température de  $100^{\circ}$ ; et de l'étendue et de l'épaisseur connues du métal on déduit la quantité de chaleur qui traverserait dans l'unité de temps une plaque ayant une étendue égale à l'unité de surface, une épaisseur égale à l'unité de longueur, et pour une différence de température égale à  $1^{\circ}$ .

700. J'ai rejeté l'emploi de la glace, comme offrant trop de causes d'erreur, et j'ai d'abord employé la disposition suivante. Deux vases concentriques en fer-blanc, l'un de  $0^m,15$ , l'autre de  $0^m,30$  de diamètre, étaient rétrécis par leur partie inférieure, de manière à n'avoir plus que  $0^m,08$  et  $0^m,12$  de diamètre; l'intervalle qui les séparait par le bas était fermé par un anneau en liège, et le vase intérieur était fermé par une plaque métallique circulaire de même diamètre, maintenue à distance du bord inférieur du vase par trois petites tiges soudées à sa circonférence et enfoncées dans le liège annulaire; du mastic de vitrier recouvrait l'intervalle, le contour de la plaque et la surface inférieure du liège; l'intervalle des deux cylindres était rempli de coton cardé. Le vase intérieur était rempli d'eau, dont on pouvait mêler les différentes



couches au moyen d'un agitateur muni d'un grand nombre d'ailes inclinées, et qui portait dans son axe un thermomètre à long réservoir : ce vase était fermé à la partie supérieure par quatre plaques de verre superposées. Au-dessous de la plaque métallique se trouvaient deux cylindres concentriques, l'un de 8, l'autre de 2 centimètres de diamètre ; ce dernier était terminé vers le haut par un entonnoir dont les bords n'atteignaient pas la circonférence du cylindre extérieur ; le tube extérieur était maintenu à distance de la plaque métallique par une bande de taffetas ciré fortement ficelée autour du tube et de la plaque. Par cette disposition, en faisant arriver de la vapeur par le tube central, elle s'épanouissait uniformément dans l'entonnoir au-dessous de la plaque, et sortait par l'intervalle compris entre les bords de l'entonnoir et le tube enveloppant. L'inclinaison de l'entonnoir, sa distance à la plaque et la distance de son contour au tube extérieur, avaient été calculées de manière que la veine de vapeur conservât toujours la même section.

Voici maintenant la marche qui a été suivie dans les observations. On faisait arriver un grand excès de vapeur dans le tube central placé au-dessous de la plaque ; on agitait régulièrement le liquide, et quand sa température était à peu près de 25°, on comptait, avec un chronomètre, les temps du réchauffement de 5 en 5°.

En admettant que les quantités de chaleur qui traversaient la plaque soient en raison directe de la différence de température de ses deux surfaces, l'accroissement de température que produirait pendant une seconde une différence de température de 1°, serait donné par la formule

$$a = \frac{m}{t} (\log A - \log T),$$

dans laquelle  $m$  représente le module,  $A$  et  $T$  les excès de température de la vapeur sur celle du liquide, au commencement et à la fin du temps  $t$ . Deux observations donnaient une valeur de  $a$ , et l'identité de ces valeurs déduites de différentes observations combinées deux à deux, si cette identité existait, établissait l'exactitude de la loi supposée.

Voici les résultats obtenus au moyen d'une plaque de cuivre rouge de 0<sup>m</sup>,011 d'épaisseur :

| TEMPÉRATURES<br>successives<br>du liquide. | ÉPOQUES<br>des<br>observations. | EXCÈS<br>de la température de la vapeur<br>sur celle du liquide. | TEMPS ÉCOULÉ<br>entre deux observations<br>consécutives. |
|--|---------------------------------|--|--|
| 24,59                                      | 7'                              | 75,41  |  |
| 30,74                                      | 8,49"                           | 69,26  | 121"   |
| 36,89                                      | 10,55                           | 63,15  | 135  |
| 43,03                                      | 13, 5                           | 56,97  | 140  |
| 49,18                                      | 15,34                           | 50,82  | 146  |
| 55,33                                      | 18,25                           | 44,67  | 167  |
| 61,48                                      | 21,58                           | 30,52  | 196  |
| 67,63                                      | 25,55                           | 32,36  | 233  |

En déterminant la valeur de  $a$  au moyen de deux observations extrêmes, on trouve  $a = 0,000744$ .

Les valeurs de  $a$  déduites de deux observations consécutives, sont : 0,00077 ; 0,00073 ; 0,00078 ; 0,00075 ; 0,00070 et 0,00073, dont la moyenne est 0,000752.

Les chiffres significatifs des valeurs de  $a$  déduites de deux observations prises dans la série en en sautant une, sont : 75, 77, 72, 76, 75, 72, dont la moyenne est 74,5. Les mêmes chiffres déduits de la série des observations en en sautant successivement 2, 3, 4 et 5, sont : 76, 73, 72, 76, 76, 75, 74, 73 ; 76, 74, 74 ; 74, 74, dont les moyennes sont 74,5 ; 74,4 ; 74,5 ; 74.

Les valeurs de  $a$  diffèrent peu les unes des autres, et les petites différences qu'on y rencontre ne suivent aucune marche régulière, et doivent être attribuées aux erreurs inévitables dans des expériences de cette nature ; mais elles résultent principalement d'une circonstance que nous indiquerons plus loin.

Des expériences analogues faites avec des plaques de cuivre plus minces, et avec des plaques de plomb, de zinc, d'étain, de fer et de fonte de différentes épaisseurs, ont donné des résultats analogues.

La première loi de la transmission se trouve ainsi vérifiée, du moins pour les métaux sur lesquels j'ai opéré, et dans les limites de température des observations.

701. En comparant les valeurs de  $a$  relatives à des plaques d'un même



métal, mais d'épaisseurs différentes, je fus très-étonné de les trouver sensiblement les mêmes, quoique pour plusieurs métaux les épaisseurs eussent varié de 1 à 20 millimètres, et je doutai de l'exactitude de la loi relative aux épaisseurs. Mais, dans toutes ces expériences, j'avais remarqué une influence très-sensible de la vitesse de rotation de l'agitateur : la valeur de  $a$  augmentait ou diminuait notablement avec cette vitesse, de sorte que la valeur de  $a$ , dans une même expérience, ne restait constante qu'à la condition de produire une agitation à peu près uniforme. En considérant en outre que la vapeur, en se condensant, devait couvrir la surface inférieure de la plaque d'une couche d'eau presque stagnante, il n'était pas douteux que, dans ces expériences, la surface de la plaque en contact avec la vapeur n'était pas à  $100^\circ$ , ni l'autre à la température indiquée par le thermomètre, et que la chaleur traversait réellement une lame métallique comprise entre deux lames d'eau, dont l'une était sensiblement immobile, et l'autre ne se renouvelait que lentement; alors, comme la conductibilité de l'eau est très-petite relativement à celle des métaux, l'influence de la conductibilité du métal disparaissait.

Pour vérifier cette conjecture, j'ai supprimé le chauffage à vapeur, j'ai rempli le vase d'eau à  $0^\circ$ , et j'ai plongé la plaque qui le fermait inférieurement, de 1 à 2 millimètres dans un grand vase rempli d'eau à la température ordinaire; j'ai terminé l'agitateur intérieur par des bandes de toile de crin qui, dans le mouvement, rasaient la surface de la plaque; et l'eau qui mouillait la surface extérieure était renouvelée au moyen d'un ruban de fil tendu verticalement dans un cadre auquel on donnait un mouvement rapide de va-et-vient. Par cette disposition, l'échauffement de l'eau du vase était très-lent, et le liquide qui mouillait les surfaces de la plaque pouvait être renouvelé rapidement. Les coefficients de transmission obtenus avec le nouvel appareil, pour des plaques de plomb de  $0^m,001$ ;  $0^m,0025$ ;  $0^m,006$ ;  $0^m,0095$ ;  $0^m,015$  et  $0^m,025$ , ont été  $0,00060$ ;  $0,00054$ ;  $0,00049$ ;  $0,00047$ ;  $0,00037$ ;  $0,00025$ . On voit, à l'inspection de ces chiffres, que l'influence des épaisseurs se manifeste d'une manière évidente. Des expériences faites avec des plaques de fer, d'étain, de zinc, de cuivre, ont donné des résultats analogues; mais l'accroissement de conductibilité par la diminution d'épaisseur était d'autant plus faible que les lames étaient plus minces et le métal plus conducteur.

Je devais penser, d'après cela, qu'en augmentant beaucoup la vitesse de renouvellement des liquides qui baignent les deux faces des plaques, et en employant des plaques épaisses des métaux les moins conducteurs, on arriverait à des coefficients qui seraient dans le rapport inverse des épaisseurs.

702. Je disposai pour cela un nouvel appareil dans lequel l'agitateur intérieur était mis en mouvement par un système d'engrenage, et l'agitateur extérieur consistait en une roue horizontale excentrique au vase, également mise en mouvement par un engrenage, et dont les rayons étaient formés par des tresses fortement tendues, qui, dans le mouvement de rotation, frottaient contre la surface extérieure de la plaque.

La figure 11 (pl. 14) représente une coupe verticale de ce dernier appareil, la figure 12 une projection horizontale, et la figure 13 une coupe à plus grande échelle de la partie inférieure du vase. ABCD est un vase en fer-blanc fermé inférieurement par la plaque métallique EF, dont la figure 13 indique le mode d'ajustement. Ce vase renferme un tube en cuivre qui porte des palettes placées à différentes hauteurs et à la partie inférieure des toiles de crin; le tube est guidé dans son mouvement par deux anneaux qui l'enveloppent et qui sont fixés dans leurs positions par les tiges IK et MN, et il est terminé supérieurement par une petite roue dentée. Le vase est fermé par un couvercle dont les bords sont mastiqués, et à travers lequel passe le tube qui porte les ailes destinées à agiter le liquide; ce couvercle porte un anneau O, suspendu à 1 centimètre au-dessus du tuyau, dans lequel on place un bouchon percé, à travers lequel passe la tige du thermomètre dont le réservoir se trouve à peu près au milieu du vase, et qui reste fixe pendant le mouvement des agitateurs. A'B'C'D' est un second vase qui enveloppe le premier auquel il est fixé par trois tiges de verre Y, Y, Y; il est rempli de coton cardé, et garni de trois pieds à vis M', M', M', qui se placent sur les supports N', N', soudés au vase inférieur PQ; le vase A'B'C'D' supporte la roue dentée à manivelle qui engrène dans le pignon du tube central. Enfin le vase PQ renferme une roue horizontale RS dont les ailes en tresse frottent dans leur mouvement la surface inférieure de la plaque EF; cette roue est mise en mouvement par le pignon T, la roue dentée UV et la manivelle X, dont l'axe traverse la boîte à étoupes Z.

Au moyen de cet appareil j'ai pu renouveler 1600 fois par minute le



Peche

36. Dilatation des gaz  
 $V' = \text{Volume à } t' \text{ degré}$   
 $V = \text{Volume à } 0 \text{ "}$   
 $t = \text{température}$   
 $\alpha = 0,00365 \dots$   
 $\alpha = 9,8088 \dots$

36. Dilatation des gaz  
 $V' = V(1 + 0,00364 t)$  ... ou après près  $\frac{1}{267}$  de son volume par degré centigr. (Daltou)  
 $V' = V(1 + 0,0364(t' - t))$  ...  $V'$  vol. à  $t'$  ...  $V$  vol à  $t$  degré.

$k = 0,0127$  cheminée poterie  
 $k = 0,005$  " en tôle  
 $k = 0,0025$  " en fonte  
 $k = 0,002$  " qui il faut admettre

50. Tableau de la tension, densité & volume de l'Eau à des températures

| température | tension | Densité | Volume |
|-------------|---------|---------|--------|
| 100         | 760     | 0,00089 | 1695   |
| 149,15      | 3420,4  | 0,00234 | 428    |

50 Poids d'un mètre cube vapeur à diff. températures. (à 100 près 590 grammes)

50 Poids de la vapeur renfermée dans 1 mètre cube d'air saturé

|    |       |    |       |    |        |    |       |    |       |
|----|-------|----|-------|----|--------|----|-------|----|-------|
| 35 | 37,80 | 45 | 58,60 | 60 | 88,74  | 10 | 9,50  | 25 | 22,01 |
| 40 | 46,40 | 50 | 63,63 | 70 | 141,96 | 20 | 16,78 | 30 | 28,51 |

56. Chaleurs spécifiques des corps. - tabl.

62. Température de fusion des Corps. -

1 K. Glace = 0. absorbe 75 unités de Chal. pour se liquéfier

66 Chaleur latente des vapeurs. - (chaleur absorbée pour passer de liq. à vap. -

| Eau | Chaleur Totale     | Chaleur latente à celle de l'air | Densité de la vap. Aq. | Densité de vap. Aq 100 |
|-----|--------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| 6   | 31 unités de chal. | 5                                | 31 unités de chal.     | 0,623                  |
|     |                    |                                  |                        | 0,454                  |

72 P<sup>sp</sup> spécifiques. -

Combustible, Houille 1 K. houille dégage en brûlant 7600 unités de Chal. - vaporise 11 K. air

Volume d'air nécessaire à la combustion de la Houille. - 9 m<sup>3</sup> le double 18 m<sup>3</sup> car

307. Vitesse d'écoulement de l'air chaud au à la pression. -

$$v = \sqrt{2gHa(t' - t)}$$

Compte colonne d'air chaud 10 m<sup>3</sup> haut air extérieur 15 air chaud 150

$$v = \sqrt{19,62 \times 10 \times 0,00365 \times (150 - 15)} = 9,9 \text{ par seconde}$$

311 Vitesse de l'air brûlé d'une cheminée. - ayant égard à la densité de l'air carbonique.

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

$$\text{ou } v = \sqrt{2gHa(t' - t)}$$

Darcey dit que les cheminées doivent avoir 10 m<sup>3</sup> de h<sup>3</sup> un diamètre pour que chaque 3 K. houille brûlés par heure corresponde à 1 décimètre de section surface de la grille 3 fois celle de section de la cheminée.



ULTIMHEAT®  
VIRTUAL MUSEUM



liquide en contact avec les faces de la plaque métallique. En plaçant dans le vase ouvert de l'eau à peu près à  $24^{\circ}$ , et dans le vase intérieur de l'eau à la température ordinaire, et en employant des plaques de plomb, l'une de  $0^{\text{m}},020$ , l'autre de  $0,015$  d'épaisseur, dans les mêmes circonstances, la durée du même réchauffement du vase intérieur a été de  $500''$  pour la première plaque et de  $380''$  pour la seconde; ce dernier chiffre ne diffère que de  $5''$  des trois quarts du premier. Ainsi l'on peut considérer la loi des épaisseurs comme vérifiée directement.

Dans ces expériences, la température moyenne du bain extérieur a été de  $24^{\circ},04$ , et n'a différé des températures extrêmes que d'une petite fraction de degré, et les excès de températures au commencement et à la fin des expériences étaient  $8^{\circ},91$  et  $9,55$ . Alors le coefficient de réchauffement pour la plaque de  $0^{\text{m}},020$  d'épaisseur était  $0,000294$ ; le poids de l'eau renfermée dans le vase, augmenté du poids du vase multiplié par sa capacité calorifique, étant de  $3^{\text{t}},287$ , la quantité de chaleur qui serait transmise à travers la plaque pour une différence de température de  $1^{\circ}$ , serait égale à

$$0,000294 \times 3,287 = 0,000966;$$

et comme la plaque avait  $0^{\text{m}},005026$  de surface, la quantité d'unités de chaleur qui serait transmise dans les mêmes circonstances à travers 1 mètre carré, serait égale à

$$0,000966 \times \frac{1}{0,005026} = 0,191,$$

et pour une plaque de  $0^{\text{m}},001$  d'épaisseur, elle serait

$$0,192 \times 20 = 3,84.$$

703. Alors, en admettant les rapports de conductibilité des métaux trouvés par M. Despretz, on obtient les nombres suivants pour les quantités de chaleur qui seraient transmises dans  $1^{\circ}$  à travers des plaques de 1 mètre carré de surface, de 1 millimètre d'épaisseur, et dont les surfaces seraient maintenues à des températures constantes qui différeraient de  $1^{\circ}$ .

|                  |       |                |      |                      |      |
|------------------|-------|----------------|------|----------------------|------|
| Or. . . . .      | 21,28 | Fer. . . . .   | 7,95 | Marbre. . . . .      | 0,48 |
| Platine. . . . . | 20,95 | Zinc. . . . .  | 7,74 | Porcelaine. . . . .  | 0,24 |
| Argent. . . . .  | 20,71 | Plomb. . . . . | 3,84 | Terre cuite. . . . . | 0,23 |
| Cuivre. . . . .  | 19,11 |                |      |                      |      |

D'après d'anciennes expériences de Clément, une plaque de cuivre de 1 mètre carré de surface, de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, en contact d'un côté avec de la vapeur à  $100^{\circ}$ , et de l'autre avec de l'eau à  $28^{\circ}$ , condense par heure  $100^k$  de vapeur, ce qui fait 15 unités de chaleur par seconde pour une différence de température de  $72^{\circ}$ , et 0,23 pour une différence de  $1^{\circ}$ .

D'après des expériences récentes de MM. Thomas et Laurens, dans lesquelles le cuivre était disposé en un seul tuyau d'un petit diamètre, on a évaporé  $400^k$  d'eau par heure et par mètre carré pour une différence de température de  $45^{\circ}$ , ce qui fait 1,22 unité de chaleur par seconde et pour une différence de température de  $1^{\circ}$ . Le chiffre obtenu par MM. Thomas et Laurens est plus élevé que celui de Clément, parce que la surface de transmission ayant la forme d'un tuyau d'un petit diamètre, l'air était complètement expulsé, circonstance qui augmente beaucoup la quantité de vapeur condensée.

On voit que dans les circonstances même les plus favorables, le chiffre obtenu pour la transmission de la chaleur à travers le cuivre, quand on ne renouvelle pas le liquide qui mouille les surfaces, est beaucoup plus petit que celui qui résulte des expériences que nous avons rapportées, à cause de la couche d'eau sensiblement immobile qui recouvre au moins une des surfaces.

704. Ainsi, quoique les lois de la transmission de la chaleur à travers les plaques, admises par les physiciens, soient exactes, ces lois ne sont point applicables à la transmission de la chaleur d'un liquide à un autre à travers une plaque métallique; et on peut admettre que, dans les limites d'épaisseurs généralement employées, la nature et l'épaisseur du métal sont sans influence sensible. Mais si, dans certains cas, il y avait un grand avantage à augmenter cette transmission, même en dépensant du travail, on y parviendrait par une agitation qui renouvellerait très-rapidement les couches liquides en contact avec les surfaces des plaques.

Tout ce qui précède suppose que les deux surfaces des plaques sont en contact avec des liquides, et par conséquent ne doit être appliqué qu'au chauffage des liquides par des liquides, ou par la vapeur; car la vapeur, en se condensant contre les surfaces des plaques, les mouille, et tout se passe comme si le chauffage avait lieu par un liquide. Mais



quand les liquides sont chauffés par des gaz, et quand les gaz sont chauffés par d'autres gaz, en est-il encore ainsi? C'est ce que nous allons examiner.

705. Parlons d'abord du chauffage des liquides par les gaz : c'est, par exemple, le cas des chaudières à vapeur, du moins pour la partie des chaudières qui ne reçoit pas le rayonnement du foyer. Je n'ai point fait d'expériences directes à ce sujet; mais les résultats de la pratique ne permettent pas de douter que, si la nature et l'épaisseur du métal ont une influence, elle est très-petite; car on a reconnu depuis longtemps que les chaudières de fonte, de cuivre et de tôle de mêmes dimensions, mais dans lesquelles le métal a des épaisseurs très-variables, donnent sensiblement les mêmes produits dans les mêmes circonstances; c'est un fait sur lequel tous les ingénieurs sont d'accord. On peut d'ailleurs facilement s'en rendre compte. Lorsque l'épaisseur du métal augmente ou que sa conductibilité diminue, la température de sa surface extérieure augmente; c'est un fait bien constaté, car dans les chaudières de fonte, la surface extérieure rougit souvent, et, quant aux chaudières de fer, l'altération qu'elles éprouvent par l'action de la chaleur augmente avec leur épaisseur; mais comme la quantité de chaleur qui se transmet augmente avec la température de la surface extérieure, on conçoit que l'influence de la nature et de l'épaisseur du métal doit être très-faible.

706. Quant à la transmission de la chaleur d'un gaz à un autre à travers une plaque métallique, comme à volume égal les gaz ont une chaleur spécifique beaucoup plus petite que les liquides, et que leur conductibilité est très-faible, on peut regarder l'influence de la nature et de l'épaisseur de la plaque comme étant absolument nulle, attendu que la quantité de chaleur qui peut traverser la plaque, même dans les cas les plus défavorables, est incomparablement plus grande que celle qui la traverse réellement, et par conséquent, dans aucun cas, l'épaisseur du métal ne peut ralentir la transmission. La quantité de chaleur qui traverse la plaque est uniquement déterminée par la différence de température des deux gaz, les pouvoirs absorbants et émissifs des deux surfaces de la plaque, et surtout par les mouvements des lames d'air qui sont en contact avec les surfaces de la plaque métallique.

Ainsi on voit que, dans tous les cas, le renouvellement rapide des couches de liquide ou de gaz qui touchent les surfaces de la plaque mé-

tallique a une très-grande influence sur la transmission de la chaleur, mais que cette circonstance est beaucoup plus importante pour les gaz que pour les liquides.

707. On doit donc chercher la disposition des appareils qui favorise le plus possible ce renouvellement, par l'effet seul du mouvement qui résulte de l'échauffement et du refroidissement, et par les mouvements que les fluides doivent prendre pour entrer et sortir des appareils. Mais, pour les gaz, on peut en outre produire artificiellement dans leurs masses des mouvements qui occasionnent un renouvellement rapide des couches en contact avec les surfaces métalliques, soit par une action directe qui n'exigerait qu'un faible travail, soit en employant une partie de la force qui résulte de l'écoulement.

708. Considérons, par exemple, de l'air brûlé à une haute température, s'écoulant dans un canal cylindrique horizontal, environné d'eau qu'il doive échauffer. Les couches d'air qui sont en contact avec le métal se refroidissent très-rapidement; mais toutes les petites veines élémentaires n'ayant qu'une vitesse parallèle à l'axe du canal, les couches changeront de place très-lentement, car la seule cause du changement réside dans l'accroissement de densité qui résulte du refroidissement, et elle n'existe que pour la moitié supérieure du canal, et elle ne tend à produire le déplacement qu'avec une faible vitesse. Il en serait évidemment de même pour toute autre direction du canal. On conçoit, d'après cela, que si la section du canal est très-grande, ainsi que la vitesse de l'air brûlé à sa sortie, la plus grande partie des veines centrales n'auront pas été amenées en contact avec l'enveloppe, et qu'elles auront conservé leur température primitive. Mais si on plaçait dans le canal des roues à palettes montées sur le même axe, et mises en mouvement par un moteur quelconque, les veines centrales seraient jetées à la surface intérieure du cylindre, et on obtiendrait ainsi un bien plus grand refroidissement du gaz. Le mouvement du gaz du centre à la circonférence pourrait même être produit par le mouvement de translation du gaz lui-même; il suffirait, pour cela, de placer dans le canal un certain nombre de roues à palettes inclinées sur l'axe comme les ailes des moulins à vent; ces appareils, auxquels le mouvement de translation du gaz imprimerait une certaine vitesse de rotation, produiraient évidemment l'effet des roues à palettes dont les plans passent par l'axe de rotation.



709. On peut encore augmenter la transmission de la chaleur par un autre procédé qui n'a point été mis en pratique, mais qui, dans certains cas, pourrait être très-efficace. Nous avons vu que, dans la transmission de la chaleur à travers une plaque, il faut distinguer l'absorption par une des faces, l'émission par l'autre, et la conductibilité à travers l'épaisseur de la plaque; et nous avons vu que, dans les circonstances ordinaires, la quantité de chaleur que peut transmettre le métal est beaucoup plus grande que celle qu'il a réellement à transmettre. Il résulte de là que si, au lieu d'employer des plaques façonnées de différentes manières, on employait des plaques traversées par des barres plongeant jusqu'à une certaine profondeur dans les deux fluides liquides ou gazeux, dont l'un doit échauffer l'autre, en augmentant l'étendue des surfaces en contact avec les deux fluides, on augmenterait beaucoup l'effet produit, d'autant plus que les lames des fluides en contact avec les surfaces des barres seraient constamment renouvelées par le mouvement de translation des fluides. Considérons, par exemple, un canal horizontal parcouru par de l'air brûlé, et devant servir à chauffer de l'air que l'on fait mouvoir en sens contraire dans un canal enveloppant; si la surface du canal intérieur est traversée complètement par des barres métalliques qui se prolongent en dehors d'une certaine quantité, et si celles-ci ont des positions différentes, les parties intérieures des barres s'échaufferont dans toute leur étendue, et cette chaleur se dissipera par les surfaces extérieures; le courant d'air brûlé pourra être refroidi uniformément dans tous les points de sa section, et la chaleur sera transportée dans tous les points de la section de la veine d'air extérieur. Cette disposition peut être utile, surtout quand il est important d'effectuer la transmission dans un petit espace; mais elle a souvent des inconvénients, soit par la construction des appareils, soit par la difficulté de nettoyer les surfaces d'absorption ou d'émission.



---

---

## CHAPITRE IX.

### VAPORISATION.

---

710. La vaporisation des liquides comprend réellement quatre systèmes différents d'opération : 1° la formation de la vapeur qui doit être employée comme force motrice ou comme véhicule de la chaleur : nous conserverons à cette opération le nom de vaporisation ; 2° la production des vapeurs qui doivent être condensées et recueillies : cette opération porte le nom de distillation ; 3° la vaporisation qui a pour but de séparer, sans le recueillir, un liquide vaporisable mêlé avec un autre qui ne l'est pas ou qui l'est moins : cette dernière opération est désignée sous le nom d'évaporation ; 4° enfin, la formation des vapeurs, qui a pour but d'enlever un corps liquide qui mouille un corps solide : cette dernière opération porte le nom de séchage. Dans ce chapitre, nous ne nous occuperons que de la vaporisation proprement dite.

711. Les générateurs de vapeur sont très-complicés et renferment un grand nombre de parties que nous examinerons successivement ; mais avant, nous décrirons sommairement deux appareils complets, choisis parmi ceux qui sont le plus généralement employés.

Les figures 1 et 3 (pl. 15) représentent en coupe une chaudière à vapeur à basse pression, dont on voit le plan figure 2. A, est le cendrier. B, le foyer. C, C, les carneaux dans lesquels circule la fumée. R, le registre qui établit la communication des carneaux avec le canal D, qui reçoit la fumée de tous les foyers des chaudières, pour la conduire à la cheminée générale. F, est un espace vide qui diminue la masse de la maçonnerie, et qui doit être complètement fermé pour s'opposer au refroidissement de la chaudière. MM, représente le tuyau général qui reçoit

la vapeur produite par chaque chaudière, et la conduit au tuyau *L* par lequel elle se rend à la machine à vapeur ou dans le lieu où elle doit être utilisée. *NN* est le mur qui sépare l'appentis, où se trouvent les chaudières, des ateliers. Le générateur *GG* est de la forme des chaudières de Watt; cette forme est favorable à la circulation de la fumée, elle est souvent employée pour les générateurs de vapeur à basse pression. *aa* représente le niveau de l'eau dans la chaudière. *hh*, le tuyau d'alimentation qui aboutit à un petit réservoir *g*, dans lequel l'eau est maintenue à un niveau constant par le tube *tt* qui fait communiquer entre eux tous les réservoirs d'alimentation. *n* est une soupape qui règle l'introduction de l'eau dans la chaudière, et qui s'abaisse ou s'élève suivant que le flotteur *i* monte ou descend. On voit que ce mode d'alimentation maintient entre de faibles limites le niveau de l'eau dans la chaudière. Un flotteur *d* est attaché à l'extrémité d'un petit balancier auquel est fixé, à l'autre extrémité, le poids qui le maintient en équilibre à la surface de l'eau. Une aiguille perpendiculaire, placée au milieu, indique par ses oscillations l'élévation ou l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière. *bb* est un orifice par lequel on s'introduit dans la chaudière quand on veut la nettoyer ou la réparer, après avoir fait écouler toute l'eau qu'elle contient au moyen du robinet *q*. *c*, est une soupape qui sert à la rentrée de l'air dans le générateur, quand la pression intérieure s'abaisse au-dessous de celle de l'atmosphère. *k* est la soupape de sûreté; un poids, par la position variable qu'il peut prendre sur le levier *y*, règle la pression qui pourra la soulever et donner issue à la vapeur. *v* est la plaque fusible qui empêche la température de dépasser celle de la fusion de l'alliage dont elle est formée. *m*, prise de vapeur communiquant avec le tuyau *l* qui conduit la vapeur au tuyau général *MM*; une soupape *s* sert à fermer cette communication quand la chaudière ne marche pas. Une autre soupape *s'* sert au dégagement de l'excès de vapeur qui se rend par le tuyau *u* dans la cheminée, afin de ne pas se répandre dans la pièce. *r,r* sont des boîtes à étoupes dans lesquelles passent les tiges des flotteurs et des soupapes. *p* est le poids qui sert à équilibrer en partie le registre.

712. Une chaudière à vapeur à haute pression, pour être plus résistante, est toujours formée d'un ou de plusieurs cylindres, terminés par des calottes sphériques. La figure 4 (pl. 15) représente la coupe longitudi-



nale d'un générateur de vapeur à haute pression; la figure 6 en est la coupe transversale, et la figure 5 est la vue de face du fourneau.

GG est la chaudière à vapeur proprement dite; G, G' sont deux *bouilleurs*, communiquant par des *cuissards* g,g avec la chaudière. Ces bouilleurs servent à préserver le générateur du coup de feu; ils prolongent sa durée, mais comme ils reçoivent seuls le rayonnement du foyer, ils sont plus tôt mis hors de service, et il faut les remplacer assez souvent. C'est pour opérer ce changement avec facilité et sans défaire tout le fourneau, qu'on a construit une voûte au-dessus des bouilleurs. Les dépôts se réunissent presque tous dans les bouilleurs: c'est pour que le nettoyage en soit facile que ceux-ci se prolongent au delà du fourneau, et qu'ils sont fermés par des tampons en fonte, qu'on enlève facilement. Des supports q,q soutiennent l'extrémité des bouilleurs. aa est le niveau de l'eau dans la chaudière; il est indiqué au moyen du flotteur d qui, en s'élevant ou en s'abaissant, fait mouvoir l'aiguille indicatrice. bb, *trou d'homme*. hh, tube d'alimentation; il communique avec la pompe d'alimentation. vv, plaques fusibles. kk, soupapes de sûreté. m, prise de vapeur. l, tuyau par lequel la vapeur se dégage. La soupape s établit ou intercepte la communication de la chaudière avec le tuyau l commun à plusieurs chaudières. Un poids placé à l'une ou à l'autre des extrémités du levier, ouvre ou ferme la soupape.

A est le cendrier, B le foyer, CC les carneaux de circulation de la fumée, R le registre qui établit ou intercepte la communication avec la cheminée E; F est un espace vide et fermé qui s'oppose au refroidissement et diminue la masse de la maçonnerie. O est une ouverture qui sert à faire tomber la suie et les matières solides entraînées par le courant d'air chaud. P,P', sont des ouvertures fermées par des briques et qui servent au nettoyage des carneaux.

#### § 1. — DES CHAUDIÈRES.

713. Dans l'établissement d'une chaudière quatre choses sont à déterminer: la nature du métal, la forme de la chaudière, sa grandeur et l'épaisseur du métal.

*Choix du métal.*

714. Les métaux que l'on peut employer dans la construction des chaudières à vapeur d'une grande dimension, sont très-peu nombreux : ce sont la tôle de fer, la fonte, le cuivre, le laiton, l'étain, le zinc et le plomb. Mais le plomb et l'étain sont trop mous et trop fusibles, et le zinc et le laiton sont trop altérables. Le fer, la fonte et le cuivre étant à la fois peu altérables et d'une grande ténacité, sont seuls employés.

715. Pour reconnaître lequel de ces trois métaux doit être préféré, il faut examiner 1° la facilité plus ou moins grande avec laquelle on peut fabriquer les chaudières en employant ces différents métaux ; 2° les moyens de réparation ; 3° leur prix ; 4° la valeur de la matière lorsque les chaudières sont hors de service ; et 5° enfin, leur durée.

716. Les chaudières de tôle et de cuivre se fabriquent avec des lames d'une étendue plus ou moins grande, que l'on emboutit, et que l'on réunit par une clouure serrée. Ces opérations s'exécutent avec plus de facilité sur le cuivre que sur le fer ; le cuivre peut même recevoir des formes qu'il serait impossible de donner à la tôle, du moins sans courir la chance d'en altérer la ténacité ; en outre, les lames de cuivre peuvent être réunies par une soudure forte, opération qui ne pourrait s'exécuter sur la tôle qu'avec de grandes difficultés. Ainsi, sous le rapport de la facilité de la fabrication, le cuivre a beaucoup d'avantages sur le fer.

Quant aux chaudières de fonte, elles reçoivent immédiatement, dans la coulée, la forme qu'elles doivent conserver, et dans l'état actuel de l'art du fondeur, toutes les formes de chaudières peuvent s'exécuter avec une égale facilité. Toute la difficulté de l'établissement des chaudières de fonte réside dans la réunion des différentes parties qui composent la chaudière. Les jonctions se font ordinairement par des collets qui s'appliquent les uns sur les autres, et que l'on tient serrés par des écrous ; les joints se bouchent avec du mastic de fonte, dont nous indiquerons plus tard la composition.

717. Les chaudières de tôle et de cuivre se réparent facilement par l'application de plaques maintenues par des rivets. Les chaudières de fonte peuvent aussi être réparées par des plaques de tôle, maintenues par des écrous et garnies de mastic de fonte.



718. Quant à la dépense d'une chaudière construite avec ces différents matériaux, ce n'est que dans chaque cas particulier qu'on peut la déterminer d'une manière absolue ; mais, les rapports des dépenses de trois chaudières semblables, construites l'une en fonte, l'autre en tôle, et la dernière en cuivre, doivent rester sensiblement les mêmes, quelles que soient la forme et la grandeur des chaudières, et ces rapports sont faciles à calculer. En effet, les surfaces extérieures des trois chaudières étant égales, les poids des métaux seront entre eux comme les densités multipliées par les épaisseurs. Or, la densité de la tôle = 7,78, celle de la fonte = 7,29, et celle du cuivre = 8,87 ; les épaisseurs correspondantes que l'on donne ordinairement à la fonte, au fer, au cuivre, pour résister à la même pression, sont entre elles comme les nombres 12, 2 et 3. Par conséquent, le poids relatif de la chaudière de fonte sera.....  $12 \times 7,29 = 87$

Le poids relatif de la chaudière de tôle sera.....  $2 \times 7,78 = 16$

Le poids relatif de la chaudière de cuivre sera.....  $3 \times 8,87 = 26$ .

Les deux derniers nombres devraient être un peu augmentés à cause des clouures, où le métal a une plus grande épaisseur : mais cette augmentation est à peu près compensée dans les chaudières de fonte par les collets d'ajustage. Maintenant, pour avoir la valeur relative de chaque chaudière, il suffit de multiplier son poids par le prix du métal façonné en chaudière.

Or, la fonte vaut maintenant à Paris 45 francs les 100 kilogrammes, la tôle 140 francs, et le cuivre 400 francs ; par conséquent, les prix relatifs de trois chaudières de même surface seront :

pour la fonte...  $87 \times 45 = 3915$  ..... = 1,

pour la tôle...  $16 \times 140 = 2240$  ..... = 0,57 ;

pour le cuivre..  $26,6 \times 400 = 10640$  ..... = 2,72.

Ainsi, les chaudières qui coûtent le moins d'établissement sont celles en tôle. Les prix des chaudières de fonte et de cuivre relativement à celles de fer sont 1,74 et 4,75.

719. Quant aux valeurs des chaudières, lorsqu'elles sont hors de service, nous pouvons les calculer en admettant que le vieux cuivre se vende 250 francs les 100 kilogrammes, la vieille tôle 24 francs, et la vieille fonte 12 francs ; par conséquent le rapport du prix de la chaudière neuve à celui de la chaudière hors de service, est pour la chaudière



de fonte..... 4 : 1;  
 pour la chaudière de tôle..... 6 : 1;  
 pour la chaudière de cuivre..... 1,6 : 1.

720. Enfin, pour juger en définitive quelles sont les chaudières les plus avantageuses, il faudrait connaître leur durée moyenne; mais la durée d'une chaudière dépend tellement de la qualité de la matière et des circonstances dans lesquelles elle se trouve, qu'on ne peut rien dire à cet égard. Il est cependant hors de doute, que toutes choses égales d'ailleurs, les chaudières de cuivre ont une plus grande durée que les autres. Si on admettait dix ans pour la durée moyenne d'une chaudière en tôle et pour une chaudière de fonte, et vingt pour celle d'une chaudière de cuivre, en comptant l'intérêt à 6 pour cent; après dix ans, une chaudière de fonte aurait coûté

$$1 + 10 \times 0,06 - \frac{12}{45} = 1,34.$$

Après le même temps, une chaudière de tôle aurait coûté

$$0,57 + 10 \times 0,06 \times 0,57 - \frac{24}{140} 0,57 = 0,81;$$

et après le même temps, une chaudière de cuivre aurait coûté

$$\frac{2,72 + 20 \times 0,06 \times 2,72 - \frac{250}{300} 2,72}{2} = 2,14.$$

Ainsi, par les seules considérations du prix d'achat, de l'intérêt du capital et du prix de la matière quand la chaudière est hors de service, les chaudières de tôle devraient être préférées à celles de fonte et de cuivre.

Mais d'autres considérations se joignent encore à celles-là, pour exclure les chaudières de fonte et de cuivre. Les chaudières, et surtout les bouilleurs de fonte, sont sujets à se casser par les variations brusques de température, et ils éclatent souvent sans causes extérieures, probablement par un travail intérieur de la matière, dont on ne connaît pas la nature. Les chaudières de cuivre coûtent à peu près trois fois plus que les chaudières de tôle, et cette dépense de premier établissement seule, doit leur faire préférer les chaudières de tôle, car dans les établissements industriels, la durée est une circonstance à laquelle on ne doit pas attacher trop d'importance, maintenant que les



découvertes se succèdent avec trop de rapidité pour qu'on puisse compter sur un long usage des appareils.

*Forme des chaudières.*

721. La forme des chaudières n'a qu'une bien faible influence sur la quantité de chaleur qu'elles peuvent transmettre, et, par conséquent, sur la quantité de vapeur qu'elles peuvent produire. Ainsi, sous ce rapport, la forme des chaudières est à peu près arbitraire. Mais il est une autre condition qui restreint beaucoup le nombre des formes qu'on peut donner aux chaudières, c'est la résistance aux forces qui tendent à les déformer ou à les déchirer. Ces forces sont au nombre de trois : le poids du métal lui-même, le poids du liquide renfermé dans la chaudière, et enfin la force élastique de la vapeur. En général, les deux premières forces ont une si faible influence, relativement à la dernière, qu'on n'y a jamais égard, d'autant plus que les épaisseurs des feuilles métalliques qu'on emploie dans la construction des chaudières, sont toujours de beaucoup supérieures à celles qui correspondraient à leur déformation par le poids du métal et celui du liquide qu'elles doivent renfermer.

La forme de chaudière la plus avantageuse, sous le rapport de la résistance, est évidemment celle d'un cylindre à base circulaire, car elle ne peut pas changer.

722. Lorsque les chaudières doivent produire de la vapeur sous une pression peu supérieure à celle de l'atmosphère, qu'elles sont à *basse pression*, on peut leur donner des formes quelconques, pourvu qu'on maintienne par des armatures convenablement placées et d'une résistance suffisante, les parties que la pression tend à écarter. Mais les dispositions le plus généralement employées consistent en un cylindre unique placé horizontalement, dont la base est tantôt circulaire, tantôt formée d'un demi-cercle, de deux parties latérales rectilignes ou concaves, et d'une partie inférieure aussi droite ou concave; la fumée parcourt successivement la partie inférieure et les parties latérales. Quelquefois aussi les chaudières sont traversées, dans le sens de leur longueur, par un ou plusieurs tuyaux à fumée. Souvent aussi le foyer est placé dans l'intérieur même de la chaudière.



Quand la vapeur doit être à haute pression, on emploie toujours des chaudières cylindriques, à foyers extérieurs, et souvent on place au-dessous deux ou trois cylindres d'un plus petit diamètre qui communiquent avec la chaudière par un ou deux tubes d'un diamètre peu différent; ces cylindres portent le nom de *tubes bouilleurs*, ils reçoivent seuls le rayonnement du foyer, et c'est sur eux que se porte toute l'action destructive de la chaleur. Enfin, dans les bateaux à vapeur et dans les locomotives, on emploie des dispositions particulières exigées par les circonstances dans lesquelles ces machines doivent fonctionner.

Nous examinerons plus tard les avantages et les inconvénients que présentent ces différentes formes de chaudières. Maintenant nous nous contenterons de décrire les chaudières à basse et à haute pression le plus généralement employées.

723. *Chaudière de Watt*. Les figures 1<sup>re</sup> et 2 (pl. 16) représentent une coupe longitudinale et une coupe transversale d'une chaudière de Watt destinée à alimenter une machine de quarante chevaux. Les feuilles de tôle de 0<sup>m</sup>,004 d'épaisseur ont été percées à la machine et réunies par des clous rivés à chaud; les trous ont ordinairement 0<sup>m</sup>,03 de diamètre, et la distance des centres est de 0,06; aux deux bouts, les parties latérales et les fonds sont réunis sur une bande de fer percée de trous et qui est pliée à angle droit; les fonds sont rivés sur la face plane, et les parties cylindriques sur l'autre. Les figures 3 et 4 représentent deux élévations d'une des bandes de fer dont nous venons de parler, et qu'on désigne sous le nom de *cornière*. Les joints des feuilles de tôle sont ensuite mâtés à froid.

Les flancs de la chaudière sont maintenus par des barres de fer *mn*, *pq*, dont les longueurs sont déterminées par des systèmes de clavettes dont on voit la disposition dans les figures 5, 6, 7; l'une représente une projection verticale, l'autre une coupe verticale, et la dernière une projection horizontale. Les deux fonds sont également retenus par des armatures qui ne sont pas représentées dans les dessins.

Au milieu de la chaudière se trouve une large tubulure désignée sous le nom de *trou d'homme*, et qui est destinée à permettre à un ouvrier de s'introduire dans la chaudière pour la nettoyer ou la réparer. Cette tubulure, tantôt circulaire, tantôt elliptique, est ordinairement en fonte; elle se ferme par une plaque de même métal que l'on serre avec des

boulons dont la tête s'introduit au-dessous du collet de la tubulure (fig. 10), ou dont la tête a été noyée dans la fonte lors de la fusion (fig. 8); dans tous les cas, on place sur le bord de la tubulure un carton dont les deux faces sont recouvertes de mastic rouge (pâte de minium et d'huile de lin lithargirée), afin de rendre le joint parfaitement étanche. Quelquefois, pour éviter toute chance de fuite par l'accroissement de pression, l'ouverture elliptique de la tubulure a un rebord plat intérieur de 2 à 3 centimètres, au-dessous duquel on introduit le couvercle en présentant son petit diamètre au plus grand diamètre de l'orifice; on le maintient en place d'une manière quelconque, et c'est la pression de la vapeur qui, en le comprimant, s'oppose d'autant plus à la fuite de la vapeur que sa tension est plus grande.

Les figures 12 et 13 représentent l'élévation et la coupe du robinet de vidange; ce robinet se place en un des points les plus bas de la chaudière, et ordinairement sur la face qui se trouve du côté du foyer.

La soupape qui est placée au centre de la plaque qui ferme le trou d'homme (fig. 10), s'ouvre de dehors en dedans; elle est destinée à s'opposer à l'écrasement de la chaudière par la pression de l'atmosphère, par suite d'un abaissement de la tension de la vapeur. Lorsque, par le refroidissement ou par une injection trop considérable d'eau d'alimentation, la tension de la vapeur s'abaisse au-dessous de celle de l'atmosphère, l'air rentre dans la chaudière et y rétablit la pression atmosphérique. La soupape dont il est question porte le nom de *reniflard*.

Pour ces chaudières, le foyer est placé au-dessous et à l'un des bouts; la fumée en parcourt toute la longueur; elle revient en avant par un canal dont un des flancs forme une des parois, et elle retourne à la cheminée par un canal qui parcourt l'autre flanc, en passant sur le fond qui se trouve en avant.

724. *Chaudière à haute pression à bouilleurs*. Les figures 1<sup>re</sup> et 2 (pl. 17) représentent une coupe verticale et une élévation d'une chaudière à deux bouilleurs, destinée à une machine de huit chevaux. Les figures 5 et 6 représentent à une échelle double une coupe de la tête d'un des bouilleurs et le mode de fermeture. Quand le diamètre des bouilleurs excède 0<sup>m</sup>,45, on les ferme par des plaques elliptiques; mais quand le diamètre est plus petit, on les ferme par des plaques retenues par des croisillons en fer, maintenus par des écrous, afin de ne pas diminuer l'orifice d'ac-



es dans les bouilleurs. Les figures 7 et 8 représentent à la même échelle le même mode de fermeture du trou d'homme; les tiges de fer *a* et *b* ont été prises dans la fonte du couvercle AB, lors de la fusion; ces tiges sont taraudées à leurs extrémités libres, et maintenues par des traverses *mn* et *pq* qui s'appuient sur les bords de l'ouverture.

725. Dans le mode de construction indiqué par les figures 1<sup>re</sup> et 2, les tuyaux de communication de la chaudière et des bouilleurs sont rivés sur ces deux pièces; mais comme les bouilleurs s'usent plus promptement que les chaudières, on a imaginé un mode d'assemblage qui permet de démonter facilement les bouilleurs sans déranger la chaudière. Il est indiqué dans la figure 9. *abcd* est une tubulure en fer, rivée sur un bouilleur; elle porte une douille en fonte, garnie d'un repos *éé*; cette douille pénètre dans une autre en tôle *gh g'h'* fixée à la chaudière; l'anneau *gg'* vient reposer sur l'anneau *éé*, et on remplit de mastic de fonte l'intervalle annulaire des deux pièces (1). Cet intervalle doit avoir de 12 à 15 millimètres de largeur, afin qu'on puisse facilement comprimer le mastic, et l'enlever avec un burin quand on veut séparer les bouilleurs de la chaudière.

Lorsqu'on adopte cette disposition pour réunir les chaudières aux bouilleurs, et que les chaudières sont à haute pression, il est prudent de fixer les bouilleurs aux chaudières au moyen d'une tige en fer qui passe dans les cuissards, et qui se termine par deux tiges de fer transversales qui s'appuient l'une contre le bouilleur, l'autre contre la chaudière. Cette disposition est indiquée dans la figure 4 (pl. 17).

726. Les figures 3 et 4 (pl. 17) représentent deux coupes d'une chaudière à bouilleurs en fonte. La chaudière est composée de deux parties réunies par des écrous et du mastic de fonte. Les bouilleurs sont fixés à la chaudière par le moyen que nous venons de décrire.

---

(1) Le mastic de fonte est formé d'un mélange de 25 à 30 parties de limaille de fonte non oxydée, d'une partie de sel ammoniac et d'une partie de fleur de soufre; on ajoute de l'eau et de l'urine, la matière s'échauffe et se durcit promptement. Pour l'usage dont il est question, on l'emploie presque sec, échauffé par l'action des éléments qui le composent, et on le comprime fortement à coups de marteau; il prend en peu de temps la dureté de la fonte. Lorsque ce mastic doit être comprimé par des écrous, on l'emploie en pâte molle.

Les bouilleurs en fonte sont entièrement abandonnés, parce qu'ils se cassent facilement par les changements de température : ils sont même proscrits par les règlements de police ; mais les chaudières en fonte avec bouilleurs en fer fonctionneraient sans présenter plus de chances d'accidents que les chaudières en fer.

727. Les chaudières sont ordinairement soutenues par quatre oreilles en fer assez prolongées pour porter sur la partie de la maçonnerie qui se trouve au delà de celle qui forme la voûte des carneaux, figures 12 (pl. 33), et 11 (pl. 34). D'autres fois les oreilles sont courtes et sont supportées par des chandeliers en fonte qui s'appuient sur le fond des carneaux. Quant aux bouilleurs, ils sont ordinairement supportés en avant par la plaque de la porte, et derrière par des chandeliers en fonte.

*Dimensions des chaudières.*

728. Dans tous les cas qui peuvent se présenter, la quantité de vapeur à produire dans une heure, est déterminée par l'effet qui doit être obtenu, et la quantité de combustible à brûler dans le même temps s'ensuit nécessairement ; en effet, le maximum de tirage des cheminées a lieu à environ 300°, et la température à laquelle 1 kilog. de houille élèverait les 18,44 mètres cubes d'air que nécessite sa combustion, si toute la chaleur développée était employée à cet effet, serait de  $7500 : 18,44 \times 1,3 \times \frac{1}{4} = 1250^\circ$ , par conséquent les  $\frac{3}{4}$  de la chaleur doivent être absorbés par la chaudière, et en multipliant par  $\frac{4}{3}$  la quantité de combustible rigoureusement nécessaire à la production de la vapeur demandée, on aura celle qui doit être consommée. Mais pour que la chaudière absorbe la quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation, il est important de lui donner des dimensions convenables.

Remarquons d'abord que la capacité de la chaudière est sans influence, car la chaleur ne pénètre dans l'eau qu'à travers sa surface.

La chaleur qui se produit dans le foyer se dissipe, comme nous l'avons dit, de deux manières différentes : par le rayonnement et par le courant d'air qui traverse constamment le combustible. Une partie de la chaudière s'échauffe et par le rayonnement et par le contact de l'air chaud, et une partie seulement par ce dernier mode. On conçoit facilement qu'à mesure que la chaudière est plus allongée, qu'elle accompagne la fumée dans une



plus grande étendue, la fumée se refroidit toujours davantage, et qu'il existe une longueur du circuit au delà de laquelle la fumée a seulement la température de  $300^{\circ}$  qui correspond au maximum de tirage.

Il est d'abord évident que chaque mètre carré de surface de chauffe absorbe une quantité de chaleur qui diminue très-rapidement depuis le foyer jusqu'à l'extrémité de la chaudière qui est abandonnée par la fumée, attendu que l'influence du rayonnement diminue avec l'inclinaison des rayons, et avec la distance; et que la température de la fumée décroît aussi très-rapidement à mesure qu'elle s'éloigne du foyer, par le fait même de l'absorption de la chaleur.

729. On a fait des expériences assez exactes pour déterminer la quantité de chaleur qui peut passer à travers un mètre carré de surface de différents métaux exposée au feu le plus ardent, et de la manière la plus avantageuse. D'après M. Christian, le maximum de vapeur que peut produire dans une heure 1 mètre carré de surface de chaudière de fonte exposée au feu le plus violent et entièrement plongée dans la flamme, est de 100 kilogrammes. M. Clément a obtenu le même nombre pour une chaudière de cuivre de 3 millimètres d'épaisseur placée dans les mêmes circonstances.

Il résulte de là, comme nous l'avons déjà dit (704), que la nature et l'épaisseur du métal sont sans influence sur la quantité de vapeur produite, et qu'on doit admettre que pour la partie de la chaudière qui se trouve immédiatement au-dessus du foyer, chaque mètre carré de surface fournit à peu près 100 kilogrammes de vapeur par heure.

Mais il est impossible de rien calculer pour ce qui se passe au delà: les phénomènes sont trop compliqués, et dépendent trop des circonstances particulières à chaque chaudière. Il faut alors s'en rapporter à des expériences qui donnent la quantité moyenne de vapeur fournie par chaque mètre carré de surface de chauffe, quand la fumée ne possède à sa sortie que la température convenable au tirage.

730. Or, il résulte de l'observation des chaudières bien établies, qui produisent de 6 à 7 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, et qui abandonnent la fumée à environ  $300^{\circ}$ , que la production moyenne de vapeur par heure et par mètre carré est comprise entre 15 et 20 kilogrammes.

Dans le traité des machines à vapeur de Farey, l'auteur donne les

règles suivantes, déduites de celles de Watt et de celles qui sont suivies par d'autres ingénieurs :  $1^{\text{m}^{\text{c}}},395$  à  $1^{\text{m}^{\text{c}}},674$  de surface de chauffe par cheval; en admettant 5 kilogrammes de houille par cheval et 5 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, cette règle revient à calculer la surface de chauffe, en supposant une production moyenne de 18 à 15 kilogrammes de vapeur par mètre carré de surface de chauffe.

Ce sont les nombres admis par les bons constructeurs, mais à la condition que la partie de la chaudière qui reçoit le rayonnement du foyer soit au moins la moitié de la surface de chauffe totale.

Il est important de remarquer que, si on prenait un nombre beaucoup plus grand pour la production moyenne, les chaudières seraient beaucoup plus petites, mais on n'utiliserait qu'une plus petite partie de la chaleur produite : on pourrait ne produire que 3 ou 4 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille. C'est ce qui arrive dans les chaudières de bateau, dans lesquelles la production de vapeur par mètre carré et par heure s'élève de 33 à 35 kilogrammes. Si, au contraire, on prenait un nombre beaucoup plus petit, les chaudières seraient trop grandes, la fumée trop refroidie à son entrée dans la cheminée, et par suite on obtiendrait un faible tirage qui pourrait occasionner plus de perte par la mauvaise combustion, que de profit par un plus grand refroidissement de la fumée, à moins cependant que les cheminées ne soient très-hautes et très-larges.

731. Connaissant, dans chaque cas particulier, la quantité de vapeur à produire dans une heure, et sachant que chaque mètre carré fournit moyennement 15 à 20 kilogrammes de vapeur, on trouvera facilement l'étendue de la surface de chauffe de la chaudière, et par suite toutes ses dimensions, quand on aura déterminé la forme qu'elle doit avoir.

Ordinairement on construit plusieurs chaudières à vapeur, presque toujours trois lorsque deux suffisent à l'effet qu'on veut produire, afin d'éviter le chômage qui aurait lieu pendant les réparations, si on n'employait qu'une seule chaudière. Dans ce cas, deux seulement sont constamment en activité. La vapeur est reçue dans un même tuyau par des tuyaux additionnels communiquant à chaque chaudière, et garnis de robinets ou de soupapes disposés convenablement.

*Épaisseur des chaudières.*

732. L'épaisseur que l'on doit donner aux chaudières dépend de la nature du métal que l'on emploie, de leur forme, de leur grandeur, et des pressions auxquelles elles seront soumises. Il est impossible de déterminer cette épaisseur pour les chaudières qui ne sont ni sphériques ni cylindriques à bases circulaires, parce que la pression intérieure tend d'abord à les déformer, et que la résistance qu'elles exercent varie avec leur forme, suivant des lois trop compliquées. Mais comme ces sortes de chaudières ne sont jamais employées que pour produire de la vapeur à basse pression, et qu'elles sont toujours garnies d'armatures intérieures qui s'opposent aux principales variations de dimensions que la pression intérieure tend à produire, l'épaisseur du métal n'a que peu d'influence.

733. Quant aux chaudières à haute pression, qui sont toujours cylindriques, on peut facilement déterminer l'épaisseur qu'elles doivent avoir pour résister à une pression donnée.

Lorsqu'une chaudière cylindrique à base circulaire est pressée intérieurement par la vapeur, en supposant que le métal soit homogène et ait partout la même épaisseur, elle ne peut se rompre que suivant deux génératrices opposées, ou suivant une section perpendiculaire à son axe, à cause de la symétrie du corps.

734. Cherchons d'abord la résistance à la rupture suivant deux génératrices. Le cylindre pouvant être considéré comme formé d'anneaux placés les uns à côté des autres, chacun, dans le cas que nous considérons, résistera isolément à la pression qui tend à l'ouvrir; ainsi, la résistance d'un cylindre à une pression qui tend à le déchirer suivant une arête, est indépendante de sa longueur et égale à celle d'un des anneaux qui le composent.

Soit ABCD (fig. 14, pl. 16) un de ces anneaux ayant, par exemple, 0<sup>m</sup>,001 de largeur et une épaisseur  $e$ ; il sera pressé intérieurement et dans la direction des rayons par la vapeur. Si on mène un diamètre quelconque AB, il est évident que les forces qui agissent au point A, dans les directions Am et An, et qui tendent à ouvrir l'anneau en ce point, se trouveront répétées au point B, de sorte que l'anneau tend également à se déchirer au point A et au point B. Les tractions qui se manifestent

aux points A et B, proviennent des pressions qui s'exercent sur les demi-cercles ACB et BDA, et la résultante de ces pressions est facile à trouver. Représentons par  $p$  la pression de la vapeur en kilogrammes par millimètre carré; la pression exercée sur une partie très-petite  $ss'$  de l'anneau sera  $p \times ss'$ , et sera dirigée suivant le rayon qui passe par le milieu de  $ss'$ . Décomposons cette force en deux autres, l'une parallèle, et l'autre perpendiculaire au diamètre AB; il est évident que la première sera sans influence sur la traction aux points A et B; la seconde s'obtiendra en multipliant  $p \times ss'$  par le cosinus de l'angle formé par la ligne  $ss'$ , avec la ligne AB; ainsi la composante perpendiculaire à AB sera  $p \times ss' \times \cos(ss', AB)$ . Mais  $ss' \cos(ss', AB)$  est égal à la projection  $tt'$  de l'arc  $ss'$  sur le diamètre AB; ainsi, la composante cherchée sera  $p \times tt'$ , et la somme totale des composantes sera  $AB \times p$ . Et comme cette résultante se partage en deux composantes égales appliquées aux points A et B, en chacun de ces points les tractions opposées seront représentées par  $\frac{1}{2}$  de  $AB \times p$ , ou par  $pR$ , R étant le rayon de l'anneau.

Ainsi, en désignant par K la résistance à la rupture par traction d'une barre ayant 1 millimètre de section, à l'instant de la rupture de l'anneau on aura

$$Ke = pR.$$

735. Examinons maintenant la résistance de la chaudière à la rupture suivant un anneau. Deux anneaux contigus tendent évidemment à se séparer en vertu des pressions exercées par la vapeur sur les deux fonds; or, d'après ce que nous avons dit précédemment, la pression exercée par la vapeur sur un élément quelconque d'un des bouts de la chaudière, pourra se décomposer en deux: l'une, perpendiculaire à l'axe qui sera sans influence sur la traction de deux anneaux contigus, et dont l'autre, parallèle à l'axe, aura pour valeur la pression sur l'unité de surface multipliée par la projection de l'élément sur un plan perpendiculaire à l'axe du cylindre; par conséquent, la somme totale de ces composantes sera égale à  $p\pi R^2$ ; et comme cette pression agit sur toutes les faces latérales des anneaux, on aura

$$2\pi ReK = p\pi R^2; \quad \text{ou} \quad Ke = \frac{pR}{2}.$$

Ainsi, la résistance d'une chaudière à la rupture suivant un anneau est deux fois plus grande que sa résistance à la rupture suivant deux



génératrices; par conséquent, c'est toujours suivant la direction des génératrices que la rupture aura lieu.

736. L'épaisseur  $e$  qu'il faudrait donner à une chaudière pour qu'elle éclatât par une pression  $p$  de la vapeur, serait alors donnée par l'équation  $e = Rp : K$ . En prenant pour unité le centimètre, et en désignant par  $n$  le nombre d'atmosphères de la vapeur, comme la pression d'une atmosphère sur un centimètre carré est de  $1^k,03$ , et que la pression qui produit la rupture est celle qui correspond à  $n - 1$  atmosphères, on aurait :

$$e = \frac{R(n-1)1,03}{K}; \quad \text{ou} \quad e = \frac{R(n-1)}{K}.$$

737. La valeur de  $K$  a été déterminée pour les métaux généralement employés par différents physiciens. Le tableau suivant renferme les résultats obtenus.

*Tableau de la ténacité des différents métaux.*

| NATURE<br>du métal.   | OBSERVATEURS.   | POIDS<br>supporté par 1 millimètre<br>carré,<br>à l'instant de la rupture. |
|-----------------------|---|--|
| Fer forgé.....        | Perronnet..... moyenne.....   | 42,9   |
|                       | Soufflot et Rondelet..... <i>id.</i> .....  | 46,8   |
|                       | Poléni..... <i>id.</i> .....  | 44,  |
|                       | Telford..... <i>id.</i> .....   | 46,  |
|                       | Brown..... <i>id.</i> .....   | 39,1   |
|                       | moyenne.....  | 43,84  |
| Tôle.....             | Navier... } dans le sens du laminage.....<br>perpendiculairement au sens du laminage..... | 40,8   |
|                       |   | 37,4   |
| Fonte.....            | Brown..... moyenne.....   | 14,2   |
|                       | Rennie..... <i>id.</i> .....  | 13,39  |
|                       | moyenne.....  | 13,70  |
| Métal de canon.....   | Rennie..... moyenne.....  | 25,54  |
| Cuivre battu.....     | <i>Id.</i> ..... <i>id.</i> .....   | 24,86  |
| Cuivre laminé.....    | Navier..... <i>id.</i> .....  | 21,1   |
| Cuivre fondu.....     | Rennie..... <i>id.</i> .....  | 13,39  |
| Cuivre jaune fin..... | <i>Id.</i> ..... <i>id.</i> .....   | 12,61  |
| Étain fondu.....      | <i>Id.</i> ..... <i>id.</i> .....   | 3,32   |
| Plomb fondu.....      | <i>Id.</i> ..... <i>id.</i> .....   | 1,27   |
| Plomb laminé.....     | Navier..... <i>id.</i> .....  | 1,35   |

738. Navier a observé qu'en général le fer commence à s'allonger sensiblement sous des charges égales aux  $\frac{2}{3}$  au moins de celles qui produisent la rupture. Le même effet a lieu pour le cuivre, sous des charges égales à la moitié de celles qui produisent la rupture, et avec le plomb pour des charges qui surpassent un peu cette moitié.

Ces trois substances présentent des modifications différentes lors de leur rupture par l'effet d'une tension. L'allongement du fer, avant la rupture, est assez irrégulier; il varie depuis  $\frac{1}{20}$  jusqu'à  $\frac{1}{10}$  environ de la longueur primitive. Le cuivre s'est allongé, avant de se rompre, des  $\frac{2}{5}$  environ de la longueur primitive, la largeur et l'épaisseur diminuant en conséquence. Le plomb, sous les dernières charges que les pièces ont supportées, s'est allongé de  $\frac{1}{70}$  environ de la longueur primitive; mais, sous des charges un peu plus grandes qui ont déterminé la rupture, on a vu les pièces s'allonger lentement et progressivement en diminuant de largeur et d'épaisseur; tandis que les autres substances rompent subitement et présentent une fracture transversale, le plomb rompt lentement en s'étirant, et les deux parties présentent, après leur séparation, une sorte de tranchant par l'effet de la diminution progressive de la largeur et de l'épaisseur, ce qui leur donne à peu près la forme de l'outil nommé *tourne-vis*.

739. Lorsqu'une chaudière cylindrique, fermée, est pressée intérieurement par la vapeur, le métal est tendu simultanément, et dans le sens de la longueur du cylindre, et dans une direction transversale. Les expériences sur la ténacité des métaux ayant été faites sans que les métaux fussent soumis à une traction latérale, il était important de vérifier si cette circonstance n'avait point d'influence sur la résistance qu'ils présentent. Navier a fait à ce sujet deux expériences décisives; cet ingénieur a fait construire deux vases sphériques en tôle, qui avaient 0<sup>m</sup>,33 et 0<sup>m</sup>,28 de diamètre, et 2  $\frac{2}{3}$  millimètres d'épaisseur: ces deux sphères ont été rompues au moyen d'une presse hydraulique, par des pressions de 144 et de 163 atmosphères. Il résulte de là que la résistance de la matière n'est point affaiblie par des tractions égales dirigées dans tous les sens, et qu'elle est la même que si elle n'était tendue que dans une seule direction. En effet, la tôle a été rompue par une tension égale dans tous les sens à environ 46 kil. par millimètre carré de section, nombre un peu plus grand que celui qui est donné par les expériences directes;



ce que l'on peut attribuer à ce que la sphère était consolidée par un cercle, où la tôle était doublée et soudée, et probablement aussi à ce que le fer était d'une très-bonne qualité.

En comparant la résistance du plomb donnée par le tableau précédent à celle qui résulte de quelques expériences faites à Édimbourg, par M. Jardine, sur des tuyaux cylindriques que ce physicien a fait crever sous des pressions qu'il a mesurées, Navier a trouvé la plus parfaite coïncidence.

740. En prenant 3000 kilog. pour la résistance du fer par centimètre carré, l'équation (1) devient

$$e = \frac{R(n-1)}{3000} = \frac{3,3R(n-1)}{10000}.$$

Mais, pour les chaudières à vapeur, l'épaisseur du métal doit être beaucoup plus grande, car la chaudière doit avoir un grand excès de résistance. La valeur de  $e$  sera nécessairement de la forme

$$e = \frac{M. 3,3R(n-1) + N}{10000},$$

attendu que pour  $n = 1$ , l'épaisseur ne peut pas être nulle.

741. L'instruction annexée à la loi du 12 juillet 1828 contient la formule suivante qui donne l'épaisseur que doivent avoir les chaudières à vapeur.

$$e = \frac{36R(n-1) + 3000}{10000}; \quad (2)$$

expression qui donne la valeur de  $e$  en centimètres, et dans laquelle le rayon  $R$  doit aussi être exprimé en centimètres.

Cette formule revient évidemment à donner à la chaudière une épaisseur de 0<sup>m</sup>,003, indépendamment de celle qui est exigée par la pression qu'elle doit supporter, et, en outre, une épaisseur dix fois plus grande que celle qui correspondrait à l'équilibre.

742. Le tableau suivant donne, d'après la loi, les épaisseurs des chaudières cylindriques de tôle et de cuivre, qui correspondent à des diamètres compris entre 50 et 100 centimètres, et pour des pressions qui varient de 2 à 8 atmosphères.

*Tableau des épaisseurs à donner aux chaudières de fer et de cuivre,  
d'après l'ordonnance du 12 juillet 1828.*

| DIAMÈTRES<br>des<br>chaudières | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                | ATMOSPHÈRES |
|                                | mm.         |
| 50                             | 3,90        | 4,80        | 5,70        | 6,60        | 7,50        | 8,40        | 9,50        |
| 55                             | 3,99        | 4,98        | 5,97        | 6,96        | 7,95        | 8,93        | 9,93        |
| 60                             | 4,08        | 5,16        | 6,24        | 7,32        | 8,40        | 9,48        | 10,56       |
| 65                             | 4,17        | 5,34        | 6,51        | 7,68        | 8,85        | 10,02       | 11,19       |
| 70                             | 4,26        | 5,52        | 6,78        | 8,04        | 9,30        | 10,56       | 11,82       |
| 75                             | 4,35        | 5,70        | 7,05        | 8,40        | 9,75        | 11,10       | 12,45       |
| 80                             | 4,44        | 5,88        | 7,32        | 8,76        | 10,30       | 11,64       | 13,08       |
| 85                             | 4,53        | 6,06        | 7,59        | 9,12        | 10,65       | 12,18       | 13,71       |
| 90                             | 4,62        | 6,24        | 7,86        | 9,48        | 11,10       | 12,72       | 14,34       |
| 95                             | 4,71        | 6,42        | 8,13        | 9,84        | 11,55       | 13,26       | 14,97       |
| 100                            | 4,80        | 6,60        | 8,40        | 10,20       | 12          | 13,80       | 15,60       |

Les ordonnances n'établissent aucune distinction entre les chaudières de fer et les chaudières de cuivre, quoique les résistances de ces deux métaux à la rupture soient différentes. Ces résistances sont à peu près entre elles comme 3 est à 2, en admettant que les poids qui produisent la rupture d'une barre ayant 1 centimètre carré de section soient 3000 kilog. pour le fer et 2000 kilog. pour le cuivre; ce sont les nombres minimums donnés par les expériences. Malgré les ordonnances, je pense qu'il est utile de donner aux chaudières de cuivre une plus grande épaisseur qu'aux chaudières de fer.

Comme les épaisseurs des tôles qui se trouvent dans le commerce ne varient pas d'une manière continue, depuis les plus petites jusqu'aux plus grandes, les constructeurs n'emploient que des tôles d'un petit nombre d'épaisseurs, et ils donnent aux chaudières des résistances plus grandes que celles qui sont indiquées par l'ordonnance. Le tableau suivant renferme les dimensions des chaudières et les épaisseurs de tôle, usitées dans l'un des plus grands établissements de chaudronnerie de Paris.

*Tableau des dimensions et des épaisseurs des chaudières pour une pression de 5 atmosphères.*

| NOMBRE<br>de<br>chevaux. | LONGUEUR<br>des<br>chaudières. | LONGUEUR<br>des<br>deux bouilleurs. | DIAMÈTRE<br>des<br>chaudières. | DIAMÈTRE<br>des<br>bouilleurs. | ÉPAISSEUR<br>de la tête<br>des chaudières. | ÉPAISSEUR<br>de la tête<br>des bouilleurs. |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--|
| 2                        | <sup>m.</sup><br>1,65          | <sup>m.</sup><br>1,75               | <sup>m.</sup><br>0,66          | <sup>m.</sup><br>0,28          | <sup>mm.</sup><br>8                        | <sup>mm.</sup><br>8                        |
| 4                        | 2,10                           | 2,20                                | 0,70                           | 0,30                           | 8  | 8  |
| 6                        | 2,45                           | 2,60                                | 0,75                           | 0,35                           | 9  | 10   |
| 8                        | 2,80                           | 2,95                                | 0,80                           | 0,38                           | 10   | 10   |
| 10                       | 3,25                           | 3,40                                | 0,80                           | 0,35                           | 10   | 10   |
| 15                       | 5,00                           | 5,15                                | 0,80                           | 0,44                           | 10   | 10   |
| 20                       | 6,80                           | 7,00                                | 0,85                           | 0,50                           | 10   | 10   |
| 25                       | 8,50                           | 8,65                                | 0,85                           | 0,50                           | 10   | 10   |
| 30                       | 9,20                           | 9,50                                | 1,00                           | 0,60                           | 10,5                                       | 10   |
| 40                       | 10,00                          | 10,30                               | 1,10                           | 0,60                           | 11   | 10   |

743. En mettant à part les deux premières chaudières, dont les surfaces sont trop grandes, toutes les autres ont des surfaces de chauffe qui correspondent à peu près à 1<sup>m</sup>,70 par cheval; en admettant 5 kilogrammes de houille par cheval et par heure, et 5 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, la surface de chauffe correspond à peu près à 15 kilogrammes de vapeur par mètre carré et par heure.

744. Les ordonnances ne parlent pas des chaudières garnies de tubes intérieurs, probablement parce que cette disposition est rarement employée pour les chaudières à haute pression. On peut se rendre compte de la résistance des tuyaux soumis à des pressions extérieures, en remarquant que, si les tubes étaient exactement circulaires, partout d'une égale épaisseur, et si la pression extérieure était la même sur tous les points, cette pression tendrait à écraser le tuyau dans toutes les directions; et comme la résistance des métaux à l'écrasement est plus grande que leur résistance à la rupture par traction, le tuyau offrirait une plus grande résistance à la pression quand celle-ci est extérieure que quand elle est intérieure. Mais si les diamètres du tuyau n'étaient pas parfaitement égaux, ou si, même pendant un temps très-

court, les pressions n'étaient pas les mêmes sur toute sa surface, les forces extérieures tendraient à l'aplatir, d'autant plus que l'aplatissement aurait fait plus de progrès, et le métal ne résisterait qu'à la flexion. Ainsi il faut éviter l'emploi des tuyaux intérieurs, du moins pour les chaudières à haute pression, à moins qu'on ne puisse leur donner un petit diamètre et une grande épaisseur.

745. Les épaisseurs des chaudières, déterminées par la formule (2), paraissent devoir mettre à l'abri de tout accident, car elles dépassent de 3 millimètres dix fois l'épaisseur qui correspond à la rupture; mais par la construction même des chaudières, et par la température qu'elles prennent dans les fourneaux, l'excès de résistance est en réalité beaucoup plus petit. D'abord les feuilles de tôle sont réunies par des rivets également espacés, dont les diamètres diffèrent peu des intervalles qui les séparent, et par cette seule circonstance la résistance de la chaudière est diminuée de moitié. Aussi, dans presque toutes les chaudières qui ont éclaté, la rupture a eu lieu suivant une ligne qui passe par les centres des trous occupés par les rivets. En outre, les chaudières sont toujours à une température moyenne, qui dépasse de beaucoup celle de la vapeur, car c'est en vertu de la différence de température des deux surfaces de la chaudière que la chaleur la traverse, et on sait que la ténacité des métaux diminue beaucoup avec la température.

746. *Essais des chaudières.* L'essai d'une chaudière est important, 1° parce qu'il peut faire connaître des fuites qui ne se seraient pas manifestées sous la pression atmosphérique; 2° parce que le métal, quoique d'une épaisseur suffisante, peut avoir des parties plus faibles, surtout aux clouures et aux soudures, et quand il est en métal coulé, la fonte peut avoir des défauts; circonstances qui feraient éclater la chaudière avec de grands dangers si la pression était due à la vapeur, au lieu que l'eau la fait rompre sans qu'il en résulte aucun accident pour les personnes qui font l'opération.

Mais pour que ces essais puissent donner une certitude complète que la chaudière résistera à la pression de la vapeur, il faudrait connaître la température maximum que le métal atteindra, la ténacité du métal à cette température, et il faudrait opérer à froid, sous une pression convenable. L'incertitude qui règne sur tous ces points, rend souvent presque illusoire l'épreuve dont il est question.



Les ordonnances exigeaient un essai à froid, sous une pression 5 fois plus forte que celle que les chaudières devaient supporter. La pression est maintenant réduite au double. L'opération consiste à remplir la chaudière d'eau, et à la refouler à l'aide d'une pompe, en chargeant convenablement les soupapes.

## § 2. — INDICATEURS DE NIVEAU.

747. Dans toutes les chaudières à vapeur, quel que soit leur usage, il est extrêmement important de connaître, à chaque instant, la position du niveau de l'eau, car ce niveau doit être maintenu à une hauteur constante, et l'indication dont il s'agit sert à régler l'alimentation. Si le niveau s'abaissait beaucoup au-dessous de la limite de chauffe, il pourrait en résulter de graves inconvénients, comme nous l'expliquerons en parlant des explosions des chaudières à vapeur. Si le niveau s'élevait beaucoup au-dessus, le magasin de vapeur pourrait devenir trop petit, et il en résulterait des inconvénients d'un autre genre.

Aussi, toutes les chaudières à vapeur sont pourvues d'appareils destinés à faire connaître à chaque instant la hauteur de l'eau dans la chaudière. Nous décrirons successivement tous ceux qui sont employés et ceux qui ont été proposés.

748. *Appareils à robinets.* La figure 1<sup>re</sup> (pl. 18) représente le plus ancien appareil de niveau. Il est formé de deux tubes qui traversent la chaudière et dont les extrémités intérieures comprennent entre elles le niveau auquel l'eau doit être maintenue; les autres extrémités des tubes sont garnies de petits robinets. Il est évident que quand le niveau de l'eau sera compris entre les extrémités des tubes, un des robinets ne devra laisser sortir que de la vapeur, et l'autre de l'eau. Les clefs des robinets sont en bois, afin que le chauffeur puisse facilement les tourner sans se brûler. Chaque tube est garni d'un collet qui s'appuie contre la surface extérieure de la chaudière, et qui est fortement serré par un écrou placé en dedans; avant de serrer l'écrou on met une couche de mastic de fonte entre le collet et la chaudière.

749. Pour éviter les causes d'erreur qui peuvent résulter de l'agitation de l'eau par le fait même de l'ébullition, il serait très-utile de placer dans la partie de la chaudière où se trouvent les extrémités des tubes,

un panier en tôle, fixe, percé d'un grand nombre de petits trous : la petite étendue des orifices de communication avec l'eau de la chaudière atténuerait les oscillations, et le niveau serait sensiblement horizontal dans l'intérieur du panier.

La figure 2 (pl. 18) représente une disposition analogue. Les tubes sont droits et placés à des hauteurs qui comprennent le niveau que l'eau doit conserver dans la chaudière. Par cette disposition les tubes peuvent se monter à vis sur la chaudière.

750. La figure 3 (pl. 18) représente un appareil fondé sur le même principe, mais qui permet de déterminer la hauteur du niveau, quand même il aurait éprouvé de grandes variations. Il se compose d'un tube droit, vertical, gradué, et mobile dans le sens de sa longueur à travers une boîte à étoupe; ce tube est garni d'un petit robinet à sa partie supérieure. On l'abaisse progressivement en le tenant par le manche *ab*, jusqu'à ce que le robinet *c* donne de l'eau; on lit alors sur le tube la distance du niveau de l'eau à un point fixe qu'on a pris pour point de départ. La figure 4 représente le tube et la boîte à étoupe sur une plus grande échelle; *mn m'n'* est un tube garni d'un rebord qui s'appuie sur la chaudière; il est serré, et le joint est rendu étanche par un écrou *pp'* qui se visse en dedans de la chaudière, et qui porte une rondelle de carton garnie de mastic rouge; ce tube porte la pièce *qq'* qui comprime les étoupes grasses *r*, et qui est percée d'un canal qui donne passage au tube mobile; la capsule qui termine cette pièce est destinée à recevoir la graisse qu'on doit de temps en temps verser sur les étoupes. On voit par la disposition de la courbure de la partie inférieure de la pièce mobile, qu'en la descendant, on comprime les étoupes contre le tube.

751. La figure 5 (pl. 18) représente un appareil à l'aide duquel on peut également déterminer la hauteur du niveau, mais par un moyen différent. Le tube par lequel doit se dégager l'eau ou la vapeur, est horizontal et mobile autour de son axe à travers une boîte à étoupe. Son extrémité est courbée à angle droit. On voit d'après cette disposition, qu'en tournant le tube au moyen du manche *ab* jusqu'à ce qu'il sorte de l'eau par le robinet, la flèche, qui est parallèle et égale à la partie recourbée du tube, indiquera la hauteur du niveau.

752. On peut ranger dans la même classe l'appareil figure 6, qui est souvent employé dans les chaudières anglaises. *abcd* est une pièce en cuivre,



filetée à son extrémité et introduite dans un trou taraudé d'une chaudière; cette pièce est percée d'un canal central occupé par une tige d'un diamètre peu différent, terminé d'un côté par une soupape qui, dans la position indiquée par la figure, ferme complètement l'orifice du tube; l'autre extrémité de la pièce intérieure est terminée par une espèce de chapeau *m*, monté à vis. Le tube intérieur communique avec un petit canal latéral *e*, ouvert à l'extérieur. Lorsqu'on veut savoir si l'eau dans la chaudière est à la hauteur du tube, on donne un petit coup sec sur la tête de la tige, la pression intérieure la ramène aussitôt à sa position primitive; mais dans l'intervalle il se dégage par l'ouverture *e* de l'eau ou de la vapeur, suivant que le niveau de l'eau est au-dessus ou au-dessous du tube.

Ces différents moyens de reconnaître le niveau de l'eau offrent peu de certitude, parce que, par la diminution de pression produite par l'ouverture du robinet, à l'extrémité intérieure du tube, et qui se manifeste d'abord sur la partie de la surface de l'eau qui est la plus voisine de cette extrémité, il se produit un bouillonnement et une élévation partielle du niveau qui peut porter de l'eau à l'extrémité du tube. Ce fait a été reconnu par des expériences directes, faites, il y a quelques années, à l'institut Francklin. La chaudière était garnie de deux plaques de verre épais, dont l'une servait à éclairer l'intérieur de la chaudière, et l'autre à observer ce qui s'y passait.

753. *Appareils à tubes communicants.* Ces appareils consistent en un tube de verre vertical qui communique par sa partie inférieure avec la partie de la chaudière qui doit toujours être remplie d'eau, et par sa partie supérieure avec la chambre de vapeur. Il est évident que par cette disposition, le liquide se met dans le tube au même niveau que dans la chaudière. La figure 7 (pl. 18) représente la disposition la plus simple de ces appareils. Les deux pièces en cuivre *abcd* et *a'b'c'd'*, percées de part en part et dans deux directions perpendiculaires, sont fixées par des écrous roulants *m* et *m'* aux deux tubes *p* et *p'* fixés eux-mêmes à la chaudière; elles reçoivent les deux extrémités du tube de verre *ef* qui y sont maintenues par de la filasse et du mastic rouge. Les écrous *a* et *a'* qui ferment les douilles verticales, servent à introduire le tube de verre. Les douilles *b* et *b'* servent à nettoyer les tubes de communication. Le panier placé dans l'intérieur de la chaudière a

pour objet de diminuer les oscillations de l'eau dans le tube; oscillations qui, sans cette disposition, ne permettraient pas d'observer le niveau avec une précision suffisante. Cet appareil a plusieurs graves inconvénients: le premier est de ne pas maintenir à une distance constante les douilles en cuivre que la pression de la vapeur tend à séparer; le second est de ne pas permettre de remplacer facilement le tube de verre pendant le travail, quand il vient à se briser. La disposition représentée dans les deux figures 8 et 9 (pl. 18) n'a pas ces inconvénients; la tige  $tt'$  sert à maintenir les deux douilles; les robinets  $x, x'$  à intercepter la communication de l'appareil avec la chaudière, quand le tube de verre est cassé. Les demi-anneaux  $z$  et  $z'$  sont destinés à préserver l'appareil des instruments des chauffeurs.

754. La figure 10 (pl. 18) représente l'appareil de niveau d'eau employé dans les chaudières des machines locomotives. Cet appareil a la plus grande analogie avec le précédent. Les robinets  $x$  et  $x'$  servent à établir ou à intercepter la communication de l'appareil avec la chaudière; les boîtes à étoupe  $a, a'$ , servent à rendre étanches les joints du tube de verre avec les douilles qui doivent le recevoir; les petits boulons  $b$  et  $b'$  servent à nettoyer les tuyaux de communication de l'appareil avec la chaudière, et enfin le robinet  $c$  sert à nettoyer le tube en y faisant passer un courant d'eau.

755. Les figures 11 et 12 (pl. 18) représentent un appareil plus simple employé dans quelques grandes chaudières à vapeur. Les douilles  $m, n$ , qui reçoivent le tube de verre, sont réunies par deux tiges  $ab$  et  $a'b'$  qui maintiennent leur écartement. La douille  $n$  a intérieurement un talon sur lequel repose le tube de verre, et elle est garnie d'un tube à robinet qui communique avec la partie inférieure de la chaudière. La douille supérieure a un diamètre qui excède celui du tube; elle est fermée supérieurement par un bouchon maintenu par une vis, et garni latéralement d'un tube à robinet qui communique avec la chambre à vapeur de la chaudière. Cette disposition est simple, mais il est difficile de rendre bien étanches les joints du tube et des douilles.

756. Enfin, les figures 13 et 14 représentent l'appareil de niveau d'eau de M. Hoyau. Il ne diffère de ceux que nous avons décrits que par des détails de construction qui sont faciles à comprendre à l'inspection des figures. Il y a cependant dans cet appareil une innovation utile que

nous devons indiquer : la douille inférieure renferme une pièce de cuivre sphérique reposant sur un siège percé de plusieurs orifices qui établissent la communication de la partie inférieure de la chaudière avec le tube de verre; quand par accident le tube vient à se casser, l'eau de la chaudière soulève la sphère, qui ferme alors complètement l'orifice supérieur de la douille, et arrête, par conséquent, l'écoulement de l'eau de la chaudière. Ces boules ont en outre l'avantage de diminuer l'amplitude des oscillations du niveau de l'eau dans le tube. L'appareil est disposé de manière à recevoir la vapeur par la partie supérieure et à communiquer latéralement avec un manomètre; mais en fermant le tuyau supérieur, et en faisant communiquer les deux tuyaux latéraux avec la chaudière, l'appareil servirait seulement à l'indication du niveau de l'eau. L'appareil ainsi simplifié est bien supérieur, sous tous les rapports, à ceux que nous avons décrits précédemment.

M. J. J. Meyer de Mulhausen a introduit plusieurs modifications importantes dans l'appareil de M. Hoyau. Pour éviter l'encrassement des tubes de verre, il fait communiquer la partie supérieure de l'appareil avec la chaudière par un tube large et d'un assez grand développement, disposé de manière que la vapeur condensée dans ce tube tombe dans le tube de verre. Pour éviter la fracture de ce dernier par les courants d'air, il l'enveloppe d'un autre d'un plus grand diamètre, qui repose sur les bords de la boîte à étoupe inférieure, ou il place l'appareil dans une cage de verre. D'après le rapport d'un comité de la société industrielle de Mulhausen, des appareils de M. Meyer qui fonctionnaient depuis une année, n'avaient éprouvé aucun accident, et les tubes de verre étaient encore parfaitement nets.

757. *Appareils à flotteurs.* L'appareil le plus simple est représenté figure 15 (pl. 18). Le flotteur est composé de deux calottes en cuivre *ab* et *cd*, soudées sur leurs bords; ce flotteur, qui doit être plus léger que l'eau, est surmontée d'une tige métallique *ef* qui traverse deux guides *m* et *n*, et s'élève dans une cloche de verre *gh* d'un petit diamètre, masquée dans une douille *ik* fixée sur la chaudière.

Lorsque les deux calottes du flotteur ont été soudées, le corps lenticulaire renfermait de l'air à la température et à la pression extérieure; alors, quand il sera plongé dans l'eau à des températures de 100°, 121°, 135°, 145°, 153°, 160°, 166°, 172°, qui correspondent à des

forces élastiques de la vapeur de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 atmosphères, la force élastique de l'air renfermé dans le flotteur sera de 1,36; 1,43; 1,48; 1,52; 1,55; 1,57; 1,59; 1,61 atmosphères; alors la pression extérieure tendra d'autant plus à écraser la lentille que la pression de la vapeur sera plus considérable, et, par conséquent, on devra donner aux lames de métal dont elle est formée une très-grande épaisseur. Mais si, avant de fermer la lentille, on y avait introduit une certaine quantité d'eau, suffisante pour remplir sa capacité de vapeur saturée à la plus haute température de l'eau dans la chaudière, il est évident que pour les forces élastiques de la vapeur dans la chaudière 1 à 8 atmosphères, les pressions intérieures seraient de 2,36; 3,43; 4,48; 5,52; 6,55; 7,57; 8,59 et 9,61 atmosphères; ainsi, la pression intérieure excéderait la pression extérieure d'une quantité qui croîtrait de 1,36 à 1,61 atmosphères. On voit, d'après cela, qu'il est toujours avantageux d'introduire de l'eau dans le flotteur, parce qu'il peut alors résister à la rupture avec une épaisseur de métal beaucoup plus petite que quand il ne renferme que de l'air.

758. Les figures 16 et 17 (pl. 18) représentent un appareil disposé d'une autre manière. Le flotteur en pierre A est équilibré par un contre-poids B, de manière à être plus léger que l'eau. La chaîne qui réunit ces deux corps passe sur une poulie fixe dont l'axe traverse une boîte à étoupe, et se termine par un index qui parcourt un cadran où se trouve indiquée la hauteur de l'eau dans la chaudière.

759. La figure 1<sup>re</sup> (pl. 19) représente un appareil à flotteur plus léger que l'eau, qui, en s'abaissant au-dessous de la limite assignée, ouvre la soupape *m*, qui laisse dégager la vapeur par un tuyau d'orgue dont le bruit avertit le chauffeur.

760. La figure 2 (pl. 19) représente un appareil qui produit le même effet. Le flotteur en pierre A est équilibré par un contre-poids B; la tige creuse qui le supporte traverse une boîte à étoupe *c*; cette tige renferme un tuyau d'orgue dans lequel la vapeur peut s'introduire par un orifice qui ne se trouve dans la chaudière que quand le flotteur est descendu au-dessous d'une certaine limite.

761. Dans la figure 3 (pl. 19) l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière, au-dessous d'une certaine limite, est indiqué par le dégagement de la vapeur à l'extrémité d'un tube. L'appareil se compose d'un



tube vertical  $ab$ , d'un grand diamètre, ouvert par les deux bouts, dont l'extrémité inférieure plonge dans la chaudière jusqu'à la limite assignée, et qui s'élève à une hauteur qui excède le maximum de pression de la vapeur dans la chaudière, et d'un tube  $mn$ , d'un petit diamètre, dont l'extrémité se trouve à une petite distance du chauffeur.

762. La figure 4 (pl. 19) représente la disposition la plus simple des appareils à flotteurs.  $A$  est un flotteur en pierre équilibré par le contre-poids  $P$ ; la tige  $ab$  est un fil de cuivre d'un diamètre seulement suffisant pour soutenir le flotteur; il passe à travers une boîte à étoupe  $c$ , et se termine par une petite chaîne qui passe sur la gorge de la poulie  $M$ . Une aiguille fixe  $mn$  indique sur un cadran  $pq$ , fixé à la poulie, la hauteur du niveau. On pourrait évidemment remplacer la poulie par un balancier, comme dans la figure 2.

763. Lorsqu'on connaît le volume et la densité du flotteur, il est facile de déterminer le poids  $P$  qu'il est nécessaire de placer à l'autre extrémité du levier, pour que le flotteur reste en équilibre stable, plongé à moitié dans l'eau. En effet, en désignant par  $V$  le volume du flotteur, par  $d$  sa densité et par  $l$  et  $l'$  les deux bras du balancier, on aura

$$(Vd - \frac{1}{2}V)l = Pl', \quad \text{d'où} \quad P = V \left( \frac{2d-1}{2} \right) \frac{l}{l'}$$

764. On a proposé de placer le flotteur et son contre-poids dans la chaudière, et en dehors un petit contre-poids pour tendre le fil. Cette disposition, imaginée par M. Chaussenot, a l'avantage de permettre l'emploi d'un fil très-fin qui offre peu de résistance dans son mouvement à travers la boîte à étoupe. Pour que l'appareil soit plus sensible, l'axe de rotation est formé d'un cylindre soutenu par deux cônes qui s'engagent dans des trous de même forme pratiqués aux deux extrémités; ce mode de suspension est représenté dans la figure 9 (pl. 24). Cette disposition est préférable aux autres; elle a seulement l'inconvénient d'embarrasser la chambre de vapeur.

765. M. Schlumberger, de Mulhausen, place le contre-poids dans la chaudière; l'axe de rotation sort à travers une boîte à étoupe, et porte à son extrémité l'aiguille indicatrice. Mais, par cette disposition, le niveau n'est indiqué par l'aiguille que dans des limites de hauteur très-peu étendues, attendu que, pour une petite inclinaison du balancier, ses extrémités touchent la chaudière. Pour éviter cet inconvénient, il

a placé, depuis, le contre-poids en dehors à l'extrémité d'un levier fixé à l'axe de rotation. M. Schlumberger pense que cette disposition est préférable aux anciennes, dans lesquelles la portion du fil qui frotte dans la boîte à étoupe s'use rapidement, et où il est alors difficile de s'opposer à la perte de vapeur; il ajoute que, par cette nouvelle disposition, la force qui produit le mouvement, agissant à l'extrémité d'une longue tige, a plus de facilité pour vaincre les frottements. Mais cet avantage est compensé par le plus grand diamètre de l'axe qui augmente la surface frottante. Cet appareil est embarrassant, plus cher que les anciens, et ne présente réellement aucun avantage.

766. L'appareil représenté par la figure 5 (pl. 19) est disposé d'une autre manière : le flotteur AA est annulaire; il est fixé par deux ou trois tiges de fer à une masse B, à l'extrémité de laquelle est attaché un fil de cuivre qui traverse un tube ouvert par les deux bouts, dont la partie inférieure descend au-dessous du niveau de l'eau dans la chaudière, et dont l'autre s'élève à une hauteur qui excède celle de l'eau correspondante au maximum de pression de la vapeur; le fil se termine par une chaîne qui passe sur deux poulies fixes et se termine par un contre-poids P. La hauteur du niveau de l'eau dans la chaudière est indiquée par la position du poids P sur l'échelle *mn*. Le tube de niveau *ab* sert à indiquer la pression de la vapeur, du moins dans les limites déterminées par sa hauteur et sa position. Par cette disposition, on évite le frottement des fils de suspension des flotteurs dans les boîtes à étoupe; mais on ne peut évidemment s'en servir que pour les chaudières à basse pression.

767. Les figures 6 et 7 (pl. 19) représentent l'appareil de niveau qui est employé dans les chaudières de bateaux à vapeur. Il se compose d'une boule creuse en cuivre, terminée par un tube recourbé, à angle droit, fermé, à l'extrémité duquel se trouve une aiguille; la partie *ab* est mobile dans une boîte à étoupe fixée horizontalement dans la face verticale de la chaudière qui se trouve en avant; l'aiguille marque, sur un cadran placé contre la chaudière, la hauteur de l'eau.

768. Enfin, on pourrait observer directement le niveau de l'eau dans la chaudière, en employant la disposition indiquée dans la figure 8 (pl. 19); elle consiste en deux tubulures opposées, convenablement inclinées, fermées par deux plaques de verre épais; par l'une, on éclaire la surface



de l'eau; et par l'autre, on peut mesurer sa hauteur sur une tige graduée fixée verticalement dans la chaudière.

Dans toutes les figures des appareils de niveau à flotteur, nous avons indiqué, autour du flotteur, une enveloppe métallique percée de trous, afin de diminuer l'amplitude des oscillations du flotteur, et de permettre de mesurer plus facilement la hauteur du niveau moyen; mais il est important de laisser à ces enveloppes des communications assez étendues avec la chaudière, pour qu'il reste dans le vase intérieur un petit mouvement oscillatoire nécessaire pour s'opposer à l'adhérence du fil dans la boîte à étoupe; d'ailleurs on s'assure, par ces petits mouvements, que l'appareil marche librement et que les étoupes ne sont pas trop comprimées.

769. On a imaginé un grand nombre de dispositions différentes d'appareils qui produisent un grand bruit lorsque le niveau s'est abaissé au-dessous de la limite fixée; nous en avons indiqué plusieurs. Celui qui paraît fonctionner avec le plus de régularité, est celui de M. Chausenot (fig. 8, 9 et 10, pl. 24); il consiste en un flotteur intérieur qui ouvre une soupape qui communique avec un sifflet.

770. Dans les grandes chaudières à vapeur, il est toujours indispensable d'avoir à la fois un indicateur de niveau à tube, et un indicateur à flotteur. Pour le premier, la disposition de M. Hoyau, avec les modifications apportées par M. Mayer, est bien préférable à toutes les autres. Pour l'indicateur à flotteur, le plus simple, celui qui est représenté par la figure 4 (pl. 19), me paraît devoir être employé de préférence, en donnant au fil de cuivre le diamètre seulement suffisant; mais, pour ces deux appareils, il faudrait diminuer l'amplitude des oscillations par les paniers de tôle dont nous avons parlé. Il serait aussi très-utile d'employer un flotteur à sifflet disposé comme dans les figures 1 (pl. 22), ou 8, 9 et 10 (pl. 24). Quant aux chaudières de bateaux, on ne peut employer que l'appareil des figures 6 et 7 (pl. 19).

### § 3. — MANOMÈTRES.

771. Les manomètres servent à indiquer à chaque instant la pression de la vapeur dans la chaudière; ces instruments sont d'une nécessité absolue: la raison en est trop évidente pour qu'il soit nécessaire d'insis-

ter sur leur importance. Les manomètres sont disposés de différentes manières, suivant qu'ils sont destinés à des chaudières à basse pression ou à haute pression.

*Manomètres pour les chaudières à basse pression.*

772. La disposition la plus généralement employée pour les manomètres à basse pression, consiste en un canon de fusil recourbé de manière à former deux branches parallèles; les deux branches sont placées verticalement : l'extrémité de l'une d'elles est mise en communication avec la partie supérieure de la chaudière; l'autre est ouverte et se termine par une échelle divisée; on introduit du mercure dans les deux branches, et une tige de bois dans celle qui est ouverte; les mouvements du mercure occasionnés par les variations de pression sont indiqués sur l'échelle par l'extrémité du flotteur. Les figures 9, 10 et 11 (pl. 19) représentent cette disposition. Il est évident que l'extrémité du flotteur correspond au zéro de l'échelle quand le mercure est au même niveau dans les deux branches du tube, et que, pour avoir la pression de la vapeur dans la chaudière, il faut ajouter à la hauteur du baromètre, le double de la hauteur de l'extrémité du flotteur, en supposant toutefois que les deux parties du tube aient exactement le même diamètre. Pour éviter de doubler la hauteur, les échelles sont ordinairement divisées en demi-centimètres qui sont marqués centimètres.

773. Il est facile de voir ce qu'il y aurait à faire si les deux parties du tube avaient des diamètres différents; en désignant par  $D$  le diamètre de la partie du tube qui est en communication avec la chaudière, par  $d$  celle de l'autre branche, il est évident que, quand le mercure montera de  $h$  dans cette dernière branche, il descendra de  $h \times d^2 : D^2$  dans l'autre, et par conséquent que la différence de niveau dans les deux branches sera

$$h + h \cdot \frac{d^2}{D^2} = h \left( \frac{D^2 + d^2}{D^2} \right),$$

et par conséquent, pour que les divisions de l'échelle donnent directement l'excès de la pression de la vapeur sur la pression atmosphérique en centimètres, les divisions devront être égales à

$$1^c \cdot \frac{D^2}{D^2 + d^2}.$$



Ce mode de construction peut présenter des erreurs assez notables, dues à la quantité d'eau plus ou moins considérable que renferme la branche en communication avec la chaudière. Cependant, comme cette partie du tube est en général toujours pleine d'eau, on peut estimer assez facilement la correction à faire. En supposant que le zéro de l'échelle ait été pris quand la chaudière ne fonctionnait pas, et que la branche en communication avec elle était pleine d'eau, il est évident que, quand le mercure descendra dans cette branche de 1 centimètre la colonne de mercure sera remplacée par une colonne d'eau, et qu'alors la différence du niveau, estimée en mercure, ne sera plus que de

$$h + h \cdot \frac{d^2}{D^2} \cdot \frac{25}{27} = h \cdot \left( \frac{27D^2 + 25d^2}{27D^2} \right),$$

et par conséquent que chaque division de l'échelle, correspondante à 1 centimètre, ne devra avoir qu'une longueur égale à

$$1^c \cdot \frac{27D^2}{27D^2 + 25d^2},$$

et, dans le cas ordinaire ou  $D = d$ , cette longueur sera

$$1^c \cdot \frac{27}{52} = 0,519.$$

On voit, d'après cela, que la cause d'erreur que nous venons de signaler, n'a réellement de l'influence qu'autant que le tube ne reste pas plein d'eau. On peut le maintenir constamment dans cet état en plaçant à son origine un réservoir dans lequel le niveau ne pourrait éprouver que des variations insensibles pour les plus grandes variations de niveau du mercure.

Ces appareils servent de soupapes de sûreté. En effet, le maximum de hauteur de la colonne de mercure étant égal à la longueur de la branche ouverte, aussitôt que la pression de la vapeur aura fait descendre le mercure au point le plus bas de la courbure du tube, la vapeur s'échappera en entraînant le mercure. Pour éviter la perte de ce métal, on peut disposer l'appareil comme l'indiquent les figures 12 et 13 (pl. 19); dans la première, le tube d'ascension est en verre; dans l'autre, il est en fer.

774. La figure 14 (pl. 19) représente un appareil de même nature, destiné à une chaudière produisant de la vapeur à deux ou trois atmosphères. Le flotteur est en fer et équilibré en partie par un contre-poids

auquel il est relié par un fil métallique très-fin ou un cordon qui passe sur une poulie fixe; le contre-poids parcourt une échelle divisée qui indique la pression de la vapeur. Lorsque la pression dépasse la limite assignée, le contre-poids lâche la détente d'une sonnerie; c'est une précaution importante pour prévenir la négligence du chauffeur ou son absence momentanée, et surtout pendant la nuit, pour le réveiller s'il s'abandonnait au sommeil.

775. MM. Nicolas Kœchlin et frères, de Mulhausen, ont adapté, à l'indicateur de leur manomètre, un mécanisme qui agite longtemps une sonnerie lorsque la pression de la vapeur a dépassé la limite de tension fixée, et qui en même temps abaisse le registre de la cheminée; cette disposition est représentée figure 15 (pl. 19).

AA, longue branche du siphon; BB, courte branche coudée en C qui se rend à la chaudière en H; D, index en cuivre; E, flotteur en fer; F, poulie en cuivre qui soutient le fil qui unit le poids E avec l'index D; GG, planche fixée à la maçonnerie de la chaudière, et qui porte le baromètre et son échelle; I, plateau sur lequel le mécanisme de la sonnerie est placée; K, pièce plate en fer fixée sur l'arbre de la poulie N: elle porte en L un excentrique pour agiter la sonnette M; OO, corde enveloppée autour de la poulie N; P, poids attaché à la corde pour la tenir tendue; Q, second poids qui fait tourner rapidement la poulie N avec la pièce K, quand cette dernière est dégrénée; R, levier qui engrène avec la pièce K par un arrêt T; S, pièce qui glisse le long d'un fil tendu sur la planche du baromètre, et qui est attachée au levier R; quand l'index vient à la toucher, elle tire le levier R et le dégrène; U, contre-poids du registre; V, levier en communication avec le verrou X qui retient la crémaillère Y du registre. Lorsque le levier R dégrène la poulie N et fait sonner, le contre-poids P soulève le levier, décroche le verrou X, et ferme le registre; la poignée Z sert à donner au registre la position voulue, indépendamment du mécanisme ci-dessus; n, rochet à double cliquet fixé sur la poulie N, pour empêcher la sonnerie d'agir pendant que l'on remonte le mécanisme.

776. Les figures 16, 17 et 18 (pl. 19) représentent deux coupes verticales d'une autre disposition de manomètres à basse pression. Cet appareil se compose d'une cuvette en fonte rectangulaire, pleine de mercure, et fixée contre une muraille; elle reçoit la vapeur par un tuyau *ab* qui

s'élève au-dessus du niveau du mercure; et le mercure monte par la pression de la vapeur, dans un tube plus ou moins long qui plonge jusqu'au fond de la cuvette. Ce tube se termine à la partie supérieure par un petit chapeau destiné à empêcher la projection du métal, dans le cas où la tension de la vapeur dépasserait la limite de pression que peut indiquer l'appareil, et il est environné à cette même extrémité d'un vase destiné à recevoir le mercure qui s'échapperait dans le cas dont il est question. Le tube est fixé dans la cuvette par du mastic de fonte comprimé dans l'intervalle qui le sépare de la douille destinée à le recevoir, et le vase supérieur est fixé au tube d'une manière quelconque.

777. La partie de cet appareil qui a pour objet d'éviter la projection du mercure quand la pression de la vapeur dépasse le maximum de pression, pourrait évidemment s'appliquer aux appareils que nous avons déjà décrits.

778. Les figures 1, 2, 3, 4, 5 (pl. 20) représentent le manomètre à sonnerie et à bascule de M. Edwards. Figure 1, coupe verticale; figure 2, vue de côté; figure 3, plan de la soupape de sûreté; figure 4, plan du réservoir à mercure; figure 5, coupe à une plus grande échelle de la partie supérieure du manomètre.

*a*, réservoir à mercure communiquant avec la chaudière à vapeur par un tube *b* muni d'un robinet *b'*. *c*, colonne montante faisant fonction d'un manomètre à air libre. *d*, flotteur qui se lève quand le mercure atteint une hauteur suffisante. *e*, collier à échappement faisant partie du flotteur, et destiné à empêcher le treuil *m* de tourner avant que le flotteur soit soulevé. *f*, tige qui, en tournant, agite la sonnette quand le flotteur a fait lever le collier à échappement. *g*, colonne descendante par laquelle le mercure se rend dans le réservoir *h* placé à l'extrémité du levier de la soupape de sûreté, et dont la capacité est telle que le poids du mercure qui peut y être contenu fasse soulever la soupape, indépendamment de la pression de la vapeur qui tend à produire le même effet. *i*, levier de la soupape de sûreté. *k*, contre-poids. *l*, soupape de sûreté. *m*, treuil monté sur la tige *f*, et sur lequel s'enroule la corde *n* qui porte le poids *o*. *p*, mentonnet fixé sur l'axe *f* et qui, en frappant contre le levier *q*, agite la cloche *r* lorsque le treuil tourne, entraîné par le poids *o*. *s*, ressort fixé au levier *q*, et qui ramène la cloche.

779. Une disposition analogue a été imaginée par M. Henri, de Mulhausen; mais la vapeur n'agit pas immédiatement sur le levier de la soupape, et l'écoulement d'une très-petite quantité de mercure est suffisante pour faire ouvrir la soupape. Dans cet appareil, lorsque le mercure se déverse, il tombe dans un bocal en tôle qui agit sur une détente très-sensible par le moyen de tringles et de leviers qui dégagent un marteau; celui-ci, en tombant, frappe un long levier qui d'horizontal qu'il était devient vertical, ferme le robinet de communication de la chaudière avec le manomètre, et ouvre un autre robinet qui établit une large communication de la chaudière avec l'air; 30 grammes de mercure suffisent pour faire jouer l'appareil (Société d'encouragement, tome 32). Cet appareil est encore plus compliqué que le précédent, et n'a pas été adopté.

*Manomètres destinés aux chaudières à haute pression.*

780. Les dispositions que nous avons décrites ne pouvant s'appliquer que difficilement aux chaudières à haute pression, à cause de la grande longueur des tubes qu'il faudrait employer, on a imaginé d'autres appareils fondés sur un principe différent.

La figure 6 (pl. 20) représente la disposition la plus simple d'un manomètre à haute pression; cet appareil consiste en un tube de verre *abcd*, formant deux branches parallèles à peu près égales, fermé à l'extrémité *a*, renfermant de l'air et du mercure, et communiquant par l'extrémité *d* avec un tuyau, garni d'un robinet M, qui se rend à la partie supérieure de la chaudière. Le mercure s'élève à peu près à la moitié de la hauteur des tubes. Quand la pression de la vapeur excède celle de l'atmosphère, le mercure monte dans le tube *ab*, et la pression de la vapeur se trouve mesurée par la force élastique de l'air comprimé dans le tube, qu'on déduit de son volume, et par la différence de hauteur des deux colonnes. En désignant par *H* la longueur de la partie du tube occupée par la colonne d'air à la pression atmosphérique, par *h* la hauteur dont s'élève le mercure dans la branche *ab*, sous une pression *P* de la vapeur, on aura évidemment

$$P = 2h + 0,76 \cdot \frac{H-h}{H}, \quad (1)$$



équation d'où l'on tire

$$h = \frac{H(P - 0,76)}{2H - 0,76} \quad (2)$$

Alors, en donnant à P successivement les valeurs qui correspondent à  $\frac{5}{4}, \frac{3}{2}, \frac{7}{4}, 2, 3$  atmosphères, la dernière équation donnera les valeurs de  $h$  qui correspondent à ces différentes pressions. Ces calculs supposent que le tube ait partout le même diamètre, et que sa partie supérieure soit terminée par une surface plane. Pour plus d'exactitude, on pourrait diviser le tube en parties d'égale capacité; alors, aux divisions correspondantes aux  $\frac{4}{5} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2}$  du volume primitif correspondraient des forces élastiques de  $\frac{5}{4} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \dots$  atmosphères, mais seulement pour l'air comprimé, et il faudrait y ajouter la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes, estimée en atmosphère. Pour éviter l'embarras de cette dernière correction, et même celui de la division du tube en parties d'égales capacités, on construit un manomètre étalon avec beaucoup de soin, et on gradue les autres sur celui-là, en les soumettant, au moyen d'une pompe, à des pressions égales croissantes de quart en quart d'atmosphère.

781. Dans l'appareil figure 7 (pl. 20), le niveau du mercure reste sensiblement constant dans une des branches; pour cet appareil, la formule (1) serait applicable en changeant  $2h$  en  $h$ .

Il est important de donner une grande longueur aux deux branches du tube qui se trouvent au-dessous du niveau constant du mercure, afin que l'air, par les variations brusques de pression, ne puisse pas en sortir.

782. Pour éviter de donner une trop grande longueur au tube qui renferme l'air, on peut employer la disposition indiquée par la figure 8 (pl. 20). Les deux branches du tube renferment des boules situées à la même hauteur et qui sont à moitié pleines de mercure quand la pression exercée sur le mercure est égale à la pression de l'atmosphère; mais celle du tube à air est beaucoup plus petite que l'autre. Par cette disposition, le mercure ne commence à s'élever dans le tube qu'après avoir rempli la boule; c'est-à-dire qu'autant que la pression dépasse une certaine limite; cette boule a aussi pour objet de s'opposer à la sortie de l'air du tube par une diminution brusque de pression.

Le manomètre de M. Buntzen (fig. 9, pl. 20) est disposé de la même manière.

783. M. Bunten a imaginé une manière très-commode de réunir les tubes de verre avec des tuyaux métalliques; les deux tuyaux doivent être à peu près du même diamètre et cannelés comme les extrémités du robinet (fig. 10 et 11, pl. 20); on les place bout à bout, recouverts de mastic rouge et enveloppés d'un tuyau de plomb d'un diamètre un peu plus grand; alors avec une pince on donne facilement au cylindre de plomb la forme des cannelures des bouts des tuyaux, et le joint devient parfaitement étanche quand le mastic a pris un peu de consistance.

784. On donne aussi aux manomètres à haute pression une disposition analogue à celle que nous avons indiquée précédemment pour les chaudières à basse pression, et qui est représentée dans les figures 12 et 13 (pl. 20). Le mercure est renfermé dans une cuvette en fonte, dans laquelle plonge la partie inférieure du tube de verre qui est fixé au moyen d'une boîte à étoupe. Cet appareil a le grand inconvénient de laisser facilement dégager de l'air dans la vapeur par un abaissement brusque de pression. L'appareil (fig. 14 et 15, pl. 20) est disposé pour éviter cet inconvénient; un tube vertical en fer est fixé à la partie inférieure de la cuvette, et le tube de verre y plonge jusqu'à une petite distance de la partie inférieure.

785. Dans tous ces appareils, la plus grande difficulté de la graduation réside dans l'influence de la variation de niveau du mercure dans les deux branches ou seulement dans la cuvette. On peut éviter complètement cette difficulté au moyen de la disposition indiquée par la figure 16 (pl. 20). Le tube *ab* est capillaire, horizontal, et à la hauteur du niveau du mercure dans la boule M. La boule N est destinée à empêcher l'air de se dégager par les diminutions brusques de pression. Pour graduer cet appareil, il suffit évidemment de diviser le tube *ab* en parties d'égale capacité à partir d'un certain point *a*; les divisions qui correspondent à la moitié, au tiers, au quart, au cinquième à partir du point *b*, seront évidemment celles que le mercure atteindra quand la force élastique de la vapeur sera de 2, 3, 4, 5 atmosphères. Mais, pour introduire le mercure dans l'appareil de manière que l'extrémité de la colonne de mercure se trouve au point *a* quand la pression qui s'exerce dans la boule M est celle de l'atmosphère, on ne peut pas employer la méthode ordinaire; il faut laisser le tube *ab* ouvert à l'extrémité *b*, verser



le mercure dans l'appareil jusqu'à ce que le tube *ab* étant horizontal, l'extrémité de la colonne soit au point convenable, et fermer alors brusquement le tube au point *b* au moyen d'un chalumeau.

786. Nous avons cru devoir décrire avec tous les détails nécessaires les différents manomètres à air qui sont employés ou qui peuvent l'être; mais nous devons dire que ces appareils sont d'un mauvais usage, qu'au bout de très-peu de temps ils sont mis hors de service par la diminution graduelle du volume d'air intérieur, par suite de l'oxydation du mercure. On reconnaît facilement qu'il y a eu absorption d'oxygène, et parce que les instruments indiquent, sous la pression de l'atmosphère, une pression plus grande, et parce que le mercure acquiert en peu de temps la faculté de mouiller le verre, ce qui indique qu'il tient de l'oxyde en dissolution. On a cru obvier à l'inconvénient dont il est question en introduisant une petite couche d'eau au-dessus du mercure; mais, par ce moyen, le métal s'oxyde encore plus facilement.

Le seul moyen d'éviter l'oxydation du mercure est d'employer, au lieu d'air, un gaz sans action sur le mercure : de l'hydrogène, de l'azote, ou de l'acide carbonique. La substitution de l'un de ces gaz à l'air, dans les différents appareils que nous avons décrits, ne présente de difficulté que pour le dernier (fig. 16, pl. 20). Pour remplir cet appareil d'acide carbonique, par exemple, on introduit ce gaz dans une vessie à robinet garnie d'un bouchon troué; après avoir rempli de mercure l'appareil, le tube *ab* étant ouvert, jusqu'à ce que la colonne s'arrête au point *a* lorsque le tube *ab* est horizontal, on incline le tube de manière que le mercure arrive en *b*; on introduit cette extrémité du tube dans le bouchon de la vessie, et on redresse le tube de manière que la colonne de mercure revienne en *a*; alors on dégage le tube de la vessie, et on le ferme à l'aide d'un chalumeau.

787. Les indications des manomètres à gaz devraient, à la rigueur, subir une correction relative à la température; mais comme, dans les circonstances les plus défavorables, en supposant une différence de température de  $15^{\circ}$  entre celle à laquelle la graduation a été faite et celle de l'observation, l'erreur n'excède pas  $\frac{1}{20}$ , on néglige cette correction, car dans aucun cas il n'est important de connaître la pression avec une plus grande précision.

788. Tous les manomètres à gaz, même quand ils ne renferment que

des gaz sans action sur le mercure et qu'ils sont disposés de manière à ne point laisser échapper de gaz, étant d'une construction difficile, délicate, d'une grande fragilité, et ayant une sensibilité variable, très-grande au commencement de l'échelle et très-petite à l'extrémité, on pourrait les remplacer avec avantage, quoique avec une plus grande dépense, par l'un des appareils suivants.

789. L'appareil figure 1<sup>re</sup> (pl. 21) est formé d'un tube de fer replié un grand nombre de fois sur lui-même; toutes les branches sont égales, parallèles, d'un même diamètre, et formées de plusieurs parties réunies par des écrous roulants fortement serrés; les faces voisines étant l'une plane, l'autre taillée en biseau, peuvent être facilement comprimées par l'écrou, de manière à former des joints parfaitement étanches. Le tube de fer se termine à une extrémité par un tube de verre *ab*, vertical et appliqué contre une échelle divisée; l'autre extrémité communique avec la partie supérieure de la chaudière. Toutes les parties inférieures des tubes sont remplies de mercure jusqu'à la ligne MN qui passe par leurs milieux. Le reste des tubes de fer est rempli d'eau. Le mercure a été introduit par les orifices *m, m', m'', etc.*, percés à la partie supérieure jusqu'à ce qu'il s'écoule par des orifices latéraux percés dans chacun d'eux à la hauteur de la ligne MN, et qu'on a fermés ensuite exactement avec des bouchons à vis fortement serrés. Le reste des tubes métalliques a ensuite été complètement rempli d'eau. Il est évident, d'après cette disposition, que si, par la pression de la vapeur dans la chaudière, le mercure s'abaisse d'une quantité *h* dans le tube AB, il montera et descendra alternativement de la même quantité dans les suivants, et montera, par conséquent, de la même quantité *h* dans le tube de verre *ab*; mais comme, dans l'appareil, il y a cinq paires de tubes communiquant par la partie inférieure, la pression de la vapeur sera  $5.2h$  ( $13,59 - 1$ ): $13,59$ . Ainsi, la variation de hauteur du mercure dans le tube de verre *ab* sera à peu près 0,1 de la pression totale estimée en mercure; et, si les tubes avaient chacun 0<sup>m</sup>,82 de hauteur, l'appareil pourrait mesurer des pressions de cinq atmosphères, et les divisions de l'échelle correspondantes à des pressions successives de 1, 2, 3, 4, 5 atmosphères, seraient écartées de  $0,1.0,76.13,59 : (13,59 - 1) = 0^m,082$ . Il est évident qu'en augmentant la longueur des tubes ou leur nombre, ou à la fois l'un et l'autre, on pourrait mesurer des pres-



sions quelconques. Mais comme il est bien rare que la pression de la vapeur dépasse 5 atmosphères, les dimensions précédentes suffiront dans tous les cas. On pourrait se contenter de donner 1<sup>e</sup> de diamètre intérieur aux tubes de fer; dans ce cas, les tubes ayant à peu près 8 mètres de longueur, ils contiendraient environ 12 kilog. de mercure. On pourrait remplacer le tube de verre par un tube de fer et un flotteur dont l'extrémité libre, ou un contre-poids auquel il serait attaché, indiquerait la pression sur l'échelle.

790. Mais dans le cas où la pression de la vapeur ne doit pas excéder 4 à 5 atmosphères, il est plus simple et plus sûr d'employer un seul tube en fer recourbé. Dans le cas d'une pression de 5 atmosphères, en plaçant au-dessous du sol toute la partie du tube qui contient du mercure, celle qui devra être au-dessus sera seulement de  $0,76.5:2 = 1^m,90$ ; la longueur totale du tube sera d'environ 6 à 7 mètres, et le poids du mercure à peu près 12 kilog. pour un diamètre de 0<sup>m</sup>,01. La figure 2 (pl. 21) représente la disposition de l'appareil; d'après ce qui précède, elle n'a pas besoin d'explications; nous dirons seulement que le réservoir M, dans lequel l'eau sera toujours sensiblement à la même hauteur, est destiné à éviter l'erreur qui pourrait résulter de la variation de longueur de la colonne d'eau.

On pourrait même diminuer de beaucoup la quantité de mercure employée, en donnant au tube en communication avec la chaudière un très-petit diamètre, et à l'autre tube un diamètre suffisant, pour que le flotteur pût s'y mouvoir facilement. A la vérité, cette économie du mercure aurait lieu aux dépens de la sensibilité de l'appareil; mais quand la course du flotteur serait réduite à  $\frac{1}{4}$  de ce qu'elle est dans un manomètre d'un diamètre constant, c'est-à-dire, à peu près à 10 centimètres par atmosphère, il n'en résulterait aucun inconvénient dans la pratique. M. Boigues, rue Neuve des Mathurins, n° 27, construit des manomètres ainsi disposés, qui ne reviennent qu'à 100 francs, pour des pressions de six atmosphères; le diamètre du tube communiquant avec la chaudière est de 0<sup>m</sup>,005; celui de l'autre tube est à peu près de 0<sup>m</sup>,015.

791. On pourrait aussi employer un long tube de verre placé sur l'échelle; cette disposition serait plus simple; on pourrait alors recourber le tube à son extrémité, de manière à faire écouler le mercure dans un

réservoir latéral lorsque la pression serait trop grande dans la chaudière. La figure 3 (pl. 21) représente cette disposition.

792. En résumé, pour les chaudières à basse pression, quand il n'est pas nécessaire d'avoir une mesure bien exacte de la pression, l'appareil figures 9 et 10 (pl. 9) doit être préféré; mais si on veut mesurer exactement la pression et avoir un appareil qui puisse servir en même temps de soupape de sûreté, il vaut mieux employer celui qui est représenté dans les figures 12 et 13 (pl. 19). Enfin, pour les chaudières à haute pression, quand la pression ne dépasse pas 5 à 6 atmosphères en sus de la pression de l'air, il faut renoncer aux manomètres à air, à cause de leur fragilité, des nombreuses causes d'erreur qu'on y rencontre, de leur complication, et adopter le manomètre à pression directe représenté figure 2 ou figure 3 (pl. 21).

#### § 4. — SOUPAPES DE SÛRETÉ.

793. Les soupapes de sûreté sont des bouchons coniques ou cylindriques, engagés dans des douilles de même forme, et qui sont pressés par des poids équivalents à la pression exercée sur la face inférieure par la vapeur à la limite qui ne doit point être dépassée. Quand la vapeur a acquis cette tension, la soupape se soulève, et la vapeur s'échappant ne peut pas acquérir une plus grande force élastique.

794. Dans la construction des soupapes il faut déterminer trois choses, la grandeur des ouvertures, la charge des soupapes, et la disposition la plus avantageuse; nous y ajouterons des observations importantes sur un phénomène singulier qu'elles présentent dans certaines circonstances.

##### *Détermination du diamètre des ouvertures.*

795. Les ouvertures doivent être évidemment telles, que seules elles puissent faire écouler toute la vapeur qui peut se former. La quantité de vapeur qui se forme ordinairement dans les chaudières est, comme nous l'avons déjà dit, de 15 à 20 kilogrammes par heure, et par mètre carré de surface exposée au feu; mais comme les soupapes doivent principalement servir dans le cas où le feu aurait été augmenté d'une manière extraordinaire, il faut compter sur 100 kilogrammes par heure et par



mètre carré de surface de chauffe, nombre qui, comme nous l'avons vu, est le maximum de la quantité de vapeur qui puisse être produite.

796. Connaissant le poids de la vapeur qui doit s'écouler dans une seconde, la détermination de la grandeur de l'ouverture ne dépend plus que de la densité de la vapeur et de la vitesse avec laquelle elle s'échappera.

Il est extrêmement probable que la vapeur s'écoule des vases dans lesquels elle se produit suivant les mêmes lois que les gaz des vases dans lesquels ils sont comprimés. Cette vérification a d'ailleurs été faite par plusieurs physiciens, et notamment par M. Christian. Les résultats de l'observation se sont accordés avec ceux du calcul, en admettant un coefficient de contraction compris entre 0,72 et 0,80. Alors, en désignant par  $v$  la vitesse d'écoulement de la vapeur sous la pression qui ne doit pas être dépassée, par  $V$  le volume de vapeur qui doit s'écouler par seconde, et enfin par  $s$  la surface de l'orifice de la soupape de sûreté, on aura évidemment  $sv = V$ , et par suite  $s = V:v$ . Le volume  $V$  se déduira facilement du poids correspondant, au moyen de la densité calculée par la formule (49). Quant à la vitesse d'écoulement, on la trouvera dans la table suivante :

*Vitesse d'écoulement de la vapeur sortant dans l'air sous différentes pressions.*

| Pression.                 | Vitesse par seconde. |
|---------------------------|----------------------|
| 1 atmosphère              | 266                  |
| 1 " $\frac{1}{2}$ mètre   | 352                  |
| 1 " $\frac{1}{3}$ mètre   | 395                  |
| 2 " $\frac{1}{4}$ mètre   | 428                  |
| 3 " $\frac{1}{5}$ mètre   | 502                  |
| 4 " $\frac{1}{6}$ mètre   | 537                  |
| 5 " $\frac{1}{7}$ mètre   | 559                  |
| 6 " $\frac{1}{8}$ mètre   | 574                  |
| 8 " $\frac{1}{10}$ mètre  | 595                  |
| 10 " $\frac{1}{12}$ mètre | 607                  |
| 12 " $\frac{1}{14}$ mètre | 618                  |
| 14 " $\frac{1}{16}$ mètre | 625                  |
| 16 " $\frac{1}{18}$ mètre | 631                  |
| 18 " $\frac{1}{20}$ mètre | 635                  |
| 20 " $\frac{1}{22}$ mètre | 639                  |

797. Supposons, par exemple, que la vapeur se produise sous la pression de deux atmosphères, dans une chaudière ayant 10 mètres carrés de

surface de chauffe; la quantité de vapeur produite par heure sera à peu près de  $20^k \times 10 = 200^k$ . Mais nous la supposerons de  $1000^k$ , et par seconde de  $0^k,277$ .

La densité de la vapeur à 2 atmosphères étant de 0,0011, le volume de vapeur à évacuer par seconde sera de  $0,277 : 0,0011 = 250$  litres. Ainsi on aura  $V = 0^m,250$ ;  $v = 428$ , et par conséquent  $s = 0,250 : 428 = 0,000578$ .

Ainsi, pour donner une issue suffisante à la vapeur, il faudra que l'ouverture de la soupape ait à peu près 6 centimètres carrés. Cette ouverture est très-petite à cause de l'énorme vitesse avec laquelle la vapeur s'écoule. Il faudrait bien se garder cependant de ne donner à la soupape que la section trouvée par le calcul, 1° parce que les vapeurs, en sortant des orifices percés en minces parois, éprouvent comme les liquides et les gaz une contraction qui diminue la dépense; 2° parce que, dans certaines circonstances, il pourrait se former, par des causes que nous ne connaissons pas, une quantité de vapeur plus considérable que celle que nous avons admise. Il est toujours prudent de donner à l'ouverture une surface au moins deux ou trois fois plus grande que celle qui est rigoureusement nécessaire, ou du moins de placer sur les chaudières plusieurs soupapes ayant chacune l'ouverture nécessaire pour laisser dégager toute la vapeur qui pourrait se produire, en admettant une formation de 100 kilogrammes par mètre carré et par heure.

798. Cherchons maintenant une formule générale au moyen de laquelle nous puissions facilement calculer le minimum de section d'une soupape de sûreté dans chaque cas particulier.

Désignons par  $S$  la surface de chauffe en mètres carrés, par  $s$  la surface de l'orifice de sortie de la vapeur, par  $n$  la force élastique de la vapeur exprimée en atmosphère, et par  $d$  sa densité. Le maximum de poids de vapeur qui pourra se produire dans une seconde, sera, d'après ce qui précède,

$$\frac{100 \times S}{3600} = 0^k,028 \cdot S.$$

La formule  $P = Vd$ , dans laquelle  $P$  représente le poids d'un corps,  $V$  son volume, et  $d$  sa densité, donne le volume au moyen du poids et de la densité; mais comme l'unité de volume est le volume de l'eau qui pèse l'unité de poids, lorsque  $P$  est donné en kilogrammes, l'unité de volume



est le décimètre cube ; ainsi le volume de la vapeur sera

$$\frac{0,028 \cdot S}{d},$$

en décimètres cubes, ou  $0,000028 \times S : d$  en mètres cubes.

La hauteur d'une colonne de vapeur, équivalente à la pression d'une atmosphère, étant  $0,76 \times 13,59 \times \frac{1}{d} = 10,33 : d$ , la hauteur génératrice de la vitesse d'écoulement sera

$$\frac{(n-1)10,33}{d},$$

et la vitesse sera donnée par la formule

$$v = \sqrt{\frac{19,62 \cdot 10,33(n-1)}{d}} = \sqrt{202,67 \frac{n-1}{d}} = 14,23 \sqrt{\frac{n-1}{d}},$$

et nous aurons

$$14,33 \sqrt{\frac{n-1}{d}} \cdot s = \frac{0,000028S}{d},$$

d'où

$$s = \frac{0,000028S}{14,33 \cdot d} \sqrt{\frac{d}{n-1}} = 0,000002 \frac{S}{d} \sqrt{\frac{d}{n-1}}.$$

Si  $s$  était estimée en centimètres carrés, la formule serait

$$s = 0,02 \cdot \frac{S}{d} \sqrt{\frac{d}{n-1}} \dots \quad (1)$$

799. La formule renfermée dans l'ordonnance du 29 septembre 1823 est

$$D = 1,3 \sqrt{\frac{S}{n-0,412}} \dots \quad (2)$$

dans laquelle  $D$  représente le diamètre de l'orifice de la soupape. Cette formule donne

$$s = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4} (1,3)^2 \cdot \frac{S}{n-0,422} = 1,32 \cdot \frac{S}{n-0,412} = 1,32 \cdot \frac{S}{n-0,412} \dots \quad (3)$$

En supposant  $S = 10$ , et  $n = 2$ , on trouve par la formule (1)

$$s = 0,02 \cdot \frac{10}{0,0011} \sqrt{\frac{0,0011}{1}} = 181,81 \cdot 0,033 = 5^c,97.$$

La formule (3) donne

$$s = 1,32 \cdot \frac{10}{1,588} = 8^c,35.$$

En supposant  $n = 10$ ,  $d = 0,0047$ , la formule (1) donne  $s = 1^\circ$ , et la formule (3)  $s = 1^\circ,4$ .

Le rapport des sections est à peu près celui de 1 à 1,4, et on obtiendrait sensiblement les mêmes résultats, en supposant dans la formule (1) un coefficient de contraction représenté par 0,70, ce qui augmenterait la section dans le rapport de 1 à 0,70, ou de 1,4 à 1. Désormais nous nous servirons de la formule légale, et nous supposerons toujours que les chaudières sont pourvues de deux soupapes de même grandeur, comme l'ordonnance l'exige.

800. *Effet produit par les soupapes d'un trop petit diamètre.* Si l'ouverture d'une soupape était trop petite pour dépenser la quantité de vapeur qui se forme à une tension donnée, la force élastique de la vapeur augmenterait, mais non pas indéfiniment; elle atteindrait bientôt une certaine limite qu'elle ne pourrait pas dépasser. En effet, à mesure que la température de la vapeur augmentera, sa densité, la vitesse d'écoulement et la dépense augmenteront en même temps, tandis que la quantité de vapeur formée restera constante; ainsi, il arrivera nécessairement un instant où la dépense sera égale à la quantité de vapeur qui peut se former d'après l'activité du foyer et l'étendue de la surface de chauffe; à cet instant la température de la vapeur restera évidemment constante. Dans tous les cas, la limite extrême serait celle correspondante à la dépense de 100\* de vapeur par heure, et par mètre carré de surface de chauffe.

801. Ce fait a été vérifié par M. Christian. Il s'est servi pour cela d'une chaudière de fonte épaisse, fermée par un couvercle de même métal maintenu par des boulons: elle fut placée dans un fourneau et chauffée par un feu très-violent, car la cheminée de tôle rougissait à près de 4 décimètres de hauteur. Le couvercle était percé de trois ouvertures: l'une recevait un thermomètre, une autre le fil d'un flotteur qui permettait de mesurer le niveau de l'eau, et la dernière était destinée à recevoir une plaque percée de différentes ouvertures par lesquelles la vapeur s'échappait.

La surface de chauffe était de 18,9382 décimètres carrés, et le volume d'eau de 10 litres.

Le feu étant maintenu à la même intensité, un litre d'eau a été éva-



poré en trois minutes, quelle que fût d'ailleurs l'étendue de la surface libre par laquelle la vapeur se dégagait.

|  |        |
|--|--------|
| Quand l'orifice était de 36 millimètres carrés, la température était de..... | 105°,5 |
| Quand l'orifice était de 18 millimètres carrés, la température était de..... | 115°   |
| Quand l'orifice était de 9 millimètres carrés, la température était de.....  | 138°   |
| Ouverture circulaire de 25 millimètres de diamètre.....                      | 100°   |
| »       »       de 12,5       »       »       .....                          | 101°   |
| »       »       de 6,25       »       »       .....                          | 112°   |
| Chaudière ouverte.....   | 100°   |

Ces expériences confirment, en outre, le fait que nous avons énoncé sur le maximum de vapeur que peut produire 1 mètre carré de surface de chauffe dans une heure; car la surface de chauffe étant de 18,9382 décimètres carrés, le feu le plus violent n'a pu produire que 1 kilogramme de vapeur en trois minutes, ce qui revient à peu près à 100 kilogrammes par mètre carré, et par heure.

Elles confirment aussi ce que nous avons énoncé précédemment, que la même étendue de surface de chauffe, dans les mêmes circonstances, produit le même poids de vapeur, quelle que soit d'ailleurs sa tension; et que le même poids de vapeur renferme toujours la même quantité de chaleur à toutes les tensions.

#### *Détermination du poids des soupapes.*

802. La charge d'une soupape, augmentée de la pression de l'atmosphère, doit évidemment être égale à la pression que la vapeur exercera en sens contraire sur cette soupape, à la température qui ne doit point être dépassée; or, la pression de la vapeur est égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base l'étendue de l'orifice, et pour hauteur autant de fois 0<sup>m</sup>,76 que la force élastique de la vapeur renferme d'atmosphères; il est par conséquent très-facile de trouver dans chaque cas particulier le poids total de la soupape.

803. Par exemple, si la soupape avait un centimètre carré, et si la limite de pression était de deux atmosphères, le poids de la soupape devrait résister seulement à une atmosphère, et par conséquent être égal au poids d'une colonne de mercure qui aurait un centimètre carré de base et 0<sup>m</sup>, 76 de hauteur; cette colonne aurait 76<sup>c</sup> cubes, et comme la densité du mercure est de 13,568, et qu'un centimètre cube d'eau pèse 1 gramme, le poids total de cette colonne serait de  $76 \times 13,568 = 1031^e,168 = 1^k,031$ .

Ainsi, pour avoir le poids d'une soupape, il faudra multiplier le poids 1<sup>k</sup>,031 par le nombre d'atmosphères moins une de la vapeur, et par le nombre de centimètres carrés de l'ouverture.

Par exemple, si la pression devait être de 3 atmosphères  $\frac{1}{2}$ , et si la soupape avait 4 centimètres de diamètre, sa surface serait de 12<sup>c</sup>,57; par conséquent, le poids de la soupape devrait être de  $1^k,031 \times 2,5 \times 12,57 = 32^k,30$ .

804. La vapeur présente à sa sortie par les ouvertures des soupapes de sûreté ou par les tuyaux d'écoulement, un phénomène fort singulier: la température de la vapeur un peu au delà de l'orifice est d'autant moins élevée, que la tension et la température de la vapeur dans la chaudière sont plus considérables; ainsi, on ne peut pas tenir la main dans un jet de vapeur à 100° qui sort par un orifice percé dans une chaudière, tandis qu'un courant de vapeur à plusieurs atmosphères ne fait éprouver qu'une sensation de chaleur très-supportable. Ce phénomène, qui paraît paradoxal, est une suite nécessaire de la dilatation que la vapeur éprouve à sa sortie dans l'air, dilatation qui est d'autant plus grande que la tension de la vapeur dans la chaudière est plus forte, et qui est nécessairement accompagnée d'un grand abaissement de température.

Ce phénomène avait été observé depuis longtemps par tous les physiiciens qui ont employé les marmites de Papin; il a été confirmé par M. Perkins et par Clément.

*Formes des soupapes de sûreté.*

805. Les soupapes de sûreté sont, comme nous l'avons déjà dit, des bouchons cylindriques ou coniques, placés dans des tubulures de même forme. Dans le premier cas, les cylindres sont terminés par un rebord étroit, qui s'appuie sur les bords de l'ouverture de la tubulure, et pour