

DE

L'ÉCONOMIE DU COMBUSTIBLE

ÉCONOMIE DU COMMERCE

TRAITÉ DES PRINCIPES GÉNÉRAUX

DE LA MANÈRE

DE

LIÈGE. — IMPRIMERIE DE J. DESOER.



76760

76760

DE

L'ÉCONOMIE DU COMBUSTIBLE

EXPOSÉ DES PRINCIPAUX MOYENS

USITÉS OU PROPOSÉS

POUR PRODUIRE ET EMPLOYER ÉCONOMIQUEMENT LA VAPEUR

SERVANT DE FORCE MOTRICE

PAR

E. BÈDE

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE



—

Deuxième édition, revue, corrigée et augmentée.

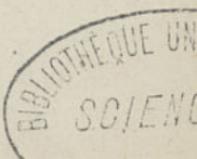
—

PARIS ET LIÈGE

E. NOBLET, ÉDITEUR.

A Paris, 20, rue Jacob.

1863



L'ÉCONOMIE DU COMMERCE

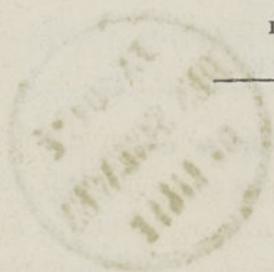
EXPOSÉ DES PRINCIPAUX POINTS

PAR M. L. L.

TOUS PROPRIÉTAIRES ET ÉCRIVAINS ÉCONOMIQUES LA FACILITÉ

RENTRE DE FORCE NOTRE

DÉPOSÉ.

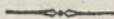


PARIS ET LONDRES

E. NOBLET, ÉDITEUR

1887

AVERTISSEMENT DE L'AUTEUR.



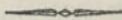
La première édition de cet ouvrage n'était qu'un tiré à part d'une série d'articles que j'ai publiés depuis mai 1857 jusqu'en juin 1859 dans la *Revue universelle* de M. CH. DE CUYPER. De ce mode de publication à bâtons rompus devaient résulter, par ici, des erreurs échappées à une plume écrivant à la hâte pour le jour fixe où devait paraître une livraison, par là, des contradictions ou des corrections, partout un certain désordre. Le long intervalle de temps écoulé entre le commencement et la fin de cette étude a pu donner aussi un caractère d'incomplet et d'arriéré, capable de frapper des lecteurs se tenant au courant des travaux de ce genre. C'est ainsi que de bons livres ont été publiés pendant que paraissaient les articles successifs de la *Revue*, de telle sorte que ces articles et par conséquent leur ensemble ne mentionnaient pas ces ouvrages. Il me suffira de

citer la traduction de l'ouvrage de M. WYE WILLIAMS *Sur la Combustion*. Cette traduction est parue en 1838, tandis que mon dernier article sur les foyers était paru en 1837. Il en est résulté que mon ouvrage, publié en apparence en 1839, semblait ignorer l'existence de ce livre.

Cette seconde édition me permettra de corriger les nombreux défauts que je viens de signaler dans la première, et de faire à celle-ci les additions nécessaires pour la rajeunir un peu, dans ce temps où les livres techniques passent vite et suivent avec tant de peine les pas rapides du génie de l'industrie entraînant celui de la science.

Septembre 1862.

DE L'ÉCONOMIE DE COMBUSTIBLE.



INTRODUCTION.

S'il est une question industrielle d'un intérêt général, c'est incontestablement celle que nous nous proposons d'envisager sous un de ses points de vue les plus importants. La quantité de combustible que notre époque consomme est devenue telle, que des esprits sérieux se sont demandé s'il n'y aurait pas lieu de craindre de voir, dans un avenir plus ou moins prochain, la terre épuisée nous refuser cet aliment de l'industrie. Sans chercher à résoudre un aussi grand problème, nous ne verrons dans cette immense consommation de combustible qu'une dépense considérable qu'il importe de réduire autant que possible.

La houille, soit à l'état naturel, soit transformée en coke, devient d'un usage presque général; nous ne nous préoccuperons pas d'autres combustibles. Il serait difficile d'énumérer tous les emplois que l'on peut faire de la houille dans l'industrie; nous nous bornerons à considérer l'un des plus importants, l'alimentation des machines à vapeur.

Un seul chiffre fera juger de la gravité de la question ainsi réduite. Si mes renseignements sont exacts, la province de

Liège possède des machines à vapeur dont la somme des forces est d'environ 20,000 chevaux. On peut évaluer au minimum la consommation de ces machines à 3^k par cheval et par heure, ou 36^k par cheval et par jour, en comptant seulement des journées de 12 heures, alors que beaucoup de ces machines travaillent davantage et souvent nuit et jour; c'est donc pour la province de Liège seule une consommation de 720,000 kil. de houille par jour; soit par année de 300 jours, plus de 200,000,000 de kil. On peut compter en moyenne à 1 fr. 50 les 100^k; car si nous possédons de la houille à 90^c et même à 70^c les 100^k, en revanche ce n'est pas avec cette houille que la consommation peut être de 3^k par cheval et par heure. Nous arrivons ainsi à une dépense annuelle de 3,000,000 de fr. rien que pour notre province, en prenant les chiffres les plus bas possible; je suis convaincu que le chiffre de 3,000,000 serait de beaucoup plus exact que le précédent.

On conçoit que sur des chiffres de ce genre il n'y a pas d'économies, si petites qu'elles soient, qui puissent être dédaignées. Cette dépense est en réalité une redevance, une contribution que nous payons à la nature en échange de la force motrice qu'elle nous donne. Nous contribuons tous à la payer; car elle pèse sur les prix de tous les objets fabriqués. Nous ne nous en plaignons pas, parce que, pour la plupart, nous payons sans le savoir, et nous n'aurions que peu de reconnaissance pour celui qui trouverait un moyen certain de produire une économie en apparence insignifiante, de 5 à 10 pour 100 par exemple; cependant nous en voudrions beaucoup à celui qui, sans nécessité, imposerait à la province 150 à 300,000 fr. de centimes additionnels.

Bien des essais ont été tentés pour obtenir ces économies si désirées; bien des promesses ont été faites; néanmoins, on ne peut enregistrer qu'un très-petit nombre de succès vraiment industriels; j'entends par là des succès constants, réguliers, et qui ne sont pas trop chèrement payés par des inconvénients pratiques.

Je ne me propose pas d'examiner les perfectionnements qui ont été apportés aux machines à vapeur; c'est une question spéciale, sur laquelle nous reviendrons peut-être, mais que nous ne pouvons aborder aujourd'hui. Nous nous bornerons à dire

que ces perfectionnements, qui n'ont guère porté que sur des détails de construction, ou sur la détente, ou encore sur la distribution de la vapeur, ne sont point d'une nature telle que la consommation de nos meilleures machines actuelles soit notablement inférieure à celle des machines que James Watt construisait il y a 60 ans.

Dans ma conviction, le temps n'est pas loin où nous verrons la machine à vapeur, sinon abandonnée, au moins complètement transformée, modifiée dans son principe même. La théorie a prononcé à ce sujet un arrêt dont les constructeurs ne pourront plus longtemps méconnaître la gravité, car les ingénieurs les plus distingués, aussi bien comme hommes pratiques que comme savants, s'accordent aujourd'hui à admettre cette conséquence de la théorie mécanique de la chaleur, que les meilleures machines à vapeur n'utilisent qu'une très-petite partie du combustible qu'elles consomment, $1/40^e$ peut-être.

Cette assertion est trop grave pour que nous ne nous réservions pas de la démontrer et d'examiner les essais faits ou à faire pour tirer de la chaleur, comme source de force, une plus grande quantité d'effet utile. Mais, en attendant la discussion de cette question, encore toute d'avenir, nous devons commencer par étudier l'état actuel des machines à vapeur et des appareils générateurs de vapeur. Nous nous garderons bien d'indiquer tous ceux qui ont été imaginés et essayés : ce serait une œuvre d'une utilité fort douteuse ; car il arrive souvent qu'en regardant trop de choses à la fois, on ne voit point celles que l'on devrait voir. Nous nous bornerons donc à décrire aussi complètement que possible les appareils dont la pratique a sanctionné la supériorité ; nous nous efforcerons de faire connaître toutes les conditions auxquelles doit satisfaire leur exécution, ce qu'ils peuvent laisser à désirer, et ce qui empêche qu'ils soient amenés à un état de perfection relatif ; nous examinerons aussi ceux qui, sans être accueillis sans réserve par l'industrie, présentent cependant assez d'avantages sérieux pour que, dans certaines conditions, il soit bon de les adopter ; nous ferons connaître enfin les principes dont l'application a été essayée et les obstacles qui se sont présentés à cette application.

L'ordre qui me paraît le plus naturel dans cette étude est d'examiner : 1^o les foyers et appareils de tirage applicables aux chaudières à vapeur ; 2^o les générateurs de vapeurs ; 3^o les appareils, en quelque sorte intermédiaires entre les chaudières et les machines, et qui servent à tirer le meilleur parti possible de la vapeur des générateurs, soit avant son entrée dans la machine, soit après sa sortie.

En présentant ce plan de notre travail, nous devons avertir que nous n'avons nul dessein de faire ici un cours complet de physique industrielle, ni même de traiter la question comme nous le ferions dans un cours. Nous voulons, dans un exposé que nous nous efforcerons de mettre à la portée de tous les industriels, les rendre capables de juger par eux-mêmes la valeur des appareils à vapeur qu'ils possèdent ou qu'on leur propose d'appliquer.

Avant d'aborder la description des appareils que nous nous proposons d'étudier, nous croyons devoir exposer et discuter avec soin quelques principes généraux, afin de n'avoir dans la suite rien à affirmer sans preuves et sans explications.

I. — PRINCIPES GÉNÉRAUX.

1. UNITÉ DE CHALEUR. — POUVOIR CALORIFIQUE DES COMBUSTIBLES.

— On ne sait pas ce que c'est que la chaleur, mais on en connaît les effets, et l'on a des moyens précis de les mesurer. Par suite, il serait difficile de définir rigoureusement ce que l'on entend par quantité de chaleur, bien que l'on s'en fasse une idée assez claire et qu'il soit facile de comparer entre elles des quantités de chaleur. Ainsi le chauffeur le moins intelligent dira que telle houille donne deux fois plus de chaleur que telle autre, s'il remarque que, pour obtenir la même quantité de vapeur, il doit brûler deux fois plus de la seconde que de la première.

Pour mesurer les quantités de chaleur, on a pris comme point de comparaison général, comme *unité de chaleur*, la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer 1 kil. d'eau

de 1 degré centigrade (1). Ainsi on a reconnu qu'avec 1^k de bonne houille brûlant complètement on pouvait chauffer 7500^k d'eau de 1°, ou, ce qui revient au même, 750^k de 10°; et l'on dit que la combustion de 1^k de houille produit 7500 *unités de chaleur*, ou 7500 *calories*. Ce nombre 7500 représente le *pouvoir calorifique* de la houille.

On a déterminé les pouvoirs calorifiques d'un grand nombre de combustibles, solides, liquides et gazeux. Cette étude n'a pas une importance pratique aussi grande qu'on pourrait le croire, parce que les conditions dans lesquelles on opère ces déterminations ne se retrouvent pas dans les opérations pratiques, et qu'il peut très-bien arriver qu'un combustible possède, en brûlant dans les conditions des expériences théoriques, un pouvoir calorifique plus grand que celui d'un autre combustible, tandis que ce dernier donnerait dans un fourneau une plus grande quantité de chaleur que le premier, soit parce que sa combustion n'exige pas un tirage aussi actif, soit pour toute autre raison analogue. D'ailleurs, lorsqu'il s'agit de houille, que signifient quelques essais faits sur de petits échantillons pesant quelques grammes? Les industriels ne doivent donc point songer à recourir aux données scientifiques pour décider le combustible qui convient à leurs fourneaux. Un essai, fait dans les conditions mêmes de la marche ordinaire des foyers, peut seul les éclairer, et tout industriel intelligent et économe doit commencer par essayer successivement différentes espèces de houille, en mesurant pendant plusieurs jours la consommation de chacune d'elles. Nous connaissons des cas où l'on a obtenu des économies considérables en brûlant de la houille d'un prix élevé; dans d'autres cas, au contraire, on reconnaissait que la

(1) Comme certains lecteurs, possédant des notions de physique assez complètes, pourraient trouver nos définitions et nos données trop peu rigoureuses, nous devons les prévenir ici, une fois pour toutes, qu'envisageant la question d'une manière aussi pratique que possible, nous ne croyons pas devoir nous préoccuper des faibles erreurs que l'on commet en regardant comme constantes des quantités telles que les chaleurs spécifiques, les chaleurs totales de vapeur, etc.

meilleure qualité des houilles chères ne suffisait pas pour compenser la supériorité de leurs prix, et qu'il y avait grand intérêt à brûler la houille la moins chère possible. C'est le plus souvent une question de tirage : on ne peut généralement brûler les houilles de médiocre qualité qu'à l'aide d'un tirage très-énergique; et, c'est là une chose que l'on ne doit jamais perdre de vue, rien ne coûte plus cher que de vouloir faire marcher un foyer avec un tirage insuffisant; car on n'y parvient qu'en nettoyant constamment le feu et en retournant de toutes façons le combustible, ce qui, ne pouvant s'effectuer sans ouvrir fréquemment le foyer, entraîne de grandes pertes de chaleur, aussi bien par l'air froid qui pénètre dans le fourneau que par le combustible incomplètement brûlé que l'on fait tomber à travers la grille. Lors donc que par une mauvaise construction du fourneau et de la cheminée, ou par une augmentation des besoins de vapeur, le tirage est devenu insuffisant, il y aura presque toujours intérêt à brûler de bonne houille, dont la combustion complète s'effectue facilement.

2. ESSAI DE LA VALEUR ÉCONOMIQUE D'UNE CHAUDIÈRE A VAPEUR.

— Si l'étude des pouvoirs calorifiques des combustibles n'est pas aussi importante au point de vue pratique qu'elle le semble au premier abord, on peut cependant en tirer des applications très-utiles. En voici un exemple : on a reconnu, avons-nous dit, que 1^k de bonne houille produirait 7500 unités de chaleur en brûlant complètement; d'un autre côté, on sait que la formation de 1^k de vapeur exige environ 650 unités de chaleur. Donc, 1^k de houille devait produire $\frac{7500}{650}$ ou 11^k,5 de vapeur. Or, avec la plupart des chaudières, on n'obtient que 5 à 6^k de vapeur par kilog. de houille. On voit donc que, dans nos fourneaux, nous n'utilisons guère que la moitié du combustible que nous brûlons. Le tirage par les cheminées coûte, comme nous le verrons, à peu près 25 % de la chaleur donnée par la houille; il reste donc pour le fourneau même une perte de 25 %, que, par de bonnes dispositions, on pourrait éviter en partie. C'est là-dessus que porte l'économie de certaines chaudières, et, par ce qui précède, on voit que le meilleur moyen de juger si une

chaudière est économique consiste à mesurer la quantité de vapeur formée par kilog. de houille; on pourra être satisfait chaque fois que l'on obtiendra plus de 6^k.

Cette expérience peut se faire pendant la marche des machines de la manière suivante : on note exactement sur le tube indicateur le niveau de l'eau dans la chaudière à un moment donné, le foyer étant en pleine activité; à partir de ce moment, on pèse le combustible que l'on charge dans le foyer, et l'on compte, au moyen d'un compteur, le nombre de coups utiles de la pompe alimentaire, en arrêtant le compteur chaque fois que le piston de cette pompe travaille à vide, c'est-à-dire n'injecte pas d'eau dans la chaudière. Au bout de quelques heures, on arrête l'expérience dans un moment où le niveau est exactement au point primitivement noté. Par la course et le diamètre du piston de la pompe alimentaire, on connaît le volume d'eau injecté à chaque coup de piston; le compteur donnant le nombre de coups effectués pendant l'expérience, on a ainsi le volume d'eau injecté et vaporisé, puisque le niveau s'est retrouvé à la fin de l'expérience le même qu'au commencement. Ce volume, évalué en litres, représente le poids de vapeur formée, et il suffit de le diviser par le nombre de kilog. de houille brûlés.

Ce procédé de mesure est sujet à différentes causes d'erreurs, dont les principales sont :

1^o La vapeur entraînant plus ou moins d'eau, le poids d'eau dépensé n'équivaut pas au poids de vapeur produite, et il pourrait arriver que l'on jugeât favorablement une très-mauvaise chaudière, parce que, précisément à cause de ses mauvaises dispositions, la quantité d'eau entraînée par la vapeur serait considérable; car il faut remarquer que cette quantité d'eau peut s'élever jusqu'au tiers du poids de vapeur qui l'entraîne. C'est ce qui arrive avec de trop petits réservoirs de vapeur.

2^o Par les fuites du piston de la pompe ou d'une soupape, le volume d'eau injecté par chaque coup de piston dans la chaudière peut être notablement inférieur à celui que donne le calcul. Cette seconde erreur comme la première tend donc à donner un résultat supérieur à la réalité. On atténuera son importance chaque fois que l'on pourra faire aspirer la pompe dans

une bêche où l'on versera des quantités d'eau connues. L'imperfection du jeu des soupapes sera alors sans influence, et l'on n'aura pas besoin de compter les coups de piston.

Les causes d'erreur que nous venons de signaler sont assez graves pour qu'il soit préférable de recourir à un autre mode de mesure, et d'exécuter des expériences particulières pendant un jour de chômage complet ou partiel des machines. Le procédé à suivre serait d'ailleurs plus simple et donnerait des résultats plus complets.

Le foyer étant en pleine activité, et la machine à vapeur tournant avec une partie de sa charge ordinaire et faisant marcher la pompe alimentaire, on laisse monter le niveau à 7 ou 8 centimètres au-dessus de la limite inférieure du niveau, et le manomètre jusqu'à une certaine pression un peu inférieure à celle sous laquelle doit s'ouvrir la soupape de sûreté, moins chargée que d'habitude. On fait cesser alors le jeu de la pompe alimentaire, et on lit le niveau dans la chaudière sur une petite échelle divisée en millimètres et fixée contre l'indicateur de niveau. A partir de ce moment, on mesure la houille dont on charge le fourneau à la manière ordinaire; bientôt la pression s'élève dans la chaudière, la machine faiblement chargée ne dépensant qu'une partie de la vapeur, et la soupape de sûreté laisse échapper l'excès de vapeur qui se forme. En même temps, le niveau baisse. Lorsqu'il est descendu aussi bas que le permet la hauteur des conduits de fumée, on cesse l'observation et on lit sur l'échelle de l'indicateur la hauteur du niveau.

Pour nous assurer du degré d'exactitude que l'on peut atteindre dans une pareille expérience, supposons une chaudière à bouilleurs de 8^m de longueur, 1^m,20 de diamètre; supposons aux bouilleurs même longueur et 0^m,60 de diamètre. En admettant que les $\frac{2}{3}$ de la surface de la chaudière et la totalité de celle des bouilleurs soient surface de chauffe, on trouve 40^m,4 comme surface de chauffe totale, et, en prenant pour chaque mètre carré de celle-ci une production de vapeur de 20^k par heure, on aurait 800^k de vapeur à l'heure. Les 800 litres d'eau correspondants occupaient dans la chaudière, au-dessus de la surface de chauffe, une hauteur de 100 millimètres environ. Il

serait très-facile de lire les variations de niveau sur l'échelle à un millimètre près, et par conséquent de ne commettre de ce côté qu'une erreur de $\frac{1}{100}$ tout au plus. La seule difficulté viendrait des mouvements de l'eau dans la chaudière; mais il serait facile d'arrêter promptement l'ébullition, et par conséquent ces mouvements, en chargeant momentanément la soupape de sûreté et fermant le robinet d'admission de la machine. Les 800^k d'eau vaporisée correspondraient à une consommation de 100 à 150^k de houille, ce qui est déjà assez considérable pour que l'on n'ait pas à craindre des erreurs sensibles. D'ailleurs rien n'empêcherait de continuer l'expérience plusieurs heures, en alimentant de temps en temps la chaudière; l'erreur résultant du volume de vapeur consommée pendant l'alimentation ne serait pas notable et pourrait même être calculée approximativement.

Actuellement, il faut remarquer que, dans cette expérience, la production de vapeur obtenue par kil. de houille sera plus considérable que celle que l'on veut connaître; car l'expérience commence alors que l'eau est déjà en pleine ébullition et que la vapeur a une certaine pression. Par suite, chaque nouveau kil. de vapeur formé n'a pas absorbé 650 unités de chaleur, mais tout au plus 550, et un kil. de houille donnant 7500 calories pourrait transformer en vapeur $\frac{7500}{550}$ ou 13^k,6 d'eau déjà bouillante. C'est pourquoi il pourra arriver que par ce mode d'observation, on trouve que certaines chaudières donnent 8 et 10^k de vapeur par kil. de houille. Mais il faudra en général réduire le chiffre obtenu dans le rapport de 550 à 650, pour avoir la production de vapeur de la chaudière supposée alimentée avec de l'eau froide.

Un autre procédé d'expérience plus simple consiste à chauffer la chaudière en laissant librement écouler sa vapeur et en y introduisant de temps en temps un volume d'eau connu. Il suffit, par exemple, d'installer au-dessus du trou d'homme, qu'on laisse ouvert, un tonneau qu'on remplit d'eau et dont on laisse écouler le contenu entier dans la chaudière autant de fois que l'exige la durée de l'expérience. Réduit à ce degré de simplicité, le procédé ne peut être employé que dans des conditions particulières; il serait, évidemment, excessivement incommode pour

des chaudières placées à l'intérieur des ateliers. Pour celles-ci on peut laisser échapper la vapeur par le tuyau qui sert spécialement à lâcher la vapeur dans l'atmosphère, chaque fois qu'on veut nettoyer la chaudière; l'introduction de l'eau en volumes connus pourra se faire alors par le tuyau ordinaire d'alimentation dont on interrompra momentanément la communication avec la pompe foulante pour en établir une autre avec un réservoir de capacité connue. L'interposition d'un robinet permettra de remplir ce réservoir, puis de le vider dans la chaudière autant de fois qu'il le faudra.

La principale objection à faire à ce mode d'expérience est la difficulté de le prolonger pendant un temps suffisamment long, puisqu'il ne peut s'appliquer qu'à des chaudières qui chôment.

Le procédé le plus simple et le plus certain que l'on puisse employer pour connaître la valeur économique d'une chaudière est incontestablement l'application d'un compteur d'eau. On possède depuis assez longtemps des compteurs, tels que celui de Kennedy, qui peuvent mesurer et noter avec exactitude les quantités d'eau qui doivent les traverser, et il y a lieu de s'étonner que ces appareils ne soient pas d'un usage plus répandu. En effet, non-seulement ils permettent de comparer facilement, par une observation aussi simple que certaine, les avantages de divers systèmes de chaudières, mais encore de reconnaître soit les altérations qui peuvent survenir dans la marche d'une même chaudière par suite de fuites inaperçues ou par des amas d'incrustations, soit les différences de qualité des combustibles employés, soit enfin les altérations d'une machine dont la consommation de vapeur, et par conséquent d'eau, augmenterait tout-à-coup. En un mot, un mesureur d'eau est un comptable qui inscrit sans frais le travail de cet ouvrier si important et si chèrement payé que nous appelons le charbon.

Pour les constructeurs, les expériences que nous venons d'exposer sont d'une importance spéciale en ce qu'elles permettent de déterminer sans peine, et presque d'une manière absolue, la prééminence d'un système de chaudière, tandis que la comparaison simple de différents systèmes est parfois impossible à faire exactement, à cause de la difficulté d'établir l'identité des conditions.

Généralement les industriels n'acceptent une machine à vapeur qu'avec la garantie d'un maximum de consommation, et après un essai, soit au frein de Prony, soit à l'indicateur de Mac-Naught. Ces essais sont moins faciles et moins certains que ceux dont nous venons de parler; c'est pourquoi l'on a lieu de s'étonner de voir ces derniers si rares. Il est vrai que le plus souvent on ne tient à connaître que la consommation globale d'une machine à vapeur, en regardant la chaudière comme partie intégrante de celle-ci; mais alors ce serait tout au moins au constructeur à faire séparément l'essai de la chaudière, outre l'essai au frein; combien de fois est-il arrivé, lorsque ce dernier essai donnait une consommation trop forte, que l'on s'évertuait à la réduire en retouchant aux pistons, aux glissières, etc., tandis que le véritable excès de consommation venait du générateur de vapeur? On ne se préoccupe de celui-ci que lorsque sa construction est visiblement mauvaise; presque toujours il suffit, pour qu'une chaudière soit déclarée excellente, qu'elle fournisse une quantité suffisante de vapeur, peu importe à quel prix.

Il n'y a qu'une seule considération qui puisse, non justifier, mais expliquer l'indifférence des industriels et des constructeurs à l'égard des générateurs de vapeur: c'est que la plupart des expériences faites pour mesurer la production de vapeur des différents appareils ont donné des résultats peu différents. C'est ainsi que dans les expériences de M. Cavé, par exemple, les diverses chaudières essayées produisaient toutes à peu près la même quantité de vapeur par kil. de houille. Mais il serait imprudent de généraliser ce résultat, et il faudrait, en vérité, une singulière insouciance pour déclarer, d'après un très-petit nombre de preuves, que le choix et par suite l'essai d'un générateur sont choses inutiles, attendu que tous les générateurs sont aussi bons les uns que les autres.

Nous reviendrons sur ce sujet après avoir décrit les principaux systèmes de chaudières employés aujourd'hui. Nous avons voulu signaler seulement une application importante de deux données scientifiques, le pouvoir calorifique des combustibles et la chaleur totale de la vapeur d'eau. Toutefois, nous devons faire remarquer que la première de ces deux données manque de

précision; en effet, le chiffre 7500 représente le pouvoir calorifique des meilleures qualités de houille; d'autres qualités développent beaucoup moins de chaleur: la houille ordinaire donne 6000 calories, et certaines houilles très-médiocres n'en donnent que 3000. Nous ne parlerons pas des schistes bitumineux, qui n'en produisent que 200 à 300.

Il faudra donc, si l'on veut faire les expériences que nous conseillons fortement, les effectuer avec les meilleures qualités de houille, ou avec de bonnes qualités ordinaires en ne comptant que sur un développement de chaleur de 6000 calories, auquel correspond une production *maxima* de 9^k de vapeur.

Il y a d'autres résultats d'expériences faites sur le pouvoir calorifique des combustibles qui sont trop remarquables pour être passés sous silence, et dont nous montrerons une importante application. Dulong a trouvé que le *carbone* (élément principal de tous nos combustibles) développe 1386 unités de chaleur en passant à l'état d'*oxyde de carbone*, gaz résultant de ce qu'on pourrait appeler la première combustion du carbone, et 7170 unités de chaleur quand il passe à l'état d'*acide carbonique*, combinaison la plus oxygénée de carbone, résultant de la combustion la plus complète. On voit par là qu'un fourneau tellement mal fait que le carbone ne pourrait s'y transformer qu'en oxyde de carbone, ne donnerait, pour une même consommation de combustible, que la 5^e ou 6^e partie de la chaleur obtenue dans un fourneau où la combustion du carbone serait complète, où il se transformerait tout entier en acide carbonique.

Ces cas extrêmes ne se présentent certainement jamais dans la pratique; mais la grande différence des deux chiffres précédents suffit pour montrer toute l'importance d'une combustion complète.

D'ailleurs, l'oxyde de carbone n'est pas le seul gaz combustible qui s'échappe avec la fumée de nos fourneaux. L'hydrogène se dégage souvent en quantités toujours très-faibles, mais que l'on ne peut négliger à cause du pouvoir calorifique très-grand de ce gaz (34740 calories).

M. Combes, dans son Rapport sur les moyens de brûler ou de

prévenir la fumée (*Annales des Mines*, 4^e série, XI, 149), dit que les quantités de gaz combustibles échappées à la combustion, pendant les expériences auxquelles il a pris part, étaient tout-à-fait négligeables. Je ne puis partager son avis en présence des analyses de M. Debette, insérées dans ce même Rapport.

Si l'on prend la moyenne des sept analyses faites par M. Debette sur les gaz d'un fourneau chauffé à la houille, on trouve les quantités relatives suivantes d'acide carbonique, d'oxyde de carbone et d'hydrogène :

Acide carbonique.	9,70
Oxyde de carbone	0,74
Hydrogène.	0,61

Nous n'avons pas à nous préoccuper maintenant de l'oxygène et de l'azote mélangés à ces gaz.

D'après ces chiffres, et connaissant les poids de 1^{m.c.} de ces différents gaz, nous pouvons dire que sur 11^{m.c.},05 de gaz produits dans un fourneau, il y a

9 ^{m.c.} ,70 d'acide carbonique pesant	19 ^k ,30
0,74 d'oxyde de carbone »	0,93
0,61 d'hydrogène »	0,05

Cela posé, on sait que 1^k d'acide carbonique renferme environ $\frac{5}{11}$ kil. de carbone, et 1^k d'oxyde de carbone environ $\frac{7}{11}$.

Donc 19^k,30 d'acide carbonique renferment 5^k,26 de carbone, qui, en passant à l'état d'acide carbonique, ont produit $5,26 \times 7170$ ou 37714 calories.

0^k,93 d'oxyde de carbone renferment 0^k,40 de carbone qui ont produit, en ne se transformant qu'en oxyde de carbone, $0,40 \times 1386$ ou 554 calories, tandis qu'en passant à l'état d'acide carbonique, cette même quantité de carbone eût donné $0,40 \times 7170$ ou 2868 calories.

Enfin 0^k,05 d'hydrogène auraient pu donner $0,05 \times 34740$ ou 1737 calories.

Ainsi donc on a obtenu :

37714 + 554 ou 38268 calories, tandis que si les gaz combustibles échappés à la combustion avaient été brûlés, on aurait eu 37714 + 2868 + 1737 ou 42319 calories. La perte de chaleur est

de 10 % relativement à la chaleur obtenue, ce qui ne me paraît nullement négligeable.

Si maintenant, au lieu de prendre la moyenne des analyses de M. Debette, nous considérons la première de ces analyses, nous y trouvons 8,49 d'acide carbonique, 2,70 d'oxyde de carbone, et pas d'hydrogène.

En reprenant le calcul précédent avec ces nouvelles données, on trouve 24 % de perte, ce qui, loin d'être négligeable, est très-considérable.

Enfin la dernière analyse de M. Debette présente 7,73 d'acide carbonique, 0,01 d'oxyde de carbone, et 1,63 d'hydrogène. La perte de chaleur résultant de la non-combustion de cette quantité d'hydrogène est de 16 % (1).

Nous ferons observer actuellement que, d'après M. Combes, les fourneaux dont M. Debette a analysé les gaz ne laissent rien à désirer dans leur marche et produisaient peu de fumée. C'est donc dans de bonnes conditions que nos fourneaux ne donnent, en moyenne, que 10 % de perte par une incomplète combustion, et même, dans ces bonnes conditions, des circonstances accidentelles ou une mauvaise conduite du feu peuvent élever cette perte à 24 %. Que sera-ce donc dans un fourneau mal fait?

(1) On peut donner facilement l'expression générale de la perte résultant de l'écoulement sans combustion des gaz combustibles; en effet, si on appelle v , v' , v'' les volumes d'acide carbonique, d'oxyde de carbone et d'hydrogène, la perte, relativement à la chaleur obtenue, sera :

$$\frac{v' \times 1,237 \times \frac{5}{7} (7170 - 1586) + v'' \times 0,0897 \times 54740}{v \times 1,98 \times \frac{5}{11} \times 7170 + v' \times 1,237 \times \frac{5}{7} \times 1586} = \frac{5118. v' + 5116. v''}{3872. v + 747. v'}$$

ce qu'on peut réduire à :

$$\frac{v' + v''}{1,25 v + 0,19. v'} \text{ ou approximativement } \frac{v' + v''}{6 v + v'}$$

Toutefois, on doit remarquer que nous n'avons pas tenu compte, dans ces calculs, de l'hydrogène brûlé, ce qui diminuerait la valeur de la perte.

L'analyse des gaz produits par la combustion de la houille dans nos fourneaux n'offre pas de sérieuses difficultés; elle peut même être faite facilement lorsqu'on n'aspire pas à une grande rigueur; aussi de même que nous avons engagé les industriels à essayer leurs fourneaux et leurs chaudières par la mesure de la production de vapeur par kil. de houille, de même nous leur conseillons de faire analyser les gaz de leurs cheminées, chaque fois qu'ils auront des doutes touchant le tirage de celles-ci.

3. VOLUME D'AIR NÉCESSAIRE A LA COMBUSTION DE LA HOUILLE. —

La houille renferme deux éléments combustibles, du carbone et de l'hydrogène. Les quantités de carbone contenues dans 1^k de houille varient suivant la qualité de houille, depuis 77 % que l'on trouve dans certaines houilles maigres, jusqu'à plus de 90 % présentées par certaines houilles grasses. La quantité d'hydrogène, élément beaucoup moins important à considérer, est presque toujours d'environ 5 %. Enfin, outre ces éléments combustibles, les houilles renferment des quantités d'oxygène qui varient depuis 16 % dans les houilles maigres, jusqu'à 4 % dans les houilles grasses, plus enfin des quantités insignifiantes d'azote.

Dans la combustion complète de la houille, le carbone doit se transformer au moyen de l'oxygène de l'air en acide carbonique, tandis que l'hydrogène, se combinant en partie avec l'oxygène de l'air et en partie avec celui de la houille, se transforme en eau. On comprend que les données de la chimie permettent de déterminer combien d'oxygène il faut pour transformer en acide carbonique la quantité de carbone contenue dans 1^k de houille; sachant ensuite que l'air atmosphérique renferme 21 % d'oxygène, on peut calculer le volume d'air qui renferme la quantité d'oxygène trouvée nécessaire pour la combustion de 1^k de houille; car la quantité nécessaire à la combustion de l'hydrogène est assez faible pour que l'on n'ait à se préoccuper que du carbone. On trouve ainsi qu'il faut environ 9 mètres cubes d'air froid pour brûler 1^k de houille. Mais on comprend qu'il serait très-imprudent de s'en tenir, dans la construction des fourneaux, à cette donnée théorique. La pratique doit agir ici, comme elle

agit presque toujours à l'égard des résultats de la théorie, qu'elle considère comme des limites extrêmes dont il faut se tenir très-éloigné. C'est ainsi qu'elle double, triple et même quintuple les chiffres fournis par les expériences théoriques. Dans le cas actuel, on doit au moins doubler le chiffre calculé, et considérer comme nécessaire à la combustion de 1^k de houille un volume d'air de 18^{me}. En effet, l'observation a fait reconnaître que, même dans de bonnes conditions, la moitié de l'air appelé dans le foyer n'avait pas servi à la combustion. Cependant celle-ci n'avait pas été aussi complète que possible, les cendres et la fumée contenaient encore des éléments combustibles qui avaient échappé à la combustion, malgré l'excès de l'élément comburant.

Nous croyons à la question que nous venons d'examiner une grande importance. Sans vouloir accorder aux chiffres que nous avons indiqués une précision superflue, nous pensons que ces sortes de données sont utiles à connaître, parce qu'elles peuvent servir de guide à la pratique et lui permettre d'éviter de longs tâtonnements. D'autres fois, la théorie sert de sanction, de contrôle à la pratique. Ainsi, lorsqu'une disposition d'appareil quelconque aura donné fréquemment de bons résultats, si l'on reconnaît de plus que ces résultats s'accordent avec toutes les données théoriques qui s'y rattachent, on acquerra la certitude la plus complète de l'efficacité générale de l'appareil. Mais ce qui pour nous fait l'importance de la question, c'est qu'elle est une des parties de ce problème des plus intéressants pour la pratique :

Y a-t-il avantage à appeler dans un foyer une quantité d'air beaucoup plus que suffisante à la combustion, malgré la perte de chaleur qui doit en résulter ?

Il est clair que l'air sortant d'un fourneau à une haute température et sans avoir servi à la combustion, emporte une quantité considérable de chaleur; c'est une perte certaine que nous pouvons évaluer facilement.

On sait, et de nombreuses expériences personnelles me permettent d'affirmer que la température des gaz, dans une cheminée de fourneau de chaudière, est rarement inférieure à 300°.

Or, la chaleur spécifique de l'air étant $1/4$, 1^k d'air à 300° contient 75 calories.

Cela posé, admettons que l'on fournisse à chaque kilog. de houille à brûler 18^{mc} d'air pesant $23^k,4$ et que la moitié de cette quantité, ou $11^k,7$, ne serve pas à la combustion. On aura par suite $11,7 \times 75$ ou $877,5$ calories emportées sans utilité pour chaque kilog. de houille brûlé, ou, ce qui revient au même, pour 7500 calories obtenues. Ce sera une perte relative de $\frac{877,5}{7500}$ ou 12 % environ.

C'est une perte notable; mais elle est une nécessité, puisqu'en fournissant moins d'air à la combustion on s'expose à ce que celle-ci soit incomplète, et nous avons vu qu'il pourrait en résulter des pertes beaucoup plus graves. D'ailleurs, avec les dispositions simples et présentant de grands avantages pratiques de nos fourneaux, on ne peut pas espérer obtenir que tout l'air pénétrant dans le foyer serve à la combustion. Il y aura toujours de ce côté une perte inévitable qui s'ajoutera à celle provenant de l'imperfection de la combustion.

Nous nous convaincrions mieux de la vérité de ces assertions, et nous arriverons à la solution complète de notre problème en recourant encore aux analyses de M. Debette.

D'après la moyenne de ces analyses, le volume d'oxygène trouvé dans les gaz d'un fourneau chauffé à la houille est de 10,26 et le volume d'azote 78,68. Sachant que l'air est formé de $1/5$ oxygène et de $4/5$ azote, on peut admettre, d'après ces chiffres, que sur 100^{mc} de gaz analysés, il y avait environ 50^{mc} d'air et 40^{mc} d'azote. Ces 40^{mc} d'azote sont le reste de 50^{mc} d'air ayant servi à la combustion. Ainsi la quantité d'air appelée inutilement dans le foyer a été égale à la quantité d'air utilisée; en d'autres termes, la moitié de l'air appelé dans le foyer n'a pas servi à la combustion.

En même temps que ces quantités d'oxygène et d'azote, on a trouvé, avons-nous vu, $9^{mc},70$ d'acide carbonique, $0^{mc},74$ d'oxyde de carbone et $0^{mc},61$ d'hydrogène, et la chaleur obtenue par la combustion du carbone des deux premiers gaz a été de 38268 calories.

Cela posé, si les 50^{mc} d'air appelés inutilement dans le foyer,

et pesant 65^k, en sont sortis avec une température de 300°, on a eu par ce fait une perte de chaleur de 65×75 ou 4875 calories, et relativement à la chaleur obtenue :

$$\frac{4875}{40003} \text{ ou } 12 \%,$$

valeur que nous avons obtenue d'une manière toute différente, dans l'hypothèse, ici réalisée, d'un volume d'air appelé double du volume nécessaire.

Remarquons que cette perte a lieu en même temps que celle de 10 % trouvée pour l'incombustion de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène. On a donc une perte totale de 22 % due en partie à l'excès d'air appelé et en partie à l'imperfection de la combustion.

En appliquant le même procédé de calcul (1) à chacune des sept expériences de M. Debette, et comparant les pertes de

(1) Les formules générales du rapport de l'air non-désoxygéné au volume total appelé, et de la perte de chaleur emportée par l'air non-désoxygéné peuvent s'établir de la manière suivante :

Soient O et A les volumes d'oxygène et d'azote contenus dans 100^{mc} de gaz des fourneaux; leur somme équivant à celle d'un volume d'air non-désoxygéné 5.0, et d'un volume d'azote libre A — 4.0; ce dernier correspond

à un volume d'air désoxygéné $\frac{5}{4}(A - 4.0)$, le volume total de l'air appelé était donc $5.0 + \frac{5}{4}(A - 4.0)$ ou $\frac{5}{4}A$, et le rapport du volume d'air non-désoxygéné 5.0 à ce volume total est

$$\frac{4.0}{A}.$$

La chaleur emportée par le volume d'air 5.0 appelé inutilement sera :

$$5.0 \times 1,5 \times \frac{1}{4} \times 500 \text{ ou } 487,5.0$$

et la perte relative qui en résultera sera :

$$\frac{487,5.0}{5872. v. + 747}$$

en conservant les notations et les résultats de la p. 20.

La perte totale sera :

$$\frac{487,5. 0 + 5118. v' + 5116. v'}{5872. v + 747 v'}$$

chaleur aux volumes d'air appelés inutilement dans le foyer, nous obtenons les résultats suivants :

NUMÉROS DES ANALYSES.	RAPPORT DU VOLUME D'AIR EXCÉDANT AU VOLUME TOTAL APPELÉ.	PERTE DE CHALEUR PAR L'AIR EXCÉDANT.	PERTE DE CHALEUR PAR L'IMPERFECTION DE LA COMBUSTION.	PERTE TOTALE DE CHALEUR.
1	57 %	10 %	2 1/2 %	5 1/2 %
2	52	9	8	14
3	22	9	11	20
4	59	12,5	2,5	15
5	55	16,6	0,7	17
6	73	19	13	34
7	73	22	17	59

Si l'on excepte les résultats de la première analyse, résultats évidemment anormaux et accidentels, puisque la quantité d'oxyde de carbone s'élève au tiers de la quantité d'acide carbonique, on arrive à cette conclusion que la perte totale de chaleur se maintient à peu près la même quand le volume d'air appelé en trop est compris entre $\frac{5}{10}$ et $\frac{6}{10}$ du volume total, et qu'elle s'élève quand le volume d'air excédant atteint les $\frac{3}{4}$ du volume total.

Toutefois, les résultats des deux dernières analyses me paraissent difficiles à admettre dans toute leur intégrité. En effet, on a peine à concilier le volume considérable d'air excédant et l'imperfection de la combustion accusés par ces analyses, d'autant plus que le gaz qui a échappé à la combustion est ici l'hydrogène, élément dont tout le monde connaît l'extrême tendance à se combiner avec l'oxygène. Mais si on laisse même complètement de côté la perte de chaleur due à l'imperfection

ce qui peut se réduire à

$$\frac{0,16.0 + v' + 0,96 v''}{1,25. v + 19. v'}$$

et approximativement à

$$\frac{5 (v' + v'') + 0,8.0}{6 v + v'}$$

de la combustion, celle qui reste due à l'air excédant, et qui n'est point suspecte, se montre encore assez considérable pour que l'on puisse affirmer que l'on dépasse les limites des bonnes conditions en fournissant à la combustion un volume d'air quadruple de celui qui est nécessaire.

Il semble résulter aussi de la troisième analyse que la perte s'élève quand le rapport du volume excédant au volume total appelé n'est que $2/10$; cependant ce résultat n'est pas assez tranché pour que l'on puisse accueillir sans réserve cette conclusion.

Quoi qu'il en soit, puisque l'appel d'un volume d'air double de celui qui est nécessaire à la combustion ne cause pas une perte de chaleur supérieure à celle que l'on trouve avec un volume moindre, et que l'on a par l'appel de ce volume double plus de garanties d'une combustion aussi parfaite que possible, on peut s'arrêter à ce rapport et, dans le calcul des dimensions des fourneaux, avoir égard à cette condition, qu'il puisse y être appelé sans peine un volume d'air double de celui qui sera nécessaire à la combustion; on pourra aller jusqu'au triple, attendu que l'on peut toujours avec un registre réduire à volonté le tirage; mais ce serait une erreur que de vouloir aller au delà.

4. FUMÉE. — La fumée proprement dite est un ensemble de vapeurs d'huiles essentielles et de particules de charbon qui, faute d'air ou d'une température assez élevée, n'ont pas été brûlées et se trouvent entraînées par les produits gazeux de la combustion. L'écoulement de la fumée dans l'atmosphère n'est donc pas seulement un inconvénient pour les voisins des usines, mais aussi une perte de combustible pour leurs propriétaires.

La production de la fumée s'observe surtout au moment où l'on vient de charger le feu. L'explication de ce fait contient celle de la formation de la fumée en général. On sait que si l'on chauffe de la houille dans un vase clos, même à une température très-élevée, comme cela se fait dans les cornues à gaz, cette houille ne brûle pas, mais distille. Les produits de la distillation sont du gaz d'éclairage, des vapeurs de goudron, etc.; le résidu est du coke. Tous ces produits sont très-combustibles, et si leur combustion ne s'est pas opérée dans des appareils

fortement chauffés, c'est parce que la chaleur n'est qu'une condition accessoire, parfois inutile même de la combustion. Les véritables éléments de celle-ci sont le combustible d'une part, et le comburant de l'autre. Dans toutes les combustions industrielles, le comburant est l'oxygène de l'air; il faut qu'il soit en quantité proportionnée à celle du combustible avec lequel il doit se combiner, ou, ce qui revient au même, qu'il doit brûler. La chaleur n'est, avons-nous dit, qu'une condition accessoire, inutile même parfois. En effet, plusieurs corps s'enflamment au contact de l'air à une température très-peu élevée. Toutefois, pour la houille il n'en est pas de même, il faut une chaleur suffisante en même temps qu'une quantité d'air suffisante. Or, lorsqu'on charge de la houille fraîche sur de la houille embrasée, les deux conditions précédentes manquent à la fois. Les parties de houille en contact avec le feu reçoivent seules assez de chaleur et d'air pour brûler; mais les autres, protégées par celles-ci aussi bien contre la chaleur du foyer que contre le courant d'air qui passe à travers la grille, ne brûlent pas, mais distillent. Les produits abondants de la distillation ne trouvent, en parcourant le foyer, que de l'air dépouillé de la plus grande partie de son oxygène par son passage à travers le combustible brûlant; par suite, malgré la haute température du foyer, une grande partie de ces produits arrive à la cheminée sans avoir été brûlée.

Ce qui se produit dans ce cas, d'une manière bien manifeste, se produit constamment à un moindre degré quand, par une mauvaise construction, la quantité d'air introduite dans le foyer est constamment trop faible par rapport à la quantité de combustible que l'on veut y brûler.

Ainsi, nous avons vu que le *minimum théorique* d'air nécessaire à la combustion était de 9^{m^e} par kilog. de houille. Donc, si l'on introduit dans un foyer de 100^k de houille par heure, alors que dans le même temps le tirage n'y fait passer que 450^{m^e} d'air, il est clair que la moitié seulement des 100^k de houille pourra brûler, et que les 50^k non brûlés, étant soumis à une température élevée, distilleront, et cela d'une manière continue.

J'ai pris ces chiffres de 100^k de houille et de 450^{m^e} d'air, comme un exemple facile; on doit espérer que cet exemple ne

se présente point dans la réalité ; mais qui l'oserait assurer en présence de certaines cheminées qui vomissent incessamment de véritables torrents d'une fumée noire et opaque ? Et non-seulement les propriétaires de ces cheminées ne se demanderont pas combien leur coûte toute cette fumée , mais ils soutiendront de longs procès contre leurs voisins , ou leur païront de fortes indemnités , plutôt que de rien corriger aux dispositions vicieuses de leurs appareils à combustion.

Nous reviendrons sur cette question de la fumée , lorsque nous aurons à décrire les foyers fumivores , et à faire connaître les bonnes constructions des foyers ordinaires.

5. COMBUSTION ACTIVE ET COMBUSTION LENTE. — D'après la quantité d'air que l'on fait entrer dans le foyer , la combustion est lente ou active.

On peut se demander lequel de ces deux modes de combustion est plus avantageux. La discussion du § 3 résout en partie cette question , en montrant que l'on peut , sans augmentation des pertes de chaleur , faire entrer dans le foyer des volumes d'air très-différents. Toutefois , la question actuelle est principalement une question de temps ; celle que nous avons examinée pouvait se formuler ainsi : Perd-on plus de chaleur en fournissant la quantité rigoureusement nécessaire , et jusqu'à quel point peut-on dépasser celle-ci ? Maintenant nous supposons que l'on fournisse à la combustion de la houille la quantité d'air précisément convenable , et nous nous demandons si en fournissant lentement cette quantité d'air de manière , par exemple , que 1^k de houille mette une heure à brûler , nous obtiendrons de ce kil. de houille plus de chaleur que si nous lui fournissions la même quantité d'air assez rapidement pour le brûler en une demi-heure ?

Pour préciser davantage encore la question , je suppose que nous avons à brûler par heure 100^k de houille ; obtiendrons-nous plus de chaleur *utile* de ces 100^k en les chargeant en une fois dans un grand foyer où l'air arrive lentement , mais en quantité convenable , ou bien en les chargeant en plusieurs fois dans un petit foyer où l'air arrive très-vite et toujours en

quantité convenable, de manière que chaque kil. de houille ne mette à brûler qu'un quart d'heure, par exemple, au lieu d'une heure?

Nous pouvons encore poser le problème autrement : en ouvrant plus ou moins le registre de la cheminée, nous pouvons brûler dans un même foyer, soit 100^k par heure, soit 200^k. Dans lequel de ces deux cas la quantité de vapeur obtenue par kil. de houille est-elle la plus considérable?

Nous insistons sur l'énoncé de la question parce qu'elle n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire. En effet, elle se complique de bien d'autres et en particulier de celle-ci : la quantité d'air convenable pour brûler 1^k de houille en une heure, l'est-elle aussi pour brûler ce même kil. de houille en une demi-heure? Nous ne le croyons pas, parce que le temps est un élément important de toute réaction chimique, et si l'on n'avait à considérer que ce côté de la question, on pourrait la résoudre immédiatement; car il serait évident que plus la combustion serait rapide, plus il faudrait d'air par kil. de houille pour la rendre complète, et par conséquent plus il y aurait de chaleur prise par l'air excédant. Mais il y a un autre élément à considérer dans la réaction chimique que nous appelons combustion, c'est la chaleur. Or, il est clair que si nous plaçons dans un foyer embrasé 100^k de houille au lieu de 20, chacun des 100^k recevra moins de chaleur que chacun des 20^k, de sorte qu'avec une même quantité d'air les premiers pourront brûler moins complètement que les seconds. Ainsi la combustion pourra se faire continuellement d'une manière plus complète lorsqu'on chargera le foyer fréquemment et par faibles charges, que si l'on procède par charges plus fortes et plus espacées.

Cependant il est difficile de se prononcer avec certitude sur ce sujet. L'expérience seule permettrait de le faire; or, ses résultats sont ici contradictoires. Ainsi, d'après M. Murray, lord Dundwald a obtenu 6^k d'eau vaporisée par kil. de houille à l'aide d'une combustion lente, alors qu'un feu très-actif ne donnait que 4 à 5^k; de sorte qu'en ralentissant la combustion, on aurait obtenu une économie de 20 à 25 %. On sait encore que les chaudières du Cornwall, renommées à cause de leur

faible consommation, fonctionnent à feu dormant. D'un autre côté, les expériences de M. Cavé montrent que l'on peut augmenter de moitié la quantité de houille brûlée par heure dans un foyer, sans que la quantité de vapeur obtenue par kil. de houille varie sensiblement. Les expériences de M. Marozeau conduisent au même résultat, mais elles montrent qu'il y a un avantage notable à charger le foyer par charges faibles et à des intervalles égaux assez rapprochés. En effet, en chargeant 20^k à la fois à des intervalles de 18, 23 et 28 minutes, on a trouvé en moyenne 6^k,49 d'eau vaporisée par kil. de houille, tandis qu'en chargeant 10^k de houille à des intervalles réguliers de 15 minutes, on a obtenu 7^k,73 à 7^k,88, soit 20 % de plus. Ainsi, dans le premier cas, 100^k de vapeur coûtaient $\frac{100}{6,49}$, ou 15^k,4 de houille, et dans le second $\frac{100}{7,8}$, ou 12^k,8; l'économie obtenue par la charge régulière et faible a été de $\frac{2,6}{13,1}$, ou 15 %.

En résumé, l'on peut conclure des faits précédents que la combustion lente est économique, lorsqu'elle se fait dans des fourneaux appropriés à ce mode de combustion, par exemple sur de très-grandes grilles où l'on peut charger une forte quantité de houille, sans donner à cette charge une trop grande épaisseur. Alors il pourra arriver que le combustible rencontre à la fois assez de chaleur et assez d'air pour brûler complètement et lentement, si l'on ralentit la vitesse d'arrivée et d'écoulement de l'air; on aura par suite moins d'air non-désoxygéné entraîné par les gaz de la combustion; ceux-ci d'ailleurs, parcourant moins rapidement les différentes parties du fourneau, se dépouilleront mieux de leur chaleur avant de parvenir à la cheminée. Inutile d'ajouter que les dimensions des fourneaux et des chaudières doivent être d'autant plus grandes que l'on veut avoir une combustion plus lente.

6. DIFFÉRENTES QUALITÉS DE HOUILLE. — On distingue généralement les houilles en houilles *grasses*, houilles *demi-grasses*, et houilles *maigres* ou *sèches*.

La houille grasse, très-riche en éléments combustibles, brûle facilement avec une longue flamme blanche, en répandant beaucoup d'odeur et de fumée, et en produisant une chaleur

très-grande. Cette houille, d'un prix élevé, est peu convenable pour les foyers des machines à vapeur, parce qu'elle est excessivement collante (d'où le nom anglais de *caking-coal*, charbon collant); les morceaux, en se soudant les uns aux autres, forment voûte au-dessus des barreaux des grilles, ce qui amène la prompte détérioration de ceux-ci en même temps qu'une difficulté de tirage. En revanche, cette propriété rend cette houille très-propre aux usages de la forge; c'est pourquoi certaines variétés portent en France le nom de houille *maréchale*, et en Angleterre celui de *forge-coal* ou *smith-coal*.

Dans les houilles demi-grasses on distingue différentes variétés dont quelques-unes très-voisines des houilles grasses, et comme celles-ci, très-collantes, servent particulièrement à la fabrication du coke, tandis que d'autres, désignées sous le nom de *houilles demi-grasses à longue flamme* (*cannel-coal*), sont très-convenables pour les foyers de chaudières.

Les houilles maigres ou sèches (*glance-coal*) se distinguent facilement à l'œil des houilles grasses en ce qu'elles sont moins noires, moins luisantes et plus compactes que celles-ci. Elles ne sont point collantes et s'enflamment plus difficilement. Celles à *longue et brillante flamme* sont très-convenables pour les foyers et leurs prix sont peu élevés.

On donne aussi différents noms à la houille d'après la grosseur des morceaux. En France et en Belgique on appelle *tout-venant* la houille telle qu'elle sort de la mine, avant qu'on en ait rien séparé; les gros morceaux sont appelés *gros*, *pérat* ou *roche*, ceux de la grosseur du poing forment la *gaillette*, les plus petits la *gailleterie* ou *petite gaillette*; enfin les très-petits morceaux réunis en masse constituent le *menu*, *fin* ou *poussier*. La houille étant en général d'autant plus pure qu'elle est en plus gros morceaux, le prix du gros est plus élevé que celui de la gaillette, et le menu est généralement à très-bas prix. A cette époque de cherté, certains menus de la province de Liège se vendent 7 fr. la tonne.

La pureté des houilles est d'une grande importance; les matières schisteuses, terreuses, calcaires, etc., qu'elles renferment forment, après la combustion, les *cendres*, lorsqu'elles sont

infusibles à la chaleur des fourneaux, ou les *mâchefers*, lorsqu'elles sont fusibles. Les cendres, outre qu'elles sont un véritable déchet, nécessitent le nettoyage du foyer à travers la grille, ce qui ne se fait jamais sans qu'une quantité notable de menus tombe sans avoir été brûlée. Les mâchefers ont un effet encore beaucoup plus fâcheux : ils se soudent aux parois des foyers et aux barreaux des grilles, qu'ils détruisent promptement ; ils forcent d'ailleurs à nettoyer le feu par-dessus la grille, ce qui est encore plus nuisible que par-dessous, parce que l'on est forcé de tenir le foyer ouvert pendant assez longtemps. La houille mouillée paraît produire plus de mâchefers que la houille bien sèche.

Les houilles, et surtout les menus, renferment souvent des quantités notables de pyrite, dont le soufre passe, pendant la combustion, à l'état d'acide sulfureux qui attaque le métal des chaudières. On doit donc employer le moins possible les variétés très-pyriteuses ; on doit surtout éviter d'en faire de grands approvisionnements, parce que la pyrite peut se décomposer à l'air en dégageant beaucoup de chaleur au point d'allumer la houille qui la contient. On a vu des incendies extrêmement graves amenés par cette cause, surtout sur des bateaux à vapeur.

Les houilles anglaises sont, en général, très-pures ; certaines variétés ne donnent que 1 1/2 % de cendres ; les houilles belges et françaises le sont beaucoup moins ; il n'est pas rare d'en retirer 15 % de cendres. Aussi a-t-on cherché à purifier les houilles par des lavages, surtout pour les désulfurer. Cette opération a particulièrement de l'importance dans la fabrication du coke.

II. — DES FOURNEAUX ET APPAREILS DE TIRAGE.

7. COMPOSITION GÉNÉRALE D'UN GÉNÉRATEUR DE VAPEUR. — Afin de n'avoir jamais à employer dans la suite des termes dont quelques lecteurs pourraient ne pas connaître la signification, nous allons indiquer d'une manière générale la composition d'un appareil générateur de vapeur comprenant fourneau, chaudière et appareils de tirage.

La *chaudière* est un vase clos renfermant l'eau qui doit être transformée en vapeur; le *fourneau* est un appareil à combustion disposé, par rapport à la chaudière, de façon que celle-ci soit chauffée par la chaleur dégagée dans la combustion. Le plus souvent, la chaudière se trouve chauffée à la fois par le rayonnement du combustible et par le contact des gaz chauds, flamme et fumée, qui parcourent les différentes parties du fourneau avant de s'en échapper. Il existe bien certains fourneaux où la chaudière n'est chauffée que par la flamme et la fumée; mais cette disposition ne se rencontre que dans des fourneaux chauffés au bois ou bien dans les générateurs chauffés par des chaleurs perdues, comme celles des fours à puddler, etc. Ce sont là des cas spéciaux que nous examinerons à part. Mais généralement nous aurons à distinguer dans un fourneau deux parties: l'une où se fait la combustion et qui est placée sous la chaudière: c'est le *foyer* proprement dit; l'autre se compose des conduits placés sous la chaudière ou sur ses côtés et par lesquels passent la flamme et les gaz chauds qui sont appelés par le tirage vers la cheminée: ces conduits sont les *carneaux*.

Toute la surface chauffée de la chaudière porte le nom de *surface de chauffe*; la partie placée au-dessus du foyer, chauffée par le rayonnement du combustible et par le contact des gaz à la haute température qui règne en ce point, s'appelle surface de chauffe *directe*; tout le reste est la surface *indirecte*. On a rarement égard à cette distinction; le plus souvent, les données pratiques se rapportent à la surface de chauffe totale. Il en est ainsi lorsque l'on dit: la production de vapeur de telle chaudière est de 20^k par mètre carré de surface de chauffe.

Le plus souvent, pour augmenter la surface de chauffe totale et par conséquent la production de vapeur sans augmenter proportionnellement les dimensions du fourneau, on ajoute à la chaudière d'autres chaudières d'un diamètre plus petit appelées *tubes bouilleurs* ou simplement *bouilleurs*.

Qu'il y ait ou non des bouilleurs, il est rare que la flamme et la fumée aillent directement du foyer à la cheminée; le plus souvent il y a ce qu'on appelle des *retours de flamme*, c'est-à-dire que, par la disposition des carneaux, les gaz du foyer arrivés

au bout du carneau C placé sous la chaudière, fig. 1, 2, 3, 4, pl. I, doivent passer dans le carneau latéral C', et de celui-ci dans le second carneau latéral C''. Les fig. 5 et 6 montrent une disposition analogue avec des bouilleurs.

Dans la figure 5, les bouilleurs sont au-dessus du foyer, la chaudière en est séparée par une voûte, et se trouve chauffée seulement par les gaz qui passent dans les carneaux latéraux C', C''.

Dans la figure 6, la chaudière est au-dessous du foyer, et les bouilleurs sont placés dans des carneaux inférieurs. Dans ce cas, les bouilleurs sont souvent appelés *tubes réchauffeurs*.

Il y a d'autres dispositions dans lesquelles la flamme, après avoir chauffé le dessous de la chaudière, passe à travers des tubes dans l'intérieur de la chaudière : ce sont alors des *tubes carneaux*, ou des *carneaux intérieurs* (pl. VII et XI).

Dans d'autres dispositions encore le feu se fait dans un ou deux tubes placés dans l'intérieur de la chaudière. Ces tubes sont alors des *foyers intérieurs* (pl. XI et XII).

Enfin dans les chaudières à foyers et à carneaux intérieurs les deux dispositions précédentes sont réunies.

Ce n'est pas ici le lieu de discuter le mérite relatif de ces différentes dispositions ; nous devons nous borner en ce moment à faire comprendre comment on peut varier les dispositions d'un fourneau d'après celles de la chaudière.

Après les carneaux vient immédiatement la cheminée, à moins que les conditions locales n'empêchent de la placer à la suite du fourneau, auquel cas les carneaux communiquent avec la cheminée au moyen d'un conduit de fumée.

La cheminée, outre qu'elle sert à évacuer assez haut dans l'atmosphère les produits gazeux de la combustion, est aussi le plus souvent un appareil de tirage, c'est-à-dire sert à faire passer dans le foyer l'air nécessaire à la combustion.

Comme la cheminée est une partie commune à tous les foyers et que nous pouvons décrire sans nous préoccuper de leurs dispositions spéciales, c'est par l'étude des cheminées et plus généralement des moyens de tirage que nous commencerons l'étude des différentes parties d'un fourneau.

8. CHEMINÉE. — Le mouvement de l'air dans les cheminées est dû à la différence de densité de l'air intérieur et extérieur, différence due à celle des températures. La colonne gazeuse intérieure, beaucoup plus chaude, plus dilatée, et par conséquent moins pesante que l'air extérieur, se trouve dans le cas d'un bâton que l'on plongerait verticalement tout entier dans de l'eau et qui se trouverait, à cause de sa moindre densité, repoussé vers le haut. Seulement, dans une cheminée, le mouvement est continu, parce que l'air qui vient remplacer celui qui en sort est aussi de l'air chaud, de sorte que l'équilibre ne peut pas s'établir.

Le mouvement doit être d'autant plus rapide que la cheminée est plus haute, de même qu'un long bâton plongé dans l'eau sera plus fortement repoussé qu'un bâton court de même grosseur.

Le calcul indique toutefois que la vitesse ne croît pas proportionnellement à la hauteur, mais seulement à la racine carrée de la hauteur (1). Ainsi il faudrait quadrupler la hauteur d'une

(1) On peut assimiler le mouvement de l'air dans une cheminée au mouvement d'un fluide dans les deux branches d'un syphon, et trouver ainsi facilement la valeur théorique de la vitesse de l'air à l'orifice de la cheminée. En effet, on peut concevoir dans l'air une branche cylindrique idéale CD jointe à la cheminée AB, fig. 1, pl. II, par la branche horizontale DA. On peut d'ailleurs faire abstraction de la pression de l'air qui s'exerce également aux points C et B. Il ne reste alors qu'un syphon CDAB, dont les deux branches ont la même longueur, mais renferment des gaz de différentes densités. Si la température extérieure est t et la température intérieure T , les densités, dans les branches CD, AB seront :

$$\frac{1}{1+at} \quad \text{et} \quad \frac{1}{1+aT},$$

en prenant pour unité la densité de l'air à 0°, et appelant a son coefficient de dilatation.

D'après cela, le poids de la colonne CD de hauteur H sera égal à celui de la colonne AB de même hauteur multiplié par

$$\frac{1+aT}{1+at}$$

Nous ne changerons donc rien aux conditions du mouvement, si, au lieu

cheminée pour obtenir une vitesse double; pour avoir une vitesse triple, il faudrait rendre la hauteur de la cheminée neuf fois plus grande, et ainsi de suite.

Je me hâte d'ajouter que cette règle n'est point rigoureuse. Trop de circonstances influent sur la vitesse de l'air dans une cheminée, pour qu'il soit possible d'obtenir une formule exacte de cette vitesse. Ainsi, si nous voulons seulement considérer les résistances qui contrarient le mouvement, nous trouvons le frottement contre les parois de la cheminée et contre celle des carneaux, la résistance au passage à travers la grille, puis à travers le combustible, les résistances des coudes, etc. Toutes

de supposer que les deux colonnes d'air ont la même hauteur et des densités différentes, nous supposons qu'elles ont la même densité

$$\frac{1}{1 + aT},$$

mais que l'une a une hauteur H , tandis que l'autre a une hauteur

$$H \frac{1 + aT}{1 + at};$$

ce sera alors le cas d'un syphon à branches inégales ou, si l'on veut, d'un jet d'eau. La hauteur motrice sera la différence des deux hauteurs, et la vitesse approximative sera donnée par les formules :

$$v = \sqrt{2g \left(H \frac{1 + aT}{1 + at} - H \right)}$$

ou

$$v = \sqrt{2gH \frac{a(T-t)}{1+at}}.$$

g étant la gravité.

Comme t est toujours très-petit par rapport à T , on peut négliger les termes qui renferment cette quantité et poser seulement

$$v = \sqrt{2g a H T}$$

ou, remplaçant g par $\frac{9^m,81}{1''^2}$ et a par $0,00567$:

$$v = \frac{0^m,268 \sqrt{HT}}{1''},$$

H étant le nombre de mètres de la hauteur et T le nombre de degrés centigrades de la température moyenne dans la cheminée.

ces résistances ne sont guère susceptibles d'évaluation (1) sérieuse. M. Pécelet a entrepris de longues expériences et de longs calculs pour obtenir une semblable évaluation; en résumé, ses résultats se réduisent à cette conséquence que les résistances qu'il serait à la rigueur possible de calculer, telles que celles du frottement dans la cheminée et dans les carneaux, sont insignifiantes à côté de celles dont on ne peut pas obtenir une valeur, même très-peu approchée, ne fût-ce qu'à cause de leur variabilité. Ainsi, d'après les calculs et les observations de M. Pécelet, la résistance que l'air éprouve à traverser le combustible et la grille est beaucoup plus grande que celle qu'engendrent les frottements. Or, il est clair qu'une pareille résistance ne peut pas être déterminée par le calcul; quelques pelletées de houille de plus ou de moins, la nature plus ou moins collante

(1) On cherche à calculer les résistances dues aux frottements dans la cheminée ou dans les carneaux, en supposant, comme on le fait toujours pour les gaz, que ces résistances sont proportionnelles au carré de la vitesse. On peut alors admettre que leur effet consiste à diminuer la hauteur motrice d'une quantité fv^2 , f étant un coefficient de frottement dépendant de toutes les conditions dans lesquelles la résistance a lieu. On a ainsi :

$$v = \sqrt{2g \left(H \frac{a(T-t)}{1+at} - fv^2 \right)}$$

ou approximativement

$$v = \sqrt{2gHaT - 2gfv^2},$$

d'où l'on tire

$$v = \sqrt{\frac{2gHaT}{1+2gf}}.$$

Si l'on veut tenir compte d'une autre résistance, telle que celle que l'air rencontre dans son passage à travers la grille, il suffit d'ajouter à f le coefficient r du terme rv^2 , expression de la perte de hauteur motrice produite par cette résistance. On a alors

$$v = \sqrt{\frac{2gHaT}{1+2gf+2gr}}.$$

Pour une cheminée tapissée de suie, M. Pécelet trouve $2gf = 0,03 \frac{L}{D}$, L étant la longueur des parois contre lesquelles s'exerce le frottement et D le

du combustible et mille autres causes doivent produire des variations considérables. Sur de semblables questions, on ne peut demander à la théorie que quelques vagues indications et point des formules précises. Réduites à ce rôle plus modeste de fournir quelques indications à la pratique, les expériences de M. Pécelet conservent encore une valeur incontestable, en permettant d'estimer approximativement l'importance de certaines résistances que l'on pourrait ou trop craindre ou trop dédaigner.

Ainsi, dans la note 1 (p. 37 et suiv.), on trouve que, d'après M. Pécelet, le frottement dans une cheminée de 30^m de hauteur, précédée de carnaux d'une longueur totale de 20^m, la section intérieure des carnaux et de la cheminée, étant égale à la surface d'un carré de 0^m,50 de côté, ne réduirait la vitesse que de 1/6.

côté de la section commune des carnaux et de la cheminée supposée carrée, ou plus généralement le quadruple du rapport de la surface de cette section à son contour. En outre, pour des dimensions ordinaires de grille et une épaisseur de houille de 6 à 8 centimètres, M. Pécelet trouve $2gr = 12$.

On a donc :

$$v = \sqrt{\frac{2gH\alpha T}{15 + 0,05 \frac{L}{D}}}$$

ou

$$v = \frac{0^m,0744}{1''} \sqrt{\frac{HT}{1 + 0,004 \frac{L}{D}}}$$

Si l'on suppose une cheminée carrée de 30^m de hauteur et de 0^m,50 de côté intérieur, précédée de deux carnaux de 10^m de longueur chacun et de même section, on aura $L = 2 \times 10 + 30$ ou 50^m, et le dénominateur sous le radical sera 1,4, dont la racine carrée est à peu près 1,2. Ainsi l'influence du frottement sera de diviser la vitesse par 1,2 ou de la réduire de $\frac{1}{6}$. Avec

20^m de carnaux de plus, on aurait $L = 70$ et $1 + 0,004 \frac{L}{D} = 1,560$. La

racine carrée de ce nombre étant 1,25, la vitesse sera réduite de $1 - \frac{1}{1,25}$

ou $\frac{1}{5}$.

Avec 20^m de carneaux de plus, la réduction serait de 1/5, de sorte que ces 20^m de carneaux n'auraient à eux seuls diminué la vitesse que de la différence de 1/5 à 1/6 ou 1/30. Quelque marge que l'on accorde à l'erreur, on conçoit que de telles évaluations montrent tout au moins que l'influence de la longueur des conduits de fumée est beaucoup moindre que l'on ne serait porté à le croire. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que l'on ne peut guère augmenter la longueur totale des carneaux qu'en augmentant leur nombre, attendu que la longueur de chacun d'eux est généralement limitée par des conditions locales. Or, à chaque passage d'un carneau dans l'autre, il y a un coude qui offre une résistance sensible au mouvement.

Le volume d'air chaud qui s'écoule en une seconde par l'orifice d'une cheminée est, à peu de chose près, égal à la vitesse multipliée par la surface de cet orifice. Le poids de ce volume s'obtient en multipliant celui-ci par le poids de 1^{m^c} d'air à la température qu'il possède en s'écoulant. C'est ce poids d'air écoulé en une seconde qui mesure le *tirage* de la cheminée (1).

(1) Le tirage d'une cheminée ou le poids d'air écoulé en 1["] peut se calculer de la manière suivante. Si l'on appelle *s* la surface de l'orifice de la cheminée, le volume écoulé sera à peu près *sv*; le poids spécifique à la température *T*, supposée la même que dans la cheminée, est

$$\frac{1^{\text{k},5}}{1 + aT}$$

Donc le tirage est

$$Q = sv \frac{1^{\text{k},5}}{1 + aT},$$

ou

$$Q = \frac{ms\sqrt{HT}}{1 + aT},$$

m étant un coefficient qui renferme les données constantes et celles qui se rapportent aux différentes résistances.

La valeur de *Q* montre que le tirage augmente proportionnellement à la section de l'orifice de la cheminée et à la racine carrée de la hauteur.

Quant à l'influence de la température, on peut reconnaître que le tirage

Le tirage ne croît pas indéfiniment avec la température de l'air dans l'intérieur de la cheminée, parce que, si d'un côté la vitesse croît avec cette température, de l'autre le poids spécifique ou le poids de 1^{me} d'air diminue avec elle. Ainsi le poids de 1^{me} d'air est :

à 100°	0 ^k ,95
200	0,75
300	0,62
400	0,53
500	0,46

D'ailleurs, la vitesse de l'air étant supposée 1 pour la température, 100° sera, d'après la formule théorique :

à 200°	1,41
300	1,73
400	2,00
500	2,24

De sorte que si l'on suppose l'orifice d'un mètre carré, le volume écoulé sera :

à 100°	1 ^{me} ,00 pesant	0 ^k ,95
200	1,41 »	$1,41 \times 0,75 = 1,06$
300	1,73 »	$1,73 \times 0,62 = 1,07$
400	2,00 »	$2,00 \times 0,53 = 1,06$
500	2,24 »	$2,24 \times 0,46 = 1,03$

Il semble par là qu'il n'y a aucun avantage, au point de vue du tirage, à laisser échapper l'air à une haute température. Mais il faut remarquer que la vitesse d'écoulement de l'air diminue rapidement quand la température s'abaisse, et que, par suite, l'influence des résistances est plus à craindre. Il suffit, pour se convaincre de l'importance de cette considération, de

croît avec la température jusqu'à la valeur $T = \frac{1}{a} = 275^\circ$, et qu'au-delà il décroît. Le tirage est donc maximum pour une température intérieure de la cheminée d'environ 500°. Le calcul montre aussi que le tirage varie très-peu avec la température entre des limites assez étendues. Ainsi, théoriquement, le tirage ne varierait pas de 1/25 entre 200° et 500°, et de 1/10 entre 100 et 200°.

se rappeler que de faibles coups de vent, ou des états particuliers de l'atmosphère, suffisent pour arrêter et même refouler la fumée de certaines cheminées d'appartements dans lesquelles la température est très-peu élevée.

Mais on peut combattre efficacement ces influences extérieures et particulièrement celle du vent, comme nous le verrons en parlant des chapiteaux des cheminées. C'est pourquoi l'on aurait tort de craindre trop de diminuer la vitesse, s'il y a un grand avantage à le faire.

Cette question nous conduit à l'examen de celle-ci :

Quelle est la perte de chaleur par les cheminées, ou, en d'autres termes, que coûte le tirage d'une cheminée?

L'expérience et le calcul (1) montrent que la température de

(1) On peut calculer la perte de chaleur par les cheminées d'après la valeur de la température dans la cheminée et dans le foyer. En effet, soit V le volume d'air nécessaire à la combustion de 1^k de combustible, et C le pouvoir calorifique de ce combustible. Chaque volume V aura, en faisant brûler 1^k de combustible, pris à ce kil. la chaleur dégagée dans sa combustion, et ce volume V d'air aura acquis ainsi dans le foyer une température T_1 . En supposant que l'air était d'abord à 0° , la chaleur absorbée par le volume V ou plutôt par le poids correspondant $V \times 1^k,5$, pour s'échauffer jusqu'à T_1 degrés sera

$$V \times 1,5 \times \frac{1}{4} \times T_1,$$

$\frac{1}{4}$ étant la chaleur spécifique de l'air; on doit donc avoir :

$$V \times 1,5 \times \frac{1}{4} \times T_1 = C.$$

D'où

$$T_1 = \frac{4C}{V \times 1,5}.$$

Avec la bonne houille on a, d'après ce que nous avons vu, $C = 7500$ calories, et $V = 18^m$; on trouve par suite :

$$T_1 = 1282^\circ.$$

On compte ordinairement sur un maximum de 1200° , parce que le pouvoir calorifique 7500 ne peut guère s'obtenir en pratique.

Si T est la température de l'air dans la cheminée, il est clair que la chaleur possédée par chaque kil. d'air dans la cheminée est à celle que pos-

l'air dans un foyer est d'à peu près 1200°. D'un autre côté, le poids d'air entré en une seconde dans le foyer doit évidemment être égal à celui qui s'écoule dans le même temps par la cheminée. Donc, si nous supposons que la température à laquelle l'air s'écoule est 300°, nous pourrions dire que chaque kil. d'air, en entrant dans le foyer, aura pris à la combustion assez de chaleur pour s'échauffer jusqu'à 1200° et en aura conservé, en s'écoulant, assez pour que sa température soit encore de 300°. Or, la chaleur contenue dans un kil. d'air à 300° étant le quart de celle que contient ce même kil. à 1200°, nous voyons que l'air à 300° emporte 1/4 de la chaleur fournie par le combustible. Donc la perte de chaleur par une cheminée dans laquelle la température est 300° peut être évaluée à 25 %. Le même raisonnement montre immédiatement qu'avec une température de 150° la perte ne sera que de 12 1/2 %, et qu'au contraire, avec une température de 400, elle serait de 33 %. On cherche généralement à obtenir dans la cheminée 300°, et j'ai vu plusieurs cheminées où la température excédait 350°, car le mercure du thermomètre y entrait en ébullition. Dans ce cas, on admet qu'il y a excès de chaleur, et par conséquent perte gratuite; mais sur quoi se fonde-t-on pour croire qu'il n'en est pas de même pour la température de 300° que l'on regarde comme la plus convenable? Je serais fort embarrassé de le dire; c'est encore là une de ces règles pratiques admises sans raisons suffisantes. La seule que l'on pourrait indiquer est celle que nous avons mentionnée, savoir la crainte de rendre les résistances au tirage trop puissantes contre une faible vitesse. Mais si l'on calcule la vitesse de l'air à l'orifice d'une cheminée de 20^m de hauteur, ce qui est

sède 1^k d'air dans le foyer dans le rapport de T à T₁. Or, comme la chaleur possédée par l'air dans la cheminée est de la chaleur perdue, et que le poids d'air écoulé par la cheminée est constamment égal au poids d'air entré dans le foyer, on voit que la perte de chaleur sera à la chaleur obtenue : : T : T₁. Ainsi la perte par kil. de combustible pourra être représentée par l'égalité :

$$p = C \frac{T}{T_1} .$$

En admettant T = 500°, T₁ = 1200, on voit que la perte est de 25 %.

une des hauteurs les plus fréquentes, et au-dessous de laquelle on descend rarement, on trouve qu'elle doit être théoriquement de 20^m,76 par seconde à la température de 300°, et de 14^m,68 à la température de 150°. La comparaison des résultats théoriques et pratiques (note, p. 45) permet d'affirmer que la vitesse réelle de l'air à la sortie d'une cheminée, dans les conditions ordinaires, est tout au moins 1/5 de la vitesse théorique. Il nous reste donc au moins une vitesse de 4^m,15 à 300° et de 2^m,94, ou environ 3^m à 150°. Cette dernière valeur est encore considérable, et si l'on songe que dans les cheminées d'appartement dont nous parlions tout-à-l'heure, la vitesse est tout au plus moitié de la précédente, et que la plupart conservent un tirage suffisant dans toutes les circonstances atmosphériques, on peut ne pas renoncer par une crainte exagérée à l'économie de combustible que doit procurer un abaissement utile de la température de l'air dans les cheminées. Nous croyons donc que l'on peut, sans inconvénient grave, réaliser une économie importante, 40 à 45 %, en utilisant la chaleur perdue des cheminées, c'est-à-dire en employant la chaleur des gaz du fourneau de façon qu'en arrivant à la cheminée ils ne possèdent plus qu'une température de 150 à 200 degrés. Nous verrons dans la suite quelques appareils construits dans ce but.

Pour déterminer les dimensions des cheminées, on a donné différentes règles théoriques et pratiques (1); la plus simple est

(1) La formule d'après laquelle on peut calculer les dimensions des cheminées s'obtient en égalant le tirage au poids d'air nécessaire à la combustion pendant 1^h; soit n^k de houille à brûler par heure et A le poids d'air nécessaire à la combustion de 1^k de houille; il faudra par heure nA kilog. d'air et par seconde

$$\frac{nA}{5600}$$

Ce poids devant être égal à celui qui s'écoule dans le même temps par la cheminée, c'est-à-dire au tirage, on devra avoir :

$$\frac{ms\sqrt{HT}}{1+aT} = \frac{nA}{5600}$$

Comme, d'après ce qui précède, la valeur de T influe peu tant qu'elle

celle de d'Arcet, déduite de nombreuses observations de cheminées fonctionnant très-bien. Elle consiste à donner une hauteur de 10^m, et une section d'autant de décimètres carrés que l'on veut brûler de fois 3^k ou 3 1/3^k de houille par heure. Si l'on donne une hauteur supérieure à 10^m, on peut réduire la section en la divisant par la racine carrée du rapport de cette hauteur à celle de 10^m. Ainsi une hauteur de 40^m permettra de réduire la section de moitié. Comme 3^k ou 3 1/3^k est la consommation des bonnes machines à vapeur, on peut se poser cette règle très-simple : un décimètre carré de section par cheval de force avec une hauteur de 10^m.

On a vivement débattu la question de la hauteur des cheminées; on s'est demandé s'il vaut mieux augmenter la section d'une cheminée plutôt que sa hauteur, construire des cheminées

est comprise entre 200° et 500°, limites qui sont aussi celles de la réalité, on peut faire $T = 500^\circ$ et poser

$$\frac{A}{5600} \frac{1 + aT}{m\sqrt{T}} = M,$$

M étant un nombre sensiblement constant, ou du moins ne variant qu'avec les résistances particulières de chaque cheminée; on aura ainsi :

$$s = \frac{Mn}{\sqrt{H}}.$$

Théoriquement, en négligeant toutes les résistances, en supposant, par conséquent, $m = 0^{\text{m}},268$ (p. 56), A égal au volume pratiquement nécessaire à la combustion de la houille, savoir 18^m (p. 22), et $T = 500^\circ$, on a $M = 22$ centimètres carrés, n étant le nombre de kilog. de houille à brûler par heure et H le nombre de mètres de hauteur.

En évaluant les résistances comme M. Pécelet, on a $M = 80$ c. q.

Montgolfier avait donné une formule qui, avec les données précédentes, revient à

$$s = 100^{\text{c. q.}} \frac{n}{\sqrt{H}}.$$

Tredgold donnait une règle dont l'expression est équivalente à

$$s = 80^{\text{c. q.}} \frac{n}{\sqrt{H}}.$$

Enfin d'Arcet propose de donner aux cheminées une hauteur de 10^m et un

très-larges et peu élevées, ou des cheminées étroites et très-hautes. Nous n'hésitons pas à conseiller des cheminées larges, et élevées seulement juste autant que l'exigent les conditions locales.

Il est rare que l'on puisse, sans être incommodé par la fumée ou sans incommoder ses voisins, donner à une cheminée moins de 10 ou 15^m de hauteur. Cette hauteur suffira pour procurer une vitesse capable de lutter contre les influences extérieures. Et si l'on donne, d'après la règle de d'Arcet, une section d'autant de décimètres carrés que l'on a de fois 3^k de houille à brûler par heure, on pourra être certain d'obtenir un excellent tirage. Si l'on ne donne qu'une section deux fois moindre, il faudra rendre la vitesse double, et, pour cela, quadrupler la hauteur de la cheminée, la porter à 40^m. Or, je suis convaincu qu'avec ces nouvelles dimensions le tirage sera très-inférieur à celui qu'on obtenait avec les premières. Car l'expérience montre que le tirage n'augmente plus d'une manière sensible avec la hauteur quand celle-ci dépasse 30^m, de sorte qu'on ne regagne pas,

décimètre carré de section pour 5^k ou 3 1/5^k à brûler par heure. En admettant toujours la vitesse proportionnelle à la racine carrée de la hauteur, on aurait d'après cette règle :

$$s = 1^{\text{d. q.}} \frac{n}{5} \frac{\sqrt{10}}{\sqrt{H}},$$

ou

$$s = 1^{\text{d. q.}} \frac{n}{5 \frac{1}{5}} \frac{\sqrt{10}}{\sqrt{H}}.$$

Ce qui peut se réduire simplement à

$$s = 100^{\text{c. q.}} \frac{n}{\sqrt{H}}.$$

On voit que cette formule est identique à celle de Montgolfier, et que c'est elle qui donne la plus forte section. On fera bien de l'adopter. En comparant le chiffre $M = 22$, indiqué par la simple formule théorique comme nécessaire pour obtenir un tirage convenable, avec le chiffre $M = 100$, donné par la pratique comme largement suffisant, on peut conclure que la vitesse de l'air à l'orifice de la cheminée donnée par la théorie est au moins égale aux 22/100^{es} ou 1/5 de la vitesse réelle.

en quadruplant la hauteur, ce qu'on perd en diminuant de moitié la section.

Mais admettons même que le tirage sera aussi bon, et que, de plus, on aura acquis toute tranquillité sur l'influence des résistances au tirage ; il est fort intéressant de calculer à quel prix on aura obtenu ce résultat, en réalité fort mince.

Supposons que nous ayons à brûler 200^k de houille à l'heure : nous pourrons donner 10^m de hauteur et 70 décimètres carrés environ de section, soit 0^m, 95 de diamètre intérieur, ou 40^m de hauteur et 35 décimètres carrés de section, soit 0^m, 67 de diamètre. Admettons, en outre, que nous ferons une cheminée ronde, cylindrique intérieurement, conique extérieurement, avec une pente de 30 millimètres par mètre et une épaisseur d'une demi-brique au sommet ; nous verrons que ce sont là les proportions usitées. Au moyen des formules de la géométrie (1), nous trouverons sans peine que le volume de briques sera :

(1) Le volume solide d'une cheminée et, par suite, son poids peuvent être déterminés facilement en se fondant sur les théorèmes qui donnent le volume d'un tronc de cône ou de pyramide. Nous considérerons quatre cas principaux :

1^o Soit une cheminée conique intérieurement et extérieurement. Appelons r, e son rayon intérieur et son épaisseur à la partie supérieure, r', e' les mêmes données à la partie inférieure, et h la hauteur de la cheminée. Le volume solide U sera la différence de deux troncs de cône de même hauteur h , et dont les rayons des bases sont r, r' pour les deux troncs, et $r + e, r' + e'$ pour l'autre. On aura, d'après le théorème connu donnant le volume d'un tronc de cône :

$$U = \frac{h}{3} \left\{ \pi (r + e)^2 + \pi (r' + e')^2 + \pi (r + e) (r' + e') \right\} \\ - \frac{h}{3} \left\{ \pi r^2 + \pi r'^2 + \pi r r' \right\}.$$

Cette valeur peut être mise sous la formule :

$$U = \frac{\pi h}{3} \left\{ e (e + e' + 2r + r') + e' (e' + 2r' + r) \right\}.$$

D'ailleurs, si l'on appelle K, i les pentes extérieures et intérieures de la cheminée, on pourra poser :

P^r une hauteur de 10^m et un diam. intérieur de 0^m,95... 10^m^s,812
 Id., id., 40^m id., 0^m,67... 140^m^s,986

Il faudra approximativement pour la première cheminée 5,000 briques, pour la seconde 70,000, et remarquons bien que la main-d'œuvre et les fondations ne seront pas simplement en proportion de ces chiffres. A mesure que la cheminée s'élève, quel que soit le mode de construction, le travail devient nécessairement plus lent et plus difficile. Il en était ainsi surtout autrefois, quand on se servait d'échafaudages pour ces constructions. Le prix croissait alors rapidement avec la hauteur. Quant aux fondations, il est clair que leur masse devra être plus que proportionnelle au poids de la cheminée, et qu'à poids égal même elle doit croître fortement avec la hauteur, car plus une cheminée est haute et étroite, plus les déplacements du centre de gravité sont à craindre. Je crois que l'on peut affirmer sans exagération que, dans le cas précédent, la cheminée haute

$$r' = r + i h$$

$$e' = e + (K - i) h$$

et l'on trouvera :

$$U = \pi h \left\{ e^2 + 2 r e + K h e + (K - i) h \left(r + \frac{K + i}{5} h \right) \right\} (a).$$

On donne ordinairement comme épaisseur à la partie supérieure une demi brique, comme pente extérieure 0^m,024 à 0^m,050 par mètre, et comme pente intérieure 0^m,015 à 0^m,018. Soit donc :

$$e = 0^m,11, K = 0,050, i = 0,018;$$

on trouvera :

$$U = 5,14. h \left\{ 0^m. 4,0121 + 0^m,22 r + 0^m,0055 h + 0^m,012 h r + 0,000192 h^2 \right\} (b).$$

2^o Soit une cheminée cylindrique intérieurement, conique extérieurement. Il suffira de faire dans la formule (a)

$$i = 0, \text{ d'où :}$$

$$U = \pi h \left\{ e^2 + K h e + 2 r e + K h \left(r + \frac{K h}{5} \right) \right\} (c),$$

et avec les données numériques précédentes,

$$U = 5,14 h \left\{ 0^m. 4,0124 + 0^m,0055. h + 0^m,22 r + 0,05 h r + 0,0005 h^2 \right\} (d).$$

coûtera quinze à vingt fois autant que la cheminée large sans présenter aucun avantage, si ce n'est au point de vue de la beauté; car, comme solidité, la première sera nécessairement inférieure à la seconde.

Il est à remarquer que beaucoup d'entrepreneurs calculent dans leurs devis le cube de maçonnerie d'une cheminée comme si elle était pleine. C'est là certainement une pratique fort peu rationnelle qui tend à diminuer la grande différence de prix que nous venons de signaler. Cependant dans le cas précédent, les cubes pleins seraient 17^m^3 , 900 et 155^m^3 , 066. La cheminée haute coûterait encore 9 fois plus que la cheminée large, si l'entrepreneur était assez peu intelligent pour compter au même taux le cube de chacune de ces constructions.

En présence de la comparaison que nous venons de faire, on a peine à comprendre comment il existe tant de cheminées hautes et étroites sans nécessité. Dans certains cas on a eu

5° Soit une cheminée de section carrée, pyramidale à l'intérieur et à l'extérieur.

Appelons a, a' les côtés de la section intérieure au haut et au bas de la cheminée. En conservant les autres notations, nous aurons :

$$U = \frac{h}{3} \left\{ (a+e)^2 + (a'+e')^2 + (a+e)(a'+e') - a^2 - a'^2 - aa' \right\};$$

d'où l'on déduira cette autre expression :

$$U = h \left\{ e^2 + 2ae + Khe + (K - ih) \left(a + \frac{K+ih}{3} h \right) \right\} (e),$$

semblable à celle que nous avons obtenue plus haut, et avec les mêmes données numériques, on aura :

$$U = h \{ 0^m. 4,0121 + 0^m,22. a + 0,0055. h + 0,012 ha + 0,000192 h^2 \} (f).$$

4° Si la cheminée est prismatique intérieurement, on fait encore $i = 0$, et l'on a

$$U = h \{ 0^m. 4,0121 + 0^m,22. a + 0^m,0055 h + 0,05 ha + 0,0005 h^2 \} (g).$$

Il est inutile de considérer les cas d'une cheminée cylindrique ou prismatique intérieurement et extérieurement, ces formes ne s'employant que pour de très-petites cheminées. Il suffirait d'ailleurs de faire dans les formules précédentes $K = 0$ et $l = 0$.

certainement en vue la beauté architecturale ; une haute cheminée, dominant un grand établissement, est incontestablement un ornement d'un caractère imposant. Mais, dans bien d'autres cas, il est visible que l'on n'a pas songé à faire une construction de luxe, et que l'ignorance ou de fausses idées ont seules décidé le choix d'une disposition inutilement coûteuse.

La hauteur de 10^m que nous avons choisie comme exemple ne pourra certainement pas être employée souvent, parce que des conditions locales s'y opposeront. En effet, une cheminée n'est pas seulement un appareil de tirage, mais aussi un appareil d'évacuation devant éloigner les produits gazeux des points où ils pourraient nuire. Il faut tout au moins que la fumée soit abandonnée dans l'atmosphère à une hauteur supérieure à celle des bâtiments qui entourent la cheminée. Dans certains cas même on doit élever la cheminée assez haut pour que la fumée ne puisse jamais incommoder les habitations voisines. Ainsi il existe presque toujours des conditions spéciales qui fixent un *minimum* de hauteur.

C'est ce *minimum* que nous engageons à ne dépasser que très-peu, quand nous conseillons des cheminées larges et peu élevées.

En résumant tout ce que nous avons dit sur les dimensions des cheminées, et ajoutant que l'on n'a jamais à craindre un excès de tirage, parce qu'on peut toujours, comme nous le verrons, le modérer par un registre, et que d'ailleurs des dimensions trop grandes sont en pareil cas une précaution d'avenir, nous poserons cette simple règle générale :

Donner aux cheminées une hauteur très-peu supérieure à celles qu'exigent les conditions locales, et, quelle que soit cette hauteur, une section d'autant de décimètres carrés que l'on a de fois 3^k de houille à brûler par heure.

Si l'on ne veut donner que la section rigoureusement nécessaire, on prendra un nombre de décimètres carrés égal au nombre de kilog. de houille à brûler par heure, divisé par la racine carrée du nombre de mètres de la hauteur.

Ajoutons encore que lorsque la cheminée est pyramidale intérieurement, ce qui est le cas le plus fréquent, c'est pour

l'extrémité supérieure que la section doit être calculée d'après les règles précédentes.

Enfin, il est presque inutile de dire que ces règles s'appliquent aussi aux cheminées communes à plusieurs foyers ; nous ferons seulement remarquer qu'en pareil cas surtout, on doit calculer largement la section en comptant sur la consommation totale de tous les fourneaux en activité, lors même que l'on ne prévoirait pas devoir se servir de tous les foyers à la fois. En effet, il est clair que, par la multiplicité et la longueur des conduits de fumée et par leur différence forcée de direction, le tirage de telles cheminées rencontrera plus de résistances que celui des cheminées ne servant qu'à un seul foyer.

Dans ce cas aussi, on fera bien de donner plus de hauteur (20 à 30^m), afin de mieux vaincre ces résistances.

Les cheminées de fourneaux de chaudières ne se construisent qu'en briques ou en tôle. Les cheminées en briques sont beaucoup plus solides et plus favorables à un bon tirage. Les cheminées de tôle sont plus légères et prennent moins de place ; mais leur durée est très-limitée et leur substance étant bonne conductrice de la chaleur, le refroidissement de la fumée dans leur intérieur est très-nuisible au tirage. Cet inconvénient est surtout sensible avec les cheminées de tôle, minces et étroites, que l'on voit à certains fourneaux de petites machines à vapeur ; leur surface extérieure étant considérable par rapport à la masse d'air qui les parcourt, le refroidissement est tel que, les jours de pluie, le tirage devient extrêmement faible, au point que j'ai vu, par cette seule cause, des machines s'arrêter faute de vapeur.

On ne doit employer les cheminées de tôle que lorsque la nature du terrain l'exige, ou lorsque la place manque pour élever une cheminée de briques, nécessairement beaucoup plus large. Nous ne parlons évidemment ici que des cheminées pour machines fixes.

Les cheminées en briques peuvent avoir différentes formes. Au point de vue de l'économie de combustible, ces formes sont indifférentes. Cependant la plupart des auteurs disent que les cheminées circulaires sont préférables, parce que ce sont celles

qui, pour une même section, ont le plus petit contour intérieur et par conséquent produisent le moins de frottement. C'est là ce qu'on pourrait appeler une *puérité théorique*. En effet, si en admettant les formules que prétend donner la théorie, celles de M. Pécelet, par exemple, on calcule quelle sera la différence de tirage d'une cheminée ronde et d'une cheminée carrée ayant toutes deux 30^m de hauteur et 25 décimètres carrés de section, on trouve que le tirage de la première l'emporte sur celui de la seconde de $\frac{1}{100}$. Si l'on redoutait une pareille perte, il suffirait de faire la section de la cheminée carrée de $\frac{1}{100}$ plus grande que celle de la cheminée ronde. Avec 3 millimètres de côté intérieur de plus, 503^{mm} au lieu de 500, on aurait encore un bénéfice.

Nous croyons qu'il est très-utile de réduire à leur juste valeur les indications de la théorie, parce qu'il n'arrive que trop souvent aux praticiens de s'attacher aux conditions théoriques les moins importantes, et d'en sacrifier d'autres plus sérieuses à leur réalisation.

D'ailleurs on voit de bons ouvrages, auxquels ont souvent recours et avec raison les constructeurs, présenter toutes les conditions théoriques sans indiquer suffisamment quelles sont celles auxquelles la pratique doit surtout satisfaire. Ainsi l'on trouve dans le *Dictionnaire des arts et manufactures* à l'article *Cheminée* :

« La résistance due au frottement du courant d'air chaud ascendant contre les parois était en raison inverse de l'aire de section et proportionnelle à son périmètre, il convient de choisir, pour la forme de la section intérieure, celle qui, sous le même périmètre, présente l'air maximum, c'est-à-dire le cercle; la forme la plus convenable à donner à la section intérieure des cheminées sous le rapport du tirage est donc la forme circulaire, et c'est maintenant celle que l'on adopte généralement pour les cheminées de chaudières à vapeur. »

On comprend que, devant les affirmations aussi positives, les personnes qui ne peuvent pas en scruter l'importance n'hésitent pas à adopter une disposition coûteuse, mais qui semble présenter un avantage sérieux.

Dans le même article, un peu plus haut, on trouve encore :

« Les résistances que les tuyaux de conduites opposent au mouvement des gaz varient selon la nature de ces tuyaux ; elles sont plus grandes dans les tuyaux de terre cuite que dans ceux de tôle, et plus grandes dans ces derniers que dans ceux de fonte. M. Pécelet a reconnu par expérience que la même loi s'applique exactement au mouvement de l'air chaud dans les cheminées. Quoique la fonte et la tôle, étant beaucoup meilleures conductrices de la chaleur que la brique, occasionnent dans les courants d'air chaud un refroidissement beaucoup plus rapide, il en résulte que les cheminées à parois métalliques tirent mieux que celles en briques ; cependant celles-ci, étant beaucoup plus solides et plus durables, sont généralement préférées. »

M. Pécelet lui-même a fait cette remarque toute naturelle que les cheminées étant toujours enduites de suie, le frottement est indépendant de leur nature, puisqu'il n'a lieu que contre cette suie. On voit donc que l'extrait précédent a encore moins de valeur que le premier, et, si l'on a égard à ce que nous avons dit plus haut, on admettra que les cheminées de tôle sont inférieures à celles de briques, non-seulement sous le rapport de la durée et de la solidité, mais aussi sous celui du tirage.

Je ne crois pas qu'il faille attacher plus d'importance à la recherche de la forme la plus convenable à donner aux cheminées pour qu'elles résistent mieux aux vents. La variabilité seule de la direction des vents rend toute solution à peu près impossible.

En somme, ce n'est pas à la théorie qu'il faut demander de décider quelle est la forme à donner à la section des cheminées, mais simplement au goût du constructeur ou du propriétaire. Généralement la forme carrée plaît moins que la forme circulaire : celle-ci, en revanche, coûte plus cher, parce qu'elle exige plus de main-d'œuvre, les briques devant être taillées et posées attentivement. La forme polygonale présente peut-être autant d'élégance que la forme circulaire et coûte moins excepté lorsqu'il s'agit de cheminées très-larges. Alors la forme ronde peut s'obtenir sans qu'il soit nécessaire de tailler les briques, et devient par là une des formes les plus économiques. Les fig. 2, 3 et 4, pl. II, représentent trois cheminées des différentes sections précédentes

pouvant alimenter un fourneau de chaudière pour une machine de 25 chevaux.

Les très-petites cheminées peuvent être prismatiques ou cylindriques, c'est-à-dire avoir la même section sur toute leur hauteur, aussi bien extérieurement qu'intérieurement. Mais la plupart des cheminées de machines à vapeur doivent, pour être solides, être pyramidales, au moins extérieurement. On donne à la maçonnerie à la partie supérieure une épaisseur d'une demi-brique, ou, en d'autres termes, une largeur de brique, soit $0^m,12$. Intérieurement la maçonnerie présente une pente de $0^m,000$ à $0^m,018$ par mètre, extérieurement de $0^m,024$ à $0^m,030$.

Ces pentes varient nécessairement, parce que l'épaisseur de la maçonnerie au pied de la cheminée ne peut être que d'un certain nombre de briques et de demi-briques, par conséquent de 24° ou 36° ou 48° , etc.; d'ailleurs cette épaisseur sera égale à $0^m,12$ augmenté de la différence des pentes extérieure et intérieure multipliée par la hauteur de la cheminée. Ainsi, au bas d'une cheminée de 20^m de hauteur, avec les pentes $0^m,030$ extérieurement et $0^m,018$ intérieurement, l'épaisseur devra être $0^m,12$ plus 20 fois la différence $0^m,012$ des pentes, c'est-à-dire $0^m,36$, ou une brique et demie.

Si on fait la cheminée prismatique intérieurement, l'épaisseur croît simplement avec la pente extérieure; celles-ci étant de $0^m,030$, l'épaisseur avec 20^m de hauteur sera $0^m,12 + 20 \times 0^m,030$ ou $0^m,72$, c'est-à-dire 3 briques.

Enfin, si on fait la cheminée de 20^m avec la pente extérieure de $0^m,030$ et une épaisseur au pied de 2 briques ou $0^m,48$, la pente intérieure sera naturellement la différence $0^m,72 - 0^m,48$ de l'épaisseur sans pente intérieure à l'épaisseur avec pente, divisée par la hauteur. Ce sera donc $\frac{0,24}{20}$, ou $0^m,012$.

On voit par là comment la pente peut varier suivant la disposition de la cheminée, mais toujours entre des limites assez resserrées.

La forme pyramidale exigeant une taille des briques, on construit quelquefois des cheminées formées de parties prismatiques de différentes sections superposées (fig. 3, pl. II). Cette

forme n'est ni aussi élégante ni aussi solide que la forme pyramidale, mais elle est moins coûteuse.

On peut construire les cheminées en briques ordinaires scellées par un mortier de chaux et de sable fin. Il faudrait que la température fût très-élevée, par exemple 500°, pour qu'il y eût nécessité d'employer des briques réfractaires.

On élevait autrefois les cheminées au moyen d'échafaudages extérieurs, qui étaient très-coûteux. Aujourd'hui la cheminée se monte en quelque sorte d'elle-même : dès que le maçon a élevé 60 ou 80 centimètres de maçonnerie, il encastre dans l'intérieur une barre de fer sur laquelle il établit un petit plancher ; une petite grue lui sert à recevoir les briques et le mortier qu'un manœuvre lui passe. Ces barres de fer restent dans la maçonnerie et servent pour le nettoyage et les réparations de la cheminée. Un bon ouvrier, aidé d'un manœuvre, peut ainsi élever en quelques semaines une grande cheminée. Nous avons déjà fait remarquer, à l'avantage des cheminées larges, que ce mode de construction si économique serait à peu près inapplicable à une cheminée haute et étroite.

Les cheminées de tôle sont à section circulaire ou elliptique. Celles des machines fixes sont généralement circulaires ; il est bon de les faire pyramidales et de leur donner une épaisseur notablement plus forte à la partie inférieure qu'à la partie supérieure. Ainsi on pourra ne donner à la tôle au haut de la cheminée que 4^{mm} d'épaisseur, et ajouter en descendant 1/4 de millimètre par mètre. Une pente extérieure de 0^m,010 suffit.

Il y a encore plus de raisons, pour les cheminées de tôle que pour celles de briques, de préférer les cheminées larges et peu élevées aux cheminées hautes et étroites. En effet, aux motifs de préférence que nous avons indiqués en faveur des larges cheminées de briques, il faut ajouter ici que l'influence du refroidissement extérieur croît en proportion de la hauteur et en raison inverse du diamètre, de sorte qu'en réduisant le diamètre et augmentant la hauteur on accroît doublement cette cause de diminution de tirage. D'ailleurs, la différence de prix, sans être aussi forte que pour les cheminées de briques, sera aussi très-grande.

Soit, par exemple, une cheminée cylindrique de tôle de 10^m de hauteur et 1^m de diamètre : sa section sera 78^{d. q.}, 54, son contour 3^m,143 et sa surface 31^{m. q.}, 43. D'après une règle posée plus haut, on donnera une épaisseur de 4^{mm} en haut et de 6^{mm},5 en bas, donc une épaisseur moyenne de 5^{mm},25. Or, on voit dans les tables de tous les aides-mémoire, que le poids de 1^{m. q.} de tôle de 5^{mm}1/4 d'épaisseur est environ 41^k; on pourra donc évaluer approximativement, en comptant sur les recouvrements, le poids de tôle entré dans cette cheminée à 1300^k.

En réduisant la section à moitié, soit 39^{d. q.},27, on devra, pour conserver le même tirage, porter la hauteur au quadruple, 40^m. Le diamètre de la cheminée avec cette section sera 0^m,707; son contour 2^m,221 et sa surface 40 × 2^m,221 ou 88^{m. q.},84. L'épaisseur étant de 4^{mm} en haut devra être de 4 + 1/4 × 40 ou 14^{mm} en bas; donc l'épaisseur moyenne sera $\frac{14+4}{2}$ ou 9^{mm}; sous cette épaisseur le mètre carré de tôle pèse 70^k. Le poids de la cheminée sera d'au moins 6500^k ou quintuple du précédent. D'ailleurs la première exigera moins de rivets, moins de courbure, en un mot moins de main-d'œuvre, et pourra être plus facilement exécutée avec soin.

Les cheminées de tôle sont généralement fixées au moyen de boulons à une large plaque de fonte boulonnée elle-même sur des fondations. Celles-ci n'ont pas besoin d'autant de solidité que celles des cheminées de briques, beaucoup plus lourdes que celles de tôle.

Il est bon d'établir les cheminées, de briques ou de tôle, sur un socle en maçonnerie très-forte dans lequel viennent déboucher les conduits de fumée, et qui présente une ouverture que l'on ferme par une maçonnerie d'une demi-brique. Cette ouverture sert à pénétrer dans la cheminée pour le nettoyage ou les réparations.

Ce socle doit reposer sur des fondations extrêmement fortes, surtout lorsque la cheminée est en briques. On peut prendre comme modèle sous ce rapport la cheminée reproduite fig. 6, pl. II, et qui a été construite, d'après les dessins de R. Stephenson, pour les chaudières des deux machines fixes du

plan incliné de Hampstead, sur le chemin de fer de Londres à Birmingham, machines faisant ensemble 120 chevaux de force. Les fondations sont un massif A en pierres de taille de 7^m,20 de côté et 1^m,80 de profondeur, portant une pyramide en briques B qui porte elle-même un prisme également en briques sur lequel repose la cheminée. On peut reconnaître que les dimensions de cette cheminée ont été largement calculées; car elle a, avec environ 40^m de hauteur, une section à l'orifice d'environ 120^d. 4., c'est-à-dire telle que la donnerait la règle de d'Arcet avec une hauteur de 10^m.

Le dessus des cheminées de briques doit être couvert d'un chapiteau en pierres de taille ou en fonte, qui sert à empêcher l'infiltration des eaux pluviales dans la maçonnerie en même temps que d'ornement. Il n'a guère que ce dernier objet quand on le fait en briques, à moins qu'on n'en couvre le dessus d'une feuille de tôle. Dans tous les cas, il faut éviter de lui donner beaucoup de poids dans la crainte de rendre dangereuses les oscillations parfois très-sensibles qu'exécutent les grandes cheminées sous l'influence du vent.

Au-dessus du chapiteau on fera toujours bien de placer une plaque de fonte plus large que l'orifice de la cheminée et soutenue par des pieds scellés dans le chapiteau (fig. 2, 3, 4, 5, pl. II). En donnant à ces pieds une hauteur égale à la moitié du côté ou du diamètre de la cheminée, on pourra être certain que la plaque n'opposera pas de résistance sensible au courant de la fumée; mais elle aura deux effets très-utiles: 1° elle empêchera la pluie de tomber dans la cheminée, ce qui nuit beaucoup au tirage; 2° elle rendra nulle l'influence du vent sur le tirage. Car on peut démontrer (1) que le vent ne contrarie l'écoulement de

(1) Pour déterminer l'influence du vent sur le tirage, on doit considérer deux directions horizontale et verticale, suivant lesquelles on peut toujours décomposer la vitesse du vent. En vertu du principe des mouvements simultanés, la vitesse horizontale du vent ne peut pas nuire à la vitesse verticale de la fumée; une molécule sortie de la cheminée avec une vitesse verticale v , et recevant du vent une vitesse horizontale v' , prendra une vitesse égale en

la fumée que lorsqu'il souffle verticalement de haut en bas. Lorsqu'il agit horizontalement, il augmente la vitesse du courant de fumée en même temps qu'il l'incline, de sorte que la colonne qui s'échappe en une seconde, au lieu d'être un prisme droit, est un prisme oblique, mais de même base et de même hauteur. Lorsque le vent souffle de bas en haut verticalement, il ne peut évidemment qu'activer le tirage; ce ne sera que lorsqu'il soufflera de haut en bas, qu'il y sera opposé. Si sa direction de haut en bas est oblique, son action sera partielle; on la déterminera en décomposant sa vitesse oblique en deux vitesses, l'une horizontale sans influence, l'autre verticale agissant seule.

En résumé, quelle que soit la direction du vent, la plaque horizontale placée au-dessus de l'orifice empêchera toute influence nuisible sur le tirage, et l'on doit s'étonner de ne pas voir généralement appliqué un appareil aussi simple, qui dans des circonstances fréquentes produira une économie de combustible plus grande que bien d'autres appareils moins modestes.

Quant à tous les autres appareils fixes ou mobiles imaginés pour obvier à l'action des vents, tels que chapiteaux, mitres, girouettes, nous n'en parlerons pas. Ce sont là des inventions de fumistes, sans importance et tout au plus applicables, comme fantaisies, aux cheminées d'habitation.

On voit parfois au-dessus des cheminées de fourneaux des plaques de fonte que l'on peut faire mouvoir verticalement ou horizontalement, au moyen d'une chaîne descendant jusqu'au bas de la cheminée ou au moyen d'un système de leviers. Ces plaques servent alors de registres pour modérer le tirage. On ne les emploie plus guère qu'au-dessus des cheminées de locomotives. Il est plus simple d'employer comme registre une

grandeur et en direction à la diagonale du rectangle construit sur les vitesses v , v' . Il résulte de là que la colonne de fumée sortie en une seconde, au lieu d'être un prisme rectangulaire ayant pour base l'orifice de la cheminée et pour hauteur la vitesse v , sera un prisme oblique, mais ayant la même base et la même hauteur. L'action horizontale du vent ne modifie donc pas le tirage, de sorte que l'on n'a à empêcher que son action verticale.

plaque de fonte verticale (fig. 7, 8, pl. II) suspendue à une chaîne, équilibrée par un contre-poids, et que l'on peut faire descendre entre deux rainures dans un des conduits de fumée, le plus souvent immédiatement avant la cheminée. Les deux rainures, qui servent de guide, appartiennent ordinairement à un cadre de fonte fixé dans la maçonnerie; on peut rendre ainsi la fermeture plus parfaite dans le cas où l'on veut éteindre le feu.

Quelquefois le registre se met horizontalement dans la cheminée (fig. 9, 10, pl. II); il est alors plus difficile à manœuvrer.

Lorsqu'on ne peut pas appliquer un registre, on emploie une valve mobile à l'aide d'une manivelle ou d'un levier (fig. 11, pl. II). Cette disposition est moins bonne: on ne peut pas obtenir une fermeture aussi complète, parce qu'il faut laisser plus de jeu, si l'on ne veut pas que le mouvement soit promptement arrêté par les cendres qui s'amassent dans les carneaux; d'ailleurs, on comprend que les pivots doivent s'user très-vite.

9. CHEMINÉES DESCENDANTES. — La grande perte de chaleur qui se fait par les cheminées a fait rechercher des moyens plus économiques de tirage; nous n'en indiquerons que trois, savoir: les cheminées descendantes, les ventilateurs et l'action des jets de vapeur.

Les cheminées descendantes sont fondées sur un principe remarquable, l'excès de densité de la fumée refroidie sur l'air froid. Que l'on imagine une cheminée ordinaire débouchant dans un canal horizontal que la fumée parcourt en se refroidissant et par lequel elle arrive dans une seconde cheminée descendante; on voit que ce système forme un syphon à trois branches, l'une horizontale, deux verticales. Les produits gazeux de la combustion s'élèvent, dans la première branche, en vertu de la moindre densité que leur donne leur haute température; ils perdent cette température dans la branche horizontale, et arrivent refroidis dans la branche descendante; là, ils possèdent une densité supérieure à celle de l'air extérieur, parce qu'ils sont formés en grande partie d'un gaz pesant, l'acide carbonique: en vertu de cet excès de densité, ils tomberont. Ainsi le tirage sera produit par deux causes agissant dans le même

sens : l'excès de densité de l'air extérieur sur la colonne gazeuse chaude de la cheminée ascendante, et l'excès de densité de la colonne gazeuse refroidie de la cheminée descendante sur l'air extérieur. Cependant une analyse exacte du mouvement (1)

(1) On détermine immédiatement la hauteur motrice dans une cheminée ascendante et descendante en remarquant que l'on a ici un syphon véritable, dans la branche ascendante duquel la température est T et la densité

$$\frac{d}{1 + aT},$$

tandis que, dans la branche descendante, la température est T' et la densité

$$\frac{d}{1 + aT'},$$

d étant la densité du gaz intérieur à 0°. On n'a pas d'ailleurs à se préoccuper de la pression de l'air, qui est la même aux deux extrémités du syphon.

Au lieu de supposer la branche descendante de même longueur H que la branche ascendante et renfermant un gaz plus pesant, on peut supposer qu'elle renferme un gaz de même densité $\frac{d}{1 + aT}$, mais que sa hauteur est $H \frac{1 + aT}{1 + aT'}$; la hauteur motrice sera alors :

$$H \frac{1 + aT}{1 + aT'} - H,$$

ou

$$H \frac{a(T - T')}{1 + aT'}.$$

Et la vitesse d'écoulement

$$v' = \sqrt{\frac{2gHa(T - T')}{1 + aT'}}.$$

Avec la partie ascendante seule, la vitesse serait, avons-nous vu :

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(T - t)}{1 + at}},$$

t étant la température extérieure.

On aura $v' = v$, quand $T' = t$, c'est-à-dire quand on aura refroidi la fumée jusqu'à la température extérieure, ce qui sera rarement possible sans multiplier les résistances.

Si l'on suppose $t = t^{\circ}$, température moyenne de nos climats, et $T' = 100$, ce qui sera toujours facile à obtenir, on trouve $v' = 5/4 v$.

montre que le tirage d'un tel système de cheminées ne pourra être égal à celui d'une cheminée simple, que si l'on parvient à refroidir complètement la fumée. En supposant que l'air chaud garde une température de 400° dans la partie descendante et possède 300° dans la partie ascendante, le tirage serait théoriquement réduit aux $\frac{3}{4}$ de ce qu'il serait avec la seule branche verticale. Cette réduction n'est pas considérable, et pourrait être facilement rachetée, soit en augmentant la section, soit en laissant pénétrer l'air à une haute température dans la partie ascendante, ce qui ne serait pas ici un inconvénient, puisqu'on utiliserait cette chaleur.

D'ailleurs quelques applications faites de ce système de cheminées montrent qu'on peut en obtenir de bons résultats, mais une difficulté sérieuse en restreint l'emploi. Il faut pouvoir se débarrasser facilement de la fumée refroidie; une des circonstances le plus favorables sous ce rapport est l'existence d'un cours d'eau à la surface duquel on peut faire déboucher la partie descendante et dont le mouvement facilite singulièrement le tirage. D'un autre côté, on devra pouvoir trouver un emploi simple et utile de la chaleur dans la partie horizontale située au-dessus de la cheminée. Dans beaucoup d'industries, cette chaleur pourrait être utilisée à chauffer un séchoir, de l'eau, etc.

En résumé, les cheminées descendantes ne sont point des appareils de tirage dont on puisse recommander l'application générale, mais ils peuvent être très-avantageux dans certains cas particuliers, tels que ceux que venons d'indiquer.

10. TIRAGE PAR UN JET DE VAPEUR. — Le tirage par un jet de vapeur paraît avoir été connu des anciens; il a acquis à notre époque une grande importance par son application aux locomotives. L'action de ce moyen de tirage est remarquablement énergique; on l'explique facilement dans les cheminées de locomotives, où la colonne de vapeur s'échappe avec une extrême vitesse en remplissant toute la cheminée, et faisant ainsi l'effet d'un piston qui se meut rapidement de bas en haut; mais il n'est pas besoin que le jet remplisse la cheminée; différentes expériences prouvent qu'un jet de vapeur, se mouvant même

dans l'air libre, entraîne dans sa direction un fort courant d'air. Aussi peut-on activer le tirage d'un fourneau en faisant déboucher un jet de vapeur, soit dans la cheminée, soit dans le cendrier sous la grille; dans le premier cas, le jet produit l'effet d'une machine aspirante; dans le second, celui d'une machine soufflante. Dans les deux cas, il est bon de faire déboucher la vapeur par plusieurs ouvertures, afin qu'elle remplisse mieux la section du cendrier ou de la cheminée. On pourra employer, par exemple, un tuyau terminé par quatre branches ouvertes.

C'est là un moyen précieux de tirage, le plus simple auquel on puisse recourir lorsque le tirage d'une cheminée est insuffisant. Quant à son économie, l'expérience seule pourrait la décider, et je ne crois pas qu'il existe de données suffisantes à cet égard. On sait seulement que dans les locomotives le mode de tirage est extrêmement coûteux; mais cela tient en partie à l'excessive énergie qu'on doit lui donner dans des conditions très-défavorables. Il faut, en effet, pour suffire à l'énorme consommation de ces machines, qu'à travers des tubes nombreux et étroits on appelle une quantité d'air très-considérable, qui n'a pour s'écouler qu'une cheminée basse et d'un petit diamètre. On n'atteint le but qu'en forçant la vapeur à sortir avec une grande vitesse par l'orifice étranglé du tuyau de décharge. Il résulte de là une contre-pression dans les cylindres qui peut aller jusqu'à 30 % de la pression; on comprend sans peine quelle énorme perte de travail et de combustible se produit ainsi.

D'ailleurs il est un principe général que l'on ne doit jamais perdre de vue dans l'examen d'un moyen de tirage : c'est que son économie ne peut résulter que de l'utilisation de la chaleur de la fumée. Le tirage d'une cheminée ne peut avoir lieu sans la perte d'une certaine quantité de chaleur emportée par la fumée, puisque c'est là la condition même du tirage. Si l'on peut, par un autre procédé, mettre l'air en mouvement à travers un fourneau et ne laisser échapper cet air qu'après lui avoir repris utilement toute la chaleur qu'il a prise à la combustion, il ne restera qu'à examiner si la dépense entraînée par ce procédé est supérieure ou inférieure à celle qui résulterait de la perte de chaleur par une cheminée. Mais il est clair que si, avec ce procédé, on

abandonne l'air chaud à la température qu'il possède dans nos cheminées, la dépense du moyen de tirage s'ajoutera simplement à la perte de chaleur par les cheminées. Or, c'est ce qui arrive dans les locomotives.

Il ne faut donc point considérer le tirage par un jet de vapeur des locomotives comme un procédé économique, mais comme un moyen simple de résoudre, n'importe à quel prix, la difficulté très-grande d'obtenir un tirage énergique dans les plus mauvaises conditions.

Ce qui empêche de juger la valeur économique du tirage par un jet de vapeur, c'est qu'il n'a jamais été appliqué que dans des cas analogues, c'est-à-dire dans les cas seulement où l'on n'aurait obtenu que difficilement, à l'aide d'une cheminée, un tirage suffisant, par exemple, sur des bateaux à vapeur. La question serait de savoir si dans de bonnes conditions, avec des chaudières auxquelles on pourrait donner une surface de chauffe assez grande pour bien utiliser la chaleur des gaz, on n'obtiendrait pas avec économie le tirage nécessaire au moyen d'un jet de vapeur. L'expérience seule pourrait résoudre cette question. Il est probable qu'elle la résoudrait affirmativement pour le cas où l'on pourrait utiliser la vapeur de décharge des machines sans condensation.

11. TIRAGE MÉCANIQUE. — Nous n'avons pas à considérer ici les différentes machines soufflantes qui ont été proposées et employées pour alimenter d'air la combustion. On n'a guère cherché à appliquer aux fourneaux de chaudières qu'un seul genre d'appareils mécaniques de tirage, savoir : les ventilateurs. Par la continuité de leur action, par la simplicité de leur construction et le peu de besoin de réparation, ces appareils se recommandent tout spécialement à une application pratique continuelle.

Nous ne pouvons ici ni décrire tous les ventilateurs qui ont été proposés, ni discuter leur mérite; nous nous bornerons à reproduire la disposition la plus simple et la plus fréquemment employée, en ajoutant que les avantages offerts par d'autres plus compliquées ne sont pas assez marquants pour que l'on y attache une grande importance, surtout dans la question actuelle.

Les ventilateurs agissent, on le sait, en donnant à l'air, par un mouvement de rotation rapide, une force centrifuge considérable. Celui que nous avons reproduit fig. 12 et 13, pl. II, se compose simplement d'un axe à palettes planes capable de recevoir, à l'aide d'une courroie et d'une poulie, un mouvement de rotation dont la vitesse peut atteindre 1500 à 1800 tours par minute. Ces palettes tournent dans un tambour dont les joues planes présentent autour de l'axe de larges ouvertures; en un point de la surface cylindrique s'ouvre un large tuyau ordinairement à section rectangulaire. Les palettes, en tournant, emportent l'air dans leur mouvement de rotation, et la force centrifuge qu'il acquiert le force à se porter vers les extrémités des palettes en quittant les points voisins de l'axe. En ces points, il se fait ainsi une raréfaction continue qui appelle l'air extérieur par les ouvertures O, en même temps que l'air intérieur comprimé à la circonférence s'écoule par la tuyère T.

L'effet utile des ventilateurs est faible, c'est-à-dire que la quantité d'air mise en mouvement par ces machines ne correspond pas au travail qu'elles dépensent; une machine soufflante avec le travail employé à mouvoir un ventilateur produirait beaucoup plus d'effet; mais les soins de construction et les réparations exigés par les soupapes et les pistons compenseraient bien cet avantage, surtout dans le cas qui nous occupe. Toutes les dispositions qui ont été imaginées pour augmenter l'effet utile des ventilateurs n'ont donné que de faibles résultats. L'une des meilleures est l'excentricité de l'axe par rapport aux joues du tambour, comme l'indique la fig. 12.

Les ventilateurs peuvent être employés comme machines aspirantes et comme machines soufflantes. La première disposition semble convenir mieux aux fourneaux de chaudière, parce qu'il suffirait d'appliquer l'ouverture de l'une des joues, l'autre étant nécessairement fermée, contre l'extrémité du dernier carneau, et de faire déboucher la tuyère dans une cheminée d'évacuation. Mais, outre la difficulté de maintenir bien graissé un appareil aspirant de l'air chaud, il est clair qu'il faudrait donner aux ventilateurs aspirants des dimensions plus grandes qu'aux ventilateurs soufflants qui injectent de l'air froid, donc

plus dense, c'est-à-dire en plus grande quantité sous un même volume. Il suffit de conduire l'air de ces ventilateurs dans le cendrier fermé, en laissant à l'arrière du fourneau une petite cheminée d'évacuation. Rappelons encore que la fumée devra avoir été préalablement refroidie aussi complètement que possible, si l'on veut que le ventilateur produise un tirage économique.

Or, quand cette condition est remplie, on trouve une économie très-remarquable par l'emploi d'un ventilateur. Ainsi, dans l'un des bains Vigier, à Paris, la fumée, refroidie par son trajet à travers de petits tuyaux entourés d'eau à chauffer, était aspirée par un ventilateur qui la foule dans une cheminée. Ce ventilateur, qui ne faisait que 40 tours à la minute, était mû par un seul homme, et appelait assez d'air pour brûler 85^k de bois par heure, et, par conséquent, 42^k,5 de houille, la combustion de 1^k de houille exigeant deux fois plus d'air que celle de 4^k de bois. Un cheval-vapeur faisant 7 fois autant de travail qu'un homme, on voit qu'avec un travail d'un cheval, on pourrait faire mouvoir un ventilateur appelant assez d'air pour brûler $7 \times 42,5 = 297,5$, ou environ 300^k de houille par heure. Or, avec une bonne machine à vapeur, un cheval, par heure, coûte 3^k de houille. Donc, à l'aide d'un ventilateur, on obtient avec 3^k de houille le tirage nécessaire à la combustion de 300^k. Ainsi le tirage par un ventilateur coûterait 1 % du combustible brûlé, tandis que le tirage par les cheminées coûte 25 %.

Voici un autre exemple plus remarquable parce que l'application a été faite plus en grand : dans une brasserie de Louvain, un ventilateur suffisait pour produire l'appel nécessaire à une combustion de 1000^k de houille par heure. Ce ventilateur prenait 6 chevaux de force, ce qui, avec une bonne machine, équivalait à une dépense de 15 à 20^k par heure. Donc ici le tirage ne coûtait que 1 1/2 à 2 %. Une cheminée aurait produit une perte de 250^k par heure ou 3,000^k par journée de 12 heures ; le ventilateur produisait le même effet avec une dépense maximum de 20^k à l'heure, de 240^k par jour. Si donc on a pu complètement utiliser la chaleur de la fumée avant son évacuation, l'économie réalisée a dû être de 2,760^k par jour.

On a peine à comprendre comment, en présence de pareils résultats pratiques, on n'a point multiplié les essais d'application des ventilateurs au tirage des fourneaux de chaudières. Je suis convaincu qu'il y a beaucoup de chances de réussite dans cette voie, et que, si l'on n'y est pas entré plus avant, c'est que, dans les grandes applications pratiques, toutes les parties d'un même tout sont solidaires et ne peuvent pas progresser l'une sans l'autre. Ainsi l'on n'a pas pu chercher à diminuer la perte de chaleur par les cheminées, avant d'avoir un moyen simple et sans inconvénients pratiques d'utiliser aussi complètement que possible toute la chaleur des gaz des fourneaux. Aujourd'hui l'emploi de plus en plus général des chaudières tubulaires résoud une partie de la question, et il reste peu de chose à faire pour achever la solution.

12. FOYER. — Le foyer proprement dit est la partie du fourneau où se fait la combustion. Dans la plupart des fourneaux de générateurs, le foyer est placé sous la chaudière même (fig. 4, pl. III) ; le combustible introduit par la porte P du foyer repose sur une grille G, et est retenu sur les côtés par les parois latérales du foyer, par la paroi extérieure dans laquelle est pratiquée la porte, et par l'autel A, qui est comme une marche d'escalier placée au fond du foyer. Sous la grille est un espace vide appelé *cedrier* qui reçoit les cendres tombant à travers les barreaux de la grille, et par lequel arrive sous celle-ci l'air nécessaire à la combustion.

La partie la plus importante à considérer au point de vue d'une bonne et économique combustion est la grille. D'ailleurs ce sont ses dimensions qui règlent celles du foyer ; nous devons donc nous en occuper d'abord.

Les grilles des foyers sont généralement formées de barreaux de fonte, parfois de fer, placés les uns contre les autres, mais maintenus légèrement écartés sur presque toute leur longueur par de petites saillies ou renforts qu'ils présentent à leurs extrémités et souvent en leur milieu (fig. 4, 2, 3, pl. III). L'écartement des grilles est naturellement double de l'épaisseur de ces saillies, ainsi qu'on le voit par la fig. 2 représentant en plan deux barreaux juxtaposés. Il est clair aussi que si l'écartement

des grilles est le quart de l'épaisseur des barreaux, la somme de ces écartements sera le quart de la somme de ces épaisseurs, et le cinquième de la somme des épaisseurs et des écartements; en d'autres termes, si on néglige l'espace occupé par les petites saillies, la partie libre de la grille par laquelle l'air doit passer sera le quart de la partie pleine et le cinquième de la surface totale. Ainsi avec des barreaux de 25^{mm} d'épaisseur dans les renforts et 20^{mm} dans tous les autres points, par conséquent écartés de 5^{mm} les uns des autres, la somme des écartements sera 1/5 de la somme des épaisseurs dans les renforts, c'est-à-dire de la largeur de la grille, et la surface ouverte de la grille sera à fort peu près le 1/5 de la surface totale.

On conçoit qu'il doit y avoir une relation entre l'ouverture de la grille par laquelle l'air entre dans le fourneau et celle de la cheminée par laquelle il sort. La règle pratique ordinaire établit l'égalité entre ces deux ouvertures. Nous nous bornerons pour le moment à admettre cette règle, que nous discuterons bientôt et que nous reconnaitrons ne pouvoir être qu'avantageuse.

Il en résulte que la surface de la grille doit être 4, 5 ou 6 fois égale à la section de la cheminée, selon que l'écartement des barreaux est 1/3, 1/4 ou 1/5 de leur épaisseur. Si donc on détermine la section de la cheminée d'après la règle de d'Arcet (p. 44), la surface de la grille sera de 4 à 6 décimètres carrés par cheval de force ou plutôt par 3^k de houille à brûler par heure. Ainsi, pour une machine de 30 chevaux, la grille du foyer devra avoir 120 à 180 décimètres carrés de surface, soit 1^m de largeur avec 1^m,20 ou 1^m,80 de longueur. Nous verrons que cette dernière dimension sera de beaucoup préférable.

L'épaisseur et l'écartement des barreaux de grille sont du reste très-variables. Le plus fréquemment l'épaisseur est de 30 à 35^{mm} et l'écartement de 5 ou 10^{mm}. On fait beaucoup de barreaux aujourd'hui de 20 à 25^{mm} d'épaisseur avec 5^{mm} d'écartement.

On propose même des barreaux de 10 à 15^{mm} d'épaisseur écartés seulement de 2 à 3^{mm}. Ces barreaux doivent nécessairement être très-courts pour offrir assez de résistance, de sorte qu'il en faut un grand nombre pour former une grille. Ce n'est point là du reste un inconvénient sérieux, et je ne vois vraiment aucune objection à faire contre l'emploi de tels barreaux;

mais je ne vois pas non plus de motifs bien plausibles en leur faveur ; leur avantage serait, dit-on, de pouvoir brûler du combustible menu et de médiocre qualité, parce que, d'une part, l'écartement étant très-petit, les plus petits morceaux de houille ne pourraient point passer à travers la grille, et que, d'autre part, le nombre des barreaux étant considérable, le passage de l'air à travers la grille serait assez large, malgré le peu d'écartement, pour que l'on puisse brûler sans peine les houilles les moins bonnes.

Je ne doute point de l'exactitude de cette assertion, mais je ne doute point non plus qu'on puisse arriver au même résultat avec des barreaux ordinaires et surtout avec des barreaux de 20^{mm} à 25^{mm} d'épaisseur et 5^{mm} d'écartement. J'ai vu sur des grilles dont les barreaux avaient au moins cet écartement, et plus de 30^{mm} d'épaisseur, brûler des menus, coûtant à Liège 70^{ces} les 100^k, c'est-à-dire moitié moins que les bonnes houilles ordinaires.

Les meilleures dimensions, selon nous, sont une épaisseur de 20 à 25^{mm} avec 5^{mm} d'écartement. On a ainsi assez d'épaisseur pour pouvoir donner aux barreaux une assez grande longueur (un mètre et plus), ce qui est toujours plus commode pour le montage et les réparations de la grille, et surtout pour le nettoyage du feu.

On augmente d'ailleurs, sans inconvénients aucun, la résistance des barreaux en leur donnant la forme indiquée figure 4.

La forme triangulaire de la section (fig. 3), facilite le nettoyage de la grille et empêche les scories de s'arrêter entre les barreaux et d'obstruer le passage de l'air.

Cette forme ne se donne qu'aux barreaux de fonte ; les barreaux de fer ne sont généralement que de simples barres à section rectangulaire posées sur champ. On ne les emploie guère du reste pour les fourneaux ordinaires de chaudières. Ils ne sont nécessaires que dans les foyers où il se produit une très-haute température, par exemple, dans les fours à réverbère.

Nous parlerons plus loin de différentes dispositions de grille que l'on a imaginées dans le but d'obtenir une combustion économique et sans fumée. Actuellement nous nous occupons seulement des foyers ordinaires, et il nous reste, au sujet de leurs

grilles, une question bien importante à examiner, celle de leur position par rapport à la chaudière, et l'examen de cette question nous ramènera à celle de l'étendue des grilles, dont nous avons déjà parlé.

Il est clair que la chaudière ou les bouilleurs doivent être placés à une certaine distance du feu. A une trop grande distance la chaleur serait mal utilisée, par une trop petite la combustion serait gênée. Où est le juste-milieu ? Les constructeurs laissent généralement 30 à 40 centimètres de distance entre le fond de la chaudière ou des bouilleurs et la grille. Mais a-t-on fait des expériences assez nombreuses et décisives pour fixer cette distance ? Je crois que personne ne s'en est donné la peine. Et que l'on ne croie pas que ce soit là une question d'un médiocre intérêt ! M. Pécelet, dans son *Traité de la Chaleur*, cite un fait extrêmement remarquable rapporté par M. de Valcourt : Une chaudière chauffée au bois alimentait une machine qui donnait un mouvement facile et rapide à deux scies mécaniques ; la grille était à 3 pieds et demi au-dessous de la chaudière ; on la rapprocha de 6 pouces, et la machine, quelque feu que l'on fit, ne put mouvoir qu'une seule scie. Dès que la distance primitive fut rétablie, les deux scies purent reprendre leur mouvement.

J'ai été témoin d'un fait analogue. Une machine de 10 chevaux avec chaudière proportionnée ne pouvait produire sa force nominale. On était obligé d'arrêter toutes les heures pour laisser remonter la pression de la vapeur, qu'une consommation exagérée de combustible ne pouvait maintenir constante. Je me bornais à faire descendre de 0^m,08 la grille qui n'était qu'à 0^m,22 en dessous de la chaudière. Depuis lors la machine marche légèrement avec une charge bien supérieure à celle qu'elle avait à mouvoir précédemment.

La distance de la chaudière à la grille doit varier, du reste, avec la nature du combustible, avec son épaisseur, et, par suite, avec l'étendue de la grille.

Ainsi, pour des houilles grasses à longue flamme, la distance devra être plus grande que pour des houilles à courte flamme. Il est facile de tenir compte de cette condition, car on sait toujours à peu près quelle espèce de houille on brûle dans le lieu où l'on établit une chaudière.

L'épaisseur du combustible doit varier aussi avec sa nature et surtout, je le répète, avec la grandeur de la grille. En effet, prenons comme exemple le foyer d'une machine de 30 chevaux brûlant par heure 90^k, ou à peu près un hectolitre de bonne houille. Si l'on charge, comme nous l'avons indiqué, p. 30, de quart d'heure en quart d'heure par charge de 20 à 25^k, chacune de ces charges étalée sur la grille, ou prenant la place d'une masse de combustible que l'on étalera, devra avoir une épaisseur d'autant plus petite que la grille sera plus grande. Généralement les données extrêmes d'après lesquelles on calcule l'étendue des grilles sont 1^{d. q.} pour 1^{k,5} de houille à brûler par heure, et 1^{d. q.} pour 0^{k,5}. Dans le cas actuel, la grille pourra donc avoir de $\frac{90}{1,5}$ ou 60^{d. q.} à $\frac{90}{0,5}$ ou 180^{d. q.}. L'épaisseur d'un quart d'hectolitre réparti sur ces étendues sera

$$\frac{25^{\text{d. c.}}}{60^{\text{d. q.}}} = 42^{\text{mm}} \quad \text{ou} \quad \frac{25^{\text{d. c.}}}{180^{\text{d. q.}}} = 14^{\text{mm}}$$

Chaque charge devant être tout au plus le quart de la masse de houille contenue dans le foyer, si l'on veut que le feu soit un peu régulier, l'épaisseur totale de la houille sur la grille sera, dans le premier cas, de 168^{mm} et dans le second de 56^{mm}. Tout chauffeur sait que la première de ces épaisseurs est beaucoup trop forte; la moitié est déjà suffisante pour un feu bien fait. Cependant avec une petite grille, telle que celle que nous avons supposée, et malheureusement telle que l'on en fait souvent, il sera impossible d'éviter cette épaisseur excessive, à moins de renouveler à chaque charge la moitié du combustible contenu dans le foyer, et auquel on ne laisserait qu'un volume d'un demi-hectolitre. On ne pourrait évidemment pas espérer obtenir ainsi une activité assez constante du foyer. Il n'est pas douteux qu'à chaque charge la pression de la vapeur diminuerait considérablement.

Une bonne combustion sur une petite grille sera tout aussi difficile à obtenir : chaque masse de houille chargée ne trouvera pour brûler que la chaleur dégagée par une masse égale en combustion, si le combustible se renouvelle par moitié à chaque charge. Si le renouvellement a lieu par quart, ce sera l'air qui manquera à cause de la grande résistance offerte à son passage par la forte épaisseur de houille amassée sur la grille.

Au contraire, avec la grande grille de $180^{\text{d.}} \cdot 4$, l'épaisseur 56^{mm} sera plutôt trop faible que trop forte. Non-seulement on pourra renouveler la houille du foyer par quart seulement à chaque charge, mais il n'y aura même aucun inconvénient à la renouveler par sixième, en laissant acquérir au combustible une épaisseur de 84^{mm} , qui convient à la plupart des houilles. Pour n'avoir que cette épaisseur dans le cas précédent, il faudrait, avons-nous dit, renouveler la houille par moitié. Donc, avec la grande grille, le combustible trouvera à la fois plus d'air et plus de chaleur; car pour l'air il n'y aura pas plus de résistance, et il y aura plus de passages, et pour la chaleur chaque masse chargée rencontrera la chaleur d'une masse quintuple en combustion.

Et si maintenant nous considérons la combustion relativement au temps, que trouvons-nous? Avec la petite grille nous devons renouveler le feu par moitié tous les quarts d'heure; donc chaque quart d'hectolitre reste dans le foyer pendant une demi-heure. Avec la grande grille, le même poids aura une heure et demie pour brûler, et il n'est pas douteux qu'il brûlera plus complètement. Nous avons d'ailleurs déjà examiné en partie cette question, p. 28; mais nous croyons devoir y revenir et insister sérieusement, parce que de bons ouvrages semblent lui ôter toute importance. Ainsi, M. Wye Williams, dans son ouvrage sur la *Combustion du charbon*, dit que l'on ne peut pas déterminer la dimension de la grille, qu'il suffit qu'elle ne soit pas trop grande; M. Péclét, dans son *Traité de la Chaleur*, M. Claudel, dans son recueil de formules et tables, disent que l'effet est sensiblement le même pour des grilles dont l'étendue varie depuis $1^{\text{d.}} \cdot 4$ pour 2^{k} de houille à brûler par heure jusqu'à $1^{\text{d.}} \cdot 4$ pour $0^{\text{k}},3$. C'est encore sortir des limites que nous avons admises, et je ne sais sur quelles preuves on pourrait s'appuyer pour démontrer une pareille assertion. Les expériences de M. Cavé indiquent, avons-nous dit, que l'on peut faire varier du simple au double la quantité de houille brûlée par décimètre carré de surface de grille sans obtenir des variations bien sensibles et bien constantes dans la production de vapeur. Cependant, si l'on prend les moyennes des résultats obtenus dans les mêmes conditions, on obtient des chiffres assez significatifs. Nous avons consigné les plus importants de ces résultats dans le tableau

ci-après, auquel nous aurons plusieurs fois recours. Les chaudières désignées par les lettres A, B, C, D, E avaient les dispositions suivantes :

A. Chaudière sans bouilleurs, de 1^m de diamètre et 8^m de longueur. La flamme et la fumée vont, vers l'arrière du fourneau, en contact avec la moitié de la surface du fond et de la surface latérale, puis reviennent vers l'avant en contact avec l'autre moitié, et se rendent à la cheminée par un conduit isolé, où se trouve un tube réchauffeur de 0^m,30 de diamètre et 6^m,25 de longueur chauffée. On a alimenté d'abord avec de l'eau froide, puis avec de l'eau de ce réchauffeur ;

B. Même chaudière sans bouilleurs ni retour de fumée. On a supprimé la cloison qui séparait les deux carneaux et fermé le carneau renfermant le tube réchauffeur, de sorte que la flamme et la fumée vont directement à la cheminée après avoir parcouru toute la surface de chauffe ;

C. Chaudière de 1^m de diamètre et 8^m,30 de longueur, avec deux bouilleurs de 0^m,40 de diamètre. La flamme va au fond en contact avec le fond de la chaudière et les 2/3 de la surface des bouilleurs, puis revient vers l'avant en contact avec le reste de la surface de chauffe, et va à la cheminée par le conduit renfermant le tube réchauffeur. On a encore successivement alimenté avec de l'eau froide et avec de l'eau de ce tube ;

D. Chaudière de 0^m,80 de diamètre et 6^m,88 de longueur, à deux bouilleurs de 0^m,40 de diamètre, sans retour de fumée. La flamme et la fumée vont directement à la cheminée en chauffant à la fois toute la surface des bouilleurs et la moitié de celle de la chaudière.

E. Même chaudière avec retour de fumée. Par un changement dans la disposition des carneaux, la flamme et la fumée reviennent de chaque côté de la chaudière et vont à la cheminée par le conduit renfermant le tube réchauffeur.

Nous avons laissé de côté quelques-uns des résultats de M. Cavé qui nous ont paru ne pouvoir fournir aucune conclusion ; et, pour que l'on puisse mieux juger de la valeur de ceux que nous rapportons, nous indiquons, dans la dernière colonne du tableau, le nombre d'expériences d'après lesquelles ont été déterminées les moyennes inscrites :

DESIGNATION DE LA CHAUDIERE ET MODE D'ALIMENTATION.	SURFACE DE CHAUFFE		SURFACE DE GRILLE	HOUILLE BRÛTÉE PAR H. ET PAR D. Q. DE GRILLE.	VAPEUR PRODUITE		NATURE DU COMBUSTIBLE.	NOMBRE D'EXPÉRIENCES
	m. q.	d. q.			PAR H. ET PAR M. Q. DE SURFACE DE CHAUFFE.	PAR KIL. DE HOUILLE.		
A Eau froide.	12,50	163	0,24	23,6	8,09	Gaillette de Denain.	3	
	»	82	0,48	24,2	7,67	»	5	
	»	»	0,59	16,4	6,43	»	1	
	»	»	0,70	28,8	6,50	»	1	
A Eau du ré- chanf- feur.	12,50	82	0,47	22,2	7,43	Gaillette de Denain.	7	
	»	66	0,57	25,0	8,54	»	2	
	»	»	0,60	22,8	7,20	Id. grosse.	1	
	»	»	0,60	20,0	6,52	Id. passée à la claie.	1	
	»	»	0,60	24,5	7,70	Id. impure.	1	
»	»	0,60	21,1	6,70	Fin Denain.	1		
B Eau froide.	12,50	163	0,44	56,2	6,28	Presque pur	3	
	»	82	0,80	28,5	5,61	St-Étienne.	3	
C Eau froide.	52,18	163	0,24	8,9	7,44	Gaillette de Denain.	3	
C Eau chaude	52,18	163	0,24	8,5	6,90	Gaillette de Denain.	1	
	»	»	0,38	12,0	6,82	»	1	
D Eau froide.	21,56	163	0,41	21,0	6,37	Tout-venant	7	
	»	82	0,53	12,9	6,08	St-Étienne	3	
	»	»	0,77	17,5	5,92	et Denain.	2	
E Eau chaude	21,56	163	0,44	21,2	6,25	Tout-venant et Denain.	2	
	»	»	»	22,9	6,76	Gaillette et Denain	2	

Il est regrettable que M. Cavé n'ait pas mis plus d'ordre dans ses expériences, en en faisant varier moins au hasard les conditions; ainsi plusieurs de ses résultats sont obtenus avec des combustibles différents ou mal définis. Il eût été facile aussi, une fois les expériences en train, de les multiplier beaucoup plus; car c'étaient évidemment les changements des fourneaux et l'établissement des chaudières qui coûtaient le plus de temps et d'argent. Par cette multiplication des expériences, on aurait pu éviter ou expliquer des anomalies évidentes qu'une simple inspection du tableau précédent fait connaître. C'est ainsi qu'il est difficile d'accorder quelque confiance à aucune des expériences du second groupe (A, eau du tube réchauffeur), excepté les sept premières. En effet, comment concevoir que, dans des conditions identiques, la gaillette ordinaire de Denain produit 8^k,34 de vapeur par kil. de houille et la grosse gaillette seulement 7,20, c'est-à-dire 15 % environ de moins; que la gaillette passée à la claie produise 6,32 ou 25 % de moins que la première; la gaillette impure 7,70 ou 18 % de plus que cette dernière, et enfin que le fin ou menu de Denain passé à la claie produise 6,70 ou 6 % de plus que la gaillette passée à la claie? Ces résultats sont absolument contraires à tout ce que le premier chauffeur venu sait des qualités d'une même houille sous différentes grosseurs.

La conclusion la plus certaine que l'on puisse tirer de l'ensemble des résultats particuliers que nous venons de considérer, c'est que, dans des expériences de ce genre, on ne peut arriver à des indications un peu certaines qu'en les multipliant autant que possible, et qu'une expérience isolée n'a que très-peu de valeur.

Si donc, revenant à la question qui nous occupe actuellement, à savoir l'étendue des grilles, nous ne considérons que les résultats d'un nombre suffisant d'expériences bien comparables, nous trouvons :

1^o Dans le premier groupe (A, eau froide) 8^k,09 de vapeur obtenus par kil. de houille sur une grille de 1^d.⁴ de surface par 0^k,24 de houille à brûler par heure, et 7^k,67 obtenus sur une grille deux fois plus petite; l'économie faite par la grande grille serait de 5 %.

2° Dans le troisième groupe (B, eau froide) on a obtenu, avec 1^{d. q.} de grille pour 0^k,44 de houille à brûler par heure, 6^k,28 de vapeur par kil. de houille, avec une grille deux fois moindre 5,61 ; la différence ou l'économie de la grande grille est de plus 10 % ;

3° Enfin, dans le sixième groupe (D, eau froide), on a trouvé de même 9 à 10 % pour l'économie de la grande grille.

Ces résultats sont assez concordants ; toutefois on peut leur faire diverses objections. Ainsi les résultats du second groupe leur sont contraires ; mais nous avons dit qu'ils étaient difficiles à admettre ; dans le premier groupe, les deux derniers résultats semblent aussi anormaux ; on voit qu'on a obtenu à peu près les mêmes résultats avec 0^k,39 et 0^k,70 par d. q. de grille, et que ce résultat est notablement inférieur à celui qui a été obtenu dans les trois expériences précédentes avec 0^k,44 par d. q. On doit probablement attribuer cette infériorité à une mauvaise conduite du feu, ou plutôt à ce que les épaisseurs que prend le combustible, quand on charge 0^k,39 ou 0^k,70 par d. q. de grille et par heure, ne sont pas aussi convenables pour une bonne allure du feu que celle qui se produit avec une charge de 0^k,44. Quoi qu'il en soit, ces résultats ne font qu'appuyer ceux que nous considérons, et, si on les ajoute à ceux des trois expériences immédiatement précédentes, on trouve comme économie des grandes grilles 10 %, chiffre des deux autres groupes.

Mais la plus grave objection que l'on puisse faire aux chiffres considérés, c'est que leurs différences sont de l'ordre de celles qui se sont présentées entre des expériences identiques, de sorte qu'on peut se demander si les économies que nous avons constatées en faveur des grandes grilles ne sont pas fortuites. Je ne le pense pas, parce que leur concordance est trop marquée.

D'ailleurs on voudra bien remarquer que les dimensions de grilles employées par M. Cavé sont toutes assez considérables. Nous avons indiqué comme limites 0^k,5 et 1^k,5 de houille à brûler par heure et par d. q. de grille ; ici nous trouvons jusqu'à 0^k,24 seulement, et la plus petite dimension relative correspond à 1^{d. q.} pour 0^k,80. Cette dimension minima est encore assez grande ; néanmoins, lorsque l'on considère tous les résultats

des expériences de M. Cavé, on ne peut s'empêcher de remarquer que chaque fois qu'on a approché de cette dimension de grille, la production de vapeur par kil. de houille a été notablement diminuée, et il est permis de supposer qu'elle l'eût été plus encore si l'on avait été jusqu'à 4^k,5 de houille par décimètre carré de grille. Il est à regretter que M. Cavé n'ait pas été jusque-là et même au-delà ; c'est par l'étendue des limites des observations, c'est en exagérant même les données dont on veut connaître l'influence, que l'on arrive à des résultats nettement concluants.

Hâtons-nous d'ajouter que si nous signalons les imperfections des expériences de M. Cavé, nous n'en comprenons pas moins toute leur valeur. Peu de personnes ont à la fois la bonne volonté, l'intelligence et les moyens nécessaires pour entreprendre de semblables observations ; mais c'est précisément parce qu'elles sont aussi rares que hautement utiles à l'industrie, que nous regrettons de les trouver incomplètes.

La plus grande des dimensions de grille employée par M. Cavé, savoir : 4^d. r pour 0^k,24 de houille à brûler par heure, me paraît trop grande pour être généralement employée. Voici pourquoi : la largeur d'une grille est limitée par le diamètre de la chaudière, qui est limité lui-même par les règlements relatifs aux machines à vapeur. Rarement on pourra donner à une grille plus d'un mètre de largeur ; ce sera donc en donnant une grande longueur qu'on obtiendra une grande surface ; mais ici il y a une limite posée uniquement par la difficulté de manœuvre du chauffeur. Il suffit d'avoir manié quelquefois les lourds ringards dont les chauffeurs se servent pour nettoyer le feu et pour étendre le combustible sur la grille, pour comprendre combien ce travail devient pénible lorsqu'il s'agit de remuer le combustible à l'extrémité d'une longue grille. On ne pourrait guère, je pense, donner plus de 2^m,00 de longueur, sans avoir à craindre que le chauffeur, à moins qu'il ne soit aussi zélé que vigoureux, exécute mal sa besogne, ne prenne pas toujours le soin de couvrir convenablement toute la grille, mais en laisse l'extrémité engorgée ou non couverte. Dès lors la dernière portion de la grille devient inutile ou nuisible ; inutile

si le chauffeur la laisse couverte de combustible brûlé qui l'obstrue, nuisible si, ne la couvrant point, il livre passage à un courant d'air froid.

Supposons maintenant une grille de 1 mètre de largeur et 1^m,80 de longueur ; sa surface sera de 1^m 80 ou 180^d 0, en comptant sur 1^d 0 pour 0^k,5 de houille à brûler par heure, on pourra brûler sur cette grille 90^k par heure, ce qui, avec une bonne machine à vapeur, correspond à une force de 30 chevaux. Ainsi cette grille de grandes dimensions ne pourra servir à chauffer qu'une chaudière de 30 chevaux, si l'on ne veut brûler que 0^k,5 de houille par d. 0. Si l'on comptait seulement sur 0^k,25, comme dans plusieurs expériences de M. Cavé, la grille ne pourrait chauffer qu'une chaudière de 15 chevaux, et serait disproportionnée à la grandeur de cette chaudière.

En résumé, je pense que la bonne dimension à adopter pour les grilles est de 1^d 0 par demi-kil. de houille à brûler par heure chaque fois que l'on peut obtenir cette dimension sans donner plus de 2^m,00 de longueur. Il est inutile de faire les grilles plus grandes, et l'on ne doit les faire plus petites que si l'on y est forcé, soit par la disposition et la grandeur des chaudières, soit par la nature sèche du combustible.

Pour terminer cette importante question des grandes grilles, je pourrais citer différents exemples notables d'économie de combustible obtenues par l'augmentation de la surface des grilles ; mais il est inutile d'insister davantage sur une question qui est aujourd'hui généralement résolue comme nous venons de le faire.

Il y a peu de choses à dire sur les dimensions du cendrier ; la seule condition à laquelle elles doivent satisfaire, c'est de laisser à l'air un passage suffisant ; or, cette condition est toujours largement satisfaite ; en effet, il est évidemment plus que suffisant que la section du cendrier n'ait pas de section plus petite que l'ouverture de la grille, et il en sera toujours ainsi, car la largeur du cendrier est égale à celle de la grille, donc au moins quatre fois plus grande que la somme des écartements ; la largeur étant la même, on voit que la section horizontale du cendrier sera toujours au moins quadruple de la section libre

de la grille. La hauteur du cendrier est toujours, pour la facilité du travail du chauffeur, d'au moins 0^m,60 ; donc au moins le tiers de la plus grande longueur que nous ayons assignée aux grilles ; par suite, la section verticale du cendrier est au moins les $\frac{4}{3}$ de l'ouverture de la grille.

Souvent on laisse au fond des cendriers une nappe d'eau ; on justifie cette pratique en disant que la vapeur qui se forme par la chute des scories dans l'eau fait flamber le combustible, en s'introduisant dans le foyer, et de plus que, le cendrier ne s'échauffant point, le courant d'air qui arrive sous la grille en refroidit continuellement les barreaux et retarde leur détérioration. En revanche on objecte que l'introduction d'un courant d'air chauffé par la chaleur perdue des cendres serait économique. Je crois que ce sont là de petites raisons, aussi bien pour que contre, et que la pratique en question est de celles dont on peut dire que si elle ne fait pas de bien, elle ne fait pas de mal. On peut donc ici laisser faire le chauffeur à sa guise.

Les cendriers sont généralement tout ouverts. C'est un tort ; rien n'est plus simple que de les munir de portes en fonte, à deux battants, qui servent de registres ; le chauffeur les ayant devant lui, faciles à mettre en mouvement, trouve dans ces portes un très-simple et très-bon régulateur du feu. D'ailleurs, leur emploi n'exclut point celui des registres.

Nous ne nous arrêterons pas non plus en ce moment à ce qui concerne les parois du foyer et l'autel. Il est clair qu'on doit les faire en briques réfractaires. La hauteur et la forme de l'autel sont importantes à déterminer ; nous en parlerons bientôt en traitant des proportions générales du foyer et des carneaux.

On pourrait croire superflu que nous nous occupions de la porte du foyer ; cependant nous devons entrer à ce sujet dans quelques détails importants.

Les portes des foyers sont en fonte et appliquées sur des cadres également en fonte boulonnés sur les maçonneries. Ces portes sont fermées au moyen d'une barre de fer, ou seulement par leur inertie et le frottement sur leurs gonds. Ce dernier mode de fermeture est rarement aussi parfait que le premier ; cependant il est suffisant, parce que nous verrons plus loin qu'il

n'y a pas d'inconvénient à ce qu'un faible courant d'air s'introduise dans le foyer.

Les portes des foyers ont généralement de 0^m,30 à 0^m,35 de haut sur 0^m,40 à 0^m,50 de large; elles doivent être placées à l'extrémité d'un canal de maçonnerie, à une distance de 0^m,40 à 0^m,50 de la grille et par conséquent du feu, dont l'action destructive serait trop rapide sans cette précaution. Déjà, malgré cette distance, on voit souvent des portes de fonte très-épaisses chauffées au rouge. C'est là non-seulement une cause de rapide détérioration, mais, en outre, une source continuelle de perte de chaleur. On y obvie très-simplement en fixant à la porte par quatre boulons une plaque de fonte, qui intercepte la plus grande partie de la chaleur, et que l'on peut remplacer facilement. On peut encore garnir l'intérieur de la porte d'un cadre que l'on remplit de briques réfractaires. Ces dispositions sont assez importantes et d'ailleurs si faciles à appliquer, que l'on peut dire que toute porte de foyer formée d'une simple plaque de fonte est une mauvaise porte placée par négligence. Malgré la plaque intérieure, la porte extérieure s'échauffe quelquefois au point d'être, sinon une source de grande perte de chaleur, au moins une cause de gêne sérieuse pour le chauffeur. C'est ce qui arrive surtout pour des massifs de chaudières enfermées dans un espace restreint. On peut, dans ce cas, faire disparaître complètement ce dernier inconvénient en suspendant devant la porte une plaque de tôle, facile à écarter lorsqu'on doit charger le feu. Cette précaution est surtout nécessaire quand la porte n'est formée que d'une seule plaque, et, ce qui prouve cette nécessité, c'est que j'ai vu des cas où de semblables plaques devaient être remplacées au bout de quelques mois.

Il est une autre disposition que je crois très-utile, et qui a pour but d'empêcher l'introduction de forts courants d'air dans le foyer, chaque fois que l'on ouvre la porte. Elle consiste à suspendre le contrepoids du registre de la cheminée précisément devant la porte, de sorte que le chauffeur ne peut ouvrir celle-ci qu'en soulevant ce poids et par conséquent en fermant le registre. Dès lors, il n'y a pas appel dans le foyer au moment où l'on ouvre la porte, et l'on n'a pas à craindre les effets d'un violent

courant d'air froid s'engouffrant brusquement dans le foyer, effets doublement fâcheux, aussi bien au point de vue de l'économie de combustible qu'à celui de la durée de la chaudière, sujette à éprouver par là de soudaines et nuisibles contractions. Cette disposition est si simple et si utile, que l'on doit s'étonner de ne pas la voir plus souvent appliquée.

Nous parlerons bientôt, à propos des appareils fumivores, d'une construction de porte fort remarquable imaginée par M. Prideaux. Actuellement, nous terminerons ce qui est relatif aux foyers ordinaires par l'examen des proportions les plus convenables à établir entre les dimensions du foyer, des carneaux et de la cheminée.

On conçoit qu'il doit exister une liaison entre toutes ces parties que doit parcourir successivement le courant des gaz de la combustion. La règle pratique ordinaire est de faire égales toutes les sections par où doit passer ce courant. Ainsi on doit donner aux carneaux la même section qu'à la cheminée et qu'à la surface libre de la grille.

Sur quoi repose cette règle? Je ne pourrais le dire; je crois que c'est là ce qu'on pourrait appeler une loi de fantaisie et de simplicité. Ni l'expérience ni la théorie bien dirigées ne peuvent y conduire. MM. Grouvelle et Jaunez, dans leur *Guide du Chauffeur*, posent en principe qu'il faut élargir les sections de passage de la fumée à mesure qu'elle se refroidit. Ce principe, posé à propos des chaudières placées sur les fours à puddler ou à réchauffer, peut sembler, dans ce cas spécial, d'une bonne application, parce qu'il importe alors de ne pas réduire sensiblement le tirage dont a besoin un four, et que d'ailleurs, par l'augmentation des sections de passage, on obtient une plus grande surface de chauffe en même temps qu'on diminue la résistance au tirage. Mais le principe posé par MM. Grouvelle et Jaunez est évidemment erroné. En effet, en disant: « Plus » une flamme est éloignée du foyer où elle s'est développée, » plus elle a travaillé, et par conséquent plus elle est refroidie, » plus on doit lui donner de passage dans les carneaux, pour » compenser la diminution de vitesse par une augmentation de » section et conserver le même tirage; » ces auteurs perdent

de vue que la température de la fumée dans les carneaux n'a que peu d'influence sur la vitesse, que ce n'est pas là que se produit le tirage, et qu'il ne s'y fait qu'un passage de l'air appelé par la cheminée ; celle-ci produit seule le tirage, fait passer dans tout le fourneau un certain nombre de kilog. d'air par seconde. Ce n'est pas en élargissant les carneaux qu'on pourra y faire passer plus ou moins d'air ; on ne fera que changer la vitesse de l'air qui doit y passer dans un temps donné.

J'arrive, par un raisonnement qui me paraît exact, à un résultat directement contraire à celui de MM. Grouvelle et Jaunez :

Si l'on doit établir une certaine proportion entre les sections de passage d'un même courant d'air, ce doit être surtout pour régler la vitesse de ce courant dans les différents point de son parcours. En règle générale, on doit éviter, dans les différentes portions d'un fluide en mouvement, des inégalités de vitesse, parce qu'il en résulte des chocs, des remous, etc. Lorsqu'il s'agit d'un liquide, comme le poids est toujours le même à très-peu près pour un même volume, il suffit que les sections des passages soient les mêmes dans tous les points du parcours. Si les sections étaient différentes, les vitesses le seraient aussi, et en raison inverse des sections. Ainsi un litre d'eau, pour s'écouler à travers un orifice d'un centimètre carré de section en une seconde, devra couler dix fois plus vite que si dans le même temps il a à passer par un orifice de dix centimètres carrés. Si donc c'était un liquide ou bien un gaz ayant partout la même densité qui devrait parcourir les différentes parties du fourneau, savoir : cendrier, grille, foyer, carneaux, cheminée, il faudrait donner à toutes ces parties la même section ; mais il n'en est pas ainsi : abstraction faite même des changements de composition que les gaz de la combustion éprouvent dans les différentes parties du fourneau, ces gaz changent continuellement de densité à mesure qu'ils s'échauffent ou se refroidissent. Or, ce n'est pas un même volume qui doit passer à chaque instant à travers les différentes sections du fourneau, mais un même poids. Ainsi, pour ne considérer que les extrêmes, je suppose qu'il entre par seconde un mètre cube d'air froid à travers la grille et qu'il sorte par seconde un mètre cube d'air

chaud par l'orifice de la cheminée. Le mètre cube entrant pesait $1^k,3$, le mètre cube sortant à 300° ne pèse qu'environ $0^k,6$; que seront devenus les $0^k,7$ non sortis? Évidemment, je le répète, ce ne sont point les volumes qu'il faut considérer ici, mais les poids; s'il entre 1^k d'air par seconde à travers la grille, il faut que dans le même temps il sorte 1^k par la cheminée. Autrement il se ferait quelque part dans l'intérieur du fourneau un amas d'air comprimé ou un vide, ce qui est impossible, puisqu'il y a ouverture de deux côtés. Ce qui est vrai pour l'orifice de la cheminée l'est aussi pour une section quelconque des conduits parcourus par les gaz. Pour qu'il ne se forme point de vide derrière ou devant cette section, il faut que le poids de gaz qui y passe en une seconde passe dans le même temps à travers une quelconque des sections précédentes ou suivantes.

Ainsi donc l'égalité des poids d'air passant dans le même temps par toutes les sections de passage est une condition qui s'établit forcément d'elle-même. Cela posé, si l'on veut en outre que la vitesse des gaz soit la même sur tout le parcours pour éviter les chocs et les remous, ce ne sera pas en établissant partout des sections égales qu'on y arrivera, mais en proportionnant les sections aux volumes qu'y prend un même poids d'air. Ainsi je suppose que l'air a une température de 0° sous la grille, de 1200° dans le foyer et au commencement du carneau C (fig. 1 à 4, pl. I) qui longe la chaudière par en dessous; qu'à l'entrée du premier carneau latéral C' , la température ne soit plus que 900° , à l'entrée C'' du second 600° , et à l'entrée D de la cheminée 300° .

On sait qu'un mètre cube d'air pèse :

à 0°	. . .	$1^k,3$
à 300°	. . .	$1^k,3 : 2,1$
à 600°	. . .	$1^k,3 : 3,2$
à 900°	. . .	$1^k,3 : 4,3$
à 1200°	. . .	$1^k,3 : 5,4$

Donc, puisqu'il doit passer dans le même temps un même poids d'air dans les points C, C' , C'' , D, par exemple $1^k,3$, il faudra que, tandis qu'il passera 1^m à travers la grille, il passe

en même temps 5^{me},4 en C, 4^{me},3 en C', 3^{me},2 en C'' et 2^{me},1 en D. Pour cela, si l'on veut que la vitesse soit la même dans tous ces points, il faudra que les sections soient entre elles comme les chiffres précédents (1).

On voit qu'il y a loin de là à l'égalité de section. Toutefois les calculs précédents ne peuvent fournir une règle, parce que les données sur lesquelles ils reposent, savoir les températures dans les différents points du fourneau, sont tout-à-fait hypothétiques et doivent varier beaucoup d'un fourneau à l'autre. On pourrait tout au plus établir des règles particulières pour chaque système de fourneau, et l'on ne pourrait le faire avec sûreté qu'en s'appuyant sur de nombreuses expériences. Jusqu'à cette heure, tout ce que l'on sait, c'est que, du moment où les dimensions des carneaux sont assez grandes, on peut les faire varier dans des limites assez étendues sans effet sensible.

Ce que nous avons voulu montrer surtout par la discussion précédente, c'est que certaines règles admises généralement ne reposent sur aucun fondement, et qu'il doit être avantageux de s'en écarter dans certains sens. Ainsi il sera généralement préférable de faire les sections de passage du gaz de plus en plus grandes depuis la cheminée jusqu'au foyer.

Il est surtout une partie du fourneau pour laquelle il serait important, selon nous, de s'écarter des règles généralement suivies. Je veux parler du carneau qui est sous la chaudière, dont la section est généralement trop petite. Un exemple le fera comprendre :

(1) En général, soit V la vitesse en un point du fourneau, S et T la section et la température en ce point, le poids qui y passera en une seconde sera

$$S V \frac{4k,5}{1 + 0,00567 \cdot T}$$

Si l'on veut que, cette quantité restant constante pour tous les points des conduits de fumée, la vitesse soit aussi constante, il faudra que le rapport

$$\frac{S}{1 + 0,00567 \cdot T}$$

ne varie pas, c'est-à-dire que S soit en chaque point proportionnel à $1 + 0,00567 \cdot T$.

Supposons une chaudière de 30 chevaux de 1 mètre de diamètre, et dont la moitié du fond est chauffée. Si la surface de la maçonnerie sous la chaudière est, comme on le fait souvent, une surface cylindrique parallèle à celle de la chaudière et distante de celle-ci de 0^m,10, par exemple, la section du carneau sera à très-peu près égale à la moitié du contour de la chaudière multipliée par cette distance, donc à $\frac{3^m,14}{2} \times 0^m,10$ ou 0^m,4, 1570. Or, d'après la règle de d'Arcet, la section de la cheminée pour une chaudière de 30 chevaux, en comptant sur une consommation de 3^k par cheval et par heure, serait de 30^d,4, donc à peu près double de celle du carneau. Ainsi, dans le cas précédent, la distance 0^m,10 de la chaudière à l'autel donnerait pour le carneau sous la chaudière une section deux fois trop petite, en se bornant seulement à suivre la règle pratique qui établit l'égalité de section des carneaux et de la cheminée. Pour se conformer à nos calculs il faudrait une distance 8 à 10 fois plus grande.

Une distance de 0^m,80 à 1^m,00 de la chaudière à l'autel paraît exorbitante, bien que nous en verrons un exemple dans la description des foyers fumivores. Néanmoins je comprends qu'on recule devant un changement aussi complet des proportions suivies; mais on ne peut s'écarter que très-peu de celles-ci et obtenir des dimensions plus rationnelles. Ainsi, en conservant la distance usitée de 0^m,35 à 0^m,40 de la chaudière à la grille, on pourra laisser au carneau une hauteur de 0^m,25 à 0^m,30 en donnant à l'autel une hauteur de 0^m,10. Cette hauteur sera bien suffisante, car on ne doit pas donner une épaisseur supérieure au combustible; d'ailleurs le mal ne serait pas très-grand si quelques morceaux de houille tombaient au-delà de l'autel; un coup de ringard les ramènerait dans le foyer; on pourrait d'ailleurs avec avantage donner une légère pente à la maçonnerie sous la chaudière, de manière à rétrécir un peu vers l'arrière le passage de la flamme déjà refroidie. Les figures 8 et 9, pl. III, montrent le carneau inférieur de la chaudière construit d'après les indications précédentes.

Différentes raisons prescrivent de donner à ce carneau une

section aussi large que possible. Lorsqu'on la fait trop étroite, et il n'est que trop fréquent de la voir égale à la moitié ou au tiers de la section de la cheminée, la flamme s'y engouffre avec une énorme vitesse due à la fois à ce rétrécissement du passage et à la grande expansion des gaz dans le foyer. On peut affirmer, sans crainte d'exagérer, qu'il y a des fourneaux dans lesquels la flamme a près de l'autel une vitesse de 30 à 40^m, c'est-à-dire une vitesse d'ouragan. Il est facile de comprendre l'effet énergiquement destructeur d'un pareil courant de flamme resserré dans un passage étroit; il est facile de comprendre aussi combien doit être mal utilisée la chaleur de ce courant.

C'est ce qui explique pourquoi, dans certains fourneaux, la flamme et la fumée conservent encore une haute température après avoir parcouru plusieurs carneaux.

On gagnerait évidemment une augmentation sensible de section dans le premier carneau, et l'on empêcherait la concentration nuisible de la flamme sur certains points de la chaudière, en faisant l'autel plan, ce qui d'ailleurs coûterait moins cher. Je ne vois aucune raison plausible qui doive engager à le faire cylindrique, comme on le fait généralement. C'est à tort, et par suite d'une manière de raisonner presque instinctive, que l'on se figure obtenir par là une meilleure chauffe de la chaudière. Du moment que le contour chauffé et la température de la flamme restent les mêmes, on ne peut que gagner à diminuer la vitesse de celle-ci et par conséquent à prolonger son contact avec la chaudière, ce que produit une augmentation de section.

En résumant tout ce que nous avons dit de plus essentiel sur les foyers ordinaires, nous conseillerons :

1^o De donner aux barreaux de grille 20^{mm} d'épaisseur et 5^{mm} d'écartement;

2^o De donner à la surface totale de la grille 1^{d. q.} par demi-kilog. de houille à brûler par heure, pour autant toutefois qu'on puisse le faire sans que la longueur de la grille dépasse 1^m,80.

3^o De faire les portes des foyers à double plaque et de suspendre devant ces portes les contrepoids des registres des conduits de fumée, de façon qu'on ne puisse ouvrir une porte sans fermer en même temps le registre correspondant.

4° De faire l'autel aussi bas que le permet l'épaisseur du combustible, afin de conserver au carneau placé sous la chaudière la plus grande section possible.

5° De donner aux conduits de flamme et de fumée des sections d'autant plus grandes que la température y est plus élevée, et pour cela faire, s'il est possible, croître d'une manière continue ces sections depuis 1^{d.} par cheval près de la cheminée jusqu'à 4^{d.} près du foyer.

Nous répéterons encore que cette dernière règle sera souvent difficile à suivre; c'est pourquoi nous considérerons plus tard comme un avantage sérieux de certains générateurs les dispositions spéciales qui permettent de s'y conformer.

13. FOYERS FUMIVORES. — On peut dire que les foyers tels que nous les avons décrits datent de l'invention des chaudières à vapeur; cependant on a fait bien des efforts pour les perfectionner. On a imaginé sous le nom de *foyers fumivores* un tel nombre de constructions variées et presque toutes demeurées sans effet, que ce terme seul est, pour les industriels, un juste sujet de méfiance.

Comme le nom l'indique, un foyer fumivore est un foyer qui ne laisse pas échapper de fumée. La fumée a dû être de tout temps une cause de gêne et de procès. Parfois l'incommodité qui en résultait a été telle, que dans les villes les administrations ont dû intervenir. Ainsi, à Londres d'abord, à Paris ensuite, des ordonnances ont été portées qui prescrivent aux industriels de ne pas laisser échapper de fumée en quantité notable hors de leurs cheminées. Ces ordonnances ont, on le conçoit aisément, stimulé le zèle des inventeurs à la recherche des foyers fumivores; toutefois il serait déjà difficile d'énumérer tous ceux qui avaient été imaginés avant qu'elles fussent portées. C'est que l'on a toujours, et souvent à tort, attaché à l'idée de fumivorité celle d'économie de combustible, et que de tout temps on a visé vers ce dernier but.

On peut distinguer deux grandes classes de foyers fumivores : 1° ceux dans lesquels on laisse se former la fumée, quitte à la brûler avant qu'elle parvienne à la cheminée; 2° ceux dans lesquels on empêche la formation de la fumée.

On a vu que la fumée provenait de ce que le combustible chargé dans le foyer ne trouve pas assez d'air ou pas assez de chaleur pour brûler complètement, et par suite subit une distillation partielle. Si donc on veut brûler la fumée après qu'elle s'est formée, il faut lui fournir, soit de l'air, soit de la chaleur, et, mieux, l'un et l'autre. Si on veut l'empêcher de se former, il faut faire en sorte que le combustible chargé dans le foyer trouve tout de suite assez d'air et de chaleur pour brûler sans distiller, et pour cela on a cherché à alimenter le foyer d'une manière continue, par conséquent, par charges très-petites s'allumant tout entières à l'instant où elles pénètrent dans le foyer. C'est pourquoi les foyers que nous avons rangés dans la seconde classe portent le nom de *foyers à alimentation continue*.

A la première classe appartiennent :

- 1° Les foyers à double grille ;
- 2° Les foyers à flamme renversée ;
- 3° Les foyers chargés par le dessous ;
- 4° Les foyers à introduction d'air ;
- 5° Les foyers dans lesquels on produit du gaz que l'on brûle ensuite.

Nous décrirons brièvement ces différents systèmes dont quelques-uns seulement ont été bien sanctionnés par la pratique ; nous voulons seulement faire connaître les principes de leur construction et les voies qui ont été explorées dans les recherches de tant d'inventeurs. Nous avons déjà dit que notre but principal était de mettre autant que possible les industriels à même de juger de la nouveauté des appareils qui leur sont présentés chaque jour et du degré de confiance qu'ils peuvent leur accorder avant que les essais aient prononcé, et nous pourrions ajouter du degré d'exagération que l'on ne trouve que trop souvent dans l'annonce des résultats obtenus.

14. FOYERS A DOUBLE GRILLE. — L'illustre James Watt avait imaginé, pour brûler la fumée, de placer à la suite l'une de l'autre deux grilles, la première chargée de houille à la manière ordinaire, la seconde chargée avec du coke. Ce combustible produisant beaucoup de chaleur et n'opposant que peu de résis-

tance au passage de l'air, la fumée de la première grille se brûlait en arrivant à la seconde. Ce moyen était efficace ; mais le haut prix du coke le rend actuellement impraticable.

On a proposé ensuite de conserver la même disposition , mais de ne charger la seconde grille qu'avec le combustible incandescent repoussé bas de la première. Cette disposition revient simplement à celle d'une longue grille au bout de laquelle on aurait toujours soin de repousser la houille brûlante, pour ne charger la houille fraîche que sur le devant de la grille, comme le fait tout bon chauffeur.

Pour faciliter cette manœuvre, et même pour qu'elle se fasse en quelque sorte d'elle-même, on a proposé des grilles inclinées sur l'arrière desquelles la houille incandescente s'amasse d'elle-même. On ajoutait aussi à la grille inclinée une grille horizontale (fig. 4, pl. III). Ces dispositions, imaginées par M. Witty, ont reçu différents perfectionnements de M. Chanter, cessionnaire de la patente de M. Witty. Le but que se proposaient les constructeurs était de parvenir à brûler de la houille dans les foyers de locomotives sans produire de fumée. M. Chanter paraît avoir atteint ce but, en ajoutant aux dispositions précédentes d'autres, dont nous parlerons bientôt.

Une disposition analogue à la précédente est celle des *grilles en escalier* ou à *gradins*. Ces grilles (fig. 5 et 6, pl. III) sont formées de plaques de fonte disposées en gradins. Au-dessous est une grille ordinaire. La houille chargée sur les plaques supérieures est successivement poussée sur les plaques inférieures. Ces grilles sont employées depuis longtemps, surtout en Allemagne, pour brûler des combustibles très-menus, ou pour des combustibles qui décrépitent et tombent en poussière, comme certains lignites et plusieurs houilles maigres. On comprend en effet que les parties les plus menues ne peuvent tomber à travers ces grilles comme à travers des grilles ordinaires, puisqu'il n'y a pas de surfaces horizontales vides, et que l'air s'introduit par des sections verticales. Celles-ci ont pour mesure la longueur des plaques multipliées par la distance verticale de deux plaques successives, et rien n'empêche de faire cette distance assez grande, en faisant assez avancer chaque barreau plat sur celui

qui lui est immédiatement inférieur, pour que la houille forme un petit talus allongé se soutenant de lui-même. On a donc, avec les grilles à gradins, la faculté de brûler les menus les plus fins, tout en conservant à l'air de très-larges passages.

C'est évidemment là une bonne condition de fumivoricité. M. de Marsilly, qui en a fait l'application, est arrivé à brûler avec très-peu de fumée, au moment de la charge seulement, les houilles qui en produisent le plus (Mons et Denain). Ces mêmes houilles mélangées de 1/5 de houilles maigres de Charleroi ou de Fresnes, et à plus forte raison ces houilles maigres seules ne donnaient aucune fumée même au moment de la charge. Toutefois il faut remarquer que ce système de foyer convient peu aux houilles maigres, parce que la distance de la grille à la chaudière est forcément assez grande, de sorte que l'on n'obtient pas une production assez rapide de vapeur avec des houilles à courte flamme.

Pour un foyer d'une chaudière de 30 chevaux, M. de Marsilly a employé les dimensions suivantes :

Longueur des plaques de la grille à gradins . . .	1 ^m ,00
Largeur	0 ^m ,20
Avance d'une plaque sur celle qui lui est immédiatement inférieure	0 ^m ,05
Épaisseur des plaques	0 ^m ,03
Distance verticale	0 ^m ,03
Distance de la première plaque à la chaudière ou aux bouilleurs	0 ^m ,32
Distance de la dernière plaque	0 ^m ,60
Épaisseur des barreaux de la grille horizontale . . .	0 ^m ,03
Écartement	0 ^m ,008
Nombre des barreaux	5

D'après ces données, la largeur de la grille horizontale est 0^m,49; celle de la projection horizontale de la grille inclinée est 0^m,95; donc la projection horizontale de toute la grille, ou, ce qui revient au même, la surface chargée de houille, a 1^m,14 de profondeur sur 1 mètre de longueur des barreaux; son étendue est donc 1^m.^q.14. La somme des écartements est de

$5 \times 0,03 + 5 \times 0,008$ ou $0^m,26$. La surface vide de la grille est donc à peu près le quart de la surface totale chargée. Ce rapport se rencontre parfois dans les grilles ordinaires. Il est donc permis de dire qu'en posant les proportions précédentes, M. de Marsilly n'a pas profité autant qu'on peut le faire de la faculté donnée par les grilles à gradins d'augmenter les passages de l'air. M. de Marsilly l'a du reste reconnu et conseillé de mettre plus de distance verticale entre les barreaux. Il suffit de réduire l'épaisseur des plaques à $0^m,02$ et de porter leur distance à $0^m,04$, comme le montre la figure 5. Avec le foyer que nous avons décrit, la production de vapeur a été en moyenne de $6^k,10$ par kilog. de houille, ce qui est déjà un résultat satisfaisant.

Mais c'est surtout par leur application aux locomotives, que les grilles à gradins ont donné de beaux résultats. Cette application, faite par MM. de Marsilly et Chobrzinski à des locomotives du chemin de fer du Nord, s'est rapidement généralisée. Plus de 200 locomotives des chemins de fer du Nord et d'Orléans ont été munies de grilles à gradins. Conformément à ce que nous avons dit tout-à-l'heure, la distance des grilles a été augmentée ainsi que leur nombre; en même temps leur épaisseur a dû être diminuée. Ainsi, selon la force des locomotives, les barreaux plats ont été d'abord au nombre de 8 ou 9, épais de $0^m,02$ et distants de $0^m,04$. L'espace libre pour le passage de l'air a été d'environ $\frac{1}{3}$ de la surface horizontale de la grille. Les résultats ont été des plus remarquables, attendu que l'on a pu brûler sur ces grilles de la houille pure, sans produire de fumée en quantité capable de gêner les voyageurs, et réaliser par là une économie considérable. Bien des essais avaient déjà été faits pour la substitution de la houille au coke; mais tous avaient dû être abandonnés, et plusieurs fois il était arrivé que cette substitution occasionnait un excès de dépense, parce que le poids de houille que l'on devait brûler dépassait assez celui du coke pour compenser, et au-delà, la différence de prix de ces deux combustibles. Avec la grille à gradins, on est parvenu à réaliser en faveur de la houille, sur les poids brûlés, une économie qui est allée jusqu'à 27 % et qui est rarement descendue au-dessous de 12 %. On a calculé que l'économie faite par l'ap-

plication de ces grilles à 62 locomotives qui ont marché à la houille sur le chemin de fer du Nord pendant le mois de décembre 1855 s'est élevée à près de 36000 francs.

Différentes qualités de houille donnent de mauvais résultats, soit parce qu'elles ne conviennent pas en général aux chaudières de locomotives, soit parce qu'elles encrassent trop la grille. On comprend aisément que ce dernier inconvénient est très-grave pour les foyers de locomotives, qui sont fermés sur le devant. MM. de Marsilly et Chobrzinski, pour rendre ce nettoyage plus facile et permettre au mécanicien de jeter son feu rapidement, ont disposé la partie horizontale de la grille de manière à ce qu'on puisse la faire basculer aisément au moyen d'un levier (1). Mais ces ingénieurs ont reconnu que cette disposition était insuffisante, qu'avec les houilles impures surtout on avait peine à piquer le feu et à dégager le mâchefer, et que les barreaux plats se brûlaient rapidement. C'est pourquoi ils ont formé leur grille d'un ou deux barreaux plats (fig. 7, pl. III) seulement, placés à la partie supérieure et percés de trous donnant accès à l'air, puis de barreaux longitudinaux inclinés, et enfin de la partie horizontale mobile. La distillation de la houille placée sur les barreaux supérieurs est assez lente pour que la fumée puisse brûler presque entièrement.

En réalité, cette disposition diffère très-peu de celle des grilles inclinées et même des grilles ordinaires. On a peine à comprendre le bon effet de ces grilles, surtout avec la forte charge de houille qu'elles doivent porter. Néanmoins les résultats sont trop remarquables, trop généraux, pour être mis en doute; l'économie faite par le chemin de fer du Nord par l'emploi de la houille en 1855 et 1856 a été évaluée à 450,000 fr. Nous ne songeons nullement à nier ce chiffre; mais nous n'en trouvons que plus curieux l'abandon à peu près complet de la grille à gradins, qui a amené ces excellents résultats, en faveur d'une disposition analogue à d'autres plus anciennes essayées sans succès. Faut-il supposer que ces premiers essais avaient été mal faits, ou voir,

(1) Voir, pour plus de détails, *Annales des mines*, 1856, t. IX, p. 55, et t. X, p. 543.

dans la préférence donnée à la grille longitudinale inclinée sur la grille à gradins, un de ces exemples assez fréquents du sacrifice d'un bon principe à une difficulté pratique?

Quoi qu'il en soit, il est fâcheux que l'on n'ait pas fait des essais assez nombreux sur l'application des grilles à gradins aux foyers des machines fixes; il serait plus facile d'éviter les difficultés du nettoyage et de donner les dimensions les plus convenables. Aucune disposition ne permet d'offrir à l'air un aussi large passage que dans les grilles à gradins; à ce titre seul elles devraient être étudiées avec soin et dans de bonnes conditions. Il est difficile de croire qu'un système dont la pratique a, dans certains cas, largement démontré les avantages, n'en présenterait point dans d'autres cas où l'application serait plus facile.

MM. Combes et Pélilot, dans leur Rapport sur le foyer de M. de Marsilly, indiquent quelques modifications à y apporter pour en augmenter l'effet. Je suis convaincu qu'il vaudrait beaucoup mieux simplifier ce foyer que d'y ajouter encore; ainsi, au lieu de faire déboucher dans les parois latérales du foyer des conduits amenant de l'air, je crois qu'il serait préférable de supprimer le canal que M. de Marsilly avait établi dans ce but et que l'on n'ouvrait qu'au moment de la charge; on pourrait alors laisser sous la chaudière un large carneau de 0^m,50 de profondeur, légèrement incliné, ainsi que je l'ai indiqué dans la fig. 5. Ce carneau formerait avec le foyer une grande chambre de combustion. Il serait peut-être avantageux aussi d'établir, comme l'indiquent MM. Combes et Pélilot, une petite maçonnerie contre la chaudière, restreignant faiblement l'entrée du carneau et forçant la fumée des grilles supérieures à passer plus près du combustible embrasé des grilles inférieures. En effet, on a fait cette remarque que les grilles à gradins semblent aller contre le but que l'on se propose, en éloignant du combustible incandescent les produits de la distillation du combustible frais. Cependant ces grilles sont incontestablement fumivores; il faut donc penser que la remarque précédente n'est pas fondée, que la combustion de la fumée n'exige pas ce contact immédiat avec le combustible incandescent, et que la fumivoricité des grilles à gradins ne résulte que de la manière dont elles se chargent, de

la grandeur et peut-être de la direction des passages d'air. C'est pourquoi je crois inutile de compliquer cette disposition.

Nous ne pouvons, en parlant de la combustion de la houille dans les foyers de locomotives, passer sous silence les résultats remarquables obtenus en Belgique par M. Belpaire, qui est parvenu à brûler des charbons très-maigres en donnant à ces foyers une très-grande largeur, 2^m,50; dans peu de temps, un assez grand nombre de locomotives sera muni de ce système de foyer, pour qu'on puisse être certain de la constance des résultats avantageux déjà obtenus.

Nous distinguerons des foyers à double grille un genre de foyers fondés sur le même principe et que nous appellerons *doubles foyers*. Il existe différents systèmes de doubles foyers, dont un très-simple et très-bon que nous regardons comme le meilleur des foyers fumivores connus. La seule inspection des fig. 8, 9, 10, 11, pl. III, fait comprendre sa disposition : A et B sont deux foyers juxtaposés, séparés dans la partie inférieure et sur une certaine longueur seulement par une plaque de fonte D. Au-delà de cette plaque les deux foyers se réunissent, ont la même grille, les mêmes carneaux, etc. Chaque foyer a sa porte, de sorte qu'on peut les charger tous deux alternativement. Dès lors il arrive que la fumée qui se produit sur la grille d'un des foyers au moment de la charge va passer sur le combustible brûlant qui couvre la grille commune au-delà de la plaque D, et se mélange d'ailleurs aux produits de la combustion de l'autre foyer. Si les dimensions ont été bien déterminées, ces produits de la combustion d'un foyer allumé depuis quelque temps déjà ne doivent pas renfermer de fumée, mais au contraire assez d'air excédant pour achever la combustion des produits du foyer nouvellement chargé. Il faut évidemment que le chauffeur ait soin de repousser, au moment de la charge, le combustible embrasé de chaque foyer sur la grille commune, et de ne jamais charger au-delà de la plaque D. Avec ce soin et cette simple disposition on atteint parfaitement le but d'une bonne combustion économique et fumivore.

On peut aisément contraindre le chauffeur à bien charger son foyer; il suffit de partager la grille en deux parties : la première

formée de barreaux très-peu écartés et offrant fort peu de jeu, la seconde formée de barreaux ordinaires présentant un écartement que l'on peut porter à 10^{mm} au moins, parce que cette grille ne doit porter que du combustible déjà agglutiné par la combustion. De cette façon, le nettoyage de la seconde grille sera beaucoup plus facile que celui de la première, et, pour débarrasser la grille, le chauffeur sera forcé de repousser constamment le charbon incandescent vers le fond, et de charger le combustible frais sur le devant. Nous avons vu que la facilité de ce mode de chargement est un des avantages des grilles à gradins et des grilles inclinées.

Le double foyer représenté dans les figures 8, 9, 10 et 11, me paraît pouvoir être considéré comme un type de perfection. Ses dimensions ont été calculées pour une chaudière à bouilleurs de 25 chevaux. Le tracé plein montre la chaudière dans le feu; il n'y aura, du reste, rien à changer, si ce sont les bouilleurs qui se placent dans le feu, ainsi que nous l'avons figuré en pointillé.

Le foyer de M. Corbin représenté fig. 6, 7 et 8, pl. IV et essayé depuis un an ou deux avec succès, ne diffère du foyer précédent qu'en ce que le combustible frais est placé d'abord entre les deux grilles sur une table de maçonnerie, où, privé d'air, il distille lentement. Les produits de cette distillation mélangés de chaque côté avec la flamme du combustible placé sur les deux grilles adjacentes et avec l'air qui traverse celles-ci, sont brûlés avant de parvenir à une ouverture rétrécie, placée au milieu de l'autel fermé. Cette ouverture, destinée à ramener les uns contre les autres les gaz distillants et les gaz enflammés, ne pouvait être que nuisible d'après ce que nous avons dit sur le rétrécissement des carneaux. Aussi M. Corbin l'a-t-il supprimée pour adopter la disposition de la figure 6.

Les doubles foyers que nous avons mis à part comme inutilement compliqués, sont disposés de façon que la fumée d'un foyer soit forcée de passer sur la grille d'un autre foyer, avant de se rendre à la cheminée, et cela par un jeu de registres qui tour-à-tour ferme le passage de la fumée de chaque foyer vers la cheminée en l'ouvrant en même temps vers l'autre foyer. D'après cela, chaque fois que le chauffeur charge un des foyers,

il faut qu'il change la position des registres. Ce supplément de besogne suffirait souvent pour que le chauffeur conduise mal son feu. D'ailleurs les registres placés dans plusieurs foyers de ce genre étaient sujets à se détruire rapidement (1).

15. FOYERS A FLAMME RENVERSÉE. — On emploie depuis longtemps, dans différentes industries et pour le chauffage des chaudières, des foyers qui malheureusement ne fonctionnent bien que chargés avec du bois : ce sont les foyers à flamme renversée ; les plus simples consistent en un canal de maçonnerie (fig. 1, pl. III), à section carrée, dont l'extrémité inférieure aboutit sous la chaudière ; mais il vaut mieux former ce canal en fonte entourée de maçonnerie (fig. 1, pl. IV). Le bois, coupé en bûches d'une longueur aussi égale que possible à la largeur du canal, est d'abord allumé par le bas ; le feu gagne de proche en proche, et la fumée qui se forme, entraînée par le courant d'air, traverse constamment toute la masse inférieure embrasée. On charge par le dessus à mesure que la masse du bois descend en se consumant. Il n'est pas besoin de cendrier, le peu de cendres qui se forment étant emportées par le tirage.

Cette disposition, inverse de celle des foyers ordinaires en ce que le courant d'air va du combustible frais à travers le combustible brûlant, est certainement plus rationnelle, ne peut qu'être éminemment fumivore, et paraît très-favorable à une combustion complète. Cependant on m'a assuré que l'on n'obtenait pas de meilleurs résultats en brûlant le bois dans ces foyers qu'en le brûlant sur de grandes grilles. Il arrive souvent que les bûches, étant trop courtes et mal disposées dans le foyer, laissent passer un courant d'air beaucoup trop fort qui emporte en pure perte une grande quantité de chaleur.

D'ailleurs différents motifs s'opposent à l'emploi de la houille dans ces foyers. En premier lieu, la houille ne peut se soutenir

(1) Voyez : *Bulletin de la Société d'Encouragement*, janvier 1833, p. 9, Foyers de M. FAIRBAIRN. — Id., t. XLIX, août 1850, p. 589, Fourneau de M. DE BUZONNIÈRE. — *Génie industriel*, t. VIII, p. 21, Fourneau de M. NUMA GRAD,

d'elle-même comme le font des bûches de bois ; il faudrait pour la retenir, placer une grille à l'extrémité inférieure du foyer, et cette grille, traversée sans cesse par un courant de flammes, serait bientôt détruite ; le nettoyage du feu à travers une grille ainsi placée serait aussi fort difficile. En second lieu, et cette difficulté me paraît plus grave que la première, la houille s'allume difficilement, excepté la houille très-grasse, et celle-ci, lors même que son prix élevé ne serait pas un obstacle, conviendrait fort peu aux foyers qui nous occupent ; ses morceaux, en se soudant, formeraient une masse épaisse et compacte obstruant le foyer. D'ailleurs il me paraît douteux que la houille même la plus grasse, en contact seulement par-dessous avec le combustible brûlant, et refroidi par le dessus par un courant d'air froid, pourrait s'allumer, ou tout au moins brûler assez vite pour entretenir une bonne vaporisation.

Divers moyens ont été proposés pour éluder ces difficultés.

Ainsi la fig. 2, pl. IV, montre une combinaison d'un foyer à flamme renversée avec une grille ordinaire, dont le cendrier peut être fermé. Lorsqu'on ouvre celui-ci, ce foyer n'est plus qu'un foyer ordinaire, alimenté par une trémie et offrant cet inconvénient que l'on ne peut pas voir le feu. Lorsque le cendrier est fermé le foyer est à flamme renversée ; mais par les raisons exposées plus haut, je doute que dans ce cas la houille puisse convenablement brûler.

La figure 3 montre une autre disposition dans laquelle la flamme et la fumée doivent traverser une grille inclinée chargée de combustible incandescent ; comme ce genre de foyer pourrait rester avec sa porte presque constamment ouverte, et par conséquent admettant beaucoup d'air, il pourrait donner de bons résultats si la seconde grille était capable de résister à l'action du feu : c'est pourquoi on a essayé dans ce genre de foyer des grilles céramiques ; mais ces essais n'ont pas eu de suite.

La figure 4 représente un foyer que je mentionne en passant, ne fût-ce que pour montrer de quelle fausse manière une question peut être comprise. Dans ce foyer on a cru obtenir les résultats que l'on demande aux foyers à flamme renversée, en obligeant la flamme à descendre, puis à remonter : j'ai lu quelque

part que cette disposition était fumivore parce que la flamme, tendant à monter à cause de sa légèreté, revenait à la rencontre de la fumée et la brûlait. L'explication est trop curieuse pour être discutée.

Jusqu'à cette heure donc, aucun des moyens basés sur le principe des foyers à flamme renversée n'a reçu la sanction de la pratique, et l'on peut dire que malgré les recherches de M. Ébelmen, l'un des hommes les plus capables sans doute de mener à bonne fin la solution de semblables questions, l'application des foyers à flamme renversée à la combustion de la houille est restée à l'état de principe. Cependant je crois que dans cette voie on peut arriver à de beaux résultats, parce que, je le répète, il est certainement beaucoup plus rationnel de faire aller le courant d'air du combustible frais vers le combustible embrasé, qu'en sens inverse; il est difficile de concevoir que les gaz combustibles mélangés avec un courant d'air suffisant pourraient traverser une masse ardente de combustible sans brûler complètement, tandis que l'on comprend fort bien que le courant d'air arrivant sous la grille, comme dans nos foyers, puisse se dépouiller d'une partie de son oxygène en passant dans le combustible brûlant, et n'en plus contenir assez pour brûler promptement le combustible frais. Dès lors de celui-ci se dégagent des gaz qui, entraînés rapidement dans une atmosphère désoxygénée, échappent à la combustion.

16. FOYERS SE CHARGEANT PAR LE DESSOUS. — Le principe des foyers à flamme renversée se retrouve dans une autre catégorie de foyers, celle des foyers se chargeant par le dessous. Il est clair que l'effet sera le même si, au lieu de charger le combustible frais sur le combustible brûlant et de disposer le foyer de façon que la flamme soit forcée de descendre, on charge le combustible frais sous le combustible brûlant en laissant la flamme s'élever. Dans les deux cas on atteindra le même but, qui est de faire passer les gaz provenant du combustible frais à travers le combustible brûlant.

On peut citer comme foyer se chargeant par le dessous ceux de MM. Arnott, Foard et Duméry.

Dans les deux premiers le foyer est alimenté par un bac rempli de combustible placé sous la grille et que l'on soulève pour introduire le combustible à travers les barreaux. L'appareil de M. Arnott a été fréquemment appliqué aux foyers d'appartement, et avec succès. Celui de M. Foard est imparfaitement connu. Tous deux paraissent devoir présenter des difficultés de manœuvre assez grandes.

Il suffit pour s'en convaincre d'examiner les figures 3 et 4, planche VI, représentant un foyer disposé comme celui du docteur Arnott, et que nous ne reproduisons que comme un exemple curieux de la hardiesse de certains constructeurs.

Le foyer de M. George, représenté figure 9, planche IV, quoique plus ingénieux, ne me semble pas non plus suffisamment pratique.

Le foyer de M. Duméry est bien conçu et mérite une attention d'autant plus sérieuse que l'Académie des sciences de Paris l'a jugé digne d'une des récompenses qu'elle accorde aux meilleures inventions concernant les arts insalubres.

M. Duméry réduit la partie horizontale de la grille à deux ou trois barreaux longitudinaux occupant le milieu du foyer ; des deux côtés le combustible est contenu dans deux cornets (fig. 5, pl. IV) dont la face inférieure est percée de fentes transversales faisant de cette face une véritable grille. Ces cornets débouchent hors du foyer sur toute la longueur de la grille ; on les remplit de houille que l'on pousse dans le foyer à l'aide de refoiloirs, sorte de pistons d'une forme semblable à celle des cornets.

L'air arrive dans le foyer à travers la grille, la face ouverte des cornets et à travers le combustible frais, comme dans un foyer à flamme renversé. On peut faire basculer le fond des cornets pour jeter le feu.

La manœuvre des refoiloirs se fait au moyen de secteurs dentés mis en mouvement par des vis sans fin calées sur un arbre que le chauffeur fait tourner à l'aide d'une manivelle.

Ce foyer a été soumis à quelques essais et a donné de bons résultats. Cependant le Rapport de la commission de l'Académie chargée de l'examen de ce foyer disait seulement qu'il résolvait bien le problème de la fumivorté sans entraîner une augmentation dans la consommation du combustible. Il n'était donc pas

question d'économie, et l'on attribuait cette absence d'économie en partie à la grande chaleur que rayonnait le foyer au-dehors, ce qui d'ailleurs était une grande gêne pour le chauffeur.

Depuis, de meilleurs résultats ont été obtenus. Ainsi deux chaudières aussi identiques que possible ont donné, l'une avec un foyer ordinaire 4^k,75 de vapeur par kil. de houille, l'autre avec le foyer Duméry 6^k. L'économie serait de 21 %. Une autre fois on a trouvé avec un foyer ordinaire 5^k,20 de vapeur par kil. de houille, avec le foyer Duméry 7^k. L'économie est de 25 %.

De pareilles économies seraient fort belles; mais on a fait remarquer avec raison que 6 et 7 kil. de vapeur par kil. de houille peuvent être obtenus avec de bons foyers ordinaires, et que si M. Duméry est arrivé à d'aussi beaux résultats, c'est en comparant son foyer à d'autres mal construits. Quoi qu'il en soit, personne au moins ne conteste à ce foyer l'avantage de la fumivoricité.

J'ai assisté, il y a près de 2 ans, à l'essai d'une grille qui m'a paru fort bien combinée, celle de M. Langen. C'est une grille à gradins que l'on charge par le dessous; les figures 1 et 2, pl. VI, en feront facilement comprendre la construction. Les gradins sont formés de petits barreaux juxtaposés, et il y a entre chaque étage de ces barreaux assez d'intervalle pour qu'on puisse pousser par ces intervalles sur les divers gradins, au moyen de l'outil fig. 3, le combustible frais sur le combustible brûlant. Un jette-feu placé au bas de la grille permet de se débarrasser promptement des scories qui, fondant sur les gradins supérieurs, descendent jusqu'en bas. Le charbon reste noir sur les barreaux de sorte que ceux-ci ne souffrent pas. Ce n'est qu'à quelques centimètres au-dessus que le combustible se trouve en pleine incandescence. Cependant avec certains charbons collants la chaleur arrive promptement aux barreaux qui se détruisent plus rapidement que ceux des grilles ordinaires; l'effet contraire se produit avec les charbons maigres; la combustion ne se produisant pas assez près des barreaux et par conséquent de l'arrivée de l'air, le feu ne peut pas être poussé activement; c'est pourquoi cette grille qui a donné d'excellents résultats avec certains charbons, tels que ceux de la Ruhr et de la Saar, en a donné de médiocres avec les charbons essayés à Liège.

17. FOYERS A INTRODUCTION D'AIR. — Les plus nombreux projets de foyers fumivores reposent sur le principe suivant : introduire dans le foyer au-delà des points où se produit la fumée, une quantité d'air suffisante pour la brûler.

Le moyen le plus simple qui ait été proposé consistait à ouvrir au fond du foyer dans la maçonnerie un canal venant déboucher par une fente transversale au-delà de l'autel. Cette disposition présentait un très-grand vice : le courant d'air dirigeait contre la chaudière une flamme très-vive qui faisait l'effet d'un dard de chalumeau (fig. 2, pl. V).

On a cherché à éviter cet inconvénient capital en divisant de différentes manières le jet d'air introduit. Une des meilleures dispositions était celle de M. Wye Williams, décrite dans la notice de MM. Viollet et Combes sur les foyers fumivores et dans l'ouvrage *Sur la Combustion du Charbon* de l'inventeur. Immédiatement au-delà de l'autel (fig. 7, pl. V) est une chambre à air, c'est-à-dire une capacité ménagée dans la maçonnerie, couverte par une plaque de fonte percée d'un grand nombre de petits trous et recevant l'air extérieur par le cendrier ou par un tuyau. Cet air sort par les nombreux trous des plaques de fonte, dans la direction du courant de fumée, avec lequel il se mélange et qu'il achève de brûler.

Comme cette disposition appliquée judicieusement par M. Wye Williams a eu du succès, on l'a variée sous toutes les formes *patentables*. Nous nous bornons à en donner un aperçu dans les figures 6, 7, 8, 9 (pl. V). Dans plusieurs de ces prétendues inventions on a cherché à combiner l'introduction de l'air avec son chauffage avant son entrée dans le foyer. Ce principe du chauffage de l'air destiné à la combustion, mal justifié en théorie, n'a pas encore été sanctionné par la pratique.

M. Amory, de Boston (1), combinait ensemble plusieurs des moyens précédents de fumivorité, en établissant au-delà de l'autel (fig. 12, pl. V) une ou plusieurs chambres de combustion dont les parois sont en fonte et forment des cloisons creuses dans lesquelles pénètre de l'air qui s'y chauffe fortement au

(1) Voir *Revue universelle*, t. 1^{er}, p. 536.

contact de la fonte, portée elle-même à une haute température par le contact de la flamme. Cet air débouche dans les chambres de combustion suivant deux directions, dans le sens du tirage et en sens contraire, de sorte que les gaz de la combustion pris entre deux courants d'air tourbillonnent, se mélangent intimement à l'air et s'enflamment; l'augmentation de section présentée par ces chambres contribue d'ailleurs à ralentir le mouvement des gaz et à faciliter leur combustion complète, en même temps qu'une meilleure transmission de la chaleur à travers les parois de la chaudière. L'application du foyer de M. Amory à une chaudière de la fonderie des canons de Liège avait produit une économie de 20 %. M. Amory affirme avoir obtenu beaucoup plus. Le chiffre de 20 % nous paraît déjà fort beau, et il serait bien à désirer que des essais ultérieurs pussent le confirmer.

M. Combes, après avoir essayé une disposition analogue à celle de M. Wye Williams, a reconnu que l'on arrivait au même résultat en faisant simplement déboucher l'air au-delà de l'autel par deux canaux ménagés dans les parois latérales du foyer, et qui, présentant leur orifice verticalement dans le foyer, dirigent le jet d'air horizontalement et non contre la chaudière. En regardant dans le foyer à travers des ouvertures ménagées à dessein, on a constaté que, lorsque ces canaux étaient fermés, et lorsqu'on venait de charger le feu, il se dégagait au-delà de l'autel une fumée épaisse, et qu'aussitôt que les canaux étaient ouverts, cette fumée s'enflammait, et l'on ne voyait au bout du foyer qu'une flamme brillante; en même temps la cheminée cessait d'émettre de la fumée.

Ainsi donc la fumivorité s'obtient sans peine, puisqu'il suffit d'ouvrir à l'air des passages à travers les parois latérales du foyer; malheureusement la disparition de la fumée dans cette circonstance n'est pas accompagnée d'une économie de combustible, probablement parce que la chaleur emportée par l'excès d'air introduit compense celle que l'on gagne par une combustion plus complète.

Nous devons accorder une mention particulière à la porte de foyer de M. Prideaux (fig. 3 et 4, pl. VI), qui, appliquée à des foyers

ordinaires, a donné de très-bons résultats au point de vue de la fumivorté. Cette porte, très-ingénieusement combinée, présente deux parties : la partie antérieure est semblable à une persienne formée de lames mobiles en fonte ou en tôle. La barre *b* qui sert à fermer la porte est articulée à ces lames, de telle sorte que lorsqu'on la soulève pour ouvrir et charger le foyer, on ouvre en même temps toutes les lames. Quand la porte est repoussée, les lames ne se referment que lentement, parce que la barre doit, en descendant, repousser un piston *p* engagé dans un cylindre vertical plein d'eau dont le dessus et le dessous communiquent par un canal *c*. Le poids du levier, des lames, etc., repoussent ce piston en faisant passer l'eau du bas dans le haut du cylindre. On peut régler la vitesse de ce mouvement, et, par suite, la fermeture graduelle des lames, au moyen d'une vis *v* qui obstrue plus ou moins le passage de l'eau dans le canal.

On voit que par ce mécanisme on livre à l'air, au moment de la charge, un passage qui se referme peu à peu dans les instants suivants, pendant lesquels la fumée se produit en abondance. Mais cette admission d'air pendant quelques minutes pourrait présenter des inconvénients sérieux, si la seconde partie de la porte n'avait pour effet d'échauffer fortement l'air avant son entrée dans le foyer. Cette seconde partie se compose de deux ou trois systèmes de lames de fonte fixes et tenant au cadre de la partie antérieure. Ces lames de fonte s'échauffent fortement par le rayonnement du combustible et, par suite, échauffent l'air qui est forcé de les traverser. On donne à chaque système de lames une direction différente afin que les rayons du foyer soient mieux arrêtés; et cet effet est si bien obtenu qu'un thermomètre placé contre une de ces portes a accusé tout au plus 18°, tandis que la porte d'un foyer voisin était rouge.

Le mécanisme de cette porte peut sembler compliqué; toutefois il faut remarquer qu'il n'est pas échauffé sensiblement, et par conséquent susceptible d'une prompte altération. En somme, la porte Prideaux est une des meilleures additions que l'on ait proposé de faire aux foyers ordinaires, et son application peut être recommandée, quand même elle n'aurait d'autre effet que d'empêcher la déperdition de chaleur par le rayonnement de la

porte, et de brûler une partie de la fumée qui se produit au moment de la charge.

Toutefois on peut obtenir le même résultat avec un peu de soin de la part du chauffeur, au moyen de la disposition de porte représentée par les fig. 8 et 9, pl. VI; elle était appliquée à la locomobile sans train exposée à Londres par MM. Houget et Teston de Verviers. Plusieurs chaudières anglaises offraient des dispositions analogues. On voit que l'air passe d'abord à travers une ouverture réglée par le chauffeur, puis à travers de nombreux petits trous de 0^m,01 de diamètre, percés dans la seconde plaque de la porte. La même ouverture variable, mais sans cette seconde plaque, est appliquée au cendrier.

M. Wye Williams, qui insiste fortement sur le placement de portes semblables, conseille de donner aux ouvertures pour le passage de l'air, une section totale de 3 à 4 déc. carrés par mètre carré de surface de grille; si la porte n'est pas assez large pour cela, on complète l'introduction de l'air par une chambre percée de trous placée derrière l'autel. M. Williams produit de nombreuses et sérieuses attestations qui confirment les excellents résultats obtenus par ces dispositions dont l'application peut se faire facilement et à très-peu de frais à tous les fourneaux, et n'est plus entravée par aucun brevet.

Avant de passer à l'examen d'un autre genre de foyers, il faut que nous fassions connaître l'objection la plus grave que l'on ait faite à l'application du principe même de l'introduction de l'air dans le foyer. On dit que la flamme produite par le mélange de la fumée et de l'air en quantité trop grande est fortement oxydante, et par conséquent destructive des chaudières. L'expérience n'a que trop souvent confirmé cette assertion, et là doit être la véritable raison qui a fait abandonner des dispositions atteignant bien le but. On peut sans doute atténuer l'action nuisible de l'air introduit dans le foyer, en réglant convenablement la quantité à admettre; mais comment déterminer cette quantité? Attendra-t-on que la chaudière présente des traces visibles d'altération? Évidemment non; car on serait peu fixé par cette fâcheuse expérience; on saurait seulement qu'il y a eu trop d'air introduit, et point combien il y en a eu de trop. Il me paraît que, pour appli-

quer avec sécurité le principe de l'introduction de l'air, il n'y a rien d'autre à faire que de réduire la quantité introduite au minimum rigoureusement nécessaire. Parfois ce minimum sera insuffisant et le foyer fumera, mais il vaut certainement mieux avoir de temps en temps un peu de fumée que de brûler continuellement sa chaudière.

Je ne puis m'empêcher de remarquer encore que l'on peut difficilement considérer comme un bon principe celui dont on doit restreindre autant que possible l'application, pour éviter un inconvénient grave inhérent à la nature même de ce principe. Il y a donc lieu de s'étonner de ce que la plupart des foyers fumivores proposés sont fondés sur le principe de l'introduction de l'air, dont l'application bien faite offre le plus de difficultés; pour moi, je suis convaincu que l'on obtiendra de meilleurs résultats en partant du principe des doubles foyers et de celui des foyers à flamme renversée.

Ce que nous avons dit des chambres de combustion avec introduction d'air nous amène à signaler une disposition de chambre de combustion dans laquelle on a cherché à brûler la fumée uniquement grâce à une forte quantité de chaleur emmagasinée, jointe à une résistance au mouvement des gaz. Je veux parler du foyer de M. de Fontenay (fig. 14 et 15, pl. V); au-dessus de l'autel, suffisamment distant de la grille est une rangée de tuyaux réfractaires superposés: la fumée après l'avoir traversée, rencontre une seconde rangée de tuyaux d'un plus petit diamètre. C'est entre ces deux parois de tuyaux que doit s'opérer la combustion de la fumée. D'après M. de Fontenay, cet effet se produit, et il l'explique par cette expérience de laboratoire qui consiste à placer dans une moufle ouverte et fortement chauffée un morceau de houille; il se dégage de la moufle une fumée abondante, qui cesse si l'on ferme la moufle imparfaitement, de manière à ce que la fumée ne puisse plus sortir assez rapidement pour échapper à la combustion. Il faudrait de nombreux essais pour que l'on puisse être fixé sur l'avantage d'une disposition semblable appliquée à divers fourneaux et à diverses espèces de combustible.

18. FOYERS A GÉNÉRATEUR DE GAZ. — On a fait longtemps beaucoup de bruit d'un nouveau système de foyer fondé sur un principe dont l'application avait bien été déjà l'objet de quelques essais, mais qui n'était entrée dans la pratique que dans des cas spéciaux. Le nouveau système, dû au docteur Beaufumé, aurait donné des résultats vraiment merveilleux, à côté d'autres malheureusement fort peu satisfaisants.

La partie essentielle du système Beaufumé est un appareil spécial appelé *gazéificateur* dans lequel la houille, ne trouvant pas assez d'air pour brûler complètement, se transforme en gaz combustibles, qui, conduits par un tuyau jusque sous la chaudière, s'y enflamment au contact d'un courant d'air suffisant. L'appareil est représenté en détail dans les fig. 5 et 6 (pl. VI):

A est le gazéificateur, consistant en une caisse de tôle dont le fond est une grille G, et qui est entourée d'une seconde caisse ou enveloppe CC' C''; celle-ci renferme de l'eau jusqu'à une hauteur marquée par l'indicateur de niveau n. Cette eau, absorbant la chaleur des parois du gazéificateur, les empêche de se brûler, et se transforme en vapeur, qui, s'écoulant par le tuyau t, se rend à la chaudière principale, ou sert à mouvoir un ventilateur destiné à fournir l'air à la combustion. Une partie de l'air est envoyée dans la chambre de maçonnerie F, et de là par les conduits F', F'' sous la grille G; pour maintenir la combustion imparfaite qui se fait dans le gazéificateur. Mais la plus grande partie de l'air fourni par le ventilateur s'écoule par le conduit T T' T'', que l'on fait autant que possible circuler dans la maçonnerie du fourneau pour échauffer l'air qui débouche en T'''.

B, B' sont les *chargeurs*; ce sont deux tubes dont les fonds sont mobiles. On ouvre les fonds supérieurs pour remplir les chargeurs de combustible, puis on ferme ces fonds et, au moyen d'un mécanisme extérieur, on ouvre les fonds inférieurs pour faire tomber le combustible dans le gazéificateur sans y introduire de l'air.

La quantité d'air envoyé sous la grille G ne suffit qu'à entretenir dans le gazéificateur une température assez élevée, mais non à brûler tout le combustible que l'on y introduit. De cette combustion incomplète résultent des gaz combustibles qui

s'échappent par le tuyau H H' et arrivent à un système M d'ouvertures (fig. 7) formant, sous la chaudière à chauffer, un large bec à gaz appelé *brûleur*. Les ouvertures de ce brûleur sont rectangulaires et alternent avec des ouvertures semblables par lesquelles débouche l'air amené par le conduit T T' T'' T'''. Les gaz ainsi mélangés à l'air se brûlent complètement.

Telles sont les parties essentielles du système; d'autres parties ont pour but de faciliter la mise en train de l'appareil. En effet, celui-ci ne peut fonctionner d'une manière normale que lorsque la combustion a atteint un degré suffisant d'activité dans le gazéificateur, et l'allumage du feu, difficile dans tous les cas avec la seule disposition que nous avons indiquée, serait à peu près impossible dans le cas, nécessairement fréquent, où le ventilateur, fournissant l'air à la combustion, ne pourrait être mis en mouvement que par la machine à vapeur alimentée par la chaudière à chauffer, ou par une petite machine spéciale alimentée par la vapeur du régénérateur enveloppe du gazéificateur.

Pour éviter cette difficulté, on a monté, au commencement du tuyau H H', un tuyau vertical I appelé *purgeur*, et qui fait fonction de cheminée. Deux valves I et J permettent de fermer soit le tuyau conducteur H H' pour laisser échapper le gaz par le purgeur, soit le tuyau purgeur L pour laisser aller les gaz dans le tuyau conducteur et au brûleur.

On commence par fermer la valve I et ouvrir la valve J, et l'on introduit du bois dans le gazéificateur par la porte O (fig. 6); on ouvre en même temps les portes Q, qui servent d'ailleurs au nettoyage du cendrier et de la chambre F. Le tuyau L faisant cheminée, le feu s'allume comme dans un foyer ordinaire; les regards P, P, P, permettent de suivre la marche de l'opération. On n'emploie les chargeurs B, B' que lorsque la combustion est bien en train; dès que l'on a assez de vapeur pour faire tourner le ventilateur, on ferme la valve J du purgeur, et l'on ouvre la valve I; en même temps on ferme parfaitement toutes les portes O et Q, et il ne reste plus qu'à alimenter de charbon le gazéificateur et d'eau son générateur-enveloppe.

Le système Beaufumé a donné, avons-nous dit, des résultats vraiment merveilleux, tellement merveilleux que nous ne les

citerions même pas, parce que nous ne les prendrions pas au sérieux, s'ils n'étaient affirmés par de hautes autorités pratiques, telles que M. Grouvelle, ingénieur justement renommé aussi bien par ses publications que par les travaux qu'il a exécutés, et MM. Cail, chefs d'une des plus grandes maisons de constructions qui existent actuellement.

Les premières expériences, faites à Chaillot par M. Grouvelle sur une chaudière à bouilleur de 24 chevaux, ont donné 10 kil. de vapeur par kilogramme de houille. Le générateur-enveloppe du gazéificateur était à haute pression.

Un autre appareil, placé à Denain chez MM. J. Cail et C^e, n'a donné que 6^k,93; le générateur du gazéificateur était à basse pression.

D'autres expériences ont été faites à Denain, en faisant exécuter un même travail, à savoir le martelage de 1000 kil. de fer, avec deux chaudières, l'une chauffée par un foyer ordinaire, l'autre par le système Beaufumé. Celle-ci a donné une économie directe de 51 %, que des corrections porteraient à 58 %.

Enfin, un second appareil Beaufumé appliqué à Denain a donné encore 10 kil. de vapeur par kil. de houille, comme les premières expériences faites à Chaillot.

Nous avons dit que dans les chaudières chauffées par de bons foyers ordinaires on obtient rarement plus de 6 kil. de vapeur, et souvent 5 kil. seulement. D'après cela, l'appareil Beaufumé donnerait 40 à 50 % d'économie.

Nous venons de dire que l'on avait trouvé à Denain 51 % et plus exactement 58 %. Ce résultat est encore plus beau; cependant on pourrait se contenter de 50 % et même de 40.

Un ingénieur distingué me disait qu'il n'aimait pas les inventions promettant 50 % d'économie, que c'était là un chiffre invariablement promis par tous les inventeurs. Je suis de son avis, parce que je crois plus facilement aux petits progrès, lents et successifs, qu'aux pas de géants. Ce n'est pas que ceux-ci soient impossibles; Wat a prouvé le contraire; l'économie de combustible réalisée par les perfectionnements qu'il a apportés à la machine à vapeur était bien supérieure à 50 %, mais aussi un beau phénomène industriel a marqué cet immense progrès.

On sait que Watt et Boulton ne demandaient pour tout paiement de leurs puissantes machines à vapeur qu'une redevance égale au tiers de l'économie qu'elles procuraient; de plus, ils rachetaient, à prix coûtant, les anciennes machines. La Société qui exploite le brevet de M. Beaufumé demande aussi une redevance proportionnée à l'économie réalisée par ses appareils, mais, au lieu de fournir ceux-ci gratis, elle les vend, au contraire, à un prix si élevé, que le bénéfice obtenu par cette vente lui permettrait de se passer de redevance.

Il serait bien préférable que ce fût la redevance qui dispensât d'un bénéfice. Et que l'on ne dise pas que ce n'est point là une considération sérieuse! Dans un temps où l'économie de combustible est une des plus graves questions qui préoccupent les industriels, où une économie considérable s'évaluerait par millions de francs rien que dans notre petite Belgique, dans un moment où la puissance de l'association permet d'entreprendre sans peine ces grandes spéculations qui exigeaient autrefois le génie de l'industrie réuni à la fortune, aujourd'hui que les Sociétés peuvent remplacer les Boulton, on a le droit de concevoir des doutes sérieux à l'égard des offres faites par des Sociétés qui promettent monts et merveilles sans rien garantir et sans rien risquer.

Je comprends qu'un industriel se donne la peine d'examiner attentivement l'œuvre d'un inventeur sérieux manquant de moyens d'exécution, et fasse tous les frais nécessaires d'un essai; cet industriel montre par là qu'il est intelligent et qu'il aime le progrès; mais il fait preuve de tout autant d'intelligence lorsqu'il rejette sans examen toute proposition de riches inventeurs et à plus forte raison de riches Sociétés qui ne disent point franchement: Voici un appareil qui coûte autant et vous donnera tel résultat; nous vous le laissons à l'essai pendant tel temps; s'il ne vous convient pas, nous le reprendrons; votre intérêt nous répond du nôtre.

En effet, comment exiger qu'un industriel ait plus de confiance dans le succès d'une invention que celui qui l'a faite ou qui l'exploite? ou comment comprendre que ceux-ci ne veuillent rien risquer pour leur invention lorsqu'ils peuvent le faire et qu'ils ont pleine confiance dans le succès?

Il peut arriver sans doute qu'un industriel ait un besoin pressant d'une invention dont on ne peut garantir le succès constant; on comprend alors que l'inventeur refuse de faire à ses risques et périls l'essai de son invention dans les conditions qui lui sont imposées, et que l'industriel y consente. Mais ici ce n'est point le cas : l'appareil Beaufumé est un système complet, indépendant des conditions extérieures dans lesquelles il se trouve, et dont, par suite, les résultats devraient être toujours les mêmes. C'est pourquoi j'ai cru ne pouvoir présenter plus à propos les réflexions précédentes, que l'on aurait tort de considérer comme étrangères à notre sujet. Car je puis les résumer ainsi : le premier caractère qui permettra à un industriel de présumer la valeur pratique d'une invention est la manière dont elle est présentée, l'importance des garanties offertes par celui qui la présente.

Nous avons dit que la Société qui exploite le brevet de M. Beaufumé n'offre point, en présentant son appareil, les garanties que l'on serait en droit de lui demander et qu'elle ne devrait pas hésiter à offrir, eu égard à ses étonnants succès, à ses brillantes promesses et à ses onéreuses conditions. C'est qu'à côté de ses succès il y a eu des résultats peu satisfaisants; ainsi, dans ceux que nous avons rapportés, nous voyons le chiffre 6^k,93 pour la production de vapeur par kil. de houille; nous le trouvons déjà très-beau; en le comparant même à un bon chiffre de production d'une chaudière à foyer ordinaire, tel que 6^k, nous trouvons encore 15 % d'économie, ce dont nous nous contenterions. D'après M. Grouvelle, la chaudière qui a donné ce chiffre 6^k,93 n'avait jamais pu donner avec un foyer ordinaire que 4^k,50. L'économie serait encore supérieure aux inévitables 50 %. Nous ne nous arrêterons donc pas à nous demander si ce chiffre 6^k,93, très-beau, selon nous, n'est pas un peu humble à côté des 10^k donnés par les autres expériences; nous admettons que cette infériorité est due à ce que le générateur-enveloppe du gazéificateur était à basse pression au lieu d'être à haute pression, comme le veut M. Grouvelle. Mais il y a eu d'autres résultats fort peu satisfaisants au point de vue pratique; ce sont ceux qui ont été obtenus à l'exposition univer-

selle de 1855. Comme économie, la chaudière chauffée par le système Beaufumé est arrivée au cinquième rang sur sept chaudières dont on a évalué la production de vapeur. En outre, le gazéificateur a dû subir de fréquentes réparations, de sorte que la marche de l'appareil a dû plusieurs fois être suspendue. Cet inconvénient est capital; sans doute on peut l'atténuer par des perfectionnements dans la construction; mais arrivera-t-on jamais à l'éviter avec certitude, à faire de l'appareil Beaufumé un appareil durable et par conséquent pratique? Telle est la question que les expériences faites sont loin de résoudre en faveur du système.

En résumé, nous savons jusqu'à cette heure que l'appareil Beaufumé est très-cher, promet beaucoup, ne garantit rien, et peut faire craindre la nécessité de fréquentes réparations et par conséquent de fréquents chômages.

Voilà les considérations toutes pratiques que nous avons à faire valoir contre un appareil avec lequel nous n'avons pas fini, parce que nous croyons que la critique doit être d'autant plus sévère que les louanges ont été plus exagérées, et c'est cette exagération qui nous reste à prouver. Pour cela, nous prendrons un chiffre parmi tous ceux du tableau des expériences très-détaillées faites à Denain. Nous trouvons que, dans une de ces expériences, la production de vapeur a été de $11^k,4$ de vapeur à 4 atmosphères, l'eau d'alimentation étant à 50° . Or, la physique nous apprend que cette production de vapeur exigerait $11,4 (606,5 + 0,305 \times 144) - 50$ ou 6840 unités de chaleur. Elle nous apprend, d'un autre côté, que la bonne houille, supérieure en qualité à celle que l'on emploie chez nous et dans le nord de la France, possède un pouvoir calorifique 7050, c'est-à-dire que la combustion complète de 1^k de houille, effectuée par les soins d'un physicien, dans un appareil de laboratoire combiné de façon à ne pas perdre de chaleur, produit 7050 unités de chaleur, ce qui n'est supérieur que de $3/100$ au nombre 6840 obtenu par un chauffeur avec l'appareil Beaufumé. Donc il est arrivé, dans l'expérience que nous discutons, que l'appareil Beaufumé a utilisé 97 % de la chaleur du combustible. Si l'on songe aux pertes de chaleur qui se font : 1° par le rayon-

nement du générateur-enveloppe du gazéificateur; 2° par la chute du combustible non brûlé dans son cendrier; 3° par le rayonnement du tuyau conducteur et les fuites par le tuyau purgeur, dont la valve ne fermera jamais hermétiquement; 4° par l'absorption de chaleur par les maçonneries de la chaudière; 5° par le courant de gaz qui s'échappent du fourneau sans pouvoir être complètement refroidi; si l'on calcule que cette dernière perte seule s'élèvera à 6 % quand on sera parvenu à refroidir les gaz jusqu'à 100°, ce qui serait pratiquement très-difficile; si, en un mot, on examine sérieusement la question, on reste confondu devant de semblables résultats, et l'on doit déclarer miraculeuse cette réduction à 3 % de toutes les pertes de chaleur dans le système Beaufumé.

Sans doute le chiffre de 10 kil. de vapeur par kil. de houille est moins phénoménal et pourrait être admis; mais l'impossibilité d'un des résultats obtenus jette un doute sur tous les autres, quelque possibles qu'ils soient, et nous devons supposer que ceux-ci ont été influencés par quelques puissantes causes d'erreurs telles que celles que nous avons indiquées § 2, comme pouvant affecter la mesure de la production de vapeur d'une chaudière.

D'ailleurs, qu'est-ce, en somme, que l'appareil Beaufumé, si ce n'est un très-mauvais foyer avec addition d'introduction d'air? En effet, le gazéificateur n'est qu'un foyer construit à dessein de manière à produire le plus de fumée possible, et le brûleur un appareil analogue à tous ceux qui ont été proposés pour brûler la fumée au moyen d'un courant d'air introduit dans le foyer au-delà des points où se forme la fumée. Si l'on veut rendre cette comparaison plus claire, que l'on conçoive un foyer de locomotive dont la grille est obstruée, puis, au bout d'une partie de la longueur des tubes, une chambre recevant l'air d'un ventilateur; quelle différence y aura-t-il entre cette disposition et celle de l'appareil Beaufumé, si ce n'est que le refroidissement de la fumée dans son trajet du gazéificateur au brûleur sera utilisé au lieu d'être perdu? Cela posé, je demande qui proposera d'appliquer aux locomotives la disposition que je viens d'indiquer?

Nous pouvons aller plus loin, affirmer que le système Beau-fumé est l'exagération du principe de l'introduction de l'air, et de ce qu'il a de plus mauvais. En effet, nous avons dit que l'inconvénient capital de l'application de ce principe était l'effet destructeur de l'action oxydante de la flamme, chargée d'air non désoxygéné, et que, pour éviter cet effet, on ne pouvait que chercher à réduire au minimum nécessaire la quantité d'air introduite pour brûler la fumée, et par conséquent aussi à réduire au minimum la quantité de fumée formée. Or, c'est ici l'inverse que l'on veut obtenir : on produit le plus de fumée possible, et l'on introduit sur la chaudière une grande masse d'air. Aussi serait-il intéressant de savoir ce que deviendraient les chaudières chauffées par le système Beaufumé. En résumé, je ne crois ni au présent ni à l'avenir de ce système.

49. FOYERS A ALIMENTATION CONTINUE. — Le principe de l'alimentation continue des foyers est certainement très-rationnel. En général, la continuité est une condition désirable d'une opération, et la plupart des machines qui servent à transformer en produits ouvrés des matières premières, ou déjà travaillées, reçoivent ces matières d'une manière continue. Pourquoi n'en est-il pas de même dans nos foyers, qui ne sont, en somme, que des machines à transformer le combustible en gaz brûlant? Une difficulté s'y oppose : les machines que l'on alimente d'une manière continue transportent aussi d'une manière continue les matières qu'on leur livre, et transforment celles-ci sans laisser le plus souvent de résidus en quantités sensibles, ou bien en se débarrassant d'elles-mêmes de ces résidus. Or, nos foyers ne transportent pas la houille dont on les charge, et ne se débarrassent pas des résidus de la combustion. Donc, pour les alimenter d'une manière continue, on a dû, soit les munir d'appareils capables de les charger de charbon d'une manière continue, en laissant au chauffeur le soin de débarrasser le foyer de tout ce qui n'aurait pas été brûlé, soit faire mouvoir la grille du foyer de façon qu'elle puisse transporter le combustible et se débarrasser elle-même des résidus solides de sa combustion. On a donc deux classes de foyers à alimentation continue : les

foyers à grille fixe et munis d'appareils d'alimentation, et les foyers à grille mobile.

La disposition la plus simple des foyers à grille fixe et à alimentation continue est celle de certains foyers à anthracite employés en Amérique. L'anthracite arrive par une ouverture percée dans le haut du foyer et surmontée d'une trémie ou grand entonnoir, et forme un tas conique reposant sur la grille, et qui s'écroule à mesure qu'il brûle, sous le poids du combustible frais qui le surmonte. Cette disposition n'est pas appliquée dans nos foyers; cependant il y aurait peut-être quelque parti à en tirer.

L'appareil de M. Collier, qui a eu un certain retentissement, et dont l'usage a été presque généralement abandonné, se plaçait à l'entrée des foyers. Une trémie était remplie de houille que broyaient deux cylindres cannelés mis en mouvement par un mécanisme extérieur; la houille broyée rencontrait en tombant les quatre palettes d'un axe vertical tournant sur lui-même. Le mouvement de ces palettes projetait la houille dans le foyer. On reprochait à cet appareil de se déranger souvent et de mal répartir le combustible, qui s'amassait trop sur les deux côtés de la grille.

Comme foyers à grille mobile, on a employé d'abord des foyers à grille circulaire tournante. Il suffit d'imaginer une roue placée horizontalement, tournant autour de son axe vertical, et recevant sur ses rayons, formant barreaux de grille, de la houille qui tombe d'une trémie placée au haut du foyer et qui a toute la longueur d'un rayon. La grille se charge ainsi d'une manière bien uniforme et par petites quantités, de sorte que la combustion se fait bien régulièrement; mais on comprend que ce système doit être très-sujet à se déranger; l'action d'une forte chaleur qui se transmet jusqu'aux organes du mouvement, les scories qui tombent sur ceux-ci, ou entre la circonférence de la grille et les parois du fourneau, ne tardent pas à entraver le mouvement. Aussi, ces grilles tournantes ont-elles été fort peu employées. Il est donc inutile de nous y arrêter.

Nous devons nous occuper plus sérieusement d'un autre foyer à grille mobile qui, malgré les imperfections que nous devons

signaler, peut être considéré comme le meilleur des foyers à alimentation continue essayés jusqu'aujourd'hui. Je veux parler de la grille mobile de Juckes, perfectionnée par M. Tailfer, qui l'a importée en France. Comme cet appareil a acquis une sérieuse importance, et que nous n'en avons encore vu dans aucun ouvrage un dessin bien complet et bien conforme à l'exécution; nous avons relevé et dessiné avec le plus d'exactitude possible celui qui est représenté fig. 1, 2, 3, 4, 5 et 6, pl. VII, et qui était appliqué à une chaudière de 30 chevaux.

On peut voir, par la fig. 3, que la grille de Juckes est une sorte de chaîne sans fin formée de petits barreaux articulés, et qui est mise en mouvement par la rotation des poulies R, R dont les surfaces portent 5 dents qui s'engrènent dans les barreaux de la grille comme dans les anneaux d'une chaîne.

La grille avance très-lentement, de 1, 2 ou 3 centimètres par minute. Ce mouvement très-lent s'obtient à l'aide de la vis sans fin *v*, qui commande la roue dentée *e*, laquelle est directement calée sur l'axe *jj'* d'un des systèmes de poulies R, qui tournent donc en même temps que cette roue; les autres poulies R placées vers le fond du foyer ne servent que de guides, ainsi que celles qui tournent folles sur les barres *b, b'''*.

Le mouvement de la vis sans fin lui est communiqué par les pignons coniques *g, g'*, ce dernier étant calé sur l'axe de la poulie motrice Q. Celle-ci reçoit par une courroie le mouvement d'un arbre horizontal appliqué le long de la face du fourneau, et mû par un renvoi de mouvement de la machine principale alimentée par la chaudière, ou souvent par une petite machine à vapeur spéciale qui se met en mouvement très-promptement, parce que, du jour au lendemain, il reste toujours de la vapeur dans la chaudière, et qu'il suffit de chauffer celle-ci pendant peu de temps, sans mouvoir la grille, pour obtenir une pression suffisante. D'ailleurs le volant à main V permet de mouvoir la grille s'il en est besoin.

Tout le système est supporté par un bâti composé de deux joues latérales en fonte BB' B'' réunies par des barres d'assemblage *b, b', b'', b''', b''', b''*. La partie B' est une pièce de rallonge qui permet de conserver les mêmes modèles pour les pièces

B, B', quelle que soit la longueur de la grille. Tout ce bâti est porté sur deux paires de roues z, z' ; de sorte qu'il forme un chariot que l'on peut faire mouvoir sur deux rails horizontaux établis au fond du cendrier.

La houille, cassée en petits morceaux, se place dans une trémie T formée par les joues B du bâti, par une plaque de tôle mobile U et par la porte P, qui consiste en un cadre de fonte rempli de briques réfractaires. On peut laisser descendre cette porte P, qui est suspendue par des chaînes enroulées sur les poulies p, p' , et l'arrêter à volonté au moyen d'un cliquet accrochant une roue à rochets calée sur l'axe de ces poulies.

La houille est emportée par le mouvement de la grille qui passe au fond de la trémie, et l'on règle la quantité entraînée, et par conséquent la charge du foyer, en fermant plus ou moins la porte P. Arrivant ainsi en petites quantités et d'une manière continue, la houille trouve toujours assez d'air et de chaleur pour brûler sans fumée, et le mouvement de la grille est assez lent pour que la houille ait le temps de brûler complètement avant d'arriver à l'extrémité de la grille; il n'y parvient que des cendres qui tombent d'elles-mêmes sur la plaque u , qui les ramène sous la grille. Ainsi cette grille se décharge d'elle-même; elle se nettoie aussi d'elle-même parce que les petits barreaux s'écartent fortement les uns des autres quand ils passent aux deux bouts de la grille où la chaîne s'enroule sur les poulies.

Les fig. 4, 5 et 6 donnent quelques détails de la grille; on voit comment les petits barreaux sont enfilés sur les barres rondes consécutives de façon à alterner les uns avec les autres; cette construction très-ingénieuse donne nécessairement beaucoup de flexibilité en même temps qu'une solidité suffisante. L'ajustage est d'ailleurs des plus simples et se fait en très-peu de temps; quand, en laissant la chaîne lâche et seulement supportée par les poulies, on a enfilé la dernière barre qui achève la chaîne, on peut tendre celle-ci en reculant, au moyen de la vis h dont l'écrou est fixe, les supports de l'axe des poulies R et par conséquent cet axe.

Pour faciliter le mouvement de la chaîne, les barres sur lesquelles sont enfilés les barreaux de la grille sont terminées par

des galets guidés par les bandes *t, t*. Le rebord *m m'* des joues latérales protège la marche de ces galets contre la chute des escarbilles.

On doit reconnaître que la disposition actuelle de la grille de Juckes est remarquablement ingénieuse et bien conçue. De nombreuses applications ont permis de juger aussi bien ses sérieux avantages que ses graves inconvénients. Dans certains cas, l'on a obtenu à la fois une fumivorté parfaite et une économie notable, résultant soit d'une réduction de consommation, soit de la possibilité de brûler sur cette grille du charbon menu de bas prix. Ainsi, d'un rapport non suspect de M. Delezenne, il résulterait que plusieurs de ces foyers, établis à Lille, ont donné jusqu'à 18 % d'économie. Malheureusement ces résultats sont loin d'être constants. Il est arrivé d'autres fois qu'après le remplacement d'une grille ordinaire par une grille de Juckes, non-seulement la consommation était augmentée, mais encore que l'on ne parvenait plus à obtenir la quantité de vapeur nécessaire. Il en a été ainsi pour des grilles placées par M. Juckes lui-même, et pour des grilles telles que M. Tailfer les construit actuellement, entre autres pour celles dont nous avons donné le dessein. L'une des causes les plus importantes de ce fâcheux résultat se trouve dans la formation de mâchefers qui, s'attachant aux parois du fourneau et s'arrêtant contre l'autel, réduisent bientôt considérablement la surface active du foyer. Alors le chauffeur est forcé d'ouvrir la porte et de retirer par le devant toute la masse des mâchefers, en entraînant avec eux du combustible non brûlé et en désorganisant complètement son feu. J'ai vu cette opération devoir se répéter fréquemment en un jour.

Pour éviter cette adhérence des mâchefers, on avait établi, sous l'une des chaudières chauffées par ces grilles, un cadre creux en feuilles de tôle rivées, qui, rempli d'eau, communiquait avec la chaudière et dont les parois remplaçaient celles du fourneau; on espérait que les scories ne s'attacheraient pas à ces surfaces métalliques, dont la température ne pouvait pas atteindre un degré élevé. Ce résultat fut obtenu en partie, mais ce cadre, pièce d'une fabrication difficile, laissait fuir l'eau et présentait des dangers sérieux d'explosion; c'est pourquoi on dut

le retirer. Je crois qu'il serait préférable d'établir des deux côtés de la grille, que l'on ferait moins large que le foyer, deux plaques de fonte que l'on pourrait faire basculer de l'extérieur; on placerait au bout de la grille une plaque semblable et l'on élèverait l'autel au-dessus de la grille plus que ne l'indique notre dessin, afin que les mâchefers pussent arriver jusqu'à la plaque mobile, que l'on ferait basculer de temps en temps pour se débarrasser de ces mâchefers. Ajoutons encore que l'on diminuerait beaucoup la formation des mâchefers en employant du combustible bien sec.

On reproche aussi à cette grille de ne pas permettre un feu aussi énergique que celui que l'on obtient sur la grille ordinaire. Cela tient uniquement, je pense, à ce que l'on a donné trop peu de distance aux barreaux pour brûler plus facilement les charbons menus. On a été inutilement trop loin.

Enfin, on adresse à la grille de Juckes un reproche général, celui d'être ce que l'on appelle *un appareil marchant dans le feu*. En effet, on a quelque peine à croire à la durée et à la marche régulière d'un appareil dont plusieurs parties sont soumises à une très-haute température. Cependant on doit remarquer que tous les organes du mouvement dans la grille de Juckes ne sont pas sensiblement chauffés. Il n'y a réellement que la grille qui est exposée à une forte chaleur, et elle est combinée de façon à si bien permettre toutes les dilatations qui se produisent dans son système, elle se meut si lentement, et elle est si facile à réparer, que l'inconvénient que nous signalons perd beaucoup de sa gravité.

En résumé, la grille de Juckes est un appareil bien conçu, vraiment fumivore, économique quelquefois, mais ne convenant, avec ses dispositions actuelles, qu'à certains combustibles. Peut-être, après certaines modifications de la nature de celles que nous avons indiquées, l'application de cet appareil pourrait-elle se généraliser. Nous croyons plus à l'avenir de la grille de Juckes, malgré les graves échecs dont nous avons été témoins, qu'à celui d'autres appareils dont on fait de plus grands éloges et dont on n'annonce que des succès.

20. CONCLUSION RELATIVE AUX FOYERS. — Si l'on résume tout ce que nous avons dit relativement aux foyers, on arrive à cette conclusion que, de tous les systèmes nouveaux, aucun ne peut être conseillé sans restriction, aucun ne réussit d'une manière constante, aucun n'est exempt d'inconvénients pratiques plus ou moins sérieux, et que l'on doit s'en tenir encore, jusqu'à cette heure, à nos anciens foyers, en se bornant à apporter le plus grand soin dans le calcul de leurs dimensions et dans la combinaison de leur ensemble, et en y ajoutant ces perfectionnements si simples et si efficaces que nous avons indiqués, et qui consistent à partager la partie antérieure du foyer en deux foyers séparés au moyen d'une plaque de fonte et d'une double porte, et à admettre par la porte et à l'extrémité du foyer, ou par la porte seulement, de l'air en quantité suffisante pour brûler la fumée, surtout au moment de la charge.

Cette conclusion est peu satisfaisante; elle semble donner au génie de l'invention un brevet d'impuissance. Cependant il n'en est pas ainsi; nous devons seulement constater que les nouveaux systèmes de foyer, imparfaits comme presque toutes les choses qui n'ont pu être soumises à une longue observation, se sont montrés inférieurs ou tout au plus égaux à nos anciens foyers, dont la simplicité est une garantie sinon de succès aussi complets, du moins de succès constants, et dont toutes les conditions de perfection ont pu être lentement et sûrement étudiées. D'ailleurs ceux-ci ne conservent leur supériorité qu'à la condition d'être conduits par un bon chauffeur, habitué dès longtemps à leur maniement, tandis que plusieurs des systèmes nouveaux exigent des soins nouveaux, ou prétendent se passer de l'intelligence et de l'attention assidue du chauffeur.

III. — DES CHAUDIÈRES.

Nous avons parcouru assez rapidement tout ce qui était relatif aux fourneaux et aux moyens de tirage , parce que nous nous trouvions forcés d'arriver , après cette étude , à la conclusion que nous avons énoncée , à savoir , que la pratique n'a pas encore reconnu vraiment utiles des modifications sérieuses aux dispositions usitées depuis longtemps. Nous n'avons donc que celles-ci à exposer avec quelques détails ; notre tâche principale se réduisait à faire connaître le plus complètement possible les conditions auxquelles doit satisfaire un bon fourneau. Ce sujet , ainsi réduit , conservait une telle importance que nous l'eussions traité avec plus de détails si nous n'avions su que nous aurions à nous en occuper de nouveau , et même avec plus de fruit , en parlant des chaudières. En effet , il nous sera facile , en décrivant les systèmes principaux de générateurs à vapeur , non-seulement de rappeler les règles générales que nous avons données sur les fourneaux , mais encore de montrer comment elles peuvent s'appliquer aux différents cas qui se présentent le plus souvent.

21. MATÉRIAUX EMPLOYÉS A LA FABRICATION DES CHAUDIÈRES. — On a fait autrefois des chaudières en bronze , en fonte , et même en bois. Aujourd'hui on ne les construit qu'en tôle de fer et de cuivre. A l'Exposition universelle de 1855 figurait bien une chaudière d'acier ; mais on ne pouvait voir en elle qu'un objet d'exposition , sans but pratique général. Sans doute , l'emploi de l'acier , doué d'une résistance plus grande que le fer , permettrait de réduire l'épaisseur ; mais les avantages d'une telle réduction ne paraissent sérieusement importants que dans des cas particuliers. En effet , ces avantages me semblent ne pouvoir être qu'une diminution dans le poids de la chaudière , et une plus facile transmission de la chaleur. La diminution de poids se trouvera largement compensée par la différence de prix de l'acier et du fer , et la différence de main-d'œuvre , de sorte

qu'elle ne sera pas un avantage au point de vue du prix de revient. Elle ne pourrait en être un que pour des chaudières que l'on cherche à rendre aussi légères que possible pour le transport, par exemple pour les chaudières des machines locomobiles.

Quant à la plus grande facilité de transmission de la chaleur, ce ne sera guère là qu'un avantage théorique, comme nous allons le faire voir en considérant immédiatement sous ce rapport les différents matériaux dont on peut faire les chaudières.

22. TRANSMISSION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES PAROIS DES CHAUDIÈRES. — On sait que les corps ne sont pas tous également *conducteurs* de la chaleur, c'est-à-dire ne transmettent pas tous avec la même facilité l'action de cet agent. On peut établir les *conductibilités* relatives de différents corps en mesurant quelles quantités de chaleur laissent passer ces différents corps dans des conditions identiques, c'est-à-dire à surface et épaisseur égales et dans les mêmes conditions de température. Ainsi, pour concevoir immédiatement cette idée, appliquons-la au cas qui nous occupe : supposons deux chaudières, l'une en fer, l'autre en cuivre, ayant exactement les mêmes dimensions, chauffées par deux foyers d'égale intensité et renfermant de l'eau bouillante sous la même pression, due à la même température. De cette façon, les deux chaudières ont la même épaisseur, la même surface, et leurs faces extérieures, ainsi que leurs faces intérieures, ont la même température; néanmoins les deux chaudières ne produiront pas la même quantité de vapeur; on pourra trouver que, tandis que la chaudière de fer a produit 20 kil. de vapeur par mètre carré, la chaudière de cuivre, pendant le même temps, en a produit 50, et cela parce que, dans les mêmes conditions, le cuivre a laissé passer 2 1/2 fois plus de chaleur que le fer; parce que la conductibilité du cuivre est de 2 1/2 fois plus grande que celle du fer.

On peut, du reste, considérer la conductibilité des corps d'une manière plus absolue, sans avoir besoin de les comparer entre eux. En effet, de l'expérience précédente je puis conclure que 1^{m.} q de fer, d'une épaisseur de 10^{mm}, par exemple, ayant l'une de ses faces en contact avec la flamme, et la fumée à une tem-

pérature moyenne de 600°, l'autre maintenue par le contact de l'eau à la température de 100°, a laissé passer, en une heure, 20×550 unités de chaleur, nécessaires pour transformer 20 k. d'eau à 100° en 20 k. de vapeur. En d'autres termes, nous dirons que 1^{m. q.} de tôle de fer, de 10^{mm} d'épaisseur, laisse passer en une heure 13,000 unités de chaleur, pour une différence de 500° entre les températures auxquelles sont exposées ses deux faces.

Or, l'observation permet d'admettre, comme approximativement vraie, cette loi que la quantité de chaleur transmise par une plaque à faces parallèles est proportionnelle à la surface de cette plaque, à la différence de température de ses deux faces, et inversement proportionnelle à son épaisseur.

Donc, du résultat précédent nous concluons que 1^{m. q.} de fer, n'ayant que 1^{mm} d'épaisseur et dont les faces auraient des températures différentes entre elles de 1° seulement, laisserait passer en une heure :

$$\frac{13000}{500} \times 10, \text{ ou } 260 \text{ unités de chaleur,}$$

et en une seconde : $\frac{260}{3600}$, ou 0,08 à peu près.

Ce chiffre 0,08 mesurerait la conductibilité du fer en définissant celle-ci : la quantité de chaleur qui traverse en une seconde une plaque de 1^{m. q.} de surface, de 1^{mm} d'épaisseur, et pour chaque degré de différence entre les températures de ces deux faces.

M. Pécelet a déterminé, par des moyens d'expérience plus précis, la conductibilité ainsi définie des différents corps, et il a trouvé pour le fer 8,01 et pour le cuivre 19,16.

Nous venons de trouver pour le fer 0,08, c'est-à-dire une conductibilité cent fois moindre que celle donnée par M. Pécelet. Nous nous sommes appuyés cependant, non pas sur des chiffres de fantaisie, mais sur celui de la vaporisation habituelle des chaudières et sur ceux des températures ordinaires du foyer et des carneaux. Comment donc expliquer que les expériences pratiques journalières donnent un résultat cent fois moindre que celui des expériences théoriques? Une réflexion simple nous fera connaître l'erreur commise dans notre calcul pratique ; nous

avons supposé que les deux faces de la tôle avaient, d'un côté, la température moyenne 600° de la flamme et de la fumée, de l'autre, la température 100° de l'eau bouillant sous une atmosphère de pression; or, s'il en était ainsi, si seulement la face extérieure de la chaudière avait toujours la température à laquelle elle est exposée, nous verrions cette face chauffée au rouge vif dans le foyer et bientôt détruite. Mais sa température n'atteint même pas (sauf dans le cas de mauvaise disposition) celle du rouge naissant, qui est d'environ 525°, et cela malgré le contact permanent de l'air chauffé à 1200° au moins. C'est que les parois des chaudières sont assez minces et leurs substances assez conductrices pour que la chaleur n'ait, en quelque sorte, pas le temps de s'arrêter à la surface. Le phénomène, en apparence très-simple, est en réalité assez complexe. On doit considérer trois échanges de chaleur: 1° l'air, au contact de la tôle moins chaude que lui, cède une partie de sa chaleur à la face extérieure de la chaudière; 2° cette chaleur passe à travers le métal jusqu'à sa face intérieure; 3° elle passe de cette face intérieure à l'eau qui est en contact avec elle; il s'établit ce que l'on appelle un *équilibre mobile de température*, lorsque la chaleur cédée par l'air à la face extérieure est égale à la chaleur cédée par cette face à la face intérieure, et à celle qui est cédée par cette face intérieure à l'eau. On voit par là que la conductibilité du métal ne constitue, pour ainsi dire, qu'un tiers des conditions du phénomène; on doit considérer en même temps, d'un côté, ce que nous appellerons la *conductibilité de l'air à la tôle*, c'est-à-dire la facilité avec laquelle l'air peut céder sa chaleur à la tôle, et, de l'autre, la *conductibilité de la tôle à l'eau*, ou la facilité de transmission de la chaleur de la tôle à l'eau. Et comme ce que nous appellerons, pour compléter l'analyse, la *conductibilité de la tôle à la tôle*, c'est-à-dire la conductibilité propre du métal et toujours très-supérieure aux conductibilités précédentes, il n'est pas étonnant que ses effets soient atténués considérablement lorsqu'ils doivent dépendre de celles-ci. En termes plus simples, si les tôles des chaudières ne transmettent pas plus de chaleur, c'est qu'elles ne peuvent transmettre que ce qu'elles reçoivent et ce dont elles peuvent se débarrasser.

Cette analyse, d'un phénomène assez complexe, est forcément imparfaite (1). Cependant on peut en tirer de très-importantes conséquences, que nous allons développer.

(1) Le calcul permet d'analyser d'une manière assez complète le passage de la chaleur à travers les chaudières.

Soient :

Q la quantité de chaleur qui passe en 1'' à travers un mètre carré d'une chaudière d'épaisseur e ;

K la conductibilité intérieure de la tôle ;

u la température de la face extérieure de la chaudière ;

v la température de la face intérieure en contact avec l'eau ;

On aura, d'après la loi approchée de la conductibilité des métaux ,

$$Q = K \frac{u - v}{e}.$$

Appelons h la conductibilité extérieure de la tôle en contact avec l'eau, c'est-à-dire la quantité de chaleur que 1 m. q. de tôle cède en 1'' à l'eau pour chaque degré de différence entre la température de la tôle et celle de l'eau ; de sorte que, t étant la température de l'eau, $h(v - t)$ sera la chaleur communiquée à l'eau en 1'' par 1 m. q. de tôle. Quand l'équilibre mobile des températures sera établi, quand celles-ci auront atteint des valeurs constantes, on devra avoir :

$$K \frac{u - v}{e} = h(v - t).$$

De même, si nous supposons que la chaleur abandonnée par l'air à la température T , au contact de la face extérieure de la tôle dont la température est u , soit proportionnelle à la différence $T - u$ de ces températures, et si nous désignons par m la quantité de chaleur abandonnée par l'air en 1'', par mètre carré de surface de chauffe et par chaque degré de différence de température, nous devons avoir aussi :

$$m(T - u) = K \frac{u - v}{e} = h(v - t) \quad (a).$$

Ce système d'équations exprime que lorsque l'équilibre des températures est établi, la quantité de chaleur cédée en 1'' à 1 m. q. de tôle est égale à la quantité de chaleur qui traverse en 1'' ce mètre carré, et à celle que cette même surface cède dans le même temps à l'eau.

Les quantités m , K , h , sont ce que nous avons appelé dans le texte : la

La conductibilité de la chaleur de l'air à face extérieure de la tôle et celle de la face intérieure de la tôle à l'eau sont à peu près indépendantes de la nature de cette tôle. En effet, la face extérieure des chaudières est toujours couverte d'une couche de charbon, ou d'autres substances en poussière, et la face intérieure d'une couche plus ou moins épaisse d'incrustation. Dès lors peu importe qu'il y ait sous ces couches du cuivre ou du fer; il ne passera toujours à travers la tôle que la chaleur cédée par

conductibilité de l'air à la tôle, de la tôle à elle-même, et de la tôle à l'eau.

Des équations (a) on peut tirer :

$$u = \frac{K h t + m (K + h e) T}{K h + m (K + h e)},$$

et $v = \frac{K m T + h (K + m e) t}{K m + h (K + m e)},$

formules qui donnent les températures des deux faces de la tôle correspondantes à des températures données de l'air et de l'eau.

En soustrayant, on trouve :

$$u - v = \frac{m h (T - t) e}{K h + m (K + h e)},$$

d'où l'on tire :

$$Q = K \frac{u - v}{e} = \frac{K m h (T - t)}{K h + m K + m h e}.$$

On voit par cette expression que la quantité de chaleur qui traverse en l'' les parois d'une chaudière est à peu près indépendante de l'épaisseur de la tôle, ce que l'expérience confirme.

On voit, en outre, que cette quantité de chaleur est proportionnelle à la différence de température de l'air et de l'eau, de sorte que l'on peut poser

$$Q = K' (T - t),$$

K' étant en quelque sorte un coefficient de conductibilité complexe.

Les expériences connues ne permettent pas de déterminer d'une manière tant soit peu précise les coefficients m, k, K , dont les valeurs varient d'ailleurs considérablement, particulièrement à cause des changements d'état des surfaces intérieures et extérieures des chaudières. Il est seulement permis de conclure des vagues données que l'on possède, que les quantités m et h sont en général très-petites par rapport à K .

l'air à la croûte extérieure et celle que la croûte intérieure cède à l'eau. La conductibilité du métal, que ce soit du fer ou du cuivre, sera toujours suffisante, je le répète, pour transmettre la chaleur qu'il reçoit. Ainsi donc, au point de vue de la facilité de transmission de la chaleur du combustible à l'eau, et par conséquent de l'économie de combustible, le choix du métal de la chaudière est fort peu important.

Des considérations identiques nous font reconnaître ce fait constaté par l'observation, que l'épaisseur des chaudières n'influe que très-peu sur la production de vapeur. Il faudrait, en effet, que l'épaisseur du métal fût bien grande pour que la chaleur mît plus de temps à le traverser qu'à passer de l'air à la face extérieure ou de la face intérieure à l'eau. On conçoit d'ailleurs qu'à mesure que l'épaisseur augmente, la température de la face extérieure doit s'élever; or, d'après le principe énoncé plus haut, la quantité de chaleur qui passe à travers une plaque est d'autant plus grande que la différence des températures des deux faces est plus forte; donc, dans le cas actuel, il s'établit une compensation: la quantité de chaleur qui passe à travers la tôle tend à diminuer par l'augmentation de l'épaisseur, mais en même temps à augmenter par l'élévation de la température de la face extérieure, la face intérieure en contact avec l'eau ne s'échauffant pas autant.

C'est pour éviter l'élévation de température et, par suite, l'altération des tôles que les règlements relatifs aux chaudières à vapeurs prescrivent un *maximum* d'épaisseur qu'il n'est point permis de dépasser. Ce *maximum*, fixé à 14^{mm}, est peut-être une limite trop rapprochée; du moins le calcul indique que l'accroissement de température de la tôle dû à une semblable épaisseur est peu considérable.

Si la nature et l'épaisseur des tôles ont peu d'influence sur la production de vapeur, il n'en est pas de même de l'état des faces de la chaudière. L'état de la face extérieure est peu important. En effet, cette face, en contact seulement avec la flamme et la fumée, ne peut se couvrir que de noir de fumée dont l'action doit être plus utile que nuisible; car l'on sait que le noir de fumée est de tous les corps celui qui absorbe le mieux

la chaleur. La couche de noir de fumée qui se dépose sur les chaudières et se renouvelle sans cesse ne peut donc que faciliter le passage de la chaleur de l'air à la tôle, tout en défendant plus ou moins celle-ci contre l'oxydation.

Mais il en est tout autrement de l'état de la face intérieure des chaudières; celle-ci est toujours plus ou moins recouverte d'une couche d'incrustation qui ne peut que nuire sous tous les rapports.

Cette couche, formée de substances terreuses qui conduisent mal la chaleur, s'oppose, d'autant plus fortement qu'elle est plus épaisse, à la transmission de la chaleur de la tôle à l'eau. Elle agit beaucoup plus énergiquement que ne pourrait le faire une augmentation de l'épaisseur de la chaudière aussi bien pour empêcher le passage de la chaleur du combustible à l'eau que pour porter à un degré trop élevé la température de la face extérieure. En effet, non-seulement la conductibilité intérieure de cette croûte est 10, 20 ou 50 fois moindre que celle de la tôle, de sorte que 1^{mm} de son épaisseur équivaut, pour la résistance au passage de la chaleur, à 10, 20 ou 50^{mm} d'épaisseur de tôle; mais, en outre, la conductibilité extérieure de cette croûte est encore beaucoup moindre que celle de la tôle, de façon que la chaleur, après avoir éprouvé beaucoup de peine à la traverser, en éprouve encore pour passer de sa surface à l'eau qui est en contact avec elle.

On comprend par là pourquoi les incrustations sont des causes puissantes d'explosions et en même temps d'excès de consommation. A mesure que la négligence du chauffeur laisse leur épaisseur s'accroître, la production de vapeur tend à se ralentir; le chauffeur augmente l'activité de son feu; ce n'est bientôt plus qu'à force de combustible sans cesse renouvelé et sans cesse tisonné, qu'il obtient la quantité de vapeur nécessaire. Sous l'action de ce feu violent, dont la chaleur ne peut assez rapidement passer jusqu'à l'eau, la tôle rougit, s'oxyde, et sa résistance diminue rapidement.

Je suis loin de croire aux brillantes promesses d'économie faites par les innombrables inventeurs des procédés propres à empêcher les incrustations; mais il ne me paraît pas douteux

que l'incrustation des chaudières arrivée à un certain degré doit être une cause très-active d'excès de consommation, et par conséquent que l'on doit réaliser une économie considérable de combustible en ne permettant jamais aux incrustations d'arriver à une certaine épaisseur. En même temps, on assurera par là la durée d'une chaudière. Nous examinerons plus tard d'autres effets des incrustations, et les moyens les plus efficaces de les combattre.

23. DE L'ÉPAISSEUR DES CHAUDIÈRES. — Les règlements relatifs aux chaudières à vapeur prescrivent de leur donner des épaisseurs déterminées d'après leurs diamètres et les pressions qu'elles doivent supporter. Ces épaisseurs sont calculées, pour le cas le plus fréquent, celui des chaudières cylindriques, d'après une formule donnée dans ces règlements et dont la forme a été indiquée par des considérations théoriques (1).

(1) On peut déterminer l'effort qui tend à rompre une chaudière cylindrique suivant une génératrice, en considérant une bande d'épaisseur donnée, 1 centimètre par exemple. L'effort qui tend à rompre cette bande en un point est égal à la somme des composantes parallèles à la tangente en ce point, de toutes les pressions que la vapeur exerce sur les éléments de cette bande; on reconnaît sans peine que cette somme se réduit à

$$(n - 1) \times 4^k,055 \times D,$$

n étant le nombre d'atmosphères de la pression de la vapeur dans la chaudière, et D le diamètre de celle-ci évalué en centimètres.

En appelant r la résistance à la rupture d'une tige de fer de 1 c. q. de section, résistance évaluée en kilogrammes, et e l'épaisseur de la chaudière en centimètres, re sera la résistance à la rupture de la bande considérée, et on devra avoir :

$$2 re = (n - 1) \times 4^k,055 \times D.$$

D'où

$$e = \frac{4^k,055 (n - 1) D}{2r}.$$

La plus petite valeur théorique de r est ~~660~~ ⁶⁶⁰ k ; en pratique on prend $1\frac{1}{2}$

Cette formule peut se traduire par la règle suivante : l'épaisseur d'une chaudière doit être égale à 3 millimètres, plus $1^{\text{mm}},8$ multiplié par le diamètre mesuré en mètres et par la plus forte pression effective (pression de la vapeur diminuée de celle de l'air) que la chaudière doit supporter, mesurée en atmosphères,

ou ~~276~~; donc on peut poser,

$$e = \frac{1,055}{330} (n - 1) D = 0,0018 (n - 1) D.$$

Si D est exprimé en mètres et e en millimètres, on devra poser :

$$e = 1^{\text{mm}},8 (n - 1) D.$$

Mais on doit ajouter à cette valeur calculée, en ne tenant compte que de la pression de la vapeur, un terme correspondant à la résistance que la chaudière doit offrir contre les autres causes qui tendent à la déformer, ne fût-ce que contre son propre poids; on a admis pour cela le terme constant 5^{mm} , de sorte que la formule prescrite par les ordonnances est

$$e = 1^{\text{mm}},8 (n - 1) D + 5^{\text{mm}}.$$

D étant exprimé en mètres.

Ou tire de cette formule :

$$n - 1 = \frac{e - 5}{1,8 \times D}.$$

Ce qui donne le nombre d'atmosphères effectives, que la pression de la vapeur dans une chaudière de diamètre et d'épaisseur donnés ne doit pas dépasser.

Les ordonnances exigent que l'épaisseur des chaudières soit inférieure à 13^{mm} , en posant :

$$14^{\text{mm}} = 1^{\text{mm}},8 (n - 1) D + 5^{\text{mm}},$$

on trouve :

$$D = \frac{6,11}{n - 1},$$

pour la valeur du diamètre maximum d'une chaudière dans laquelle la vapeur peut avoir une tension de n atmosphères, et

$$n - 1 = \frac{6,11}{D},$$

pour le nombre maximum d'atmosphères effectives auquel il est permis d'élever la pression de la vapeur dans une chaudière de diamètre D .

Au reste, les ordonnances donnent une table dans laquelle sont calculées les épaisseurs pour les diamètres et les pressions les plus usités. Voici cette table :

DIAMÈTRE DES CHAUDIÈRES.	TENSION DE LA VAPEUR DANS LA CHAUDIÈRE.							OBSERVATIONS
	2	3	4	5	6	7	8	
	ATM.	ATM.	ATM.	ATM.	ATM.	ATM.	ATM.	
mètres.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	
0,50	5,9	4,8	5,7	6,6	7,5	8,4	9,5	L'épaisseur à donner aux parois des chaudières cylindriques est exprimée par la formule : $E = d(n - 1) / 1,8 + 5.$ E, étant l'épaisseur exprimée en millimètres; d, étant le diamètre de la chaudière, exprimée en mètres; n, la tension de la vapeur exprimée en atmosphères.
0,55	4,0	5,0	6,0	7,0	7,9	8,9	9,9	
0,60	4,1	5,2	6,2	7,3	8,5	9,5	10,6	
0,65	4,2	5,5	6,3	7,7	8,8	10,0	11,2	
0,70	4,5	5,5	6,8	8,0	9,5	10,6	11,8	
0,75	4,5	5,7	7,0	8,4	9,7	11,1	12,4	
0,80	4,4	5,9	7,5	8,8	10,2	11,6	15,1	
0,85	4,5	6,1	7,6	9,1	10,6	12,2	15,7	
0,90	4,6	6,2	7,9	9,5	11,1	12,7	»	
0,95	4,7	6,4	8,1	9,8	11,5	13,3	»	
1,00	4,8	6,6	8,4	10,2	12,0	15,8	»	
1,05	4,9	6,8	8,7	10,6	12,4	»	»	
1,10	5,0	7,0	8,9	10,9	17,9	»	»	
1,15	5,1	7,1	9,2	11,5	15,5	»	»	
1,20	5,2	7,5	9,5	11,6	15,8	»	»	
1,25	5,2	7,5	9,7	12,0	»	»	»	
1,50	5,5	7,7	10,0	12,4	»	»	»	
1,55	5,4	7,9	10,5	12,7	»	»	»	
1,40	5,5	8,0	10,6	15,1	»	»	»	
1,45	5,6	8,2	10,8	15,4	»	»	»	
1,50	5,7	8,4	11,1	15,8	»	»	»	
1,55	5,8	8,6	11,4	»	»	»	»	
1,60	5,9	8,8	11,6	»	»	»	»	
1,65	6,0	8,9	11,9	»	»	»	»	
1,70	6,1	9,1	12,2	»	»	»	»	
1,75	6,1	9,5	12,4	»	»	»	»	
1,80	6,2	9,5	12,7	»	»	»	»	
1,85	6,5	9,7	15,0	»	»	»	»	
1,90	6,4	9,8	15,5	»	»	»	»	
1,95	6,5	10,0	15,5	»	»	»	»	
2,00	6,6	10,2	15,8	»	»	»	»	

On remarquera que les colonnes de cette table ne sont pas toutes remplies et que l'épaisseur n'atteint jamais 14^{mm}. C'est que les règlements s'opposent à ce que l'on donne cette épaisseur

aux chaudières. Si, en raison du diamètre projeté ou de la tension de la vapeur, une épaisseur plus forte était nécessaire, on devrait, au lieu d'une seule chaudière, en établir plusieurs de diamètres plus petits.

Nous avons déjà mentionné la cause de cette mesure et déclaré que nous la trouvons trop restrictive. Nous croyons en effet, d'après des calculs qui ne sont pas assez précis pour être exposés ici, qu'une augmentation de 5,10 et même 15 millimètres dans l'épaisseur ne produit qu'une très-faible élévation de la température extérieure. On doit bien remarquer toutefois que dans les lignes de rivets, souvent exposées au feu, l'épaisseur est double et atteint souvent 20 et 25 millimètres. Si donc il était permis de donner aux tôles des chaudières une épaisseur de 20 à 25^{mm}, on pourrait avoir dans des points fortement chauffés des épaisseurs de 40 à 50^{mm}, ce qui ne serait certainement pas sans danger. Mais, dans les cas où ne se présenteraient point de doubles épaisseurs, il y aurait peu d'inconvénient à permettre une épaisseur de tôle de 20 à 25^{mm}. Du reste, dans les cas exceptionnels, on accorde, en Belgique et en France au moins, beaucoup de latitude dans ce sens aux constructeurs.

On doit bien remarquer, d'ailleurs, que l'on a rarement intérêt à augmenter l'épaisseur d'une chaudière. En effet, les dimensions des chaudières se calculent particulièrement d'après la surface de chauffe que l'on veut obtenir; celle-ci peut être augmentée de deux manières, soit en augmentant le diamètre, soit en augmentant la longueur. On peut augmenter la longueur sans augmenter l'épaisseur, tandis que l'on ne peut employer un diamètre plus grand sans donner une épaisseur plus grande. De là il résulte qu'à égalité de surface de chauffe, une chaudière de grand diamètre pèse beaucoup plus, et par conséquent coûte beaucoup plus cher qu'une chaudière de grande longueur.

Prenons comme exemple une chaudière cylindrique simple devant avoir 15 mètres carrés de surface de chauffe. En supposant, conformément aux règles ordinaires de la pratique, que la moitié de la surface cylindrique est surface de chauffe, on obtiendra les 15 mètres carrés voulus, soit en donnant un diamètre de 1^m et d'une longueur d'environ 9^m,50, ou un diamètre

de 1^m,50 et une longueur de 6^m,30. Or, dans le premier cas, l'épaisseur calculée pour une pression de 4 atmosphères effectives sera $3^{\text{mm}} + 1,8 \times 4 \times 1$ ou 10^{mm},2, soit 10^{mm} 1/2 et dans le second $3^{\text{mm}} + 1^{\text{mm}},8 \times 4 \times 1,50$ ou 13^{mm},8, soit 14^m. Ainsi nous aurons dans le premier cas pour le corps de la chaudière 30 mètres carrés de tôles de 10^{mm} 1/2 d'épaisseur, pesant environ 2,500 k., et dans le second 30 mètres carrés de tôles de 14^{mm}, pesant environ 3,300 k. Il y aura donc une différence de 800 k. En se basant sur le prix modéré des constructeurs belges, 50 fr. les 100 kil., on arrive à une différence de prix de 400 fr. On voit donc que chaque fois que les dispositions locales permettront de donner aux chaudières une longueur suffisante, il y aura intérêt à diminuer le diamètre. Nous examinerons bientôt cette question sous d'autres points de vue, et nous verrons qu'il est rarement nécessaire de donner aux chaudières le plus grand diamètre et par conséquent la plus grande épaisseur possible.

Cependant la première donnée qu'il est bon d'établir, lorsque l'on fait le projet d'une chaudière, est le diamètre limite, correspondant à la pression sous laquelle elle doit marcher. Il suffit pour cela de diviser le nombre 11 par le nombre d'atmosphères donné; le quotient est le diamètre exprimé en mètres.

On voit ensuite de combien on peut réduire le diamètre.

Les règlements belges permettent de s'écarter de la règle que nous avons donnée pour calculer les épaisseurs des chaudières, lorsqu'il s'agit de parois non chauffées; ainsi pour les parties extérieures des chaudières tubulaires (1) qui ne sont pas chauffées

(1) La formule prescrite par les ordonnances belges pour les épaisseurs des tôles extérieures non chauffées des chaudières tubulaires est :

$$e = 2^{\text{mm}} + 1,5 (n - 1) D.$$

Son application a été étendue récemment aux chaudières à foyer intérieur dont le diamètre est assez grand pour qu'il y ait toujours au moins 6^m,25 d'eau au-dessus des foyers, et dont la longueur égale au moins quatre fois celle de la grille, de façon à ce que la fumée soit suffisamment refroidie quand elle vient chauffer la surface extérieure de la chaudière.

Pour les tôles extérieures des locomotives on admet la formule réduite :

$$e = 2^{\text{mm}} + 1,2 (n - 1) D.$$

fées du tout, ou même pour celles des grandes chaudières à foyers intérieurs qui ne sont que faiblement chauffées, il suffit de prendre pour épaisseur 2^{mm} plus le produit de $1^{\text{mm}},5$ par le nombre d'atmosphères effectives et par le diamètre exprimé en mètres. Pour les chaudières de locomotives qui sont généralement l'objet de soins particuliers et d'une surveillance assidue, on peut se contenter de donner aux tôles extérieures une épaisseur égale aux $2/3$ de celle que donnerait la table précédente. En Allemagne les règlements indiquaient différentes formules pour calculer les épaisseurs des tôles selon qu'elles étaient pressées de dehors en dedans ou de dedans en dehors. Dans ce dernier cas qui est celui que considèrent seuls les règlements belges, l'ordonnance prussienne prescrivait des épaisseurs moindres que celles qui nous sont imposées aujourd'hui. On est allé plus loin en Prusse, en supprimant tout règlement et laissant à chaque constructeur la responsabilité de son œuvre. Toutefois l'épreuve des chaudières reste exigée. Ce système est suivi en Angleterre depuis longtemps. Il serait certainement bon s'il n'y avait lieu de craindre que la concurrence des chaudières se vendant par force de cheval, et non au poids, amène une réduction considérable des épaisseurs. Les acheteurs peuvent d'ailleurs se prémunir contre ce danger en exigeant des épaisseurs déterminées.

24. ÉPREUVE D'UNE CHAUDIÈRE. — Toute chaudière avant d'être installée doit avoir été éprouvée. L'ingénieur, chargé de cette épreuve par le gouvernement, commence par s'assurer si l'épaisseur de la tôle est au moins égale à celles que les ordonnances exigent, en raison des diamètres des différentes parties de la chaudière et de la tension que la vapeur doit y acquérir. A cet effet, il mesure l'épaisseur, soit sur le bord des feuilles assemblées à recouvrement, soit sur les bords des ouvertures percées dans la chaudière, pour recevoir des tuyaux ou d'autres pièces. Si l'épaisseur est suffisante, il ne reste qu'à essayer la chaudière, pour reconnaître s'il n'existe pas quelque défaut, soit dans les tôles, soit dans la construction, qui la rende incapable de supporter la pression sous laquelle on veut qu'elle

puisse marcher au besoin. Les ordonnances exigent que les chaudières des machines fixes soient essayées sous une pression égale à une fois et demie celle pour laquelle elles sont construites.

Nous nous bornerons pour le moment à donner une idée de cette épreuve, nous réservant d'en parler avec plus de détails lorsque nous connaîtrons mieux les différents systèmes de chaudières auxquelles elle peut s'appliquer. On commence par remplir la chaudière d'eau, puis on la ferme hermétiquement, et, au moyen d'une pompe foulante, on introduit successivement de nouvelles quantités d'eau, jusqu'à ce que l'on voie se soulever une soupape chargée de poids déterminés.

En 1852, le gouvernement français a prescrit, avec beaucoup de raison, l'emploi d'un manomètre dans les essais des chaudières à vapeur. Le manomètre indique, en effet, avec beaucoup plus de sûreté que les soupapes, non-seulement, comme celles-ci, la pression maxima, mais encore toutes les pressions successivement produites, et sous lesquelles peuvent se manifester soit des ruptures, soit des fuites.

Lorsque l'épreuve est jugée satisfaisante, l'ingénieur *timbre* la chaudière, c'est-à-dire fixe, en un point visible, une petite plaque de cuivre portant un numéro, qui est le nombre d'atmosphères effectives auquel il est permis de porter la pression de la vapeur. Cette plaque est attachée avec des vis dont on lime ensuite la tête, de façon à ce qu'il soit difficile de les ôter pour changer la plaque. C'est le *timbre* de la chaudière.

Dans le cas où l'épaisseur de la chaudière serait moindre que celle qui correspond à la pression maxima pour laquelle elle a été construite, on détermine la pression sous laquelle il sera permis de la faire marcher : il suffit, pour cela, de diviser, par le diamètre en mètres, l'épaisseur mesurée en millimètres et diminuée de 3^{mm}. Le résultat est le nombre d'atmosphères effectives que pourra atteindre la pression de la vapeur. On essayera et on timbrera la chaudière pour cette pression.

25. CONSTRUCTION DES CHAUDIÈRES. — Nous dirons quelques mots seulement de la construction des chaudières, et particulièrement des chaudières ordinaires en tôle de fer.

Les tôles dont on fait les chaudières doivent être de très-bonne qualité ; la plupart des constructeurs affirment qu'ils emploient de la tôle au bois pour les fonds et les parties directement exposées au feu ; mais cette tôle au bois n'est le plus souvent que de la bonne tôle n° 4, dont on peut, du reste, se contenter.

Les tôles sont cintrées et embouties à chaud, puis réunies au moyen de rivets, qui ne sont rien d'autre que des clous ronds dont on écrase la pointe pour en former une tête. Les rivets se placent chauffés jusqu'au blanc naissant ; en se refroidissant, ils se contractent et rapprochent fortement les tôles. On leur donne ordinairement un diamètre égal à la somme des épaisseurs des feuilles qu'ils doivent assembler, et on les place à des distances égales au double de leur diamètre. Les têtes ont en général une section double des corps.

Les rivures sont à un rang et plus rarement à deux rangs. Elles se font à la main ou à la machine. La rivure à la main s'exécute au marteau ou à la boutrolle, qui est un étampe interposée entre la tête du rivet et le marteau. La rivure à la machine donne des résultats moins certains ; elle se pratique cependant avec succès chez quelques grands constructeurs.

26. DES DIMENSIONS DES CHAUDIÈRES. — On détermine ordinairement les dimensions des chaudières d'après la surface de chauffe que l'on veut obtenir. Cependant il est d'autres éléments très-importants à considérer, savoir : les grandeurs de la *chambre d'eau* et de la *chambre de vapeur*, c'est-à-dire des espaces laissés à l'eau et à la vapeur. En effet, il y a de grands inconvénients à faire ces espaces trop petits. Lorsque la chambre d'eau est trop petite, la consommation de vapeur fait baisser rapidement le niveau, et l'inattention du chauffeur peut amener de graves accidents. En outre, l'introduction de l'eau d'alimentation, surtout si l'on alimente avec de l'eau froide, fait sensiblement baisser la température et, par suite, la pression de la vapeur ; non pas, comme le disent de bons auteurs, parce que l'on doit faire jouer davantage les pompes alimentaires, car celles-ci ne doivent toujours fournir que la masse d'eau équivalente à la

masse de vapeur consommée, ce qui ne dépend pas de la chaudière; mais il est clair que l'addition d'une même masse d'eau froide doit refroidir une masse d'eau chaude, d'autant plus fortement que celle-ci est plus petite. Or, ce refroidissement de l'eau de la chaudière est sérieusement nuisible, parce qu'un abaissement de quelques degrés dans la température de l'eau et, par suite, de la vapeur, produit un abaissement notable de la pression. Ainsi, par exemple, la vapeur d'eau à 152° possède une pression de 5 atmosphères; à 148° cette pression n'est plus que 4 1/2 atmosphères; de sorte qu'un abaissement de température de 4° sur 152° produit une diminution de pression de 1/2 atmosphère sur 5.

Or, supposons une machine de 20 chevaux consommant 400 k. de vapeur, et par conséquent 400 litres d'eau par heure. Supposons que l'eau d'alimentation soit de l'eau de condensation à 30°, et que la chaudière contienne 2,000 litres d'eau à 152°. la vapeur ayant 5 atmosphères. Admettons que l'on ne reste pas plus d'un quart-d'heure sans alimenter, de façon à ce que l'on n'ait à restituer à la chaudière que 100 litres d'eau, que la pompe fournira en quelques minutes. Nous aurons donc un mélange de 100 litres d'eau à 30° avec 1,900 litres à 152°, reconstituant la masse primitive des 2,000 litres, dont la température peut se déterminer facilement par un simple calcul de partage. En effet, les 1,900 litres d'eau à 152° apportent, à la masse de 2,000 litres, une quantité de chaleur de 1,900 × 152 ou 288,800 calories; les 100 litres à 30° apportent 100 × 30 ou 3,000 calories; donc on a en tout 288,800 + 3,000 ou 291,800 unités de chaleur à partager entre 2,000 litres d'eau; la température de la masse totale sera donc de $\frac{291,800}{2,000}$ ou 146° à peu près; la pression de la vapeur correspondante à cette température est de 4 1/4 atmosphères, tandis que celle qui correspond à 152° est 5 atmosphères. Donc, l'introduction des 100 litres à 30° fera baisser la pression de 3/4 d'atmosphère, ce qui est énorme.

Si la chambre d'eau contient 4,000 litres, la température qui résultera du remplacement de 100 litres à 152° par 100 litres à 30° sera :

$$\frac{3,900 \times 152 + 30 \times 100}{4,000} = 149^{\circ};$$

la pression correspondante est à peu près $4 \frac{3}{5}$ atmosphères, de sorte que la perte de la pression ne serait que $\frac{2}{5}$ d'atmosphère au lieu de $\frac{3}{4}$.

Ce calcul n'est pas rigoureux, parce que nous n'avons pas tenu compte de la chaleur transmise par le foyer pendant le temps de l'alimentation, et cette quantité est considérable. En effet, d'après les proportions ordinaires des pompes alimentaires, l'introduction des 100 litres dans le cas actuel demandera à peu près 5 minutes. Si la chaudière vaporise 400 litres à l'heure, elle en vaporisera $400 \times \frac{5}{60} = 33,3$ en une minute, ce qui correspond à une quantité de chaleur transmise égale à $33,3 (650 - 38) = 20,646$ calories, l'eau d'alimentation étant toujours à 30° . Mais on aurait tort de croire que cette quantité de chaleur doit être apportée, comme appoint du foyer, dans le total dont nous avons déduit la température du mélange; car cette quantité de chaleur se dépense presque entièrement à produire la vapeur que la machine continue à absorber pendant l'alimentation. Autrement la pression baisserait par suite de la diminution de la masse de la vapeur, au lieu de baisser par l'abaissement de température de l'eau. En réalité, les échanges de chaleur qui se produisent pendant l'alimentation constituent un phénomène très-complexe que nous ne pourrions analyser ici; mais la partie que nous en avons détachée, savoir l'échange de chaleur entre l'eau froide et l'eau chaude, en est certainement la plus importante, et les résultats que nous en avons déduits ne peuvent qu'approcher très-près de la vérité.

La conséquence pratique immédiate de ces résultats, c'est que l'on doit donner à la chambre d'eau une capacité aussi grande que possible. Il ne me paraît pas qu'il puisse y avoir une limite supérieure à assigner, c'est-à-dire que l'on ne peut pas, suivant moi, faire les chambres d'eau trop grandes, pourvu, bien entendu que ce ne soit pas aux dépens des chambres de vapeur, dont nous parlerons dans un instant. On ne peut pas non plus assigner avec certitude une limite inférieure, parce que les conditions de marche et d'alimentation des chaudières sont trop différentes. Ainsi il est clair que les considérations précédentes perdent beaucoup de leur valeur si l'on suppose que l'eau d'ali-

mentation a été préalablement chauffée, soit par la vapeur de décharge, soit dans des tubes réchauffeurs. Dans ce dernier cas, du reste, la capacité de ces tubes doit compter comme chambre d'eau. Il est clair aussi que le mode d'alimentation doit modifier l'importance des dimensions de la chambre d'eau; si l'on fait fonctionner continuellement une pompe alimentaire, en en tenant une autre en réserve pour ajouter de temps en temps à la première, on pourra obtenir, avec une chambre d'eau restreinte, une température et, par suite, une pression suffisamment constantes.

Dans tous les cas, il sera bon de donner à la chambre d'eau une capacité au moins égale à 8 fois le volume d'eau à dépenser par heure; c'est la proportion adoptée dans la plupart des chaudières de Cornouailles. Dans les chaudières tubulaires de locomotives et de bateaux, cette proportion se réduit souvent à 6 ou 7.

En comptant sur une consommation de 25 litres d'eau par heure et par cheval, ce qui est considérable pour la plupart des machines, la proportion précédente revient à donner à la chambre d'eau une capacité de 8×25 ou 200 litres par cheval, ce que nous croyons généralement suffisant.

La *chambre de vapeur* doit être aussi de grande dimension, afin que la pression n'éprouve pas de brusques variations à chaque cylindrée, c'est-à-dire à chaque absorption du cylindre. Ces variations de pression sont plus nuisibles encore que celles qui proviennent de l'alimentation, parce que celles-ci résultent d'un ralentissement dans l'ébullition de l'eau, tandis que celles-là rendent l'ébullition plus violente. On sait, en effet, que l'eau entre en ébullition lorsque la vapeur qui se forme dans sa masse a acquis une pression égale à celle de l'atmosphère située au-dessus de sa surface. Si l'on refroidit même très-légèrement la masse de l'eau bouillante, sans diminuer la pression de l'atmosphère ambiante, l'ébullition s'arrête jusqu'à ce qu'une source de chaleur quelconque ait rendu à l'eau la température correspondante à cette pression; ainsi chacun peut s'assurer qu'une goutte d'eau froide jetée dans une masse même assez forte d'eau bouillante suffit pour arrêter un instant toute ébullition.

Si, au contraire, l'on diminue la pression de l'atmosphère supérieure sans diminuer la température de l'eau, cette température devenant plus élevée que celle qui correspond à la pression supportée par l'eau, l'ébullition redouble de violence jusqu'à ce que l'extraordinaire dégagement de vapeur qui se produit ait rendu à l'atmosphère supérieure la pression correspondante à la température de l'eau. On conçoit aisément qu'une ébullition désordonnée et tumultueuse doit être très-nuisible; elle a tout au moins pour effet de charger la vapeur d'une quantité considérable d'eau qu'elle entraîne dans les conduits jusqu'aux cylindres, où se produisent alors des chocs quelquefois assez violents pour rompre les fonds des cylindres ou les tiges des pistons, et qui toujours causent de grandes pertes de travail. Nous verrons dans la suite jusqu'où peuvent aller ces pertes de travail; il nous suffira de dire maintenant que c'est là une des causes les plus fréquentes d'une consommation excessive de combustible, et que le meilleur moyen de la combattre est de donner à la chambre de vapeur les plus grandes dimensions possibles. La bonne proportion admise par Watt était de huit à dix fois le volume d'eau à consommer par heure; mais il faut remarquer que ces proportions ont été indiquées par la pratique, spécialement pour les chaudières à basse pression, et qu'elles peuvent être considérablement réduites pour les chaudières à haute pression. En effet, nous avons indiqué comme raison de la nécessité de donner au réservoir de vapeur de grandes dimensions, les variations considérables de pression qui se produiraient dans la chaudière, si ce réservoir n'était pas beaucoup plus grand que le volume de vapeur qui s'absorbe rapidement pendant la durée d'un coup de piston. On comprend que la pratique peut assigner une limite inférieure au rapport qui doit exister entre le volume du réservoir de vapeur et le volume du cylindre; ce rapport devrait dépendre, à la rigueur, de diverses conditions telles que la vitesse du piston, la grandeur des orifices d'échappement, etc.; mais au moins on reconnaît qu'il y a là un rapport bien net, une relation naturelle entre deux quantités semblables. Il n'en est pas de même pour la relation que nous avons indiquée, d'après Watt et tous les bons

autéurs, entre le réservoir de vapeur et le volume d'eau à vaporiser par heure. En effet, le réservoir ainsi calculé devrait contenir des poids de vapeur différents, selon la pression de celle-ci; or, ce sont des poids et non des volumes déterminés qu'une chaudière de force donnée doit fournir en un temps donné; par conséquent, le réservoir de vapeur peut être d'autant plus petit que sous un même volume, la vapeur a plus de poids, c'est-à-dire que la pression de la vapeur est plus élevée.

Ainsi, pour mieux fixer les idées, supposons d'abord qu'une machine à vapeur consomme en général 25^k de vapeur par heure et par cheval, quelle que soit la pression; nous pourrions ensuite modifier nos conclusions en admettant des chiffres de consommations différentes, selon le genre des machines. Le volume de ces 25^k sera

29275	litres,	si la pression est	1,5	atmosphères.
22500	»	»	2	»
15525	»	»	3	»
11925	»	»	4	»
9725	»	»	5	»

Ces volumes ont approximativement entre eux les mêmes rapports que les nombres 1, 3/4, 1/2, 2/5, 1/3. Donc si le réservoir à vapeur doit être proportionné au poids de vapeur qu'il doit contenir et fournir à la machine, on pourra, selon que la pression de la vapeur sera 2, 3, 4 ou 5 atmosphères, se contenter de donner à ce réservoir une capacité égale à 3/4, 1/2, 2/5 ou 1/3 de celle qu'on devrait lui donner pour une pression de 1,5 atmosphère.

Or, les machines de Watt travaillant tout au plus sous cette pression de 1,5 atmosphère, la proportion de dix fois le volume d'eau à consommer par heure admise pour les chaudières alimentant ces machines, pourra être réduite à 7 1/2, 5, 4 et 3 1/3 pour les chaudières marchant sous des pressions de 2, 3, 4 et 5 atmosphères.

Nous pouvons formuler cette règle d'une manière plus simple et qui nous conduira à des données plus générales. Le volume d'eau à consommer par heure et par cheval étant, toujours

d'après la supposition précédente, de 25 litres la capacité de la chambre à vapeur devra être au maximum de 250 litres par cheval pour les chaudières où la vapeur ne possède que 1,5 atmosphère de tension, et d'après les rapports précédents il suffira qu'elle soit de

$3/4 \cdot 250 = 188$ litres par cheval, si la tension est 2 atm.

$1/2 \cdot 250 = 125$ » » » 3 »

$2/3 \cdot 250 = 100$ » » » 4 »

$1/3 \cdot 250 = 83$ » » » 5 »

Nous pourrions maintenant considérer les cas où la machine consomme moins ou plus de 25^k de vapeur par cheval et par heure; mais nous pouvons nous dispenser de cet examen et arriver à des résultats plus généraux et mieux définis en considérant non plus la force d'une chaudière en chevaux, ce qui est, comme nous l'avons déjà remarqué, assez vague, mais, bien l'étendue de la surface de chauffe.

En supposant qu'une chaudière produise en moyenne 20^k de vapeur par mètre carré de surface de chauffe et par heure, nous trouvons que dans l'hypothèse de 25^k de vapeur nécessaires par cheval et par heure, il faut 1^{m.2},25 de surface de chauffe par cheval de force. Donc les capacités de chambre de vapeur données plus haut conviendraient pour 1^{m.2},25 ou 3/4 de mètre carrés de surface de chauffe de la chaudière, et si nous divisons ces capacités par 5/4, nous aurons la capacité à donner au réservoir de vapeur pour 1 mètre carré de surface de chauffe, et qui sera, en l'exprimant maintenant en mètres cubes :

0^{m.c.},200 la tension de la vapeur étant 1 1/2 atm.

0 ,150 » » » 2 »

0 ,100 » » » 3 »

0 ,080 » » » 4 »

0 ,067 » » » 5 »

En d'autres termes, la capacité de la chambre de vapeur exprimée en mètres cubes, devra être environ 1/5, 1/7, 1/10, 1/12 ou 1/15 de la surface de chauffe exprimée en mètres carrés, selon que la tension de la vapeur sous laquelle doit marcher ordinairement la chaudière est 1 1/2, 2, 3, 4 ou 5 atmosphères.

Avec cette règle nous n'avons pas à nous préoccuper du plus ou moins de consommation de vapeur par cheval de force, puisque la surface de chauffe se réglant d'après cette consommation, le réservoir de vapeur variera dans le même rapport.

Nous n'avons même fait intervenir la considération de la force en chevaux, que pour compléter l'examen de la question qui nous occupe; nous eussions pu arriver immédiatement au résultat précédent par le raisonnement suivant: la chambre de vapeur d'une chaudière à basse pression, doit avoir une capacité égale à 10 fois le volume d'eau consommé par heure, donc de 200 litres par mètre carré de surface de chauffe, puisque chaque mètre carré est en général supposé vaporiser 20 litres d'eau. D'ailleurs le volume d'un même poids de vapeur sous des pressions de 2, 3, 4 ou 5 atmosphères, n'étant que $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{5}$, ou $\frac{1}{3}$ du volume sous une pression de 1,5 atmosphères (maximum de tension dans une chaudière à basse pression), nous aurons le même rapport entre le poids de vapeur contenu dans le réservoir et le poids de vapeur fourni par la chaudière en une heure, en donnant à ce réservoir, selon que la tension y est 2, 3, 4, ou 5 atm., une capacité égale à $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{5}$ ou $\frac{1}{3}$ de celle que nous lui donnerions si la tension était seulement de 1,5 atmosphère, donc nous devons lui donner une capacité de $\frac{3}{4} \cdot 200$ ou $0^{m.c.}, 150$ par mètre carré de surface de chauffe, si la pression est 2 atmosphères, $\frac{1}{2} \cdot 200$ ou $0^{m.c.}, 100$ si la pression est de 3 atmosphères, et ainsi de suite, comme nous l'avons énoncé plus haut.

On peut formuler une règle générale approximative en disant que la capacité de la chambre à vapeur doit être par mètre carré de surface de chauffe égale à $0^{m.c.}, 300$ divisé par le nombre d'atmosphères de tension que possède la vapeur dans la chaudière.

Cette règle donne :

Pour 1 $\frac{1}{2}$, — 2, — 3, — 4, — 5 atmosphères.

$0^{m.c.}, 200$ — $0,150$ — $0,100$ — $0,075$ — $0,060$.

au lieu de $0^{m.c.}, 200$ — $0,150$ — $0,100$ — $0,080$ — $0,067$.

Remarquons que cette règle, qui ne doit donner d'ailleurs que des dimensions *minima*, est vérifiée par la pratique en ce sens

que bien des chaudières ont leur chambre de vapeur tout au plus égale à celle que l'on en déduirait sans que pour cela on ait constaté de graves inconvénients; néanmoins nous persistons dans notre opinion que l'on doit faire ces réservoirs aussi grands que possible tant qu'on peut le faire sans inconvénient sérieux, tel que celui d'offrir au refroidissement une trop grande surface, et nous continuerons à considérer comme un mérite de certains systèmes de chaudière celui d'offrir de plus grandes chambres de vapeur.

Sous ce rapport, il est préférable de donner aux chaudières un grand diamètre plutôt qu'une grande longueur; mais nous verrons que l'on peut compenser aisément l'infériorité des chaudières de petits diamètres en les munissant de réservoirs de vapeur.

Il nous reste, pour terminer ces généralités, à dire quelques mots sur la surface de chauffe et particulièrement sur la valeur des différentes surfaces de chauffe. Nous avons déjà dit, § 7, que l'on distinguait la surface de chauffe *directe*, qui est au-dessus du foyer, de la surface de chauffe *indirecte*, qui n'est chauffée que par la flamme et la fumée; il est inutile d'ajouter que la première est bien plus active que la seconde; on conçoit qu'il est difficile de bien préciser les valeurs relatives de ces deux surfaces; on peut en juger cependant par les chiffres suivants. On a trouvé, avec des chaudières de fonte et de cuivre, qu'un mètre carré en plein feu produit 100 kil. de vapeur par heure. Il en serait certainement à peu près de même avec une chaudière en tôle de fer; car nous avons vu que la nature du métal devait peu influencer sur la production de vapeur. On sait d'ailleurs qu'un mètre carré de surface de chauffe total produit en général de 20 à 30 kil. de vapeur par heure. Si l'on songe que dans cette surface totale il entre toute la surface directe, on doit admettre que la production d'un mètre carré de surface indirecte doit équivaloir tout au plus à $\frac{1}{3}$ de celle d'un mètre carré de surface directe. On comprend donc que l'on gagne peu à augmenter la surface de chauffe indirecte sans la surface directe, c'est-à-dire à augmenter les parties chauffées d'une chaudière sans augmenter la grille. Ainsi une augmentation

d'un mètre dans la longueur de la grille produira en général plus d'effet qu'une augmentation de 5^m dans la longueur de la chaudière.

La disposition de la surface de chauffe exerce certainement une influence sur la vaporisation; mais cette influence est très-difficile à préciser. Au premier abord, on pourrait la croire nulle, admettre que du moment où la paroi extérieure de la tôle est en contact avec un milieu à une température donnée, peu importe la position de la paroi; mais nous avons vu que l'on se tromperait si on raisonnait simplement ainsi: la tôle est en contact extérieurement avec un courant d'air à 1200°, intérieurement avec de l'eau à 150°, donc elle laisse passer une même quantité de chaleur, proportionnelle à 1050, quelle que soit la position de la tôle par rapport au courant d'air. En effet, la première chose à considérer est, avons-nous dit, la transmission de la chaleur de l'air à la tôle, et l'on conçoit que cette transmission doit varier selon la vitesse de l'air et selon la manière dont s'établit le contact de l'air et de la tôle; ainsi l'on comprend que le courant d'air dans un carneau n'a pas la même vitesse en tous les points d'une même section, pas plus que l'eau n'a une même vitesse sur toute la section d'une rivière; il doit y avoir le *fil* du courant d'air comme il y a le fil de l'eau. Que l'on se représente un tube bouilleur, entièrement rempli d'eau, placé tout entier dans un carneau au-dessus du foyer, de manière que toute sa surface puisse être chauffée; il est certain que la flamme n'enveloppera pas complètement le bouilleur, mais passera tout entière par-dessous, et, par suite, que le dessous du bouilleur sera plus fortement chauffé que le dessus. Il y a même des constructeurs qui prétendent que le dessus ne sera que très-peu ou point chauffé; je crois que c'est là une singulière erreur; le dessus du bouilleur, sans être une surface de chauffe aussi active que le dessous, transmettra à l'eau beaucoup de chaleur; car il sera en contact avec de l'air très-chaud et qui sera certainement emporté sans cesse avec le mouvement de la flamme. Je suis donc d'avis que si même l'on doit préférer les surfaces chauffées par le dessous, on ne peut point dédaigner celles qui ne le sont que par le dessus.

On doit encore, avons-nous dit aussi, considérer la transmission de la chaleur de la tôle à l'eau. Cette transmission sera modifiée aussi par la position des parois chauffées, parce qu'au contact de ces parois il se forme continuellement des bulles de vapeur qui, s'interposant entre la paroi et l'eau, empêchent l'échange de chaleur. Sous ce rapport encore une paroi chauffée par le dessus sera moins active qu'une paroi chauffée par le dessous, attendu que les bulles ne pourront l'abandonner aussi rapidement. On diminuerait cette cause de résistance au passage de la chaleur en inclinant légèrement le bouilleur, ce que nous conseillerons souvent dans la suite.

La grandeur à donner aux surfaces de chauffe est un point des plus importants dans l'étude des chaudières. On se base ordinairement, pour la déterminer, sur les données suivantes : un mètre carré de surface de chauffe totale d'une chaudière cylindrique avec ou sans bouilleurs produit en moyenne, avec un feu modéré, 20 kil. de vapeur. D'un autre côté, les machines à vapeur consomment plus ou moins de vapeur selon leur mode de construction; on peut admettre qu'une bonne machine à détente et à condensation consomme 15 à 20 kil. de vapeur par heure et par cheval; une machine sans détente et à condensation 20 à 25 kil.; une machine à détente et sans condensation, 25 à 30 kil.; enfin une machine sans détente et sans condensation, 30 à 35 kil. Donc, on devra donner aux chaudières une surface de chauffe de

0,75 ^{m. q.}	à	1 ^{m. q.}	par cheval pour les machines à détente et à condensation.
1	à	1,25	» » sans détente et à condensation.
1,25	à	1,50	» » à détente sans condensation.
1,50	à	1,75	» » sans détente et sans condensation.

Cependant les constructeurs donnent rarement, même pour les meilleures machines, une surface de 0,75^{m. q.} ou même de 1^{m. q.} par cheval, et en cela ils ont grandement raison. En effet, il est reconnu, et nous avons cité comme preuve les chaudières de Cornouailles, que les grandes surfaces de chauffe sont très-favorables à l'économie du combustible, parce qu'elles permettent de donner à la combustion beaucoup de lenteur et de régularité.

D'ailleurs, si les industriels demandent des machines à détente et à condensation, très-chères et exigeant beaucoup d'entretien, c'est dans le but d'obtenir une faible consommation de combustible.

Dès lors, ils ne doivent pas regarder non plus au surplus de dépense qu'entraîne une grande chaudière, et je crois que l'on se montrerait très-conséquent en admettant, comme proportion uniforme, celle de 1^m.50 par heure et par cheval. En effet, il n'y a pas plus de raison de faire une économie de frais sur la construction de la chaudière que sur la construction de la machine. Pourquoi se contenter d'une chaudière assez bonne, quand on veut une excellente machine? Et l'on doit bien remarquer que cette proportion de 1^m.50 par cheval, supérieure à celles qu'adoptent la plupart des constructeurs, est loin d'être exagérée. En Angleterre, on donne fréquemment 2^m.4 par cheval, et l'on a été jusqu'à 5.

Nous ne parlons évidemment ici que des chaudières ordinaires de machines fixes, il est des systèmes particuliers, tels que celui des chaudières tubulaires, où la surface de chauffe est extrêmement active; on doit nécessairement alors pouvoir la réduire considérablement. Cependant il sera toujours bon de ne pas trop profiter de cet avantage quand on n'y sera pas forcé.

27. DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE CHAUDIÈRES. — On a imaginé un très-grand nombre de systèmes de chaudières; mais on peut les ranger tous dans quelques grandes catégories. Nous mettrons à part la chaudière historique de New-Commen, formée d'une portion de sphère avec un fond plat ou concave : elle n'est plus en usage nulle part.

Il nous reste alors sept types généraux de chaudières :

- 1° Les chaudières cylindriques ;
- 2° Les chaudières cylindriques à tubes bouilleurs ;
- 3° Les chaudières cylindriques à tubes réchauffeurs ;
- 4° Les chaudières à carneaux intérieurs ;
- 5° Les chaudières à foyers intérieurs ;
- 6° Les chaudières à foyers et à carneaux intérieurs ;
- 7° Les chaudières tubulaires, qui ne sont qu'une espèce particulière du genre précédent.

Outre ces systèmes d'un usage répandu, nous en décrirons d'autres essentiellement différents, que la pratique n'a pas encore bien sanctionnés, mais qu'il est intéressant de connaître, parce qu'ils pourraient être utiles dans certains cas spéciaux. Tels sont les générateurs inventés par MM. Belleville, Boutigny et Testud de Beauregard.

28. CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES. — Bien que l'on entende généralement par chaudières cylindriques celles dont la section est un cercle, on peut cependant ranger dans cette catégorie la chaudière *en tombeau* de James Watt, dont la forme n'est autre chose qu'un cylindre, mais à directrice non circulaire. Tout le monde connaît cette chaudière, dont la moitié supérieure est un demi-cylindre prolongé par des flancs concaves, avec un fond également concave. Cette forme ancienne paraît à beaucoup de personnes très-imparfaite, très-arriérée; cependant on aurait tort de la dédaigner; car, au point de vue de l'économie du combustible, elle peut lutter avec beaucoup de nos chaudières d'aujourd'hui. Son défaut le plus sérieux est le peu de résistance qu'elle offre à la pression de la vapeur. En effet, les chaudières à section circulaire, pressées uniformément par la vapeur, ne peuvent que s'élargir uniformément, mais sans changer de forme, comme le ferait un anneau dans lequel on chasserait un mandrin, tandis que les chaudières de Watt, dont la section présente des courbes dans différents sens, peuvent se déformer considérablement, la pression tendant à leur donner une forme circulaire. On ne conservera aucun doute à ce sujet, en se rappelant seulement qu'une vessie dans laquelle on souffle s'arrondit d'autant plus régulièrement que l'on souffle plus fortement.

Cette déformation des chaudières de Watt sous l'action de la vapeur ne permet de les appliquer qu'aux machines à basse pression, qui deviennent de plus en plus rares. On ne pourrait les rendre capables de supporter une forte pression qu'à l'aide d'armatures et de tirants qui en compliqueraient la construction.

Ces chaudières étaient aussi d'un très-grand volume, relativement à leur surface de chauffe, de sorte qu'elles prenaient

beaucoup de place, même pour des forces peu considérables. Il est vrai qu'elles offriraient, en revanche, de grandes capacités à l'eau et à la vapeur.

Les chaudières cylindriques actuellement employées sont à section circulaire. La détermination de leurs dimensions est des plus simples : on ne peut guère compter comme surface de chauffe que la moitié de leur surface cylindrique, c'est-à-dire la moitié de leur contour multipliée par leur longueur. Le contour étant égal au diamètre multiplié par 3,14, on aura donc la surface de chauffe en multipliant le diamètre par la longueur et par $\frac{3,14}{2}$ ou 1,57.

La grandeur du diamètre ne pourra pas, d'après ce que nous avons vu, dépasser une certaine valeur, dépendant de la pression à laquelle la chaudière doit marcher. Ainsi, si la pression maxima est 4 atmosphères effectives, le diamètre ne pourra pas dépasser 1^m,53 ; pour une pression de 5 atmosphères effectives, le diamètre maximum sera 1^m,22.

Mais on fera bien, d'après ce que nous avons vu aussi, de prendre un diamètre moindre pour avoir une chaudière moins épaisse et, par suite, moins pesante et moins chère. On se réglera, pour cela, d'après la longueur que les conditions locales permettent de donner à la chaudière.

Ainsi je suppose que l'on ait à établir une petite chaudière de 5 chevaux et qu'on ne puisse lui donner qu'une longueur de 6^m. Pour avoir, comme nous l'avons conseillé, 1^m,50 de surface de chauffe par cheval, et par conséquent ici 7^m,50 de surface de chauffe, on devra avoir, pour demi-contour de la chaudière, $\frac{7,50}{3,14}$ ou 1^m,25, ce qui correspond à un diamètre de 0^m,800. Ce seraient les dimensions des fig. 1, 2 et 3, pl. 8. L'épaisseur devra être de 9^{mm} pour une pression de 4 atmosphères, de 10^{mm} 1/2 pour une pression de 5 atmosphères.

En prenant un diamètre plus grand et une longueur moindre, on aura une chaudière plus lourde et plus coûteuse. Elle offrirait sans doute l'avantage d'une plus grande capacité pour l'eau et pour la vapeur ; car la section de la chaudière croît comme le carré du diamètre, de sorte que, si pour garder la même surface de chauffe on prend un diamètre double et une longueur moitié,

la section devient 4 fois plus grande, et le volume, égal au produit de cette section par la longueur, se trouve être le double de ce qu'il serait avec un diamètre deux fois plus petit et une longueur deux fois plus grande.

Mais nous reconnâtrons facilement qu'avec les dimensions précédentes, les volumes laissés à la vapeur et à l'eau seront largement suffisants. En effet, l'eau occupera à peu près les $\frac{2}{3}$ de la capacité intérieure de la chaudière et la vapeur l'autre tiers. Cette capacité sera de $3,14 \left(\frac{0^m,800}{2} \right)^2 \times 6^m$ ou environ 3 mètres cubes, dont $2^m.c.$ ou 2,000 litres pour l'eau, et $1^m.c.$ ou 1,000 litres pour la vapeur. On aura ainsi la proportion la plus élevée que nous ayons indiquée pour la chambre de vapeur, avec une proportion double de celle que nous avons conseillée pour la chambre d'eau.

Remarquons maintenant que si l'on double la longueur et, par suite, la surface de chauffe et la puissance de la chaudière, on doublera en même temps la chambre d'eau et la chambre de vapeur, de sorte que, sous ce rapport, le diamètre de $0^m,800$ sera toujours assez grand. Toutefois, ce diamètre deviendra le plus souvent insuffisant à cause de la longueur qu'il exigerait. Ainsi, déjà pour une force de 10 chevaux, il faudrait une longueur de 12^m , ce qui est considérable. Mais, ce que l'on ne doit pas perdre de vue, c'est que c'est là la seule difficulté qui s'oppose à l'emploi du diamètre que nous proposons comme le plus souvent avantageux pour les petites chaudières cylindriques.

Nous pouvons ajouter dès maintenant que nous conseillons d'une manière générale d'appliquer aux chaudières cylindriques, avec ou sans tubes bouilleurs ou réchauffeurs, des *dômes* ou réservoirs de vapeur. Ces dômes produisent à la fois une augmentation de la chambre de vapeur, qui ne peut guère être trop grande, et un éloignement toujours avantageux entre la prise de vapeur et la surface de l'eau.

Nous ne les représentons pas sur nos figures, parce que la position de ces dômes dépend souvent des conditions locales, et que d'ailleurs leurs dimensions sont assez arbitraires.

En général, on doit les faire cylindriques, et on peut leur

donner un diamètre égal aux $\frac{2}{3}$ de celui de la chaudière, et une hauteur égale à leur diamètre.

Ainsi la chaudière des figures 1, 2 et 3 devra être munie d'un dôme de 0^m,540 de diamètre et de hauteur moyenne. La section correspondante à ce diamètre est de plus de 22 décimètres carrés, et le volume du dôme sera d'environ 125 litres, de sorte que le réservoir de vapeur sera de 1,125 litres par 5 chevaux ou 225 litres par cheval, ce qui correspond, d'après les données que nous avons admises, à neuf fois, au lieu de huit fois, le volume d'eau à consommer par heure.

Quant à la position des dômes, nous nous bornerons à dire que, chaque fois qu'on le pourra, on devra les placer à l'arrière de la chaudière, parce que l'ébullition y est moins violente, et que, par suite, l'entraînement de l'eau par la vapeur y est moins à craindre.

Les fourneaux pour les chaudières cylindriques simples peuvent être disposés de différentes manières : 1° sans retour de flamme (fig. 3); 2° avec un retour de flamme (fig. 4); 3° avec deux retours de flamme (fig. 1, 2 et 5). (31, 4)

Il est assez difficile de dire d'une manière positive laquelle de ces dispositions est préférable, lorsque l'on a pris pour chacune d'elles des dimensions convenables. En effet, la question peut se poser ainsi : la moitié de la chaudière pouvant être chauffée, comment doit-on la chauffer? Est-ce en chauffant d'un seul coup toute cette moitié par un courant de flamme et de fumée allant directement à la cheminée, ou bien en chauffant successivement plusieurs parties de cette moitié par un courant de flamme et de fumée faisant un parcours plus long, en se repliant une ou plusieurs fois sur lui-même?

La solution de la question ne serait pas douteuse si, dans les trois cas précédents, on donnait aux carneaux la même section, c'est-à-dire si le carneau unique de la chaudière sans retour de flamme n'était pas plus grand que les deux carneaux de la chaudière à un retour de flamme, et ceux-ci pas plus grands que ceux de la chaudière à deux retours de flamme.

S'il en était ainsi, il est clair que la durée du contact d'une même masse d'air chaud avec les chaudières serait trois fois plus

longue pour le fourneau à deux retours de flamme que pour celui sans retour de flamme, et une fois et demie plus longue que pour celui à deux retours de flamme; car la vitesse de l'air appelé par la cheminée serait la même dans les carneaux, de sorte qu'il faudrait trois fois plus de temps pour en parcourir trois qu'un seul, leurs longueurs étant les mêmes. Encore faisons-nous abstraction de la différence des températures qui règnent dans les carneaux de nos trois chaudières, différence qui augmentera considérablement encore celle des temps employés à les parcourir. Il me suffira de rappeler les considérations que j'ai énoncées § 12.

D'ailleurs il est évident que la chaleur du combustible est d'autant mieux utilisée, qu'elle agit pendant plus longtemps sur la chaudière. Donc, si l'on ne veut pas abrégé la durée de cette action, l'on ne peut réduire le nombre des carneaux qu'à la condition d'augmenter leur section de façon à rendre la vitesse des gaz d'autant plus petite qu'ils ont moins de chemin à parcourir.

Ainsi, si l'on ne construit qu'un carneau, on devra lui donner une section au moins égale à la somme de celles que l'on donnerait à plusieurs carneaux. Cette règle a été observée dans les figures 2, 3 et 4.

Dans la figure 3, le carneau unique a près de 29 décimètres carrés de section.

Dans la figure 2, le carneau sous la chaudière a environ 15 décimètres carrés de section, les deux autres environ 7; la somme des sections est donc de 29^{d. q.}, comme la section du carneau unique précédent.

Dans la figure 4, le carneau sous la chaudière a près de 23^{d. q.} de section, le carneau latéral en a environ 13; la somme est de 35^{d. q.}, donc plus grande que dans les cas précédents. Aussi pourrait-on sans inconvénients réduire les dimensions des deux carneaux, particulièrement du second.

Lorsque les carneaux ont de bonnes proportions semblables à celles que nous avons indiquées, leur nombre ne paraît pas avoir une grande influence. Cependant je préférerais toujours les multiplier, parce qu'il me paraît que, dans un large carneau unique, le courant de flamme doit trop se concentrer dans une

direction unique, et ne remplir qu'imparfaitement tout le carneau; en d'autres termes, le fil du courant d'air, si je puis m'exprimer ainsi, doit être trop prononcé dans un carneau unique allant directement à la cheminée.

Toutefois, cette disposition d'un seul carneau a l'avantage d'être plus simple et d'occuper moins de place. En effet, on peut voir sur nos figures qu'une chaudière avec un fourneau à un seul carneau occupe une largeur de 4^m,820; la même chaudière avec un fourneau à trois carneaux a une largeur de 2^m,220. Cette différence de largeur deviendrait bien plus sensible si l'on voulait placer une chaudière de même diamètre, mais plus longue, pouvant, par exemple, servir à alimenter une machine de 10 chevaux; on sera déjà très-gêné pour donner aux carneaux une section suffisante. Étant limité par la hauteur de l'eau dans la chaudière, on ne pourra gagner que sur la largeur, tandis qu'avec un seul carneau, il suffira d'élargir la grille pour obtenir déjà une augmentation considérable de la section de ce carneau. Ainsi, en donnant 0^m,800 de largeur à la grille au lieu de 0^m,500, on aura déjà 38^d.4 de section au lieu de 29, sans augmenter en rien la largeur du fourneau.

La disposition de la figure 4 permet aussi d'obtenir des sections suffisantes pour les carneaux, sans augmenter beaucoup la largeur du fourneau.

Mais à part cet inconvénient, très-léger dans la plupart des circonstances, je crois qu'il sera préférable d'adopter les fourneaux à deux retours de flamme, comme plus favorable à une bonne distribution de la chaleur.

D'ailleurs les conditions locales doivent influencer sur le choix des dispositions du fourneau. Ainsi il est clair que celles des figures 2 et 3 s'appliquent seulement au cas où la cheminée est à l'arrière du fourneau.

Quand la cheminée sera à l'avant on devra employer la disposition de la figure 3 ou celle de la figure 2, dans laquelle le courant d'air reviendra à la fois par les deux carneaux latéraux, ce qui sera aussi une très-bonne disposition.

Nous avons représenté en coupe transversale et en coupe longitudinale la disposition du fourneau à deux retours de flamme,

parce que c'est celle qui est, en quelque sorte, la plus complète ; une coupe transversale suffisait pour faire comprendre les deux autres. On voit, par les figures 1 et 2, que la flamme, après avoir parcouru le dessous de la chaudière, passe par le canal K dans le premier carneau latéral C, revient à l'avant de la chaudière et passe ensuite dans le second carneau latéral C'. C'est la disposition de la plupart des chaudières à deux retours de flamme.

En résumant les dimensions des différentes parties du fourneau et de la chaudière adoptées dans les figures 1 et 2 pour une force de 5 chevaux, nous aurons, d'après les cotes de nos croquis :

Surface de chauffe.	7 ^m q.,50	— par cheval	1 ^m .q.,50
Surface de grille	10 ^d .q.	— »	10 ^d .q.
Sections des carneaux : sous			
la chaudière	15 »	— »	3 »
Sections des carneaux : laté-			
raux.	7 »	— »	1,4 »

On voit que ces dimensions sont largement proportionnées.

On remarquera, en outre, comme détails pratiques, que le lit de maçonnerie sous la chaudière est plan et supporté par une voûte, que cette voûte est fermée à l'avant par une cloison d'une demi-brique que l'on abat de temps en temps pour retirer les cendres déposées par la fumée à l'arrière du fourneau au-dessous du canal K. De même le devant des carneaux latéraux est fermé par une maçonnerie d'une demi-brique que l'on enlève pour nettoyer ces carneaux.

Au lieu de ces maçonneries, on peut placer des plaques en fonte, que l'on retire à volonté. Mais ces plaques, ne fermant jamais bien, laissent entrer de l'air qui refroidit en pure perte le courant de fumée, de sorte que l'on a un défaut continu à supporter pour épargner, une fois par mois au plus, le travail d'une heure d'un maçon.

La figure 5 représente une chaudière cylindrique avec un carneau intérieur. Nous en parlerons quand il sera question de ce genre de chaudière.

Nous attendrons de même que nous soyons arrivés à l'étude

des chaudières à tubes réchauffeurs pour décrire la disposition de chaudière représentée dans les figures 6, 7, 8 et 9 qui est plus convenable que les précédentes pour des forces de 8 à 10 chevaux.

29. CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES A TUBES BOUILLEURS. — Nous avons vu que les chaudières cylindriques simples occupaient un espace considérable. Afin d'obtenir sous un plus petit volume une surface de chauffe assez grande, on a ajouté à ces chaudières d'autres d'un plus petit diamètre qui portent le nom de *tubes bouilleurs* lorsqu'ils sont chauffés directement par le foyer, et de *tubes réchauffeurs* lorsqu'ils ne reçoivent que la chaleur de la fumée, la chaudière étant seule chauffée directement.

Le fourneau d'une chaudière à bouilleurs peut être disposé de différentes manières; parfois on expose en même temps à l'action du foyer les deux bouilleurs et une partie de la chaudière, dont les côtés seuls sont alors chauffés par des retours de flamme. C'est la disposition de la figure 6. Elle ne me paraît pas favorable à une bonne distribution de la chaleur, surtout en ce qu'elle ne se prête pas facilement à de bonnes proportions dans les carneaux.

En général, il vaut mieux n'exposer que les bouilleurs seuls à l'action directe du feu, ne fût-ce qu'en vue des réparations que l'on doit toujours prévoir et qui, se portant ici principalement sur les bouilleurs, seront plus faciles et moins coûteuses.

C'est pour rendre cet avantage encore plus marqué que l'on forme le dessous des bouilleurs de plaques de tôle de petites dimensions, comme le montre la figure 2.

La disposition du fourneau des figures 1, 2, 3 et 4 me paraît bien entendue et facile à établir. Le dessous des bouilleurs seul est exposé à l'action directe du feu; le dessus et les côtés de la chaudière sont chauffés par des retours de flammes. La séparation des carneaux se fait par deux petites voûtes s'appuyant contre les bouilleurs et par une cloison établie entre eux et le dessous de la chaudière.

La flamme, après avoir longé le dessous des bouilleurs, passe par le canal K dans un des carneaux latéraux, puis par-devant la chaudière dans l'autre carneau.

Conformément à ce que nous avons dit § 14, le foyer est à double porte. On a supprimé la plaque de fonte qui sépare le devant de la grille et qui n'est pas indispensable si la porte est assez profonde.

Dans la figure 5, la grille est inclinée pour un foyer chauffé au bois.

On peut compter comme surface de chauffe la moitié de la surface cylindrique de la chaudière et les $\frac{5}{6}$ de la surface des deux bouilleurs, en ne prenant, bien entendu, comme longueurs que les longueurs chauffées.

Ainsi la chaudière représentée figures 1 à 4 aura comme surface de chauffe la moitié d'une circonférence de $0^m,900$ de diamètre, ou $\frac{3,14 \times 0^m,900}{2}$, multipliée par la longueur totale de la chaudière $4^m,400$, ce qui donne $6^m,20$; plus deux fois les $\frac{5}{6}$ d'une circonférence de $0^m,500$ de diamètre, soit $2 \times \frac{5}{6} \times 3,14 \times 0^m,500$, multipliés par la longueur chauffée des bouilleurs, $4^m,560$, ce qui donne $11^m,93$; la surface de chauffe sera donc de $18^m,13$.

Cette chaudière avait été établie pour une machine à détente et à condensation de 15 chevaux; la surface de chauffe avait été calculée sur $1^m,20$ par cheval, ce que nous avons vu être une bonne proportion admise pour ce genre de machines; cependant nous avons conseillé d'aller jusqu'à $1^m,50$ par cheval, et nous croyons que, dans le cas surtout de ces chaudières à bouilleurs, cette proportion n'est pas exagérée. En effet, nous reconnaitrons que l'on obtient à peine avec elle une grandeur suffisante pour la chambre de vapeur.

La capacité de cette chambre est ici environ le tiers d'une surface de cercle de $0^m,900$ de diamètre, multipliés par une largeur de $4^m,400$, ce qui donne à peu près 930^d , soit 62 litres par cheval, si l'on attribue à la chaudière une force de 15 chevaux, ou de 78 litres par cheval si la chaudière, calculée d'après $1^m,50$ de surface de chauffe par cheval, n'est établie que pour 12 chevaux.

En ajoutant à la chaudière un dôme de $0^m,600$ de diamètre et de hauteur, et par conséquent de 170^d de capacité, on aura pour celle de la chambre de vapeur 1,100 litres.

Cette petitesse des réservoirs de vapeur est un inconvénient sérieux des chaudières à bouilleurs; on ne peut guère l'éviter qu'en leur ajoutant de grands réservoirs de vapeur; tels qu'une petite chaudière enveloppée dans la maçonnerie, ce qui n'est guère applicable qu'à un massif de plusieurs chaudières, ou encore en donnant d'assez grands diamètres aux chaudières (1), ce qui malheureusement en augmente l'épaisseur et, par suite, le poids. Cependant on aurait tort de s'arrêter ici à ce surcroît de dépense; car les inconvénients d'une

(1) La surface de chauffe d'une chaudière à bouilleurs peut en général être établie par cette formule :

$$S = \frac{\pi D L}{2} + 2 \times \frac{5}{6} \times \pi d l.$$

En appelant

S, la surface de chauffe totale;

D, L, le diamètre et la longueur de la chaudière;

d, l, le diamètre et la longueur chauffée du bouilleur;

π , le rapport de la circonférence au diamètre 3,142;

le volume de la chambre de vapeur aura pour expression :

$$V = \frac{1}{5} \frac{\pi D^2 L}{4}.$$

En remplaçant π par sa valeur, on a :

$$S = 1,57. DL + 2,62. dl$$

$$V = 0,26 D^2 L.$$

On en conclut :

$$\frac{V}{S} = \frac{0,26. D^2 L}{1,57. DL + 2,62 dl}.$$

Le plus souvent on a $d = \frac{D}{2}$ et $l = L$, d'où :

$$\frac{V}{S} = 0,09. D.$$

Si l'on ajoute un dôme ayant pour diamètre et pour hauteur $\frac{2}{3} D$, on aura :

$$V = 0,26. D^2 L + \frac{5,14}{4} \cdot \frac{4}{9} \cdot D^3 \times \frac{2}{5} D,$$

ou à peu près :

$$V = 0,26 D^2 (L + D) \text{ et } \frac{V}{S} = 0,09 \left(1 + \frac{D}{L} \right) D.$$

chambre de vapeur très-réduite peuvent être très-graves. Il vaut mieux, selon moi, renoncer aux chaudières à bouilleurs que de leur donner des dimensions insuffisantes. C'est certainement à cause du grand nombre de chaudières semblables, établies avec de mauvaises proportions, que l'on est réduit à considérer comme chiffre de production de la plupart des chaudières le nombre humiliant de 4 ou 5 kil. de vapeur par kilogramme de houille, alors que certaines chaudières en donnent 7, 8 et 9, et que la production théorique doit être 11 kilog.

Du reste, les chaudières à bouilleurs présentent un autre inconvénient très-sérieux : les bouilleurs occupant la partie inférieure du générateur, ce sont eux qui reçoivent la plus grande partie des dépôts terreux que l'eau abandonne. Ces dépôts s'attachent fortement aux parois qui reçoivent beaucoup de chaleur, et forment sur celles-ci des incrustations d'autant plus nuisibles que ces parois sont plus fortement chauffées. Aussi, je crois que c'est avec raison que ce système est de plus en plus abandonné chaque jour et que l'on préfère celui à tubes réchauffeurs, dont nous allons parler.

Auparavant, je ferai également remarquer ici que la proportion du fourneau des fig. 1 à 4 a été largement calculée, même en comptant sur une force de 15 chevaux. En effet, on a :

	d. q.	d. q.
Surface de la grille	99, ou par cheval	6,6
Section des carneaux : 1 ^o sous la chaudière, 40	»	2,67
» 2 ^o latéraux	27	1,80

On a pris, pour la facilité du nettoyage, les mêmes dispositions que celles que nous avons indiquées précédemment.

30. CHAUDIÈRES A TUBES RÉCHAUFFEURS. — On a employé fort longtemps des chaudières à tubes réchauffeurs sans y voir un système particulier de générateurs et sans en apprécier les avantages. Cet emploi n'était, en quelque sorte, qu'occasionnel; ainsi l'on ajoutait souvent, à des chaudières cylindriques simples ou à bouilleurs, ou même à des massifs de chaudières, un ou plusieurs tubes bouilleurs chauffés par les gaz du fourneau avant leur entrée dans la cheminée. Ces tubes étaient appelés

réchauffeurs. Ils n'étaient, on le voit, qu'une partie accessoire du générateur, que l'on ajoutait si l'on avait une place convenable.

C'est à M. Farcot que l'on doit particulièrement accorder le mérite d'avoir compris les avantages spéciaux de ces tubes réchauffeurs, et d'en avoir fait des pièces essentielles du générateur.

La figure 5 (pl. 10), empruntée au *Guide du Chauffeur* de MM. Grouvelle et Jaunez (nouvelle édition), représente une coupe transversale faite à l'avant d'une chaudière de M. Farcot. La chaudière est placée au-dessus du foyer; les réchauffeurs sont dans des carneaux latéraux superposés; les réchauffeurs communiquent entre eux par des cuissards de tôle, tandis qu'un large tube de fonte établit la communication entre le réchauffeur supérieur et la chaudière. Cette dernière communication me paraît très-imparfaite; la vapeur qui doit se former en grande quantité dans le premier réchauffeur ne peut se rendre à la chaudière principale qu'en produisant dans toute la masse d'eau des soubresauts fort nuisibles.

Les dispositions généralement adoptées aujourd'hui sont à la fois moins compliquées et meilleures que la précédente.

Les figures 6, 7, 8, 9 (planche 8), montrent le système le plus simple possible d'une chaudière à un seul tube réchauffeur, très-convenable pour de petites forces.

Le tube réchauffeur placé sous la chaudière est, par là même, moins long que celle-ci d'environ la longueur de la grille. Il est réuni à la chaudière par un seul cuissard formé de deux pièces assemblées à collet. Les collets sont placés dans la maçonnerie et protégés par elle contre les coups de feu. Cette disposition très-simple permet de retirer séparément la chaudière ou le réchauffeur, quand les réparations l'exigent, sans avoir à démolir tout le fourneau. On pourrait même, au besoin, continuer à travailler avec la chaudière pendant qu'on réparerait le bouilleur, en fermant le cuissard par une rondelle pleine.

L'alimentation se fait par le devant du réchauffeur, ou, en général, par l'extrémité du réchauffeur opposée à celle qui est en communication avec la chaudière, ou plus généralement encore par l'extrémité du réchauffeur qui reçoit la dernière

l'action du feu. C'est là un des points essentiels de ce système de chaudière; il est évidemment très-logique de diriger ainsi l'alimentation, de faire en quelque sorte marcher la température de l'eau en sens contraire de celle des gaz du fourneau. En effet, le courant de gaz, qui lèche une partie du générateur, cédera à l'eau contenue dans cette partie d'autant plus de chaleur, que la différence de température sera plus grande. Admettons, par exemple, que la température des gaz, au moment où ils vont quitter le fourneau, est 300°, et que là ils rencontrent une extrémité du réchauffeur où l'eau entre à 50°, la quantité de chaleur qui passera à travers la tôle sera proportionnelle à 300—50 ou 250°. Si, au contraire, les gaz rencontrent, en quittant le fourneau, une partie où l'eau possède 150°, la quantité de chaleur transmise ne sera proportionnelle qu'à 300—150 ou 150°. C'est ce qui aura lieu dans une chaudière à bouilleurs où les gaz lèchent en dernier lieu les flancs de la chaudière dans laquelle la température est toujours au moins celle de la vapeur.

Cette disposition de la chauffe relativement à l'alimentation, dans les chaudières à tubes réchauffeurs, présente d'ailleurs un autre grand avantage. L'eau n'arrive à la chaudière qu'après avoir été chauffée dans le réchauffeur; il ne s'y produira donc pas, pendant l'alimentation, d'abaissement sensible de la température de l'eau, et par suite de la pression de la vapeur.

Enfin, pour le nettoyage de la chaudière, la position des réchauffeurs sous la chaudière est aussi très-avantageuse. C'est, en effet, dans ces parties inférieures du générateur que se déposent les matières tenues en suspension par l'eau, et ces parties étant relativement peu chauffées, ces matières ne peuvent adhérer que faiblement aux parois des réchauffeurs, et forment dans leur intérieur, non pas des incrustations, mais des dépôts boueux que l'on enlève facilement avec un balai, et que l'on peut d'ailleurs évacuer partiellement en laissant écouler assez souvent, tous les soirs même si l'on veut, une partie de l'eau de ces réchauffeurs, par des robinets de vidange placés à leur partie inférieure.

La chaudière représentée dans les figures que nous venons

d'indiquer a été faite pour une machine de 8 chevaux, à détente et à condensation.

La surface de chauffe calculée, comme pour les chaudières à bouilleurs, en ajoutant la surface du réchauffeur à la moitié de la surface de la chaudière, est $10^{\text{m}^2},50$, soit de $1^{\text{m}^2},30$ par cheval.

La grille et les carneaux ont été largement proportionnés. Le carneau inférieur a même une section beaucoup plus forte qu'il n'est nécessaire. Cela résulte de ce que l'on a voulu donner à ce carneau une profondeur assez grande pour que le nettoyage puisse se faire facilement. Il faut, en effet remarquer que sous le rapport de la facilité avec laquelle les carneaux peuvent se remplir de cendres, et en être débarrassés, il y a une différence essentielle entre les chaudières à bouilleurs et les chaudières à tubes réchauffeurs. Dans les premières, la flamme, après avoir parcouru le carneau sous les bouilleurs, monte dans un carneau supérieur; les cendres, entraînées par le courant de gaz, tendant au contraire à tomber, on peut, en laissant à l'arrière du fourneau un espace libre, recueillir la majeure partie de ces cendres, qui se séparent du courant de gaz au moment où celui-ci s'élève dans le carneau supérieur. Dans les chaudières à tubes réchauffeurs, au contraire, la flamme descend au bout du premier carneau, et les cendres, prenant la même direction, pénètrent dans les carneaux inférieurs, au fond desquels elles se déposent. Il est donc bon de donner à ces carneaux une forme telle qu'ils ne s'encombrent pas trop promptement et qu'on puisse les vider aisément; sous ce rapport les dispositions des figures 6, 7 et 8 me paraissent très-convenables.

Le cendrier a été construit également en vue de ce nettoyage des carneaux; une cloison d'une demi-brique ferme seule l'entrée du carneau, qui est ici tournée vers le cendrier, et qui pourrait tout aussi bien, suivant les conditions locales, se trouver à l'arrière du fourneau.

Les chaudières d'une force un peu notable dont ordinairement à deux réchauffeurs. Les figures 1, 2, 3, et 4 (pl. 10) montrent une disposition assez ordinaire de ces chaudières; elle ne me paraît cependant point la meilleure, et, si j'ai reproduit ce

croquis de préférence à d'autres, c'est parce que la plupart des dimensions importantes m'ont paru bien déterminées et que les imperfections que j'aurai à signaler sont très-faciles à corriger.

Dans cette chaudière, les tubes réchauffeurs sont horizontaux, communiquent entre eux par une large tubulure placée à l'avant du fourneau, et avec la chaudière par deux tubulures situées à l'arrière. La flamme, après avoir léché le dessous de la chaudière, passe, par une ouverture à l'arrière du fourneau, dans un des carneaux inférieurs, et de ce carneau elle passe à l'avant du fourneau dans l'autre carneau, par une ouverture pratiquée dans la cloison qui sépare ces deux carneaux. C'est dans le tube placé dans le dernier carneau qu'arrive l'eau d'alimentation par un tuyau plongeant au fond de ce tube. Les tubes se vident par des robinets placés à l'avant de chacun d'eux.

Les défauts essentiels que nous avons à signaler dans cette disposition sont l'horizontalité des tubes et la communication établie entre le dernier réchauffeur et la chaudière.

Par suite de l'horizontalité des tubes, il peut se former en certains points des amas de vapeur, celle-ci ne trouvant pas toujours un dégagement assez rapide et assez facile par l'unique tubulure qui joint chaque tube à la chaudière. Alors la tôle se boursouffle et s'altère profondément dans les parties qui cessent ainsi d'être protégées par l'eau. Dans ce cas on doit, pour arrêter ces effets, introduire près de ces boursoufflures, dans l'intérieur du réchauffeur, un tuyau qui vient se recourber dans la tubulure.

La communication établie entre le second réchauffeur et la chaudière est rendue indispensable par la cause précédente ; ce n'est que par là que peut s'échapper la vapeur qui se forme dans le haut de ce réchauffeur. Cependant cette communication ôte à ce système de générateur un de ses avantages essentiels, en permettant à l'eau d'alimentation de s'introduire dans la chaudière avant d'avoir parcouru les deux réchauffeurs. Il est clair, en effet, que les mouvements désordonnés de l'ébullition doivent amener, par la tubulure qui réunit le second réchauffeur à la chaudière, une partie de l'eau d'alimentation qui arrive

dans ce réchauffeur précisément dessous cette tubulure. Bref, cette communication ôte au système ce caractère si rationnel de présenter à l'eau qui s'introduit dans la chaudière des surfaces de chauffe successives.

On peut très-aisément éviter les deux inconvénients précédents et rendre aux chaudières à tubes réchauffeurs leur véritable caractère, en inclinant les deux réchauffeurs, le premier de l'arrière du fourneau vers l'avant, le second en sens inverse, et en supprimant la tubulure qui met ce second en communication avec la chaudière. Avec ces deux inclinaisons en sens inverses, les réchauffeurs forment comme deux branches d'un serpentín s'élevant vers la chaudière: la vapeur produite dans le second réchauffeur passe dans le premier par la tubulure qui se trouve au-dessus de la pente. Il suffit d'une pente très-légère, telle que $0^m,01$ par mètre. L'alimentation se fait naturellement par l'extrémité inférieure du second réchauffeur; c'est aussi à la même extrémité que l'on place le robinet de vidange.

Les chaudières à tubes réchauffeurs ainsi disposées peuvent être certainement rangées au nombre des systèmes de générateurs les mieux combinés au point de vue de la disposition des surfaces de chauffe et de la facilité d'entretien.

Au point de vue des capacités que ces chaudières offrent à l'eau et à la vapeur, on doit les placer sur le même rang que les chaudières à bouilleurs; car il y a sous ce rapport identité entre ces deux systèmes de générateur. La chambre d'eau sera toujours suffisante; mais la chambre de vapeur pourra parfois être un peu petite; aussi ces chaudières doivent-elles, comme les chaudières à bouilleurs, être toujours munies de dômes.

La planche 11 offre deux dispositions particulières de chaudières à tubes réchauffeurs, dont une surtout est remarquablement bien conçue. C'est celle qui est représentée dans les figures 1 à 6.

Deux bouilleurs B, B', sont placés chacun au-dessus d'un foyer: entre eux, deux réchauffeurs R, R' reçoivent l'action des gaz venant de ces deux foyers, et qui passent du foyer dans le carneau supérieur par les ouvertures voûtées p, p' , et de là dans le carneau inférieur par le passage p'' .

Les deux bouilleurs B, B' et le réchauffeur supérieur R communiquent chacun par une tubulure avec un corps de chaudière C; cette chaudière est plutôt un grand réservoir de vapeur, car elle n'est chauffée que par la chaleur des maçonneries qui l'enveloppent; aussi ne doit-on y maintenir l'eau qu'un peu au-dessus des tubulures.

Des registres glissant dans les coulisses *e, e'* permettent d'isoler l'un des bouilleurs et l'un des foyers lorsque l'on veut marcher avec un seul de ceux-ci: dans ce cas, on ferme, au moyen d'une plaque de tôle, la tubulure du bouilleur qui ne fonctionne pas.

Cette chaudière et son fourneau sont, je le répète, parfaitement conçus. Si l'on a soin de charger alternativement les deux foyers, on arrive à une fumivorté à peu près complète, attendu que la flamme et la fumée du foyer nouvellement chargé viennent rencontrer, à leur entrée dans le carneau du réchauffeur supérieur, la flamme de l'autre foyer.

La surface de chauffe, la chambre de vapeur et la chambre d'eau peuvent être largement calculées sans que le générateur occupe trop de place et acquière un poids considérable. En effet, on doit remarquer que toute la surface de chacun des bouilleurs et réchauffeurs est surface de chauffe.

On a, il est vrai, objecté à ces chaudières que la surface supérieure des bouilleurs était une surface de chauffe peu active, insignifiante même; nous avons déjà dit, § 27, ce que nous pensions des surfaces chauffées par le dessus. Nous pouvons ajouter ici que la chaudière dont nous donnons le croquis, et dont la surface de chauffe est d'environ 26 mètres carrés, avait été placée pour alimenter une machine de 20 chevaux, et qu'aujourd'hui cette machine en fait plus de 25, en même temps que la chaudière fournit de la vapeur à des tuyaux de chaufferie d'un développement de plus de 600 mètres. On s'est borné cependant, pour obtenir cet excédant de vaporisation, à porter la longueur des grilles de 1^m,100 à 1^m,500; et, depuis la chaudière a fourni sans peine la vapeur nécessaire. On peut donc affirmer que la surface de chauffe de ce générateur est très-active.

Pour la facilité du nettoyage, cette chaudière offre les mêmes avantages que les chaudières ordinaires à tubes réchauffeurs; mais elle est beaucoup mieux disposée pour le nettoyage des carneaux: en effet, l'on peut (et c'est à tort qu'on ne l'a point fait dans le fourneau reproduit par nos croquis) laisser à l'arrière du fourneau, au bout du carneau qui suit le foyer, un espace ouvert pour recueillir la plus grande masse des cendres, comme nous l'avons indiqué pour les chaudières à bouilleurs.

J'ai pu apprécier la valeur économique de ces chaudières: en marche forcée, et par conséquent contraire à une bonne économie, cette chaudière produisait au minimum 5^k de vapeur par kilog. de houille de qualité ordinaire, ce que beaucoup de chaudières ne donnent qu'avec les meilleures qualités de charbon et pendant une marche normale.

Un avantage très-considérable encore de ces chaudières est leur grande sécurité par rapport à la cause la plus fréquente des explosions, savoir: l'abaissement du niveau de l'eau au-dessous de la ligne des carneaux. Il faudrait, avec la disposition précédente, un abaissement considérable du niveau pour que seulement les tubulures supérieures des bouilleurs fussent mises à nu. Toutes les parties en contact avec les gaz du fourneau sont entièrement remplies d'eau; la seule qui contienne de la vapeur n'est chauffée que par les maçonneries.

La disposition de générateur représentée figures 7 et 8 (pl. 11), me paraît beaucoup moins bien conçue que la précédente. Deux bouilleurs placés dans un même foyer portent, suspendus par quatre tubulures, un réchauffeur. On ajoute un second réchauffeur dans le cas où l'on place deux chaudières à côté l'une de l'autre, et ce réchauffeur est alors commun aux deux chaudières.

Les deux bouilleurs sont réunis à leur partie supérieure par un petit réservoir porté sur deux tubulures.

Les deux ou trois réchauffeurs inférieurs communiquent par un tuyau; on doit en outre établir une communication entre le réchauffeur du milieu et les bouilleurs supérieurs, pour que la vapeur du réchauffeur puisse s'échapper et que l'équilibre de pression puisse s'établir. Sans quoi, l'on conçoit aisément que la moindre différence de pression dans les deux chaudières

suffirait pour produire une dénivellation considérable dans les masses d'eau de ces deux chaudières qui communiquent par les réchauffeurs inférieurs.

Les deux bouilleurs ne sont chauffés que par la moitié inférieure de leur surface. Sous ce rapport les surfaces ne sont pas aussi bien utilisées pour la chauffe que dans le système précédent; en revanche, il est vrai, la chambre de vapeur est proportionnellement plus grande.

Un défaut plus grave de ces chaudières est la solidarité de toutes leurs parties, solidarité telle que l'on ne pourrait remplacer une des parties sans démolir tout le générateur. Ce défaut est encore plus grand lorsque deux chaudières sont réunies pour former un massif, comme dans la figure 7. Il suffit alors de l'inadvertance d'un chauffeur qui oublierait d'établir la communication de vapeur entre les deux chaudières, pour causer un accident sérieux. En effet, un quart d'atmosphère d'excès de pression dans un des générateurs est plus que suffisant pour refouler toute l'eau dans l'autre.

La disposition des tubulures qui réunissent le premier réchauffeur aux deux bouilleurs me paraît peu favorable à une longue durée de la chaudière. Ces deux tubulures produisent en deux points du carneau des étranglements où la flamme prend un excès de vitesse. Il doit en résulter un effet sur ces tubulures d'autant plus nuisible que la disposition de leurs parois est un obstacle au prompt dégagement des bulles de vapeur qui se forment à leur contact, et ce sont précisément les faces internes de ces tubulures qui reçoivent le plus fort coup de feu et dont l'inclinaison contrarie l'ascension des bulles de vapeur.

Ces considérations et un essai, insuffisant peut-être, sur la production de vapeur de ces chaudières, me font affirmer sans hésitation que ce système de chaudières à tubes réchauffeurs ne vaut pas ceux que nous avons d'abord décrits et surtout celui des figures 1 à 6 (pl. 11). Nous ne craignons même pas d'ajouter que celui-ci est, de tous les systèmes de chaudières que nous avons vus jusqu'à cette heure, celui que nous recommanderions d'adopter dans presque tous les cas. Nous ne nous arrêterions

gère que devant des conditions locales qui ne permettraient pas de donner au générateur la largeur nécessaire.

31. CHAUDIÈRES A CARNEAUX INTÉRIEURS. — Pour augmenter la surface de chauffe de ses chaudières en tombeau, James Watt avait imaginé de les faire traverser dans toute leur longueur par un tube à travers lequel le courant d'air chaud devait passer avant d'atteindre les carneaux aboutissant à la cheminée, ou après avoir traversé les carneaux situés sur les flancs de la chaudière. La surface intérieure de ce tube s'ajoutait ainsi à la surface de chauffe.

Cette disposition a été appliquée également aux chaudières cylindriques; la figure 5 (pl. 8) nous en a déjà montré un exemple.

La position et les dimensions du tube se déterminent d'après les règles auxquelles sont soumises celles des carneaux; ainsi ce tube devra être placé de façon que, le niveau de l'eau s'abaissant, la surface supérieure ne soit pas mise à nu et exposée à rougir par l'action de la chaleur; de plus, il devra avoir une section assez grande pour que le tirage ne soit pas gêné. Cette dernière condition sera satisfaite si l'on calcule la section nécessaire au tube, comme on calculerait celle d'un carneau placé dans les mêmes conditions. Le calcul (1) montre

(1) On peut établir une relation générale entre la surface de chauffe d'une chaudière et les sections des carneaux d'un fourneau en s'appuyant sur les règles et les résultats pratiques que nous avons indiqués précédemment. S'il s'agit d'une chaudière ordinaire, produisant 20^k de vapeur par mètre carré de surface de chauffe et par heure, et 6^k de vapeur par kil. de houille; la section s de la cheminée, devra, d'après la règle de Darcet (1 décimètre carré ou 0m.q,01 pour 5^k,55 à brûler par heure) être pour une surface de chauffe S

$$s = \frac{S \times 20}{6 \times 5,5} \times 0,01 = \frac{S}{100}.$$

Les sections des carneaux devront être au moins égales à cette section s de la chaudière, et il sera mieux (§ 12) de les faire égales à $\frac{5}{2} s$ immédiate-

que dans le cas le plus fréquent, celui des tubes cylindriques, le rapport du diamètre du tube à celui de la chaudière doit être au moins : 0,24 — 0,31 — 0,38 — 0,43 — 0,49 — 0,67 selon que le rapport de la longueur de la chaudière à son diamètre sera : 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 10.

Il sera bon d'augmenter ces rapports de $\frac{2}{10}$ ou de $\frac{4}{10}$ de leurs valeurs selon que le tube formera le dernier ou l'avant-dernier

ment après le foyer, 2s dans le carneau suivant, et $\frac{5}{2}$ s dans les derniers carnaux.

Si l'un de ces carnaux se compose d'un tube cylindrique, ou plus généralement de n tubes cylindriques de diamètre d parcouru en même temps par les gaz du fourneau, on devra avoir, comme minimum de section totale :

$$s = n \pi \frac{d^2}{4} = \frac{S}{100}$$

Cela posé soit L et D la longueur et le diamètre extérieur de la chaudière, dont nous supposons la moitié de la surface extérieure chauffée, la surface de chauffe sera :

$$S = \left(\frac{\pi D}{2} + n \pi d \right) L,$$

et s devra avoir une valeur au moins égale à celle que donne l'équation

$$\frac{n \pi d^2}{4} = \left(\frac{\pi D}{2} + n \pi d \right) \frac{L}{100}$$

ou

$$d^2 - \frac{4L}{100} d = \frac{2DL}{n \times 100}$$

d'où l'on tire

$$d = \frac{2L}{100} \pm \sqrt{\frac{4L}{100^2} + \frac{2DL}{n \times 100}};$$

ou

$$d = \frac{2L}{100} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{100 \cdot D}{2L}} \right),$$

en supprimant le signe — qui doit être écarté, attendu que d ne peut avoir de valeurs négatives.

carneau. Ainsi les dimensions relatives du tube et de la chaudière de notre croquis (fig. 5, pl. 8) conviennent à une longueur égale à six fois le diamètre, c'est-à-dire, dans le cas actuel, à une longueur de 4^m,800. Avec cette longueur, cette chaudière aurait comme surface de chauffe près de 10^m·q. Sans le tube, elle n'aurait que 6^m·q.

Parfois on remplace le tube unique du système précédent par deux tubes que traverse en même temps le courant de fumée,

Nous pouvons également mettre cette formule sous la forme :

$$\frac{d}{D} = \frac{2}{100} \frac{L}{D} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{100}{2n} \frac{L}{D}} \right)$$

qui donnera le rapport $\frac{d}{D}$ quand on connaîtra le rapport $\frac{L}{D}$ et le nombre de tubes n .

Si l'on veut que la section du carneau soit m fois celle de la cheminée, on devra avoir :

$$\frac{n\pi d^2}{4} = \left(\frac{\pi D}{2} + n\pi d \right) \frac{Lm}{100}.$$

D'où
$$\frac{d}{D} = \frac{2m}{100} \cdot \frac{L}{D} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{100 \cdot m}{2mn} \frac{L}{D}} \right)$$

En général, si l'on veut faire la section du tube ou des systèmes des tubes faisant carneau égal à $\frac{S}{a}$, on devra avoir :

$$\frac{d}{D} = \frac{2}{a} \frac{L}{D} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{a}{2n} \frac{L}{D}} \right).$$

Cette formule s'appliquera à toutes les formes de chaudières présentant des carneaux intérieurs cylindriques, et chauffées sur toute la moitié de leur surface extérieure.

Si la fraction de surface extérieure chauffée est b , on aura :

$$n\pi \frac{d^2}{4} = \left(\frac{b\pi D}{2} + n\pi d \right) \frac{L}{a}$$

et
$$\frac{d}{D} = \frac{2}{a} \frac{L}{D} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{ab}{2n} \frac{L}{D}} \right).$$

et qui ne forment ainsi qu'un seul carneau. Les rapports du diamètre de ces tubes au diamètre de la chaudière devront être au moins

$$0,19 - 0,24 - 0,30 - 0,35 - 0,39$$

selon que le rapport de la longueur de la chaudière à son diamètre sera

$$2 - 3 - 4 - 5 - 6.$$

De même que pour un seul tube, il sera bon d'augmenter de $\frac{2}{10}$ ou de $\frac{4}{10}$ la valeur de ces rapports selon que les deux tubes constitueront le dernier ou l'avant-dernier carneau du fourneau.

Les figures 1, 2 et 3, pl. 12, montrent les dispositions d'une semblable chaudière et de son fourneau. La flamme, après avoir chauffé le tiers inférieur de la surface extérieure de la chaudière, passe dans les deux tubes à la fois, revient sur l'avant pour retourner ensuite à l'arrière du fourneau vers la cheminée par deux carneaux latéraux.

Les dimensions indiquées s'accordent avec toutes les règles que nous avons indiquées :

Elles donnent une surface de chauffe de 27 m², une section de carneaux de 29 décimètres carrés sous la chaudière et dans les deux tubes réunis, et à peu près autant dans les carneaux latéraux. La surface de grille est $\frac{1}{17}$ de la surface de chauffe.

Ce genre de chaudière est à peu près complètement abandonné ; il ne présente en effet aucun avantage bien sérieux. Le développement de surface de chauffe que donnent les tubes s'obtient avec à peu près le même poids de tôle dans les chaudières à bouilleurs ou à réchauffeurs, les maçonneries sont aussi à peu près les mêmes, et les quantités de chaleur qu'elles peuvent absorber fort peu différentes ; d'ailleurs les chaudières à tubes bouilleurs ou réchauffeurs sont très-supérieures à celles que nous considérons, au point de vue de la facilité du nettoyage et des réparations ; elles se prêtent mieux à des dimensions quelconques, et les tubes augmentent la chambre d'eau au lieu de la diminuer.

32. CHAUDIÈRES A FOYERS INTÉRIEURS. — D'une forme à peu près identique à celle des chaudières que nous venons d'examiner, les chaudières à foyers intérieurs présentent autant d'avantages que celles-ci en présentent peu. Elles n'en diffèrent cependant qu'en ce que les tubes intérieurs, au lieu de servir seulement au passage des gaz sortis des foyers, renferment les foyers eux-mêmes. Par là on obtient à la fois une excellente disposition de la chauffe, une grande simplicité de maçonneries, et une bien faible absorption de la chaleur par celles-ci.

La chaudière, selon sa grandeur, renferme un (fig. 4, 5 et 6, pl. 12) ou deux tubes (fig. 1, 2, 3, 4, pl. 13) dans la partie antérieure desquelles sont les foyers ; la flamme et la fumée qui s'en dégagent vont à l'arrière des tubes, reviennent par un carneau latéral vers l'avant de la chaudière en lèchant un quart de sa surface extérieure, et retournent à l'arrière vers la cheminée en lèchant l'autre quart de cette surface.

La largeur du foyer ou des foyers se détermine d'après la largeur à donner à la grille, laquelle dépend de la surface de chauffe.

Celle-ci est égale à la surface intérieure du tube diminuée de la portion de surface qui est sous la grille, plus la partie de la surface extérieure chauffée par le retour de flamme.

On a donné à ces chaudières différentes formes, telles que celles des figures 7 et 8. Dans la première, les foyers sont fortement elliptiques, la chaudière n'est pas exactement cylindrique, mais un peu aplatie sous les tubes. Dans les chaudières de la figure 8, dites chaudières à *jambages*, on a supprimé la partie de la chaudière qui, située sous la grille, ne sert que de cendrier et n'est pas chauffée. Ces dispositions bien combinées sont certainement très-bonnes au point de vue de l'économie de combustible; mais elles laissent à désirer sous plusieurs rapports. En premier lieu, les formes données aux tôles ne leur permettent pas de supporter une forte pression, d'autant plus que la pression de la vapeur agit ici de dehors en dedans, et tend à aplatir davantage les tubes. Dans les chaudières cylindriques avec ou sans bouilleurs, au contraire, la vapeur ne peut que dilater les tôles, mais tout en leur conservant leur forme

ou plutôt en tendant à leur donner une forme plus parfaitement cylindrique; elle agit là comme le soufflé de l'ouvrier verrier qui obtient des tubes bien cylindriques rien que par la pression uniforme que ce soufflé exerce dans l'intérieur d'une masse de verre. En se dilatant ainsi d'une manière régulière, la tôle peut résister à de très-fortes pressions, il en est de même d'un tube de caoutchouc dans lequel on comprime de l'air; ce tube se gonfle uniformément jusqu'au moment où il crève; si au contraire on veut aspirer l'air de son intérieur, à l'instant la pression extérieure de l'atmosphère l'aplatit.

En réfléchissant attentivement à ces faits on les trouve d'abord anormaux; un tube parfaitement cylindrique doit certainement résister tout aussi bien à une pression uniforme agissant du dehors vers le dedans de ce tube, qu'à la même pression agissant uniformément en sens contraire; il n'y a là d'autre différence que celle qui peut exister entre la résistance à l'écrasement et la résistance à l'allongement; le tube doit, sous une pression extérieure uniforme, se resserrer uniformément, comme il doit s'ouvrir uniformément sous une pression constante extérieure. Ces considérations sont exactes sans nul doute, du moment où l'on admet un tube à section parfaitement circulaire, mais on ne rencontre pas de semblables tubes dans la pratique; il n'en est pas dont la section ne soit légèrement elliptique et dans ce cas le calcul, et même le plus simple raisonnement, prouve que l'ellipticité doit augmenter et augmenter rapidement sous l'effort d'une pression extérieure. L'expérience aussi ne le démontre que trop.

On comprend donc que si l'on s'écarte des formes à sections circulaires, on diminue considérablement les résistances dont sont capables les chaudières; aussi doit-on, dans les dispositions de chaudières que nous avons rapportées, rendre à leurs différentes parties autant de résistance que possible en les renforçant au moyen de tirants et autres armatures intérieures qui relient entre elles ces différentes parties. La complication de construction qui en résulte pour ces chaudières, outre qu'elle en élève considérablement le prix, présente le très-grave inconvénient d'en rendre le nettoyage à peu près impossible et la

réparation très-difficile. Et même avec cette complication, ces chaudières n'étaient pas encore en état de résister à de fortes pressions et on ne les employait guère que pour des pressions effectives tout au plus égales à 2 atmosphères.

Aujourd'hui leur construction, en se simplifiant autant que possible, a fait disparaître les défauts que nous venons d'indiquer et que l'on objectait seuls à ces chaudières. Ainsi dans les chaudières des figures 4, 5 et 6, pl. 12, il n'entre que deux formes cylindriques.

Cette chaudière présente une surface de chauffe de 7 à 8^m; ce n'est pas du reste pour ces petites formes que les chaudières à foyers intérieurs sont bien convenables, parce que le nettoyage en est alors trop difficile. Il en est autrement pour les grandes chaudières.

Les figures 1, 2, 3, 4, planche 13, en reproduisent une de 50 à 60 chevaux, exécutée par MM. Piedbœuf qui, dans leurs ateliers d'Aixla-Chapelle et de Jupille (près Liège), construisent ces chaudières en très-grand nombre. Les foyers, au nombre de deux, sont à section circulaire en tôle au bois de 12^m d'épaisseur, au-delà de la grille on peut réduire cette épaisseur et employer de la tôle ordinaire. Une des dispositions les plus remarquables est celle des lignes de rivets des tôles du foyer. On voit qu'au lieu d'être seulement posées l'une sur l'autre, ces tôles ont leurs bords relevés en équerre; par là on obtient le double avantage de soustraire à l'action du feu les lignes de rivets et de constituer de fortes nervures qui augmentent de beaucoup la résistance des tubes à l'écrasement, et que l'on renforce encore en interposant un cercle en fer; en outre, on a dans ce mode de construction une excellente garantie de la qualité du fer employé; car une qualité ordinaire ne permettrait pas ce redressement des bords. Ce mode de réunion des tubes aux foyers est aussi très-suivi en Angleterre, où il a été imaginé par M. Adamson.

Les dimensions des tubes et de la chaudière sont déterminées de telle façon qu'il reste au-dessous des foyers assez de place pour qu'un ouvrier puisse s'y introduire, en passant par le trou d'homme que l'on voit sur le devant de la chaudière. Au-dessus

des foyers, il reste un espace beaucoup plus grand qui permet de tenir le niveau de l'eau à 0^m,35 au-dessus des tubes et d'éviter ainsi le danger d'explosion que l'on reprochait également à ces chaudières; même avec cette hauteur de niveau, il reste encore une chambre de vapeur, proportionnellement plus grande que dans les systèmes de chaudières à bouilleurs et à réchauffeurs. En effet, avec une distance de 0^m,500 entre le niveau de l'eau et le dessus de la chaudière, on trouve à la surface de l'eau une largeur de 0^m,732, et par suite, pour la chambre de vapeur, une section de 0^m,613. Pour 9^m,850 de longueur, la capacité de cette chambre sera 6038 décimètres cubes. En ajoutant la capacité du dôme, qui est d'environ 270 d. c., on arrive à un total de 6308 pour une chaudière de 60 chevaux, soit donc de 105 litres par cheval, ce qui est une proportion beaucoup plus forte que dans les cas précédents.

Les chaudières à foyer intérieur peuvent donc, sous ce rapport, être rangées parmi les bonnes chaudières; toutefois hâtons-nous d'ajouter que cet avantage ne tient qu'à leur grand diamètre, et qu'avec des proportions identiques, les chaudières à tubes bouilleurs ou réchauffeurs présenteraient la même proportion de chambre de vapeur.

Ce grand diamètre que l'on est forcé de donner à ces chaudières est peut-être le seul inconvénient sérieux qu'elles présentent, non pas au point de vue de l'économie de combustible ou de la facilité d'entretien et de nettoyage de ces chaudières, mais seulement au point de vue de leurs poids et par conséquent de leur prix, et aussi parce que les règlements de police, imposant un *maximum* d'épaisseur, on ne peut pas faire fonctionner ces chaudières sous des pressions élevées.

C'est ainsi que la chaudière de nos croquis avec une épaisseur de 14 millimètres, pour les tôles extérieures, ne pouvait être timbrée en Belgique, il y a deux ans, que pour marcher sous une tension de vapeur de 4 atmosphères. Cet inconvénient était tellement grave qu'il suffirait, pour empêcher l'usage de ces chaudières, de se répandre dans les pays où l'on se montrerait trop sévère dans l'observation des règlements. En Angleterre où il n'en est pas ainsi, ces chaudières ont acquis une vogue qui

plaide plus haut en leur faveur, que tout ce que nous pourrions dire. Plus des 9/10 des chaudières que l'on y construit actuellement sont de ce système, et les chaudières de Cornouailles, si renommées pour leur économie de combustible, ne sont que des chaudières à foyers intérieurs. En Allemagne aussi, ces chaudières se sont répandues à tel point, que l'on n'exagérerait pas en affirmant que les 7/8 des générateurs de machines fixes que l'on y construit actuellement sont à foyers intérieurs.

Mais aussi les épaisseurs ordonnées dans ce pays pour les chaudières, étaient beaucoup moindres que celles qui sont prescrites en France et l'étaient en Belgique: c'est ainsi qu'une chaudière de 2^m de diamètre, comme celle de nos croquis devait n'avoir, pour être timbrée à 3 atmosphères, c'est-à-dire pour marcher sous une tension intérieure de 4 atmosphères, qu'une épaisseur de 16^{mm}, au lieu de 14^{mm}, imposés par les règlements français et belges. Avec cette épaisseur de 14^{mm}, la même chaudière de 2^m de diamètre, qui ne pouvait être timbrée en Belgique qu'à 3 atmosphères, l'eût été en Allemagne à 4 1/4.

En revanche, les règlements belges ne donnant pas de formule spéciale pour les parties pressées de dehors en dedans, le constructeur pourrait se contenter de leur donner l'épaisseur prescrite par la formule ordinaire. On aurait ainsi pour les foyers de 0^m,800 de diamètre de notre chaudière une épaisseur de 7^{mm},3 pour une tension intérieure de 4 atmosphères, tandis que les règlements prussiens donneraient dans ce cas, par une formule spéciale, l'épaisseur de 8^{mm},9.

Si maintenant l'on considère que les explosions de chaudières en Allemagne sont excessivement rares et que les chaudières dont nous nous occupons y sont très-répandues, on doit reconnaître que c'est à tort que nos règlements proscrivaient, par l'imposition d'épaisseurs trop fortes dans des parties peu exposées au feu, l'emploi d'un système de générateur reconnu bon théoriquement et pratiquement.

Il y avait d'autant plus lieu de modifier sous ce rapport ces règlements, que de simples mesures administratives suffisaient pour autoriser l'application à ce genre de chaudières de la formule qui donne les épaisseurs des tôles extérieures non chauffées

des chaudières tubulaires, épaisseurs encore plus fortes que celles prescrites par les règlements prussiens pour les tôles chauffées. D'ailleurs on doit bien remarquer que les tôles qui ne sont chauffées que par des retours de flamme conservent autant de résistance que celles qui ne le sont pas du tout; il en est ainsi surtout des tôles extérieures des chaudières à foyers intérieurs qui ne sont que très-peu chauffées à cause de la grande absorption de chaleur qui a lieu dans les foyers. On peut affirmer hardiment que la température de ces tôles ne peut pas atteindre la limite à laquelle commence à diminuer la résistance du fer. Il résulte en effet des expériences de M. William Fairbairn que la tôle chauffée à 400° Fahrenheit ou 200° centigrades environ possède au moins autant de ténacité qu'à des températures inférieures. Il semble même que vers ce degré de température le fer possède son maximum de résistance. Il n'y avait donc pas de raison pour ne pas comprendre les chaudières à foyers intérieurs dans la catégorie des chaudières tubulaires. En le faisant on a rendu leur usage possible parce qu'il devient permis de les timbrer à une pression suffisamment élevée, tandis que l'on pouvait à peine, dans la plupart des cas, les timbrer à 3 atmosphères.

Malgré cette réduction d'épaisseur, ces chaudières n'en restent pas moins très-pesantes et par conséquent très-coûteuses; mais on doit, dans l'évaluation de leur prix, tenir compte de différents frais que n'entraîne pas leur installation. Ainsi elles n'exigent qu'une maçonnerie très-simple, en briques ordinaires, qui pour la chaudière de nos croquis reviendrait à peine à 500 fr., alors que la maçonnerie d'une chaudière à bouilleurs de même force, maçonnerie compliquée et faite en majeure partie de briques réfractaires, coûterait 1500 ou 2000 fr. Il peut encore y avoir une différence de 2 ou 300 fr. pour la devanture du fourneau.

En outre, la maçonnerie d'un fourneau ordinaire exige des réparations bien plus fréquentes; car il est rare que l'on ait à réparer un fourneau ailleurs que dans les foyers même ou au moins très-près de ceux-ci; les maçonneries des carneaux n'exigent presque jamais de réparations.

Les réparations à prévoir dans ces chaudières sont aussi généralement plus faciles que dans les autres systèmes : en effet ces réparations ne peuvent guère porter que sur les foyers, les tôles extérieures souffrant très-peu de la chaleur. On pourrait affirmer, sans trop s'aventurer, qu'une chaudière à foyers intérieurs ayant servi 20 ans et plus, et dont on a renouvelé les foyers, qui en sont la partie la moins coûteuse, vaut une chaudière neuve. Il n'en serait certainement pas de même d'une chaudière à bouilleurs ou à réchauffeurs dont on renouvelerait les tubes.

Nous avons déjà dit que le nettoyage de ces chaudières, avec leurs nouvelles dispositions, est très-facile, puisqu'un homme peut pénétrer dessus et dessous les foyers. Il est d'ailleurs une circonstance qui facilite ce nettoyage ; c'est que les dépôts boueux se déposent naturellement au fond de la chaudière qui n'est que faiblement chauffée par les retours de flamme ; ils ne tendent pas y adhérer et on peut en évacuer la majeure partie au moyen du robinet de vidange que nous avons figuré sous le trou d'homme, au bas de la devanture de la chaudière.

Il est bon de disposer la maçonnerie de manière à ce que l'on puisse facilement entrer dans les foyers et en retirer les cendres qui s'y amassent en grande quantité au-delà de l'autel.

Examinons maintenant si les dimensions principales de la chaudière de nos croquis satisfont aux règles que nous avons posées pour les grilles et les sections des carneaux.

La surface de chauffe égale à la somme des deux surfaces des tubes diminuées des parties placées sur la grille, plus la moitié de la surface extérieure de la chaudière, est dans cette chaudière $75^m. 4$.

La section des foyers égale à peu près à la moitié de la section des tubes est d'environ 25 décimètres carrés pour chaque foyer, ou $50^d. 4$ pour les deux foyers.

La section des premiers carneaux est égale à celle des tubes, soit $50^d. 4$ pour chacun d'eux, $100^d. 4$ en tout.

La section de chacun des deux carneaux latéraux est d'environ $90^d. 4$, ainsi que celle du passage entre ces deux carneaux. Celle du passage à la cheminée est $75^d. 4$.

Enfin, la surface de la grille est en tout $2 \times 0^m,800 \times 2^m,400 = 3^m,4$ 36.

On voit que celle-ci est à peu près la vingtième partie de la surface de chauffe, ce qui est une bonne proportion pour les grandes chaudières.

Les sections des carneaux satisfont aussi aux règles pratiques ordinaires. Celle du passage à la cheminée est $1/100$ de la surface de chauffe, ce qui est une bonne proportion ; les autres sections sont toutes supérieures. Cependant, elles ne le sont pas autant que nous l'avons conseillé. En effet, nous avons dit que pour obtenir une égalité approchée entre la vitesse du courant de fumée, dans les différents points de son parcours, il fallait donner au foyer et à l'entrée du premier carneau une section $2 \frac{1}{2}$ fois plus grande que celle de la cheminée ou du conduit qui y aboutit, tandis qu'à l'entrée du second carneau la section devait être seulement 2 fois, et à l'entrée du troisième carneau seulement $1 \frac{1}{2}$ fois plus grande que cette section de la cheminée. C'est surtout pour le foyer que cette règle n'est nullement suivie dans les proportions de nos figures. Loin d'être $2 \frac{1}{2}$ fois plus grande que celle de la cheminée, la section des deux foyers réunis, n'est que les $2/3$ de celle-ci, et la moitié de celle du premier carneau ; aussi il se produit dans celui-ci un phénomène remarquable : la flamme, au lieu de se diriger directement vers les extrémités des tubes, tourne en spirale dans l'intérieur de ceux-ci, en faisant, depuis l'autel jusqu'à l'extrémité des tubes un nombre de tours plus ou moins grand selon l'énergie du tirage ; ce tournoiement de la flamme s'explique précisément par la différence de vitesse qu'éprouve brusquement le courant de gaz, en passant de la section étroite du foyer dans une section double ; il se produit un remous, comme il s'en produit presque toujours en pareil cas. Du reste, ce tournoiement, loin d'être nuisible ici, est plutôt avantageux, en ce qu'il augmente l'activité de la surface de chauffe des tubes, le développement du parcours suivi par les gaz et, par conséquent, l'utilisation de leur chaleur ; mais on comprend qu'il n'en serait nullement de même dans des chaudières à fourneaux ordinaires où ces remous n'auraient pour effet que

d'échauffer plus fortement la maçonnerie et de contrarier le tirage.

On a construit des chaudières à foyers intérieurs et à bouilleurs, c'est-à-dire que, dans l'intérieur des tubes, au-delà des foyers, on a quelquefois placé des tubes bouilleurs, comme le montrent les figures 9 et 10. Cette disposition est tout au moins inutile, en ce que la surface de chauffe qu'elle semble ajouter à celle de la chaudière, n'est obtenue qu'aux dépens de la valeur de celle des parois de la chaudière. En effet, l'expérience montre que cette dernière n'est que peu active dans les chaudières à foyers intérieurs ordinaires; elle doit l'être encore beaucoup moins lorsqu'on augmente la surface de chauffe dans les tubes par l'addition d'un bouilleur intérieur. En général on ne doit chercher à augmenter la surface de chauffe indirecte d'un générateur que lorsque les dimensions et les dispositions de celui-ci sont telles que le courant de gaz conserve trop de chaleur au moment de pénétrer dans la cheminée, et ce n'est certainement pas le cas avec les chaudières à foyers intérieurs.

C'est une erreur contraire qui a fait imaginer des chaudières chauffées à la fois intérieurement et extérieurement. La surface de chauffe directe doit devenir par là trop considérable, par rapport à la surface indirecte et les gaz doivent quitter le fourneau à une température trop élevée; sans doute, on augmente de cette façon la production de vapeur de la chaudière, mais ce n'est qu'aux dépens d'un surcroît plus grand de consommation de combustible.

33. CHAUDIÈRES A FOYERS ET A CARNEAUX INTÉRIEURS. — On a également cherché à augmenter la surface de chauffe des chaudières à foyers intérieurs en les munissant en même temps de carneaux intérieurs, dans lesquels circulaient la flamme et la fumée à leur sortie des foyers. Cette disposition n'a pas plus de valeur que celles que nous venons d'indiquer, si on l'applique aux chaudières de machines fixes dans lesquelles on peut obtenir par des carneaux latéraux en maçonnerie un développement de surface de chauffe bien suffisant. Mais elle a été d'un très-grand secours pour les chaudières de bateaux, et l'on a imaginé une

très-grande quantité de formes différentes présentant toutes la même disposition essentielle, savoir des foyers intérieurs suivis d'un long développement de carneaux formés par des cloisons dans l'intérieur de la chaudière. Nous ne nous arrêterons pas un instant à ce genre de chaudières parce qu'il est maintenant à peu près complètement abandonné par suite de l'emploi de plus en plus général des chaudières tubulaires dont nous allons nous occuper.

34. CHAUDIÈRES TUBULAIRES. — Nous venons de dire que ces chaudières ne sont que des chaudières à foyers et à carneaux intérieurs ; en effet, le foyer est à l'intérieur du générateur et les gaz qui s'en échappent doivent, avant d'atteindre la cheminée, parcourir un système de tubes formant carneaux et entièrement entourés de l'eau à vaporiser.

On trouve bien aussi une disposition contraire, c'est-à-dire des tubes chauffés par l'extérieur et dans lesquels circule l'eau, mais cette disposition est aussi rare que celle des chaudières tubulaires proprement dites est commune. Nous parlerons donc principalement de celles-ci.

La chaudière de locomotive est le type des chaudières tubulaires, c'est pourquoi nous en avons présenté un croquis (fig. 1, 2, pl. 14), quelque communs que soient les dessins de ces chaudières. On distingue trois parties essentielles dans ce genre de générateur, la *boîte à feu*, ou foyer, les *tubes* et la *boîte à fumée* surmontée de la cheminée.

La boîte à feu des locomotives est à parois rectangulaires, et entièrement entourée d'eau, excepté sous la grille et dans la partie où se trouve la porte du foyer. C'est là une disposition commandée par les conditions auxquelles doit satisfaire la locomotive et nullement indiquée par les règles d'une bonne et utile construction. Aussi, comme nous ne pouvons considérer ici la locomotive que d'une manière en quelque sorte accidentelle, parce que l'étude sérieuse d'un tel sujet nous entraînerait trop loin, nous ne nous arrêterons à cette forme de chaudière que pour en montrer les défauts et examiner les modifications qu'on doit lui faire subir lorsque les conditions à remplir le

permettent. La forme plane des parois de la boîte à feu, et de la partie de la chaudière qui la recouvre, ôterait à ces parties toute résistance si on ne les renforçait l'une par l'autre ; c'est pourquoi la boîte à feu et la chaudière sont fixées l'une à l'autre par un grand nombre d'entretoises ; celles-ci doivent d'ailleurs résister à l'énorme pression qui s'exerce sur la face supérieure de la boîte à feu, pression qui n'est pas contrebalancée par une pression contraire, et peut atteindre 100,000^k dans certaines locomotives.

Il est évident que cette disposition rend impossible tout nettoyage des parois extérieures de la boîte à feu et des parois intérieures de la partie correspondante de la chaudière. Il en est de même pour la partie où sont les tubes ; ceux-ci dont le diamètre dépasse rarement 6 cent. sont en aussi grand nombre que possible et il est aussi impossible de les nettoyer extérieurement, sans les démonter, que de nettoyer la partie de la chaudière qui les renferme. Le tirage, activé comme on le sait par le jet de la vapeur qui se fait à la sortie des cylindres dans la cheminée, est tellement énergique que l'air en passant dans les tubes avec une grande vitesse y entraîne avec cette même vitesse une masse considérable de poussière fine, résidu de la combustion du coke ; cette poussière raye et use les tubes à tel point qu'il faut les renouveler très-fréquemment ; la dilatation et la contraction qu'éprouvent ces tubes sont aussi une cause de fuites et de réparations continuelles. Ce tirage d'ailleurs coûte énormément cher, en ce que la force nécessaire au jet de vapeur ne s'obtient qu'en créant dans les cylindres une contrepression qui s'élève souvent au-delà du tiers de la pression effective. Enfin l'espace laissé au-dessus des tubes et de la boîte à fumée est si petit qu'il n'y a aucune proportion entre la chambre de vapeur et la surface de chauffe. Aussi n'est-il pas rare de voir la vapeur s'échappant d'une chaudière de locomotive entraîner la moitié de son poids d'eau.

En présence de tous ces inconvénients réunis, il semble que l'on n'aurait pas dû songer un seul instant à employer un semblable système de générateur sans y être obligé par les conditions à remplir. Mais on a reconnu avec raison que c'était

précisément la multiplicité de ces conditions qui était la source de ces inconvénients, et que l'on pourrait éviter plus ou moins complètement ceux-ci, lorsque l'on ne serait point soumis à celles-là. En effet, de même que dans la construction de la machine locomotive on a dû aller à l'encontre de toutes les règles suivies jusque-là, parce qu'il fallait obtenir sous un petit volume une extrême puissance, de même il a fallu renoncer à suivre toutes les règles indiquées pour la construction des chaudières, lorsque l'on a voulu, avec un générateur relativement très-petit, obtenir une très-grande production de vapeur; il a fallu avant toutes choses exagérer la grandeur et l'activité de la surface de chauffe.

D'ailleurs, même dans les conditions défavorables où se trouvent les chaudières à locomotives, celles-ci sont loin d'être de mauvaises chaudières; elles sembleraient même remarquablement économiques si l'on pouvait accepter sans corrections les résultats des observations faites sur leur production de vapeur.

Ainsi M. Chaudré a trouvé dans diverses expériences faites en 1854 sur deux locomotives de la ligne de l'Est, en France, une production moyenne de 27^k,65 de vapeur par mètre carré de surface par heure, et de 8^k,24 par kil. de coke, ce qui revient à 10^k,30 par kil. de houille, la houille ayant un pouvoir calorifique de 1/4 plus élevé que celui du coke. Une autre expérience de M. Chaudré est intéressante en ce qu'elle montre combien est grande l'influence d'une marche forcée sur la consommation. La vitesse du train ayant été augmentée de plus de moitié, la production de vapeur s'était élevée à 46^k,7 par mètre carré et par heure, et relativement à la quantité de coke brûlé réduite à 6^k,05 par kil. de coke, quantité correspondante à 7^k,57 par kil. de houille, soit 1/4 de moins que pendant la marche normale.

Ce dernier chiffre serait même très-satisfaisant et les premiers seraient bien voisins du maximum de production possible, si nous ne devons y apporter une correction importante: nous avons déjà dit que la quantité d'eau entraînée par la vapeur dans les chaudières de locomotives s'élève en général au tiers

du poids de vapeur. Ce poids d'eau chaude n'a absorbé au plus que le quart de la chaleur qu'aurait absorbé le même poids de vapeur; de sorte que le poids d'eau fourni par la pompe a donné $\frac{2}{3}$ de son poids de vapeur et $\frac{1}{3}$ d'eau chaude équivalant, comme chaleur emportée, à $\frac{1}{12}$ de vapeur, soit donc en tout $\frac{9}{12}$ ou $\frac{3}{4}$ de vapeur, c'est-à-dire que pour connaître la production de vapeur nous ne devons prendre que les $\frac{3}{4}$ de l'eau dépensée. Par suite, la production de vapeur par kil. de houille se réduit aux chiffres de production par kil. de coke, soit en moyenne $8^k,24$ en marche normale, $6^k,05$ en marche forcée.

Ces chiffres sont encore très-beaux, et l'on comprend que l'on ait cherché à appliquer aux machines fixes des chaudières donnant de semblables résultats dans des conditions peu favorables.

Affranchis de ces conditions, les constructeurs en sont revenus aux formes simples des chaudières ordinaires, c'est-à-dire aux formes cylindriques. A part les chaudières de bateaux dont les formes dépendent de différentes conditions, les chaudières tubulaires sont ordinairement composées d'un corps cylindrique dans lequel se trouvent un ou plusieurs foyers également cylindriques, et un nombre plus ou moins grand de tubes de $0^m,05$ à $0^m,10$ de diamètre allant vers l'arrière de la chaudière en prolongeant les foyers, comme dans les locomotives et beaucoup de locomobiles, ou revenant vers l'avant comme dans plusieurs chaudières de bateaux.

Les figures 3 et 4 (pl. 14) représentent une petite chaudière tubulaire de 8^m de surface de chauffe, pouvant alimenter une machine de 5 à 6 chevaux.

Les figures 5, 6, 7, 8 (pl. 14) représentent une chaudière à deux foyers intérieurs avec chambre de combustion et parties tubulaires, d'une disposition parfaitement combinée par M. W. Fairbairn.

Entre les figures 9, 10 et 11 (pl. 14) reproduisent une chaudière de 12 chevaux avec tubes revenant vers l'avant de la chaudière et construites de façon à ce que l'on puisse retirer le foyer et les tubes, lorsqu'on veut nettoyer ou réparer l'une

de ces parties. Cette chaudière, brevetée au nom de M. Pérignon, fait partie du système des machines transportables de MM. Thomas, Laurens et Pérignon.

Les règles qui doivent présider à la construction de ces chaudières sont celles que nous avons posées pour les chaudières à foyers et à carneaux intérieurs. Il faut que la section totale en un point quelconque des carneaux soit toujours au moins égale à celle que donne la règle de d'Arcet, savoir un décimètre carré pour 3^k de houille à brûler par heure, ce qui revient en général à 1^{d.4} par mètre carré de surface de chauffe, comme nous l'avons indiqué précédemment.

Le calcul (1) montre que cette règle ne peut être satisfaite que pour autant que la longueur des tubes ne dépasse pas 25 fois leur diamètre; il est bon même qu'elle ne soit au plus que de 22 à 23 fois le diamètre pour qu'il y ait un rapport convenable entre la surface de chauffe directe des foyers et celle des tubes.

(1) On peut établir entre la surface de chauffe, le nombre et les dimensions des tubes d'une chaudière tubulaire à foyers cylindriques, des relations analogues à celles que nous avons posées pour les chaudières à foyers intérieurs.

Soient encore S la surface de chauffe et s une section transversale faite en un point des carneaux. Pour que le tirage soit convenable, il devra y avoir entre ces deux aires un rapport a , de sorte que l'une des conditions à remplir est exprimée par

$$s = \frac{S}{a}. \quad (1)$$

Soient maintenant D le diamètre des tubes qui contiennent les foyers, N leur nombre, L la longueur de la grille, L' la longueur restant au-delà de la grille, et de même d , n , l le diamètre, le nombre et la longueur des petits tubes.

La surface de chauffe se composant de la moitié de la surface des foyers et de toute la surface des tubes, on aura

$$S = \frac{N \pi D L}{2} + N \pi D L' + n \pi d l. \quad (2)$$

Si s_1 représente une section transversale des foyers, s_2 une section

Ainsi on se donnera d'abord le diamètre des tubes que l'on veut employer et qui varie ordinairement de 0^m,050 à 0^m,100. Puis, divisant la surface de chauffe que l'on veut avoir par 100 fois la surface de cercle correspondante à ce diamètre, on aura le nombre minimum des tubes qu'il sera bon de dépasser autant que possible.

Ce nombre posé, on trouvera le diamètre à donner aux tubes des foyers pour que leur surface postérieure puisse recevoir les

transversale au-delà de la grille, mais avant les tubes, et s_2 une section transversale des tubes, on aura :

$$s_1 = \frac{N \pi D^2}{8} \quad (5)$$

$$s_2 = \frac{N \pi D^2}{4} \quad (4)$$

$$s_3 = \frac{n \pi d^2}{4} \quad (5)$$

Le seul rapport $s_1 = \frac{1}{2} s_2$ montre que les foyers ne pourront pas satisfaire, en même temps que les autres parties de la chaudière, à la relation $s = \frac{S}{a}$. Ces foyers sont toujours trop petits, comme nous l'avons déjà dit à propos des chaudières à foyers intérieurs. Pour que la section soit suffisante au-delà, on devra avoir

$$\frac{n \pi d^2}{4} = \frac{1}{a} \left(\frac{N \pi D L}{2} + \pi D L' + n \pi d l \right) \quad (6)$$

et

$$\frac{N \pi D^2}{4} = \text{ou} > \frac{n \pi d^2}{4}.$$

De cette dernière relation on tire :

$$N D^2 = \text{ou} > n d^2, \quad (7)$$

expression d'une première condition à remplir.

L'équation (6) peut s'écrire :

$$a n d^2 = 2 N D L + 4 N \pi D L' + 4 n d l, \quad (8)$$

d'où nous tirons :

petits tubes avec un écartement suffisant de l'un à l'autre. Ce diamètre variera selon que l'on voudra placer les tubes en quinconce, ou en carrés formés de lignes verticales et horizontales.

D'un autre côté, prenant la longueur des tubes égale à 22 fois leur diamètre, on pourra, connaissant leur nombre, calculer leur surface de chauffe totale, on retranchera celle-ci de la surface voulue et l'on pourra calculer enfin la longueur à donner

$$n = \frac{2ND(L+2L')}{d(ad-4l)}. \quad (9)$$

Le nombre n ne pouvant être négatif, on voit que la relation posée (1) ne peut être satisfaite que si l'on a :

$$ad > 4l \quad (10)$$

expression d'une seconde condition.

L'équation (9) sera une troisième relation de condition dont on pourra déduire les quantités inconnues en fonction de celles que l'on se donnera.

On peut joindre à la condition fondamentale exprimée par l'équation (1) d'autres conditions, telles que des rapports déterminés entre la surface de la grille et la surface de chauffe, et entre la surface de chauffe des tubes et celle des foyers; la pratique a fait reconnaître que la surface de chauffe des tubes ne doit pas dépasser 10 fois celle des foyers. Admettons d'une manière plus générale que l'on doit avoir:

$$n\pi dl = \text{ou} < bS_1 \quad (11)$$

en représentant par S_1 toute la surface de chauffe autre que celle des tubes.

L'équation (6) donnant :

$$S_1 + n\pi dl = \frac{an\pi d^2}{4} \quad (12)$$

ou
$$S_1 = n\pi d \left(\frac{ad}{4} - l \right)$$

la relation (10) deviendra

$$\frac{l}{b} = \text{ou} < \frac{ad}{4} - l$$

d'où
$$l = \text{ou} < \frac{a}{l \left(1 + \frac{1}{b} \right)} d. \quad (13)$$

Si nous prenons, comme dans la note précédente, $a = 100$ et de plus

aux tubes des foyers pour que ceux-ci présentent le surplus de surface de chauffe nécessaire.

Ainsi pour la chaudière des fig. 3 et 4, on a choisi des tubes de 0^m,05. Comme on se proposait d'obtenir une surface de chauffe de 7 à 8^m.^q, on devait avoir pour le passage de la fumée dans les tubes une section de 7^d.^q; la section de chaque tube étant de 0^d.^q 20 environ, il fallait au moins 35 tubes. En donnant au tube du foyer unique un diamètre de 0^m,520, nous

$b = 10$, la relation (10) nous donnera

$$l = \text{ou} < 25 \cdot d$$

et la relation (12)

$$l = \text{ou} < 22.75 \cdot d.$$

Ainsi donc la condition seule d'un bon tirage exigera que la longueur des tubes n'excède pas 25 fois leur diamètre, et pour qu'il y ait en outre un bon rapport entre la surface directe et la surface indirecte, il faudra même ne pas excéder le rapport 22,75.

En ajoutant la condition que la grille ait une surface égale à $\frac{1}{c}$ de la surface de chauffe, on a en général :

$$NLD = \left(\frac{n\pi}{2} (L + 2L') + n\pi dl \right) \quad (14)$$

ou, à cause de l'équation (6),

$$NLD = \frac{a n \pi d^2}{c \cdot 4} \quad (15)$$

d'où

$$L = \frac{a n \pi d^2}{c \cdot N \cdot 4D} \quad (16)$$

En prenant dans la relation (15) l'égalité : $4l = \frac{b a d}{b + 1}$, et substituant dans l'équation (9), on trouve :

$$L + 2L' = \frac{n d^2}{2ND} \frac{a}{b + 1},$$

d'où, à cause de l'équation (16),

$$L' + \frac{a n d^2}{4N D} \left(\frac{1}{b + 1} - \frac{\pi}{2c} \right). \quad (17)$$

Faisons, d'après les données admises jusqu'ici, $a = 100$, $b = 10$, $c = 20$; nous aurons :

1° Longueur *maxima* des tubes :

pouvons placer 37 tubes aussi bien en carrés qu'en quinconce ; nous leur donnons une longueur de $1^m,100$, c'est-à-dire 22 fois le diamètre, et nous obtenons ainsi par les tubes seulement une surface de chauffe de $37 \times 1^m,100 \times \text{circ. } 0^m,05 = 6^m,40$; il ne restait plus que $0^m,60$ de surface de chauffe à obtenir par le foyer ; or, pour que la surface de la grille soit au moins $1/20$ de la surface de chauffe, il faut que sa longueur soit au moins de $\frac{8^m,4}{20 \times 0^m,520}$ ou $0^m,770$; avec cette longueur la sur-

$$l = 22,75 d. \quad (a)$$

2° Longueur *minima* de la grille :

$$L = 5,925 \frac{n d^2}{N D}. \quad (b)$$

5° Longueur *minima* totale des tubes qui contiennent les foyers, y compris celle de la grille :

$$L + L' = 4,258 \frac{n d^2}{N D}. \quad (c)$$

4° Nombre minimum des petits tubes :

$$n = \frac{S}{100 \cdot \frac{\pi d^2}{4}}$$

S étant la surface de chauffe totale. Connaissant le nombre et le diamètre des petits tubes, on peut déterminer le diamètre des foyers dont le nombre dépend de la grandeur de la chaudière comme pour les chaudières à foyers intérieurs. Cette détermination sera une simple opération géométrique dont le résultat variera selon que les tubes seront disposés en quinconce ou en carrés suivant des lignes verticales.

Les résultats des 4 formules précédentes peuvent être modifiés avec les valeurs des constantes qu'elles renferment ; ainsi, si l'on compte que 1^k de houille produit 8^k de vapeur, et que 1^m en produit 20 par heure, on aura seulement $2^k,5$ brûlé par heure et par m. q. d'où $a = 125$. Si l'on compte 2^m de surface de chauffe par cheval, la production de vapeur ne doit être que de 10^k de vapeur par m. q. et par heure, et la valeur de a devient 250.

face de la chaudière directement au-dessus de la grille sera $0^m,770 \times \frac{\text{circ. } 0^m,520}{2} = 0^m,463$; en y ajoutant $0^m,30 \times \text{circ. } 0^m,520 = 0^m,49$, nous aurons avec les tubes une surface totale de $7^m,452$.

Cette chaudière, ainsi mesurée, marche dans des conditions de tirage bien meilleures que les chaudières ordinaires, parce que le tirage est ici tout à fait direct; d'un autre côté, les proportions de la chambre de vapeur seront les mêmes que dans les chaudières à foyers intérieurs, attendu que le diamètre extérieur devra être le même que si la chaudière était seulement à foyer intérieur sans tubes, comme celle des figures 4, 5, 6 (pl. 14), à laquelle nous avons donné les mêmes diamètres de foyer et de chaudière qu'à notre chaudière tubulaire, mais avec une longueur de $2^m,670$ au lieu de $2,170$, cette différence de longueur étant nécessaire pour obtenir la même surface de chauffe $7^m,450$.

Si nous comparons ces deux chaudières de même force nous trouverons à la chaudière tubulaire les avantages suivants :

1^o Absence complète de maçonneries et par conséquent de chaleur absorbée par celles-ci ;

2^o Meilleure division de la surface de chauffe, d'où résulte une économie de combustible bien constatée par la pratique, et une plus prompte mise en vapeur, se traduisant aussi en économie de combustible et de temps ;

3^o Facilité de transport d'un point à un autre.

En regard de ces avantages nous devons placer comme inconvénient la difficulté du nettoyage et la nécessité de réparations plus fréquentes; car les petits tubes peuvent être au bout de peu de temps mis hors de service, surtout si les eaux d'alimentation sont très-incrustantes et si l'on ne purge pas fréquemment la chaudière.

Quant aux prix d'établissement de ces deux chaudières ils différeront peu. En effet, il faudra, d'après les règlements relatifs aux machines à vapeur, donner aux tôles extérieures de la chaudière à foyer intérieur sans tubes une épaisseur de $9^{\text{mm}},5$ et seulement de $7^{\text{mm}},5$ pour la chaudière tubulaire. Dans les

deux cas nous devons donner aux tubes renfermant le foyer une épaisseur de 8^{mm}, épaisseur plus grande que celle imposée par les règlements, savoir : 6^{mm},75 ; les petits tubes sont en fer et de 3^{mm} d'épaisseur. Avec ces données on trouve que la chaudière à foyer intérieur doit peser environ 1200^k, et la chaudière tubulaire, avec sa boîte à fumée, environ 1000^k. Malgré cette différence de poids, cette dernière pourra coûter plus cher que la première, parce que sa construction est plus difficile ; mais la différence sera assez petite pour être couverte par les frais de maçonneries qu'exigerait la première chaudière.

En résumé, on devra préférer la chaudière tubulaire à la chaudière à simple foyer intérieur, et par conséquent à tous les autres systèmes de chaudière, quand les eaux d'alimentation seront peu incrustantes, la difficulté du nettoyage étant le seul défaut sérieux de ce genre de chaudière.

Tout ce qui précède s'appliquant également aux autres types de chaudières tubulaires que reproduisent nos croquis, nous n'aurons qu'à faire ressortir ici les avantages qui leur sont particuliers.

La chaudière des figures 8, 9, 10 et 11 appartient au type des chaudières tubulaires à retour de flamme, suivant lequel sont exécutées la plupart des chaudières de bateaux modernes et plusieurs chaudières de locomobiles : mais, tout en appartenant à ce type, elle présente des particularités importantes que nous signalerons plus loin et qui en font un système spécial appelé : à *foyer amovible*. Cette disposition des tubes en retour permet de leur donner plus de longueur sans allonger trop la chaudière ; elle permet aussi d'utiliser mieux la place à donner aux générateurs, ce qui est un avantage important pour les bateaux ; en effet, il est clair que nous aurions pu disposer les tubes de la chaudière des fig. 3 et 4, tout autour du foyer et raccourcir ainsi celle-ci de toute la longueur que nous avons donnée aux tubes, en établissant seulement une seconde boîte à fumée sur le devant de la chaudière. Toutefois cet avantage n'est pas aussi grand qu'on pourrait le croire ; nous avons vu en effet qu'il ne fallait pas dépasser entre la longueur et le diamètre des tubes un certain rapport que l'expérience, de même que le calcul

fondé sur les données pratiques ordinaires, fixent à environ 25. Lorsque la longueur dépasse 25 fois le diamètre des tubes, le tirage ne se trouve plus dans de bonnes conditions, à moins que l'on ne réduise l'activité de la surface de chauffe. Nous avons calculé ce rapport 25 en supposant une production de 20^k de vapeur par mètre carré de surface de chauffe et la nécessité d'une section d'au moins 1^{d.4} par 3^k 1/3 de houille à brûler par heure, pour tous les passages de fumée, ce qui revenait à 1^{d.4} par mètre carré de surface de chauffe, en supposant que chaque kil. de houille produit 6^k de vapeur. Il est évident maintenant que si l'on donne à la chaudière une surface de chauffe assez grande pour qu'on puisse se contenter d'une production de 10^k de vapeur par mètre carré, il suffira d'une section de 1^{d.4} pour 2^{m.4} de surface, et dans ce cas le calcul montre que la longueur des tubes peut atteindre 50 fois leur diamètre. En général, le rapport maximum de la longueur des tubes à leur diamètre doit être égal à 500, divisé par le nombre de kil. de vapeur que l'on veut obtenir par mètre carré de surface de chauffe.

Réciproquement, on pourra compter qu'en marche normale, sans forcer l'activité du foyer, la production de vapeur par mètre carré ne dépassera guère un nombre de kil. égal à 500, divisé par le rapport entre la longueur et le diamètre des tubes. Ce sera donc sans avantage bien réel que l'on augmentera la longueur de ceux-ci sans augmenter leur diamètre, à moins qu'on ait recours à un tirage forcé, ce qui est rarement économique, ou que l'on calcule très-largement la surface de chauffe.

En outre, il faut remarquer qu'en réduisant la longueur de la chaudière, on réduit en même temps la capacité de la chambre de vapeur, qui déjà est presque toujours trop petite dans les chaudières tubulaires.

Je crois donc que lorsque l'on n'y est point forcé par des conditions locales, comme sur les bateaux à vapeur, il n'y a pas de raison sérieuse de placer les tubes en retour vers l'avant au lieu de les placer à la suite du foyer.

Toutefois, les inventeurs de la chaudière des fig. 8 à 11 (pl. 14) se sont proposé un but important, en ramenant ainsi les tubes vers l'avant; c'était de faire du foyer et des tubes un seul tout

pouvant être retiré d'une pièce hors de la chaudière lorsqu'un nettoyage complet ou des réparations l'exigent.

A cet effet, le foyer est rivé d'un côté à une plaque de tôle cintrée A B, de l'autre à une boîte à fumée entièrement close, d'où partent quelques tubes situés sur les côtés du foyer et fixés à leur autre extrémité dans la plaque A B. Sur le contour de cette plaque vient, d'un côté, s'appliquer, comme un chapeau, le corps de la chaudière, de l'autre la boîte à fumée antérieure qui porte la cheminée. Ces trois différentes pièces étant réunies par des boulons, on peut les séparer sans peine, d'autant mieux que les écrous de ces boulons, se trouvant à l'extérieur, ne sont pas du tout exposés à l'action de la chaleur. Ainsi, par exemple, si l'on veut nettoyer la chaudière, il suffit de dévisser les boulons *e* qui réunissent la chaudière au foyer et de retirer celui-ci en même temps que la boîte à fumée; on peut alors nettoyer très-facilement l'extérieur du foyer et des tubes et l'intérieur de la chaudière.

Nous devons faire remarquer que cette disposition très-ingénieuse est susceptible, comme les autres dispositions du type à retour, de se prêter aux proportions voulues entre les différentes parties de la chaudière; le foyer, établi du côté où le tuyau central offre, à cause de sa forme tronc-conique, son plus grand diamètre, est assez spacieux, même pour brûler du bois ainsi qu'on le pratique dans plusieurs scieries: le faisceau tubulaire dont on règle la section totale, suivant que le tirage résulte d'un jet de vapeur ou de l'appel d'une cheminée, peut contenir assez de tubes lorsque le tirage s'effectue par ce dernier moyen, pour qu'il ne soit utile de donner à la cheminée que la hauteur habituelle, comme l'expérience le prouve pour des générateurs atteignant la force de 60 à 70 chevaux. Ce résultat s'accorde, du reste, avec les derniers calculs précédents, si l'on réfléchit que la vaporisation dans ces chaudières est d'au moins 8 kil. d'eau par kil. de houille, et que de plus, on ne leur demande guère que 12 à 15 kil. de vapeur par heure et par mètre carré de surface de chauffe: dès lors la combustion atteint au maximum $\frac{12}{8}$ à $\frac{15}{8}$ kil. de houille par mètre carré de surface

de chauffe, ce qui, d'après la règle de d'Arcet, exigerait pour le passage du gaz une section de $\frac{12}{24}$ à $\frac{15}{24}$ de décimètre par mètre de surface de chauffe, donc une section totale des tubes égale à $\frac{1}{200}$ ou $\frac{1}{160}$ de la surface de chauffe.

Si l'on remarque, en outre, que les résistances au tirage sont moindres dans ces chaudières que dans les chaudières emmuraillées, l'on comprendra que l'on peut obtenir une activité suffisante de la combustion dans des circonstances en apparence insuffisantes.

La pratique a montré que, même pour de grandes chaudières, il est facile de démonter et remettre en place le foyer et les tubes; cette opération s'effectue en quelques heures alors qu'il ne s'agit, par exemple, que de nettoyer la surface de chauffe. La pièce amovible, appelée vaporisateur, atteint rarement en effet un poids de 3000 kil., et, comme elle repose, à l'une de ses extrémités, sur des rails établis dans la chaudière, tandis que l'autre extrémité est supportée à l'aide d'une poulie roulante ou repose sur un rouleau, elle est aisément manœuvrée par deux ou trois hommes de peine. Le joint n'offre pas plus de difficultés à être refait que celui du couvercle, d'un diamètre souvent plus grand, de nombre de machines à vapeur.

On pourrait objecter à la chaudière du système de MM. Laurens et Thomas, représentée par les figures 8, 9, 10 et 11 de la planche 14, l'accumulation des cendres au-delà de l'autel, et la difficulté de réparer les fuites qui pourrait se déclarer à l'extrémité des tubes dans la boîte à fumée intérieure; ces objections ne sauraient s'appliquer à la chaudière reproduite dans le portefeuille de M. Oppermann (III^e volume) non plus qu'aux autres construites d'après les plans de ces ingénieurs.

Une porte spécialement ménagée sous le pont de l'autel permet au chauffeur d'enlever les cendres qui s'accumulent derrière la grille.

Quant aux fuites, on pourrait répondre qu'il ne s'en manifeste pour ainsi dire jamais, tant à cause de l'éloignement du foyer où se trouve cette extrémité des tubes, qu'en raison de l'entière

liberté de dilatation du faisceau tubulaire. Comme cependant un tube peut venir à fuir dans une chaudière construite sans assez de soin, le fond de la boîte à fumée intérieure est boulonné sur une équerre qui entoure toute cette boîte, de telle sorte qu'il suffit de le démonter pour que l'extrémité des tubes se trouve sous la main de l'ouvrier; cette précaution de construction devient inutile pour les générateurs dont le diamètre du tuyau central contenant le foyer atteint 0^m,55 à 0^m,60, parce qu'alors, en enlevant la grille, l'ouvrier pénètre par ce tuyau dans la boîte à fumée qui possède assez de profondeur pour qu'il puisse y faire un mattage.

Observons que la liberté de dilatation laissée au vaporisateur est une condition très-favorable à la durée de toute la surface de chauffe et à sa résistance aux fuites. Aussi, quand MM. Laurens et Thomas conseillent aux manufacturiers de se munir d'un foyer ou vaporisateur de rechange, c'est parce que ce simple foyer remplace en réalité une chaudière complète de rechange, bien à meilleur compte et sans l'encombrement qu'elle occasionne.

Le fond de la boîte à fumée n'a pas non plus habituellement la disposition représentée par la figure 9, planche 14, disposition qui exige des tôles spéciales et n'offre pas aussi facilement la résistance voulue que le fond bombé comme MM. Laurens et Thomas l'établissent. L'absence de toute explosion jusqu'à présent des chaudières qui ont un fond de cette forme, prouve que celle-ci présente toutes les garanties de solidité nécessaire même pour fonctionner sous des pressions de 7 et 8 atmosphères, comme beaucoup de générateurs de ce système fonctionnent en France depuis assez longtemps déjà.

MM. Thomas et Laurens ajoutent encore à la sécurité de leurs chaudières en prolongeant la calandre au-delà du faisceau tubulaire de manière à avoir une forte réserve d'eau. Les graves accidents proviennent, en effet, presque toujours d'un abaissement du niveau de l'eau au-dessous des parois chauffées, ou d'un excès de pression de la vapeur: or, l'allongement de la calandre extérieure permet d'obtenir une augmentation aussi grande que l'on veut de la masse d'eau contenue dans la chau-

dière, et par cette augmentation, si facile à réaliser, qui porte à la fois sur le volume d'eau au-dessus des parois chauffées et sur le volume total, le niveau met bien plus longtemps que dans toute autre chaudière tubulaire, à descendre d'une manière dangereuse pour un même degré de négligence de la part du chauffeur. De plus, la pression monte moins rapidement pour un même excès d'activité du feu, ou bien pour le même temps de moindre dépense en vapeur.

La faculté d'accroître à sa volonté et au gré des besoins, au-delà du faisceau tubulaire, la longueur de la calandre de ces chaudières, permet de réaliser par leur emploi, une régularité de fonctionnement des machines à vapeur aussi complète qu'avec les chaudières à foyer extérieur les plus volumineuses et les plus encombrantes.

MM. Houget et Teston employent parfois pour leurs locomobiles une disposition de chaudière, également à retour de flamme, dont le foyer seul est amovible; les tubes et la boîte à fumée intérieure sont reliés à la chaudière de manière à former un tout très-solide; le fond de cette boîte sort de la chaudière de façon à ce que l'on puisse, par une ouverture aussi large que l'on veut, et fermée pendant le travail par une porte, retirer les cendres de la boîte et pénétrer dans l'intérieur de celle-ci pour les réparations. Le foyer est un tube conique, sur lequel deux cercles *c, c'* constituent des rainures annulaires qui viennent s'appliquer, l'une sur le bord relevé en équerre de la face antérieure de la chaudière, l'autre sur un bord semblable de la plaque des tubes de la boîte à fumée. Du mastic ou toute autre matière à joints placée dans cette rainure, rend étanche la réunion du foyer au reste de la chaudière; toutefois, cette disposition ne réussit bien que pour les petites chaudières, à cause des dilatations qui dérangent les joints. Pour les grandes chaudières on pourrait recourir avec sécurité à une disposition indiquée par MM. Thomas et Laurens, et dans laquelle l'un des joints, celui antérieur, serait remplacé par un stuffing-box.

La chaudière de la locomobile que MM. Houget et Teston avaient exposée l'année dernière à Londres (voir *Revue univer-*

selle de M. de Cuyper, août 1862) était à flamme directe et disposée de telle façon que le foyer et le système des tubes peuvent se retirer ensemble de la chaudière. Cette disposition est d'une construction facile : on peut en voir un croquis dans le *Traité des chaudières à vapeur* de M. Falleinsten : ce croquis représente une petite chaudière construite il y a 4 ans par M. Pétry d'après les plans de MM. Houget et Teston. D'après ces mêmes plans, M. Piedbœuf en a construit une de 30^m² de surface de chauffe.

MM. Biddel et Balk avaient déjà antérieurement fait breveter en Angleterre une chaudière à peu près semblable, que MM. Ransomes et Sims ont appliquée récemment à quelques-unes de leurs locomobiles (voir *Practical Mechanics Magazine*, 1863, p. 285). Nous devons ajouter que la patente Johnson, qui a importé de France en Angleterre le système de l'amovibilité du foyer dans les chaudières, est elle-même d'une année environ antérieure à celle Biddel et Balk.

M. Farcot employe également une chaudière de ce genre : les deux joints sont formés par un fil métallique comprimé entre deux plateaux dressés.

Les figures 3 et 4 représentent une modification apportée récemment, par MM. Houget et Teston, à leur disposition de chaudières à flamme directe ; le foyer pénètre dans une ouverture à bords relevés sur le devant de la chaudière ; une pièce en fer ou en fonte, qui sert de devanture et fixée par des boulons à la face de la chaudière, reçoit dans une rainure remplie de mastic les extrémités des tôles réunies du foyer et de cette face de la chaudière. On remarquera que pour nettoyer antérieurement les tubes de cette chaudière, il suffit de faire sortir de celle-ci le système du foyer et des tubes, seulement de toute la longueur de ceux-ci.

Cette disposition est déjà sous ce rapport plus avantageuse que celles des autres chaudières à parcours direct et susceptibles d'être démontées. En effet, on doit dans tous les cas avoir derrière une chaudière sans retour de flamme, assez de place pour pouvoir nettoyer les tubes ; l'outil que l'on introduit à cet effet dans leur intérieur devant avoir au moins leur longueur,

il faut que cette longueur soit libre derrière la chaudière. Ainsi donc du moment où l'on pourra placer une chaudière à flamme directe, on aura aussi la place pour effectuer le dernier genre de démontage, tandis que, si l'on veut démonter par devant, il faut avoir, en arrière de la chaudière, un espace libre d'une longueur égale à celle des tubes et en avant, un espace d'une longueur égale à celle de toute la chaudière. On se trouve rarement dans de telles conditions, lorsque les chaudières doivent être installées dans l'intérieur des ateliers, et sous ce rapport, les chaudières à retour de flamme seraient souvent préférées, parce que leur installation se prête mieux à toutes les conditions locales.

Dans les générateurs précédents à flamme directe, la dilatation n'est pas libre et le démontage de la partie mobile offre des difficultés réelles à cause des deux joints, difficultés pouvant cependant être évitées par une disposition de ce type que MM. Laurens et Thomas nous ont montré et qui consiste à terminer par un Stuffing-Box d'une construction particulière soit le foyer à l'avant, soit la boîte à fumée à l'arrière.

Il nous reste à parler de la chaudière de M. Fairbairn, qui peut, je n'hésite pas à le dire, être considérée comme l'ensemble le plus parfait que nous possédions des meilleures dispositions, propres à produire économiquement la vapeur. Elle avait été construite d'abord pour les locomotives, et la principale question que M. Fairbairn s'était proposé de résoudre, était la fumivorté des chaudières de ces machines et, par suite, la possibilité de les chauffer à la houille : il eut recours, à cet effet, à l'application aux chaudières tubulaires des doubles foyers qui, de tous les appareils fumivores, donnent, avons-nous dit, les résultats, sinon les plus complets, au moins les plus constants.

La chaudière des figures 5, 6, 7 (pl. 14), est une chaudière de machine fixe. J'en dois le dessin à l'extrême obligeance du constructeur, M. Piedbœuf, qui m'avait déjà confié le dessin de la chaudière à foyer intérieur de la planche 12. On peut, du reste, reconnaître dans la disposition générale de ces deux chaudières une grande analogie ; des deux côtés, la construction est aussi

simple qu'elle peut l'être pour ce genre des chaudières. On a évité autant que possible la nécessité des armatures intérieures; les fonds seuls sont renforcés par des équerres.

Les foyers de cette chaudière tubulaire sont encore circulaires, et les tôles dont ils sont formés sont redressées en équerre dans les lignes de rivets. Ces deux foyers, identiques à ceux d'une chaudière à foyers intérieurs ordinaires, viennent aboutir tous deux dans une chambre de combustion C, du fond de laquelle partent les tubes.

Les produits de la combustion de deux foyers se mélangent dans cette chambre et se brûlent mutuellement, si l'on a soin de charger alternativement les deux grilles.

Cette chambre de combustion est de forme elliptique; elle est soutenue contre la pression de la vapeur d'un côté par son bord antérieur relevé en équerre, de l'autre par les bords courbés de même de la plaque qui reçoit les tubes. Trois nervures dans le sens de la longueur de cette chambre achèvent de la renforcer.

Les tubes de ces chaudières ont généralement $0^m,070$ de diamètre. Dans la chaudière des fig. 5, 6 et 7 (pl. 14), ces tubes sont au nombre de 151, et leur longueur est de $3^m,300$, donc environ 50 fois leur diamètre. Mais il faut remarquer que cette chaudière, présentant une surface de chauffe de 120 mètres carrés environ, n'a été construite que pour faire 60 chevaux de force; c'est aussi pour cette force seulement que la section des tubes offre aux gaz un passage suffisant. La section totale est en effet $151 \times 3,14 \left(\frac{0,070}{2}\right)^2 = 58^d,4$ donc près de $1^d,4$ par cheval, ce qui est en général suffisant. De même la surface de la grille est de $2 \times 0^m,864 \times 2,300 = 345^d,4$, 6, soit près de $6^d,4$ par cheval, ce qui est encore la proportion que nous avons admise.

Ainsi donc cette chaudière se trouve bien proportionnée, du moment où l'on ne veut lui donner qu'une force de 60 chevaux; elle pourrait sans doute fournir beaucoup plus; mais il faudrait alors forcer la marche du foyer et l'on ne pourrait plus compter sur des résultats aussi économiques que ceux qu'elle fournit en marche normale.

On peut affirmer qu'aucun système de générateur ne donne, comme économie de combustible, des résultats plus remarquables et plus constants que ce genre de chaudière tubulaire. Il est rare qu'une chaudière Fairbairn, de dimensions largement calculées, ait donné moins de 8^k de vapeur par kil. de houille, soit 33 % de plus que les bonnes chaudières ordinaires donnant 6^k de vapeur par kil. de houille.

Mais autant cette chaudière offre d'avantages lorsqu'elle est bien proportionnée, autant elle offre d'inconvénients lorsque, dans sa construction, on a perdu de vue une de ces règles essentielles sur lesquelles nous n'avons cessé d'insister. Il suffit, par exemple, que la section des tubes soit trop petite pour que la chaudière ne puisse pas fonctionner, et le cas s'est présenté plusieurs fois où des chaudières ont été mises entièrement de côté, sans autre cause que celle-là.

Nous n'hésitons pas à recommander l'emploi de cette chaudière de préférence à toute autre, surtout pour des forces de 30 à 60 chevaux et sauf le cas où les eaux sont fortement incrustantes. Le nettoyage des tubes devient alors une sérieuse difficulté. Lorsque les eaux n'incrustent que modérément, on peut nettoyer les tubes en vidant la chaudière fréquemment, et en faisant de temps en temps, lorsque la chaudière est vide, un petit feu de bois dans les foyers. Les incrustations, en s'échauffant, s'écaillent et tombent au fonds de la chaudière, on les retire par des trous d'homme qui permettent de pénétrer dans toutes les parties du fonds. Sans exiger d'autres soins que ces nettoyages faciles, ces chaudières peuvent marcher fort longtemps. Celle que représentent ces figures fonctionne depuis près de 8 ans dans une raffinerie de sucre de Cologne, sans avoir subi la moindre réparation; ses résultats ont été tellement satisfaisants que le même établissement a commandé successivement 5 chaudières semblables.

Il existe un type de grande chaudière horizontale semblable extérieurement à celle de Fairbairn, mais toute différente à l'intérieur, et qui paraît être employée avec succès en Angleterre; je veux parler de la chaudière de Galloway (fig. 5 et 6, pl. 15). Les tubes de cette chaudière sont verticaux et coniques; ils sont

placés dans l'intérieur des tubes foyers où ils forment comme des colonnes renversées. Ces tubes sont chauffés à l'extérieur par le courant de gaz et l'eau circule dans leur intérieur. Ces dispositions sont certainement très-rationnelles; les tubes ainsi placés ne peuvent que renforcer les foyers, leur nettoyage est très-commode, le mouvement de circulation de l'eau doit y être très-actif et le dégagement de vapeur facile; cependant cette chaudière, d'après les nombreuses observations de M. Longridge, n'arrive, comme économie du combustible, qu'au troisième rang. Elle atteint le second lorsqu'on ajoute une partie tubulaire ordinaire d'environ un mètre de longueur, après la série des tubes verticaux. Mais en tête reste toujours la grande chaudière tubulaire ordinaire. Nous ne pouvons donc abandonner notre préférence pour cette chaudière, même en présence des louanges particulières données à la chaudière de Galloway par M. Longridge, ni des arguments par lesquels M. Wye Williams cherche à démontrer que les chaudières tubulaires ne peuvent être avantageuses. L'expérience a si bien contredit ces arguments qu'il nous serait inutile de les relever.

Il nous resterait à parler des chaudières tubulaires verticales: mais nous croyons inutile de nous arrêter à la description des nombreuses formes de ce genre qui ont été imaginées parce qu'elles sont en général inférieures aux chaudières horizontales. Le seul avantage qu'elles offrent est de prendre moins de place horizontalement; mais il est largement compensé par les inconvénients d'une construction plus compliquée, offrant plus de difficulté aux nettoyages et aux réparations, et donnant aux surfaces de chauffe des dispositions peu favorables. On sait, en effet, que les surfaces verticales sont inférieures comme surface de chauffe aux surfaces horizontales. Or, la plaque qui porte les tubes est ordinairement dans ces chaudières la seule surface de chauffe horizontale, et il vaudrait même mieux qu'elle ne le fût pas; car c'est sur cette plaque, entre les tubes, que se déposent les incrustations, d'autant plus dangereuses que cette plaque est directement soumise à l'action du foyer; de sorte que si l'on n'a pas soin de purger très-souvent la chaudière, cette plaque et les extrémités des tubes qui y sont engagées sont

très-sujettes à se détériorer. Il en est de même de l'extrémité supérieure des tubes qui, se trouvant dans la vapeur et non dans l'eau, n'est pas suffisamment protégée contre l'action de la chaleur. On a même cru devoir interdire souvent, pour cette seule cause, l'emploi de ce genre de chaudière. Toutefois, certaines dispositions ne présentent pas ce défaut, les tubes étant entièrement plongés dans l'eau et la cheminée ayant ses parois isolées au centre d'un réservoir de vapeur de forme annulaire (1); mais ces dispositions ont pour effet de réduire le réservoir de vapeur qui, dans ces chaudières, est presque toujours très-petit.

En résumé, ces chaudières ne peuvent être recommandées que dans des cas spéciaux, par exemple pour des formes particulières de locomobiles, ou pour de petites machines fixes auxquelles on ne peut consacrer qu'un très-petit emplacement.

35. NOUVEAUX SYSTÈMES DE GÉNÉRATEURS. — Nous avons dit (§ 28), qu'après avoir décrit les générateurs de vapeur dont l'usage a été sanctionné par la pratique, nous dirions quelques mots d'autres systèmes d'une construction essentiellement différente, et dont il importe de connaître au moins les dispositions fondamentales, ne fût-ce que pour savoir ce que dans l'avenir l'on pourra attendre de dispositions semblables. Nous avons cité les générateurs de MM. Belleville, Boutigny et Testud de Beauregard.

Le générateur de M. Belleville n'est qu'un serpentín, placé verticalement au-dessus d'un foyer et dans lequel une pompe envoie constamment une quantité d'eau égale à celle que la chaleur convertit en vapeur; une soupape convenablement chargée règle l'alimentation de manière à maintenir cette égalité entre l'eau fournie et la vapeur dépensée (2). L'absence de tout réservoir de vapeur aurait nécessairement pour effet de

(1) Voir : WIEBE *Skissen buch für den Ingenieur und Maschinenbauer*, 4^{er} liv., pl. 5.

(2) Voir *Génie industriel* de M. Armengaud, t. VIII, p. 88.

charger celle-ci d'une quantité considérable d'eau entraînée, si M. Belleville n'avait imaginé de la faire passer, au sortir du serpentín où elle se forme, dans un autre serpentín dont les spires, d'un diamètre beaucoup moindre que celles du générateur, enveloppent celles-ci en redescendant vers le foyer. La vapeur, en parcourant ce second serpentín, se dépouille de l'eau qu'elle entraîne et se surchauffe fortement, c'est-à-dire acquiert une température beaucoup plus élevée que celle qui correspond à la pression qu'elle possède. Nous examinerons plus loin cette question du surchauffement de la vapeur, mais nous pouvons dire dès maintenant que la vapeur trop fortement surchauffée, exerce une action nuisible sur les organes essentiels des machines à vapeur, en brûlant les étoupes des bourrages et en amenant par le dessèchement des parties frottantes, telles que les tiroirs et les pistons, un grippement très-nuisible à ces parties et au travail général de la machine. Or, il me paraît difficile que le surchauffement de la vapeur dans le générateur de M. Belleville, puisse être contenu dans de bonnes limites. Il pourra procurer dans les premiers temps, d'importantes économies de combustible, mais celles-ci peuvent être rachetées bientôt par le surcroît de dépense provenant de la détérioration des parties essentielles de la machine.

Le générateur serpentín est aussi lui-même sujet à de graves altérations; fortement chauffé et d'autant plus sujet à s'incruster qu'il est à peu près impossible à nettoyer, ce serpentín devrait bientôt perdre de sa conductibilité et s'altérer profondément, si on ne l'alimentait avec des eaux très-pures.

A côté de ces défauts sur lesquels une pratique assez longue peut seule se prononcer définitivement, nous devons mentionner d'importantes qualités, telles qu'une réduction considérable dans les dimensions et poids de ces chaudières, une vaporisation très-active succédant à un allumage très-court, et enfin l'absence de danger d'explosion et la possibilité d'atteindre des pressions très-élevées. En effet, comme la pratique l'a prouvé, une explosion du serpentín se produit sans accident grave, le tube se déchire sur une longueur plus ou moins grande, mais l'absence d'une forte masse d'eau ou de vapeur rend cette

déchirure inoffensive et prompte à réparer. On pourrait donc porter sans danger la pression à un degré qu'on n'oserait atteindre dans les chaudières ordinaires, à cause des dangers qu'elle présenterait, et de la difficulté de donner aux tôles des générateurs de formes ordinaires les énormes épaisseurs qui seraient nécessaires.

Ces qualités sont telles que l'on peut espérer voir la chaudière Belleville prendre place parmi les générateurs usuels, au moins dans certains cas où la légèreté d'un générateur, ses petites dimensions et sa sécurité sont des avantages de premier ordre. Il en est ainsi particulièrement pour les bateaux à vapeur; du reste, des essais exécutés en France depuis assez longtemps déjà permettront de fixer bientôt la valeur de ce mode de générateur.

La chaudière de M. Testud de Beauregard est un vase de petite dimension, dont le fond est une plaque chauffée au rouge par un foyer. De l'eau, amenée par des tuyaux circulant dans les carneaux, vient tomber en gouttes sur cette plaque et s'y transformer en vapeur fortement surchauffée. Des essais faits en France et en Belgique ont montré que ce générateur pouvait, avec des dimensions entièrement petites, développer une grande puissance; mais des accidents graves survenus pendant ces essais, et des irrégularités continuelles dans la production de vapeur ont fait abandonner complètement ces expériences.

Le générateur de M. Boutigny est une chaudière cylindrique verticale, chauffée par le dessous. Dans l'axe de cette chaudière est une barre de fer portant plusieurs diaphragmes ou calottes sphériques de tôle, disposées de telle façon que l'eau projetée sur le diaphragme supérieur s'étale successivement sur les surfaces des diaphragmes suivants jusqu'à ce qu'elle soit entièrement réduite en vapeur; comme dans les deux appareils précédents, la chaudière ne reçoit à chaque instant que la quantité d'eau qui doit être immédiatement consommée à l'état de vapeur, et l'on peut, en réglant cette quantité d'eau, surchauffer la vapeur à tel degré que l'on veut; il suffit pour cela de fournir une quantité d'eau moindre que celle qui serait nécessaire pour remplir la chaudière de vapeur saturée.

Ce générateur, qui ne convient que pour de petites forces, paraît avoir donné de bons résultats, puisque M. Boutigny assure avoir obtenu jusqu'à 8^k de vapeur par kil. de houille, et 95^k par mètre carré de surface de chauffe, avec une petite chaudière de 0^m,31 de diamètre sur 0^m,64 de hauteur, qui vaporisait environ 50 litres par heure. Ces résultats, dont il serait inutile de faire ressortir l'importance, ne sont probablement pas reproduits d'une manière constante, car ils étaient de nature à rendre générale l'application aux petites machines à vapeur d'un générateur qui est loin d'être très-répandu.

Nous devons faire, du reste, sur les trois systèmes précédents une remarque générale qui nous permettra de comprendre pourquoi, malgré les brillants résultats annoncés, aucun d'eux n'est réellement entré dans la pratique. Le caractère particulier de ces générateurs est de produire de la vapeur au fur et à mesure qu'on en consomme. Ils n'ont ni réservoir de vapeur, ni réservoir d'eau. Or, quelque ingénieuses que soient les dispositions adoptées pour régler la quantité d'eau fournie en proportion de la quantité de vapeur dépensée, il doit être très-difficile d'obtenir entre ces deux quantités une égalité, non pas mathématique, mais seulement suffisante pour les besoins de la pratique, la régularité de marche étant une des conditions premières de tout appareil à vapeur. Si même la régularité voulue a été obtenue dans des essais faits par les inventeurs, après de nombreux tâtonnements et avec de très-grands soins, il est permis de supposer qu'il n'en a plus été ainsi lorsque ces appareils ont été abandonnés aux mains de chauffeurs qui n'ont pu apporter à leur maniment l'attention incessante qu'ils exigeaient. Il y a certes lieu de leur appliquer ce reproche adressé par les praticiens à tous les appareils compliqués, qu'ils demandent pour conducteurs non pas des ouvriers, mais des ingénieurs. Ajoutons encore que l'on peut objecter à tous ces appareils la question de durée, puisque dans plusieurs de leurs parties les tôles sont soumises à l'action directe de la chaleur sans être intérieurement protégées par de l'eau contre une trop forte élévation de température.

36. ALIMENTATION DES CHAUDIÈRES. — Les chaudières actuelles sont généralement alimentées par des pompes foulantes; autrefois, les chaudières à basse pression étaient souvent mises directement en communication avec des réservoirs placés à une hauteur suffisante pour que le poids de la colonne d'eau pût vaincre la pression de la vapeur. La hauteur du niveau dans le réservoir au-dessus du niveau dans la chaudière devait être d'au moins autant de mètres que l'excès de pression intérieure comptait de dixièmes d'atmosphère. Remarquons que cette disposition, inapplicable d'ailleurs aux chaudières à haute pression, ne présentait d'avantage réel que dans des cas spéciaux, où l'eau pouvait arriver d'elle-même dans ces réservoirs; car si l'on devait l'y élever au moyen d'une pompe, il était plus rationnel et plus simple de fouler directement, à l'aide de celle-ci, l'eau dans la chaudière.

Les pompes aspirantes et foulantes actuellement employées, sont généralement à pistons plongeurs. Nous n'avons pas à entrer ici dans leur description; bornons-nous à dire qu'on calcule leur diamètre et leur course d'après cette condition, que le volume d'eau foulé en un temps donné, en une heure par exemple, soit le double de celui que la chaudière doit vaporiser pendant ce temps. La pompe ne doit alors fonctionner que pendant la moitié du temps de la marche de la machine. On la rend inactive, soit en desserrant une vis de pression, ou en retirant une clavette, qui fixe le piston à la tige dont il reçoit le mouvement, soit en ouvrant un petit robinet placé en un point quelconque de la pompe et qui, donnant accès à l'air dans son intérieur, l'empêche de fonctionner, quoique le piston continue à se mouvoir.

Nous avons déjà dit, § 27, que l'on obtiendrait plus de constance dans la température de l'eau de la chaudière et par conséquent dans la pression de la vapeur, en alimentant d'une manière continue avec une pompe, et en tenant une seconde en réserve pour le cas où la consommation d'eau augmente. Il vaut donc mieux munir ainsi les machines de deux pompes foulantes, calculées de manière à fournir chacune exactement le volume d'eau consommée. L'une des pompes peut alors fonc-

tionner à peu près constamment ; on ne doit l'arrêter que quelques instants lorsqu'on voit le niveau s'élever trop dans la chaudière ; de même on ne doit aussi faire fonctionner la seconde pompe que pendant fort peu de temps, quand on voit que, malgré le travail de la première, l'eau baisse d'une manière continue dans la chaudière. On diminue ainsi, par l'emploi de deux pompes, l'importance des variations du niveau, en même temps que par la continuité de l'alimentation on maintient constante sa température.

On obtient encore mieux cette constance de température, en même temps qu'une notable économie de combustible, en chauffant l'eau avant son entrée dans la chaudière, soit au moyen de la chaleur perdue du gaz du fourneau, soit au moyen de la vapeur de décharge d'une machine sans condensation.

On peut chauffer de différentes manières l'eau d'alimentation par la vapeur de décharge : 1° en faisant passer la vapeur au-dessus de la surface de l'eau dans la bêche où aspire la pompe ; 2° en faisant passer la vapeur à travers la masse d'eau contenue dans cette bêche ; 3° en faisant passer la vapeur dans des tuyaux entourés de l'eau à échauffer ; 4° en faisant passer l'eau dans des tuyaux chauffés extérieurement par la vapeur.

Le premier procédé donne peu de résultat, l'eau ne s'échauffe qu'à la surface supérieure, sa mauvaise conductibilité s'opposant à la transmission de la chaleur aux couches inférieures qui, plus froides que celles qui les surmontent, ne se mélangent pas avec elles.

Le second procédé échauffe mieux l'eau, mais il crée une contrepression toujours nuisible, en même temps qu'il produit des vibrations dans les tuyaux par suite des condensations successives qu'éprouve la vapeur en arrivant dans l'eau. Ces vibrations se manifestent par un bruit désagréable que l'on a souvent l'occasion d'entendre, lorsqu'on laisse passer la vapeur d'une chaudière de locomotive dans l'eau du tender.

Ces deux procédés ont en outre l'inconvénient de faire aspirer à la pompe de l'eau chaude, et il est naturel de penser qu'elle doit moins bien fonctionner dans ce cas que lorsqu'elle aspire de l'eau froide ; les soupapes, surtout si elles sont en caoutchouc,

les joints et les bourrages doivent souffrir du contact continuels de l'eau chaude.

Cet inconvénient est le seul qu'on puisse reprocher au mode de chauffage par contact direct de la vapeur et de l'eau, imaginé par M. Cavé. Son appareil consiste en un coffre cylindrique dans lequel arrive la vapeur de décharge qui s'en échappe par une tubulure supérieure. Le haut de l'appareil est traversé par un tuyau dont le dessous est percé de petits trous; l'eau d'alimentation amenée dans ce tuyau en sort sous forme de nappe tombant au milieu de la vapeur. Le dessous du coffre se remplit ainsi d'eau à 90° ou à 100° qu'aspire la pompe. (Voir Armengaud, publication industrielle, t. XI, p. 315).

Le troisième procédé présente également cet inconvénient de faire aspirer de l'eau chaude par la pompe; en outre par l'allongement et les détours imposés au tuyau de décharge il crée à la vapeur une résistance.

Le dernier moyen paraît préférable. Il suffit de faire arriver la vapeur de décharge dans un coffre renfermant un serpentin dans lequel la pompe foule l'eau froide qu'elle a aspirée, et qui ne s'échauffe ainsi que dans le trajet de la pompe à la chaudière. Il y a également avantage au point de vue des résistances; car si la densité plus grande de l'eau tend à lui faire éprouver plus de frottement, la différence de vitesse produit beaucoup plus d'effet sur la vapeur. En effet, nous savons qu'à poids égal le volume de la vapeur de décharge est à peu près 1700 fois celui de l'eau. Si donc, au lieu de faire passer l'eau dans le serpentin, nous y faisons passer la vapeur, pour qu'il sorte autant de vapeur que nous voudrions y faire entrer d'eau, il faudra que la vapeur ait une vitesse 1700 fois plus grande. Or, l'expérience nous apprend que le frottement d'un fluide dans un tuyau est à peu près proportionnel à la densité de ce fluide et au carré de sa vitesse. Donc la densité de la vapeur étant 1700 fois moindre que celle de l'eau, le frottement de la première devrait être 1700 fois moindre que celui de la seconde, à égalité de vitesse; mais la vitesse de la vapeur étant 1700 fois plus grande le frottement devrait être de ce chef 1700×1700 fois plus grand que celui de l'eau à égalité de densité, de sorte

qu'avec une densité 1700 fois moindre, il reste encore égal à 1700 fois celui de l'eau. Il est vrai que ces considérations supposent que le tuyau dans lequel doit passer la vapeur est le même que celui dans lequel devrait passer l'eau, tandis que généralement le tuyau de décharge de la vapeur sera beaucoup plus gros que celui d'alimentation ; mais cette différence sera loin de corriger celle des résistances, et il restera toujours en faveur de l'eau, l'avantage d'une résistance beaucoup moindre opposée au travail de la machine.

Le reproche le plus sérieux que l'on fasse à l'emploi d'un serpentín parcouru par l'eau et plongé dans la vapeur de décharge, est la formation d'incrustation dans l'intérieur du serpentín, qui, s'opposant à la transmission de la chaleur à travers ses parois, en réduit beaucoup l'efficacité. Cette objection peut être fondée lorsque l'on alimente avec des eaux très-incrustantes. Dans ce cas, on peut remplacer le serpentín par un appareil à tubes droits semblable à une petite chaudière tubulaire, dont le fonds se démontant peut permettre le nettoyage intérieur des tubes : cette disposition aurait d'ailleurs l'avantage de réduire la résistance au mouvement de l'eau qui parcourerait simultanément tous les tubes.

Le chauffage de l'eau d'alimentation par la chaleur perdue des gaz du fourneau se fait en introduisant l'eau, avant son entrée dans la chaudière, dans un appareil réchauffeur quelconque. Le plus souvent ce n'est qu'un simple tube semblable aux tubes bouilleurs et réchauffeurs, qui peut être dans ce cas considéré comme une partie de la chaudière ou du massif de chaudières qu'il dessert, plutôt que comme un appareil spécial.

On peut également employer comme appareil réchauffeur un serpentín ou un appareil tubulaire semblable à ceux dont nous venons de parler, placés en un point du conduit qui aboutit à la cheminée ou même dans l'intérieur de celle-ci. L'obstacle le plus sérieux que l'on rencontre dans cette application est encore la formation d'incrustations qui obstruent les tubes, formation qui doit être plus abondante que dans les appareils chauffés à la vapeur, par cela seul que l'élévation de température produite par le contact des gaz est naturellement plus élevée que celle

qu'on obtient avec la vapeur de décharge. On peut souvent parer à cet inconvénient par l'emploi d'un appareil tubulaire dont on peut nettoyer les tubes en démontant un couvercle. Ce nettoyage ne présentera de sérieuses difficultés que lorsqu'on aura à faire à des eaux très-incrustantes.

Une autre cause d'insuccès dans l'emploi de ces appareils réside dans la formation sur leurs surfaces extérieures de dépôts de suie et de poussière emportées par le courant du gaz et qui s'oppose à la transmission de la chaleur à travers les parois du réchauffeur. Pour empêcher ces dépôts, M. Green (voir *Revue universelle*, t. III, p. 599) a imaginé de faire mouvoir par la machine qu'alimente les chaudières un râcloir formé d'anneaux reliés entre eux et entourant les tubes. On cite des économies de 20, 25 et 30 % obtenues avec cet appareil. Sans contester ces chiffres, nous croyons que l'on ne pourra obtenir de semblables économies que lorsque les chaudières, auxquelles on adaptera des appareils de ce genre, présenteront une surface de chauffe trop petite pour la quantité de vapeur qu'on veut obtenir. Alors il se peut que l'addition d'une surface de chauffe énorme, telle que celle de 175 mètres carrés offerte par un appareil de M. Green appliqué à huit chaudières, puisse apporter une économie considérable. Cet appareil n'est plus alors un simple réchauffeur d'eau, mais une grande chaudière supplémentaire chauffée par la chaleur perdue des fourneaux. Aussi, dans ce cas, voit-on ces appareils non-seulement chauffer l'eau d'alimentation, mais encore transformer celle-ci en vapeur. Tant qu'il en sera autrement, tant que la surface de chauffe du générateur sera assez développée, pour qu'un réchauffeur ne puisse avoir d'autre effet que d'élever plus ou moins la température de l'eau sans la vaporiser, il sera difficile d'obtenir de ce réchauffeur une économie de plus de 10 à 20 %. En effet, supposons que dans une chaudière où la tension de la vapeur est de 5 atmosphères nous introduisons de l'eau à 0°, il faudra dépenser, pour transformer chaque kilogramme en vapeur, 650 unités de chaleur; si nous chauffons cette eau jusqu'à 150°, c'est-à-dire tout près de son point d'ébullition sous la pression de 5 atmosphères, et cela sans aucune dépense de combustible, il ne nous

restera à fournir à chaque kilogramme d'eau que 500 unités de chaleur pour obtenir de la vapeur. Nous aurons donc économisé 150 unités de chaleur sur 650, soit 23 %. Tel sera le maximum d'effet que l'on pourra obtenir en supposant que l'on puisse chauffer l'eau au point que nous avons supposé, rien qu'avec de la chaleur entièrement perdue. Ce résultat sera certainement très-satisfaisant, et l'on pourrait se contenter d'un effet beaucoup moindre. Mais il ne doit pas nous surprendre. En effet, l'application d'un réchauffeur, capable d'élever l'eau à un degré voisin de son point d'ébullition, tel que peuvent l'être les réchauffeurs tubulaires à grandes surfaces, n'est rien d'autre en somme que la transformation d'une chaudière ordinaire en chaudière tubulaire. Et celles-ci, comparées aux premières, peuvent donner facilement des économies de 20 % et plus.

Loin donc de repousser l'emploi de réchauffeurs d'eau tubulaires, nous croyons devoir en conseiller l'application fréquente comme moyen d'obtenir par leur addition aux chaudières ordinaires les avantages de la grandeur et de la bonne division de la surface de chauffe.

Nous ne pouvons parler de l'alimentation des chaudières à vapeur sans mentionner le très-ingénieux appareil imaginé par M. Giffard et qui porte son nom.

L'injecteur Giffard est fondé sur le même principe que la trompe des forges catalanes. La vapeur sortant de la chaudière et s'échappant par un orifice étroit avec une très-grande vitesse produit sur l'air qui entoure l'orifice l'effet d'entraînement dont nous avons déjà parlé au § 10. Cet orifice débouchant dans une cavité où vient aboutir un tuyau plongé dans un réservoir d'eau, le vide qui se produit dans cette cavité et dans ce tuyau, par suite de cet entraînement de l'air, se remplit bientôt de l'eau qui s'élève dans le tuyau. Cette eau se mélange à la vapeur, la condense et lui emprunte une partie de sa quantité de mouvement. Elle se trouve ainsi animée d'une telle vitesse et par suite d'une telle force vive qu'elle peut pénétrer dans une chaudière, même contre une pression supérieure à celle de la vapeur qui l'entraîne.

Cette eau, par cela seul qu'elle se mélange avec la vapeur, est

fortement échauffée, de sorte qu'on ne peut songer à la réchauffer ensuite. D'un autre côté, on ne peut pas non plus réchauffer l'eau du réservoir parce que l'appareil ne fonctionne plus dès que la température de l'eau aspirée est un peu élevée. On voit donc que l'injecteur Giffard ne permet pas l'utilisation de la vapeur perdue. C'est pourquoi on a reconnu souvent (et j'ai pu le faire personnellement) que l'emploi de cet appareil occasionne un surplus de consommation de 8 à 10 %. Si nous ajoutons que cet injecteur est assez capricieux, que parfois il cesse de fonctionner sans cause apparente, et que, dans tous les cas, il serait imprudent de le faire aspirer de 2 à 3 mètres de hauteur, on comprendra que son application aux chaudières de machines fixes soit encore très-limitée. Elle a eu beaucoup plus de succès auprès des locomotives. Là, en effet, on n'utilise pas la vapeur de décharge à réchauffer; il n'y a donc pas eu lieu de renoncer à l'économie que ce réchauffement procurait. De plus, l'injecteur Giffard avait pour ce cas particulier un très-grand avantage, celui de pouvoir fonctionner avec la locomotive au repos. La même raison rend cet appareil utile aux chaudières de bateaux, et en général à toutes les chaudières qui n'ont pas toujours une machine en mouvement pour les alimenter.

37. INCRUSTATIONS DES CHAUDIÈRES.— Nous avons souvent parlé, dans le cours de ce travail, des incrustations formées dans les chaudières par le dépôt et l'adhérence entre leurs parois de matières solides tenues en suspension ou en dissolution dans l'eau. Ces matières sont principalement des sels calcaires, soit du carbonate de chaux (*calcaire* proprement dit) ou du sulfate de chaux (*Pierre à plâtre* ou *gypse*). Ces sels sont moins solubles dans l'eau chaude que dans l'eau froide. Ainsi l'eau à 20° peut dissoudre un peu moins de $\frac{1}{4}$ pour 100 de son poids de sulfate de chaux, tandis qu'à 100° elle ne dissout que un peu moins de $\frac{1}{4-6}$ pour 100, soit $\frac{1}{50}$ pour 100 de moins qu'à 20° : de là résulte que de l'eau chargée de sulfate de chaux étant chauffée de 20° à 100° doit par cela seul laisser déposer $\frac{1}{50}$ pour 100 de son poids de ce sel, soit 1 kil. pour 3,000^k ou 3^{m.c.} d'eau. Si cette eau est non-seulement chauffée, mais en outre vaporisée, elle

doit laisser déposer tout le sulfate de chaux qu'elle contient, donc $1/4$ de kil. par 100^k d'eau ou 1^k pour 400^k d'eau.

Or un mètre carré de surface de chauffe vaporisant en moyenne 20^k d'eau par heure, les dépôts ne se produisant généralement que sur la surface de chauffe, chaque mètre carré de celle-ci devra en une heure se couvrir de $\frac{1}{20}$ de kil. de sulfate de chaux, ou de $\frac{12}{20}$ de kil. en une journée de 12 h. et de $30 \times \frac{12}{20}$ ou 18^k en un mois. Ces 18^k répartis sur un mètre carré auront une épaisseur de 18^{mm} : $2,25$ ou 8^{mm} , attendu que un décimètre cube de sulfate de chaux pèse environ $2^k,25$. Ainsi donc les eaux fortement chargées de sulfate de chaux, que l'on désigne sous le nom d'eaux *séléniteuses*, peuvent produire en un mois une incrustation de 8^{mm} d'épaisseur. Il est inutile de faire ressortir de nouveau combien une telle épaisseur d'une substance peu conductrice de la chaleur doit tout à la fois réduire la vaporisation, augmenter la consommation de combustible et causer une prompte détérioration des tôles.

Le dépôt du carbonate de chaux contenu dans les eaux *calcaires*, résulte principalement de ce que ce sel n'est soluble dans l'eau que lorsque celle-ci tient en dissolution de l'acide carbonique. Ce gaz se dégageant pendant la vaporisation, les eaux perdent leur pouvoir dissolvant et laissent déposer le calcaire sous forme d'incrustations.

Il serait fort long et fort oiseux de décrire les mille et un procédés qui ont été proposés pour combattre les incrustations des chaudières. La plupart de ces procédés, déclarés infaillibles par leurs inventeurs, ou bien sont inefficaces, ou bien présentent à côté d'avantages douteux des inconvénients qui le sont malheureusement beaucoup moins, tels que l'encrassement des machines par l'eau chargée des matières employées, ou la corrosion des chaudières par l'action chimique de ces matières sur le fer. Nous pouvons renvoyer pour l'étude de ces procédés au travail publié par M. Van den Corput dans le XXXI^e vol. du *Bulletin du Musée de l'industrie*, travail excellent dont nous nous bornerons à présenter un résumé, en y ajoutant seulement quelques détails qui nous ont paru dignes d'intérêt.

L'action des substances proposées contre les incrustations

est, comme toute action d'un corps sur un autre, mécanique, physique ou chimique.

Les substances qui agissent mécaniquement tendent à produire dans la masse des matières qui se déposent des mouvements capables d'empêcher leur adhérence aux parois de la chaudière. Tels sont les petits cailloux, les rognures métalliques, le verre pilé, etc., dont on a proposé de couvrir le fonds des chaudières. Ces corps ont le défaut d'user notablement la surface intérieure des tôles qu'ils frottent continuellement dans le mouvement rapide que leur donne l'ébullition. L'emploi du verre pilé était en outre particulièrement dangereux parce que les particules très tenues de ce corps étaient souvent entraînées avec l'eau jusque dans les organes des machines dont ils causaient l'usure rapide.

On peut employer avec plus de sécurité comme agents mécaniques de petites fascines ou seulement des éclats de bois que l'on jette dans la chaudière et qui s'y chargent d'incrustations. Malheureusement, ce moyen, s'il ne présente point d'inconvénient, est aussi fort peu efficace.

Je puis en dire autant de l'idée de M. Conrad Meyer, qui proposait de prolonger jusqu'à une certaine hauteur dans le corps de la chaudière le cuissard antérieur des bouilleurs. Ce prolongement devait, en faisant l'office de cheminée, produire un courant continu dans la masse d'eau, sous l'action duquel les particules tenues en suspension se réunissaient en petits cailloux faciles à retirer des chaudières. Un peu de réflexion suffit pour montrer que ce courant doit se produire toujours de lui-même dans les chaudières et que le prolongement du cuissard peut à peine l'activer.

Nous pouvons indiquer, comme agissant d'une manière physique l'argile, la fécule de pomme de terre, le son, la sciure de différents bois et les extraits de bois de teinture. Ces corps font l'office d'*interposants*, c'est-à-dire qu'enveloppant les particules des dépôts terreux, ils les empêchent de se réunir en une masse solide et leur font conserver une consistance boueuse, qui les rend faciles à expulser des chaudières par une vidange partielle opérée fréquemment à travers les robinets *purgeurs*.

L'argile a le défaut d'augmenter la masse de ces dépôts boueux. On emploie avec plus d'avantage la pomme de terre, dont il suffit de jeter de loin en loin quelques kilogrammes dans la chaudière.

Un autre interposant remarquable est la matière connue sous le nom de *métalline*, formée de *graphite* ou *plombagine*, de suif et de poussière de charbon de bois mélangés avec de l'huile ou du goudron, de manière à former un vernis dont on enduit les parois de la chaudière. Ce vernis s'oppose bien à la formation des incrustations, mais comme son application doit être assez fréquente (tous les quinze jours, si c'est possible) et exiger un temps assez long, souvent deux jours, elle entraîne des chômages trop coûteux, à moins que l'on n'ait des chaudières de réserve.

Les agents chimiques proposés, tels que le *carbonate de soude* (sel de soude), le *chlorhydrate d'ammoniaque* (sel ammoniac), l'*alun*, etc.; agissent en transformant en sels solubles et en sels complètement insolubles se déposant immédiatement sans adhérer au fer, les sels peu solubles qui se déposent lentement pendant la vaporisation. Les résultats obtenus n'ont été ni complets ni constants, tandis qu'il s'est manifesté des inconvénients graves, tels que la corrosion des tôles par les acides souvent mis en liberté dans ces réactions.

Certaines substances, telles que la *mélasse*, le *moût de bière*, la *drèche*, la *betterave*, etc., agissent à la fois comme interposants et comme agents chimiques par le sucre qu'elles contiennent et qui facilite la solubilité de la plupart des sels de chaux. Presque toutes ces matières ont le défaut de faire mousser l'eau des générateurs et d'encrasser les soupapes et les tubes indicateurs.

Enfin, il est un procédé auquel on peut dans certaines cas recourir avec avantage : c'est la précipitation des sels calcaires avant l'introduction de l'eau dans la chaudière; il suffit d'avoir un réservoir assez grand pour que l'on puisse y laisser reposer l'eau pendant un jour au moins, et de jeter dans ce réservoir un peu d'eau de chaux qui, s'emparant de l'acide carbonique libre, rend l'eau incapable de dissoudre le carbonate de chaux;

celui-ci se dépose au fond du réservoir, et l'on peut laisser écouler l'eau, ainsi dépouillée de sa matière incrustante, dans un bassin intermédiaire où les pompes alimentaires vont la puiser.

Ce procédé exige, on le voit, des conditions et des soins particuliers qui s'opposent à la généralité de son emploi.

En résumé, les moyens les plus pratiques que l'on puisse employer, sinon avec un succès complet, au moins sans aucune difficulté et sans inconvénient, résident encore dans l'emploi de la pomme de terre ou des extraits de bois de teinture, particulièrement la décoction de bois de campêche. Le cachou brun paraît être aussi une des plus puissants moyens de combattre les incrustations. Il suffit d'en jeter tous les mois 1/2 kil. par force de cheval dans la chaudière.

ENTRAÎNEMENT DE L'EAU PAR LA VAPEUR. — Nous avons déjà indiqué plusieurs fois, comme cause d'un excès de consommation de combustible, l'entraînement par la vapeur d'une quantité d'eau parfois très-grande qui, non-seulement, constitue immédiatement une perte de chaleur, mais, en outre, entraîne des pertes de travail et mêmes des accidents graves, en pénétrant dans les organes des machines.

On a proposé un grand nombre d'appareils destinés à s'opposer à cet entraînement de l'eau. le plus simple et l'un des plus efficaces est une plaque de tôle, de 0^m,300 environ de largeur sur une longueur qui varie avec celle de la chaudière, placée sous la prise de vapeur à une faible distance des parois de la chaudière. Cette plaque, en étendant la prise de vapeur sur une grande partie de la surface de l'eau, empêche de se produire les différences notables de pression qui peuvent avoir lieu au moment où la vapeur peut s'écouler, par exemple à chaque ouverture des lumières d'un cylindre. On conçoit que les masses de vapeur voisines du tuyau de sortie s'y précipitant les premières, la pression devra être à chaque évacuation moindre sous la prise de vapeur que dans les points éloignés de celle-ci, et d'autant moindre que l'évacuation se fera d'une manière plus rapide et plus soudaine. Quelquefois cette diffé-

rence de pression est telle que l'eau est brusquement soulevée jusque dans le tuyau de sortie ; c'est ainsi que se produisent la plupart des coups d'eau dont les conséquences sont presque toujours désastreuses pour les machines ; c'est ainsi encore que se produit le phénomène effrayant de la *trombe d'eau*, dans lequel l'eau, remplissant entièrement l'orifice de sortie, est chassée violemment et presque en totalité hors de la chaudière, par la pression de la vapeur qu'elle emprisonne.

Sans amener des accidents aussi graves, l'inégalité de pression sur les différents points de la surface du liquide est toujours très-nuisible en ce qu'elle rend l'ébullition plus tumultueuse, et par suite l'entraînement de l'eau par la vapeur plus considérable.

D'autres appareils, tels que le tuyau d'Ewbank, les plaques percées de trous placées sous les dômes, tendaient à obtenir aussi une répartition de la prise de vapeur sur une plus grande surface, mais d'une manière moins simple et moins sûre que les plaques dont nous avons parlé, et dont l'usage devrait être général, ne fût-ce que comme moyen certain d'empêcher les graves accidents que nous avons signalés.

Nous ne nous occuperons par d'autres appareils de formes très-variées, dans lesquels on a cherché à arrêter l'eau entraînée en opposant au courant de vapeur des obstacles tendant à arrêter l'eau sans arrêter la vapeur. Ces appareils ne produisent généralement que très-peu d'effet, parce que la vitesse de la vapeur est tellement grande qu'elle entraîne malgré tous ces obstacles la majeure partie de l'eau dont elle est chargée, d'autant plus facilement que l'eau se trouve divisée en très-petites masses.

Mais il est un procédé particulier dont nous ne pouvons nous dispenser de parler : c'est le suréchauffement de la vapeur. On a proposé depuis longtemps de faire passer la vapeur dans des tuyaux chauffés par la chaleur du fourneau même du générateur ou d'un fourneau accessoire, afin de vaporiser l'eau entraînée. On ne se proposait point par là d'échauffer la vapeur à un degré supérieur au degré de température qu'elle possède dans la chaudière ; on voyait, au contraire, dans le suréchauffement de la vapeur un effet nuisible se produisant en même

temps que l'effet cherché. Et de fait, il est arrivé souvent que la vapeur acquérait dans ces tuyaux chauffés une température tellement élevée que des organes principaux de la machine en étaient altérés : les garnitures des boîtes d'étoupes étaient brûlées, les pistons chauffés et desséchés grippaient dans les cylindres. En présence de ces résultats on a renoncé à ce que l'on appelait le *dessèchement* de la vapeur par la chaleur.

Depuis quelques années l'emploi de la vapeur surchauffée est devenu de nouveau un sujet d'étude. On a vu avec raison dans cet emploi, autre chose qu'un moyen de se débarrasser de l'eau entraînée, un principe nouveau d'économie de vapeur et par conséquent de combustible. On comprend aisément que si l'on chauffe la vapeur après sa sortie de la chaudière, elle doit acquérir soit une augmentation de pression si son volume ne change pas, soit une augmentation de volume sous le même poids et la même pression si on lui permet de se dilater. Dans le premier cas, en dépensant le même volume et le même poids de vapeur, on aura un accroissement de force; dans le second, en dépensant le même volume sous la même pression, on dépensera un moindre poids. Si donc le suréchauffement de la vapeur s'est fait aux dépens d'une chaleur perdue, l'augmentation de pression obtenue, ou la diminution de dépense en poids, sera autant de gagné.

Ainsi, par exemple, si l'on surchauffe la vapeur d'environ 300°, on doublera le volume de 1^k de vapeur en lui laissant la même pression. On pourra par conséquent fournir de la vapeur, faisant la même force à deux coups de piston, avec le même poids que consommait un seul coup de piston, quand la vapeur était saturée. On fera donc une économie de 50 % sur le poids de vapeur consommée, et par conséquent sur le poids de houille brûlée.

Les diverses applications qui ont été faites du principe du suréchauffement de la vapeur, bien qu'elles aient montré le parti que l'on pouvait en tirer, sont loin d'avoir donné des résultats constants. Je me bornerai à dire ici que les insuccès obtenus peuvent être expliqués, soit par un suréchauffement trop fort, dont les inconvénients pratiques dépassaient les avantages, soit par un suréchauffement trop faible, dont les effets étaient perdus

par suite de nombreuses causes de refroidissement qui ramenaient à l'état de saturation la vapeur surchauffée. Et nous devons remarquer ici qu'il faut ôter beaucoup moins de chaleur pour ramener un poids de vapeur surchauffée à l'état de saturation, que pour condenser un même poids de vapeur saturée.

On conçoit qu'il doit être difficile de régler à volonté le suréchauffement de la vapeur de manière à compenser les pertes de chaleur, sans dépasser le point où la température devient nuisible aux organes de la machine. Les conditions dans lesquelles se fait ce suréchauffement varient d'ailleurs tellement d'un fourneau à l'autre que l'on ne doit pas s'étonner de l'inconstance des résultats obtenus, ni désespérer de l'application du principe.

Pour une étude plus complète de cet important sujet nous ne pouvons que renvoyer à l'excellent mémoire présenté en 1856 par M. Hirn à la Société industrielle de Mulhouse. Nous ne pouvons entrer plus avant dans cette étude sans sortir du cadre de ce travail; car, ainsi que le dit M. Hirn, pour obtenir quelques déductions satisfaisantes des expériences connues, une analyse approfondie des fonctions mêmes de la machine à vapeur devient indispensable.

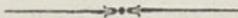
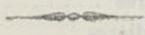


TABLE DES MATIÈRES.



	Pages
AVERTISSEMENT DE L'AUTEUR.	5
INTRODUCTION.	7
I. — PRINCIPES GÉNÉRAUX.	
SS	
1. Unité de chaleur. — Pouvoir calorifique des combustibles . . .	10
2. Essai de la valeur économique d'une chaudière	12
3. Volume d'air nécessaire à la combustion de la houille	21
4. De la fumée	25
5. Combustion active et combustion lente.	28
6. Différentes qualités de houille	30
II. — DES FOURNEAUX ET APPAREILS DE TIRAGE.	
7. Composition générale d'un générateur de vapeur	32
8. Cheminées	35
9. Cheminées descendantes	58
10. Tirage par un jet de vapeur.	60
11. Tirage mécanique	62
12. Foyer	65
13. Foyers fumivores.	85
14. Foyer à double grille	86
15. Foyer à flamme renversée.	94
16. Foyers se chargeant par le dessous	96
17. Foyers à introduction d'air	99
18. Foyers à générateurs de gaz	104
19. Foyers à alimentation continue	111
20. Conclusion relative aux foyers	117

III. — DES CHAUDIÈRES.

21. Matériaux employés à la fabrication des chaudières	118
22. Transmission de la chaleur à travers les parois des chaudières.	119
23. De l'épaisseur des chaudières.	126
24. Épreuve d'une chaudière	131
25. Construction des chaudières	132
26. Des dimensions des chaudières	133
27. Des différents systèmes de chaudières	144
28. Chaudières cylindriques	145
29. Chaudières cylindriques à tubes bouilleurs	152
30. Chaudières à tubes réchauffeurs	155
31. Chaudières à carneaux intérieurs	164
32. Chaudières à foyers intérieurs	168
33. Chaudières à foyers et à carneaux intérieurs	176
34. Chaudières tubulaires	177
35. Nouveaux systèmes de générateurs	198
36. Alimentation des chaudières	202
37. Incrustation des chaudières	208
38. Entraînement de l'eau par la vapeur	212





Chaudière cylindrique pour une machine de 15 chevaux. (Fig. 1, 2, 3, 4)

Fig. 1.

Coupe transversale suivant A B.

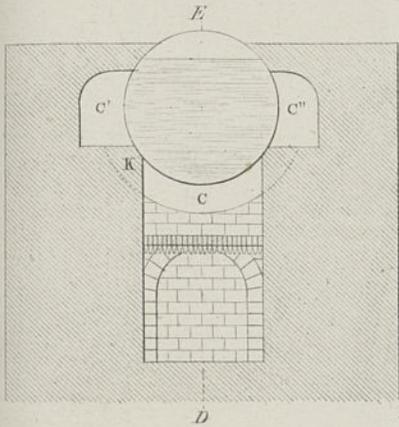


Fig. 3.

Coupe transversale suivant G H.

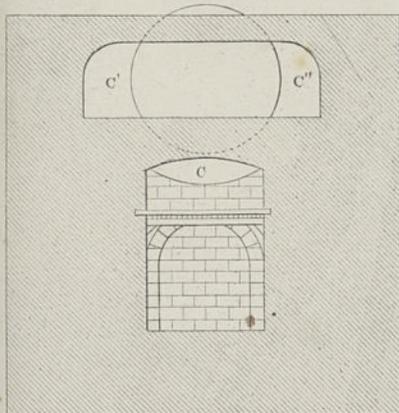


Fig. 2. Coupe longitudinale suivant D E.

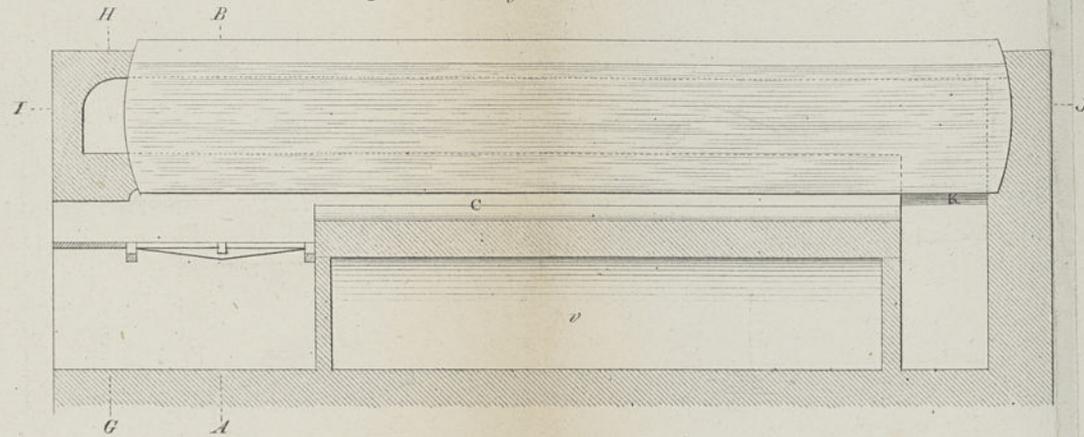
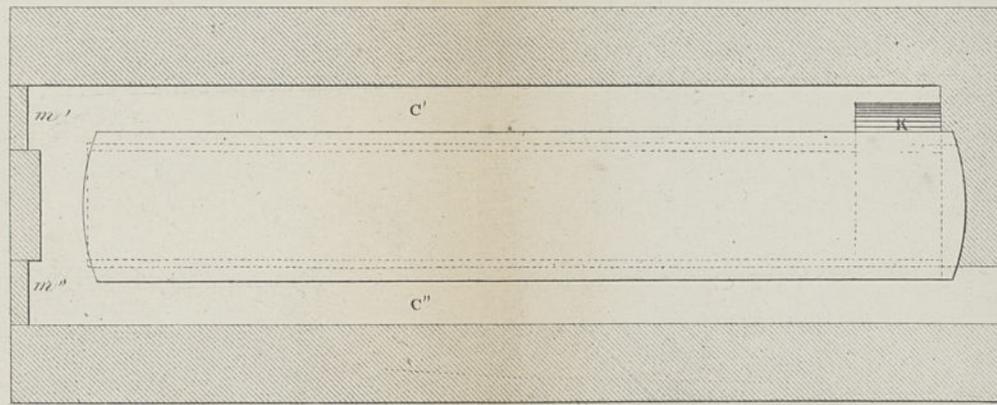


Fig. 4. Coupe horizontale suivant I J.



Chaudière à tubes bouilleurs.

Fig. 5.

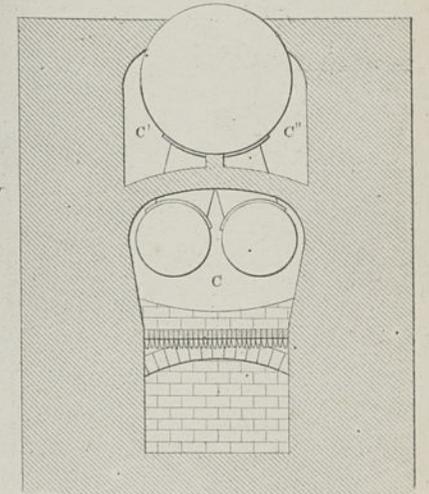
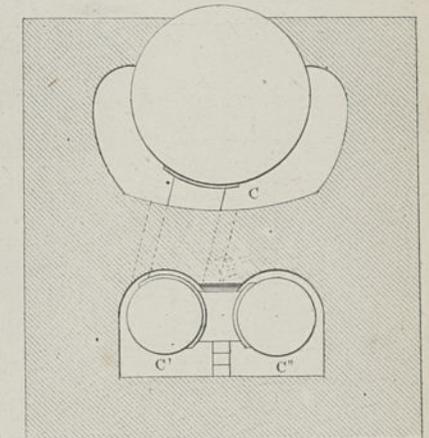
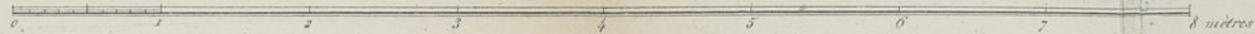


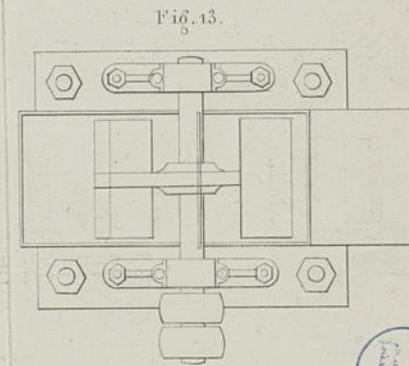
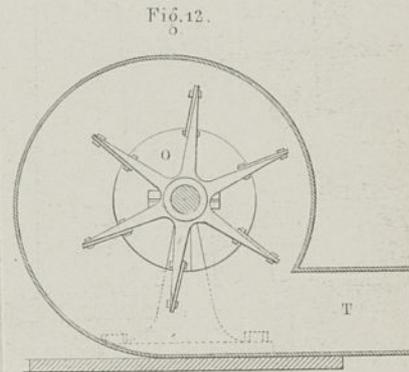
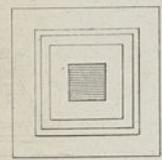
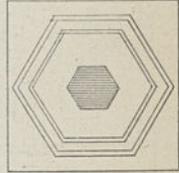
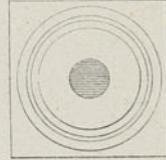
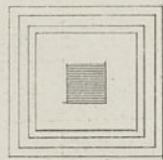
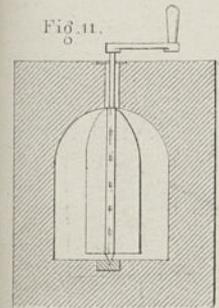
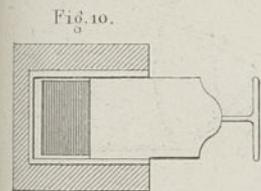
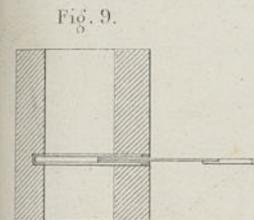
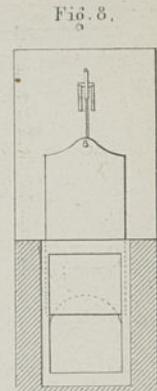
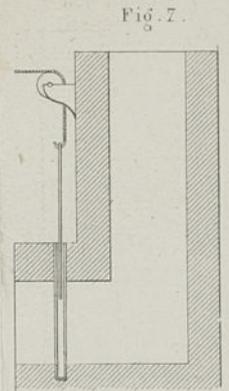
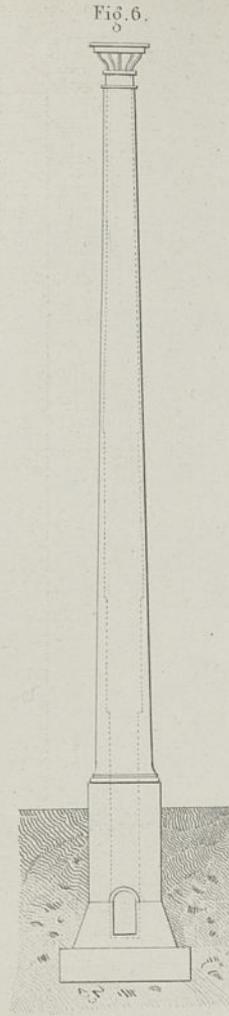
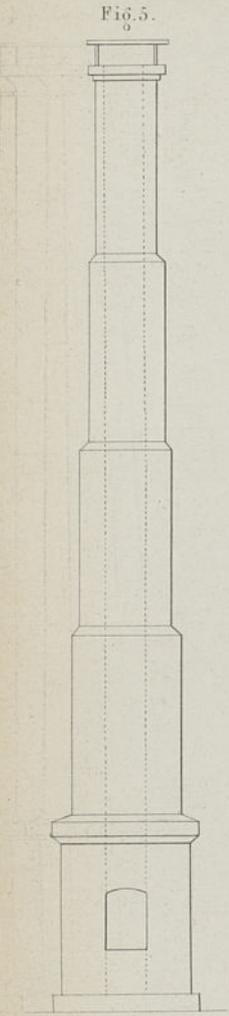
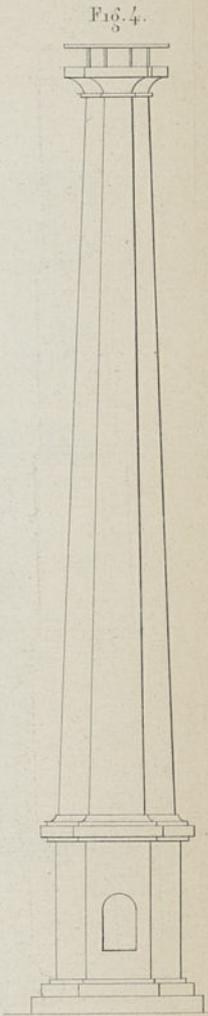
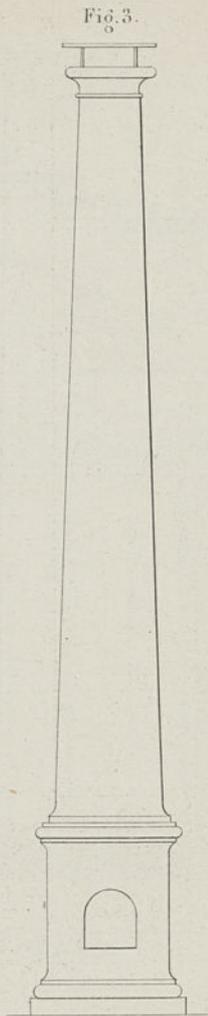
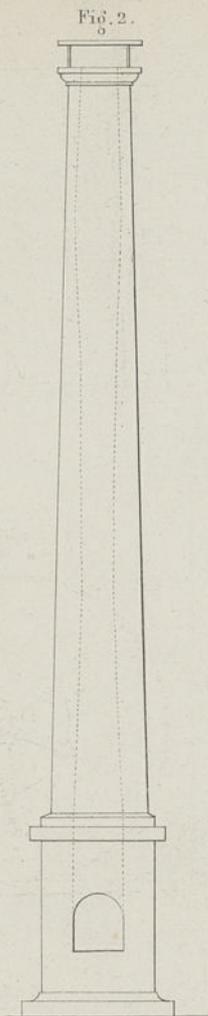
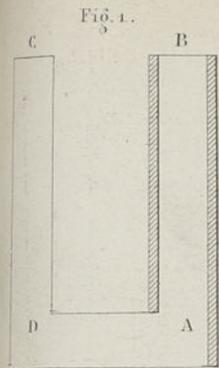
Fig. 6.

Chaudière à tubes rechauffeurs.



Echelle de 1/50.





Echelle de 1/500 pour les fig. 8, 9, 10 et 11.
 „ de 1/400 pour la fig. 12.

BU
LILLE

Double foyer pour 25 chevaux

Fig. 8

Face.

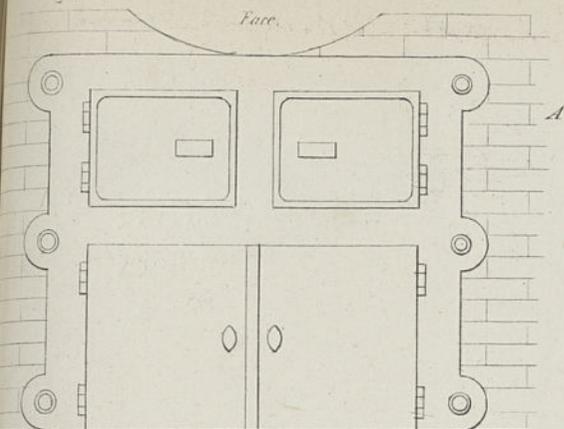
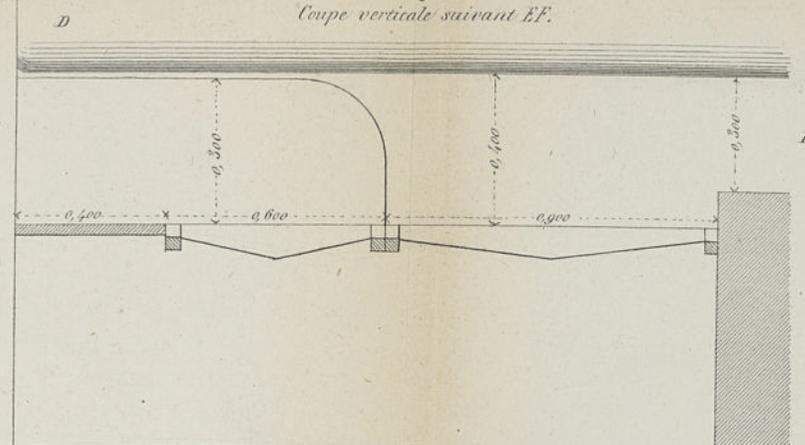


Fig. 9.

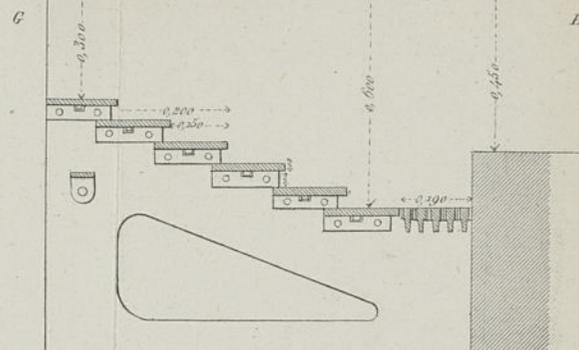
Coupe verticale suivant EF.



Grille à gradins pour 25 chevaux.

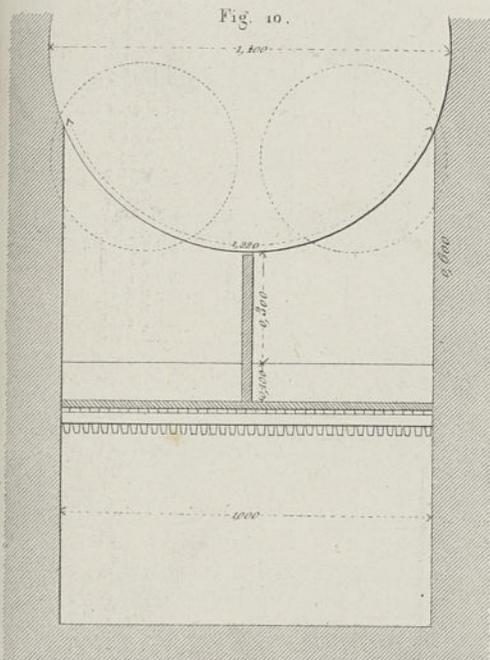
Fig. 5.

Coupe verticale suivant MN.

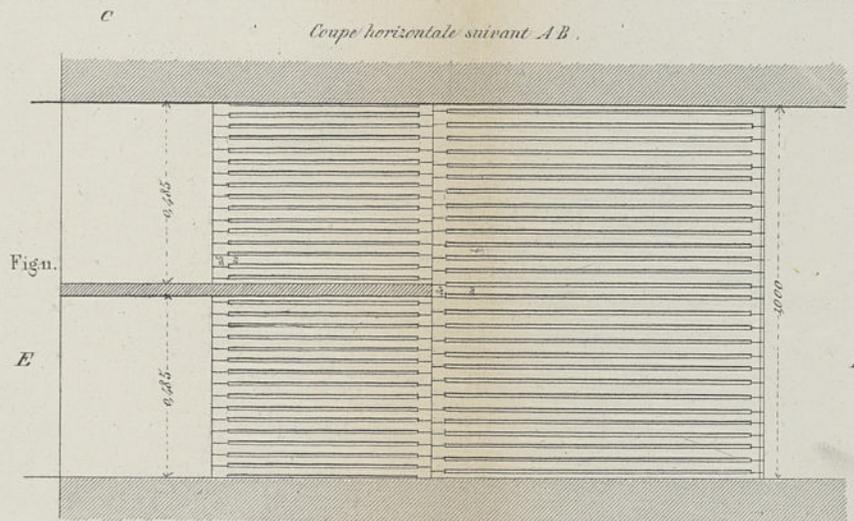


Coupe verticale suivant CD.

Fig. 10.



Coupe horizontale suivant AB.



Coupe horizontale suivant GH.

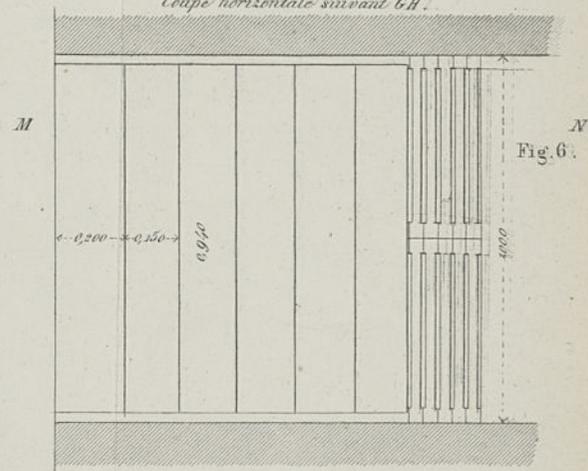
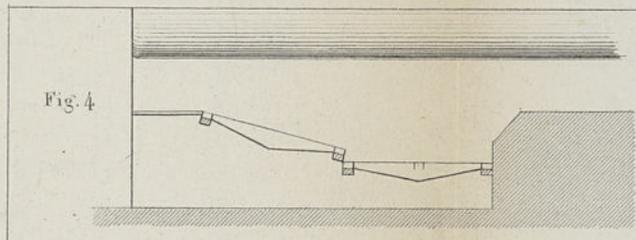


Fig. 4



Foyer de locomotive pour la combustion de la Houille.

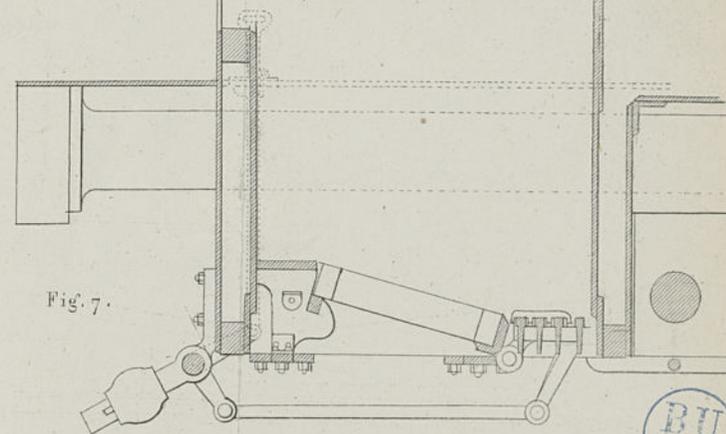


Fig. 1.

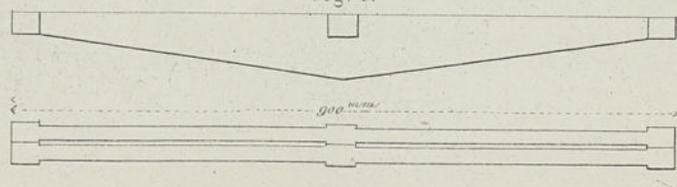


Fig. 12.



Fig. 7.

Echelle de 1/20 pour les Fig. 5 à n

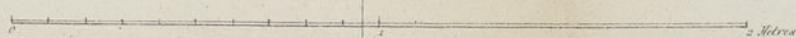


Fig. 1.

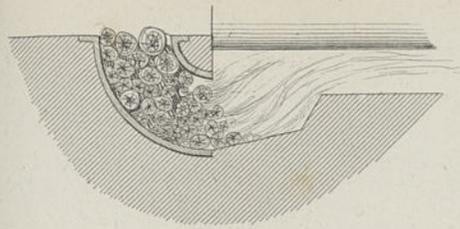


Fig. 2.

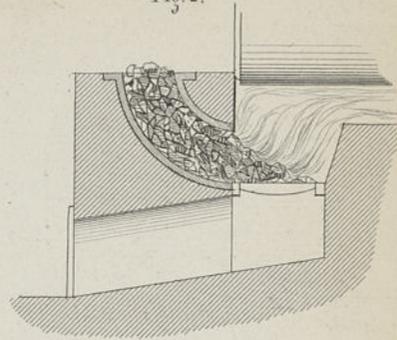


Fig. 3.

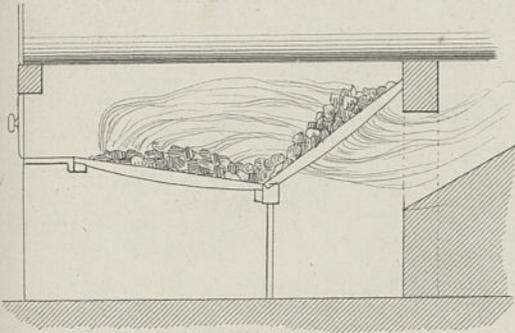


Fig. 4.

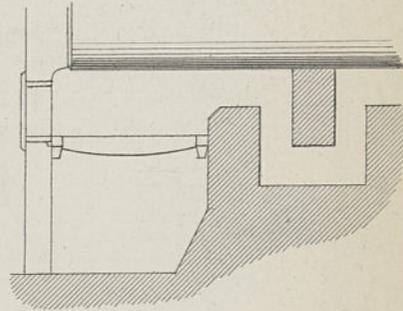


Fig. 5.

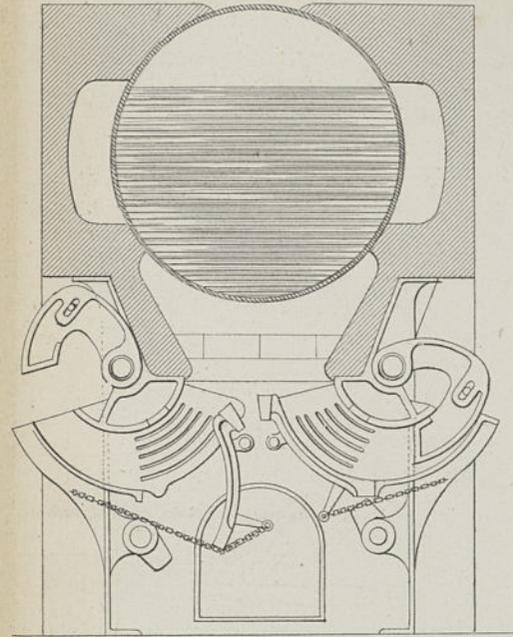


Fig. 6.

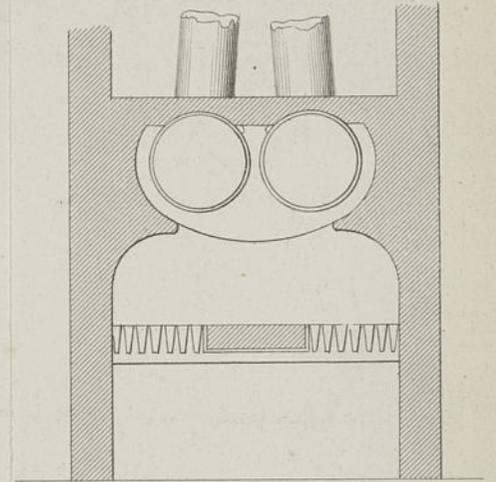


Fig. 7.

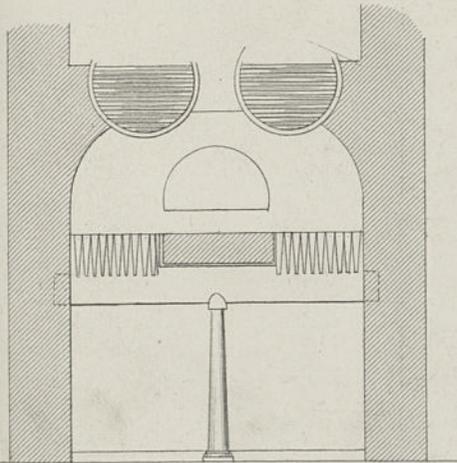


Fig. 8.

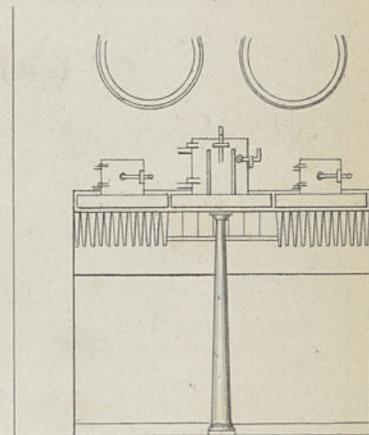
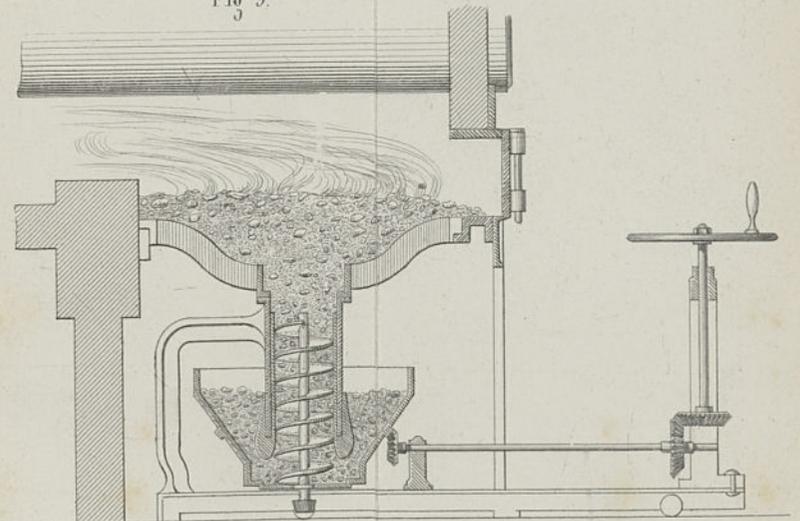


Fig. 9.



BU
LILLE

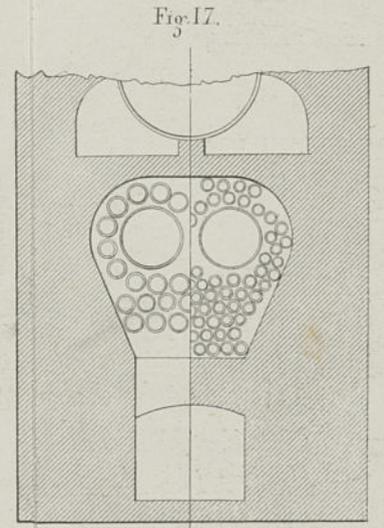
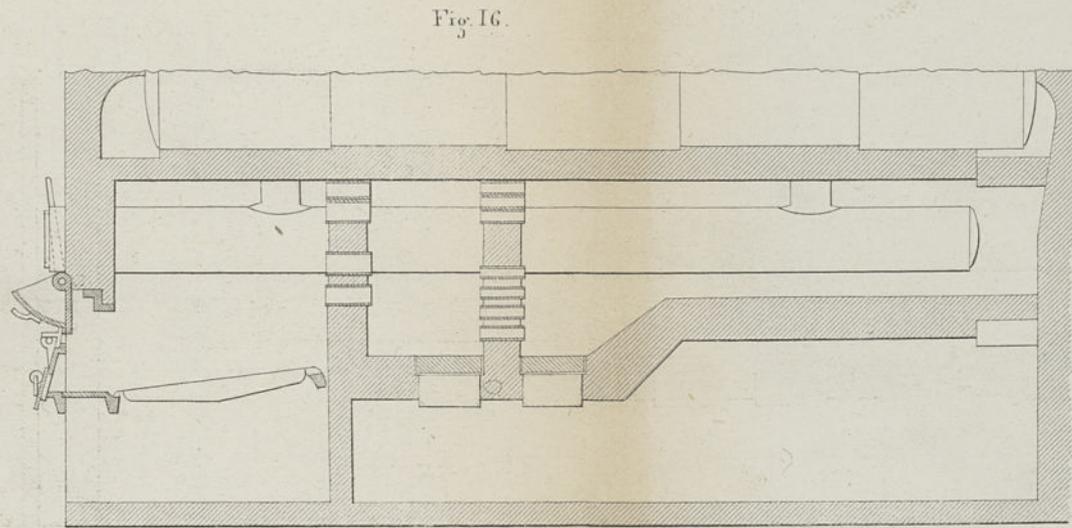
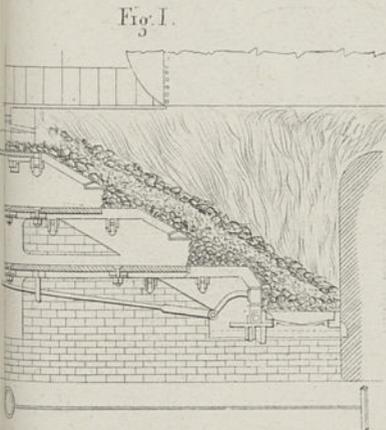
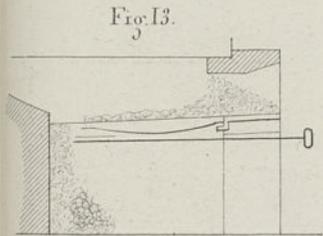
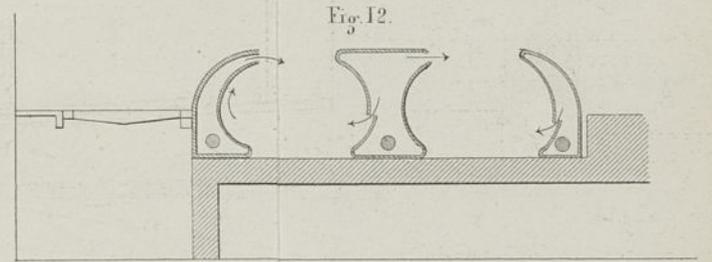
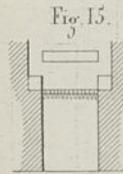
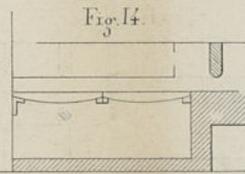
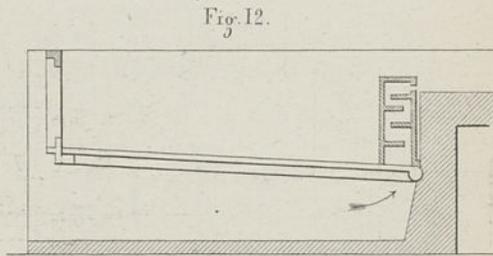
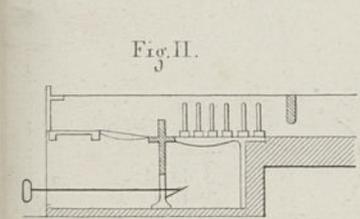
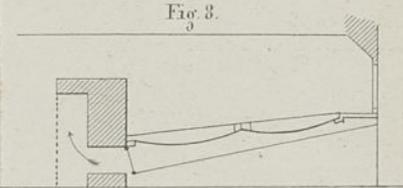
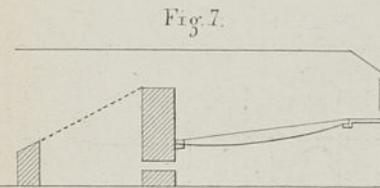
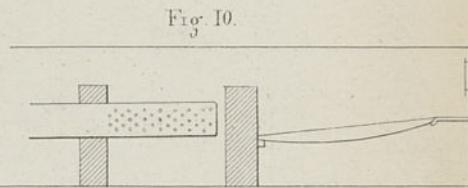
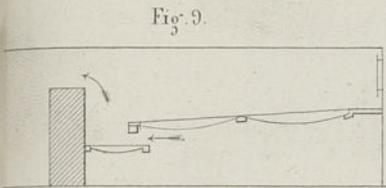
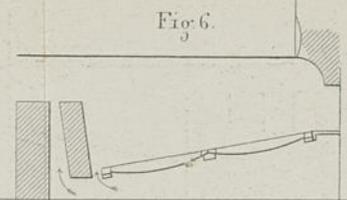
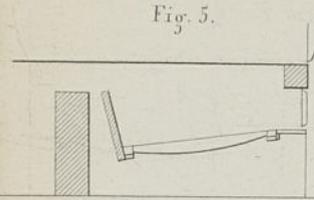
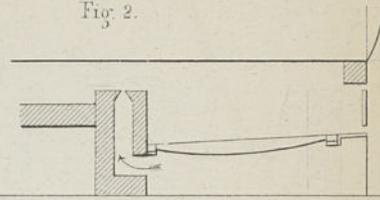
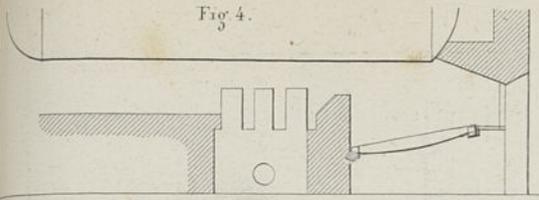
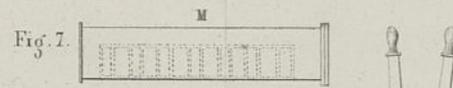
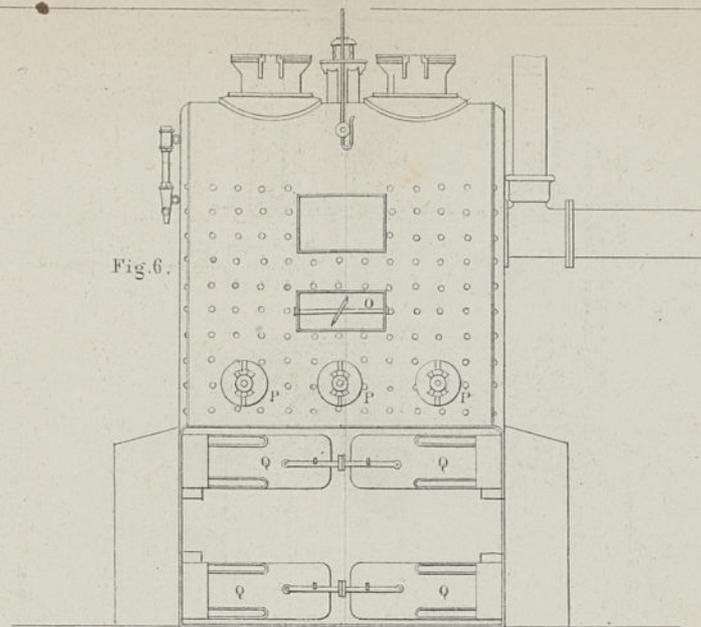
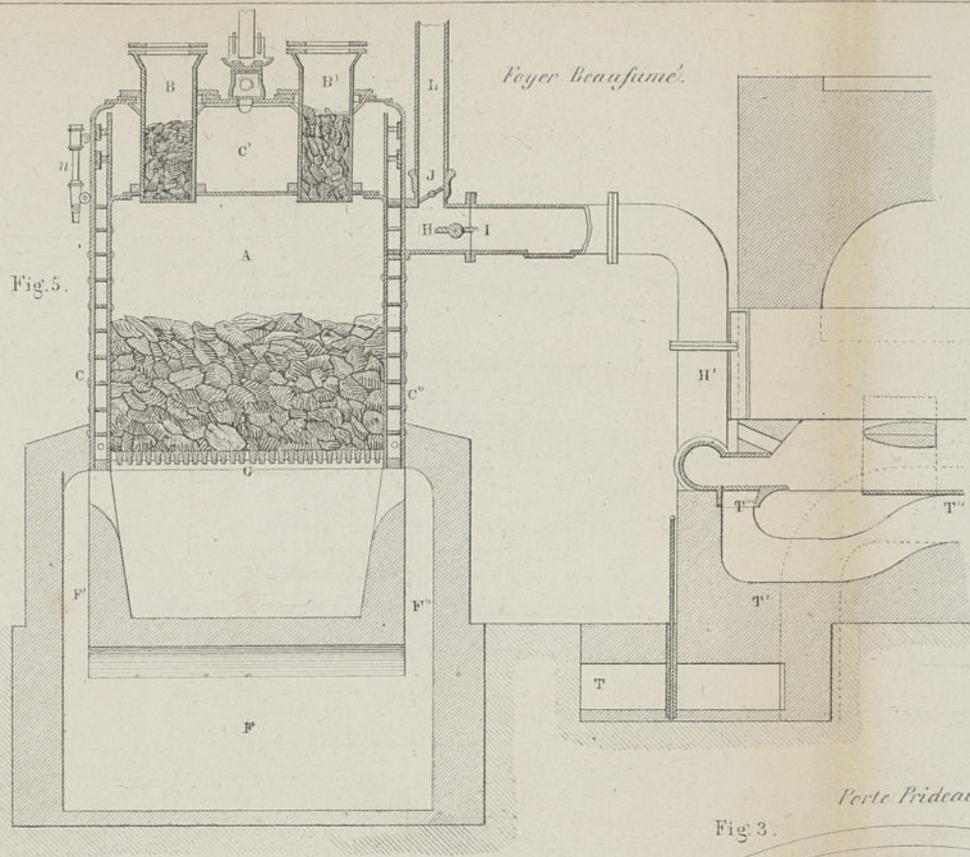
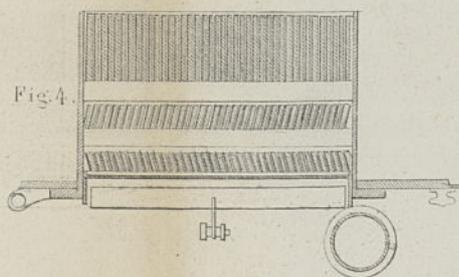
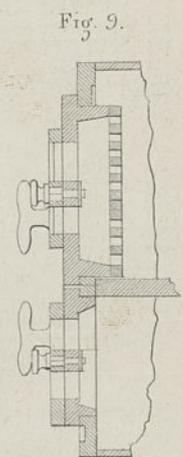
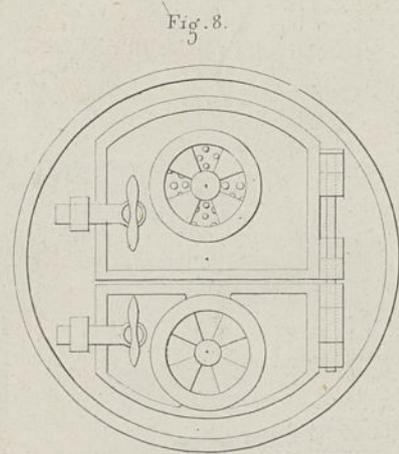
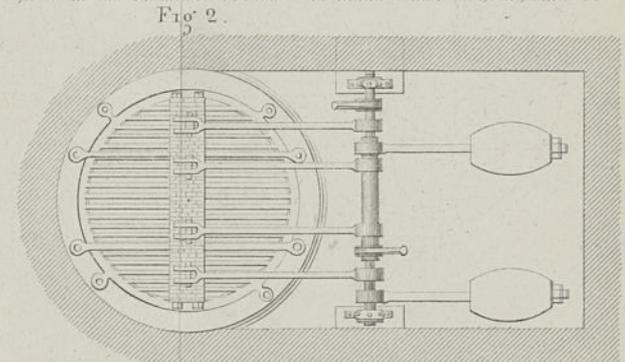
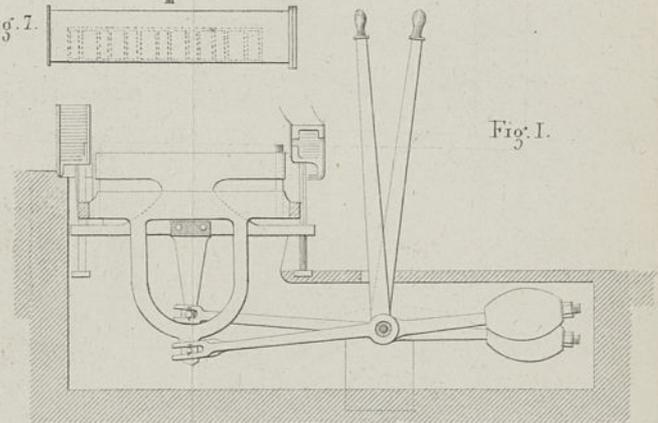
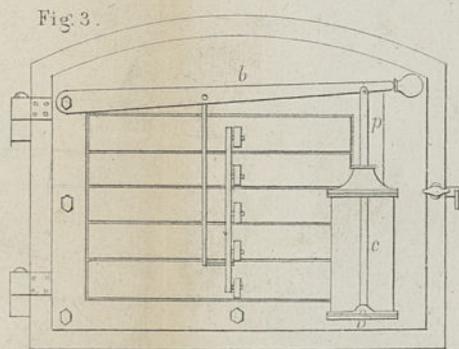


Fig. 3.

BU
LILLE



Porte Pridéaux.



GRILLES MOBILES FUMIVORES.
JUCKES, TAILFER.

Fig. 1

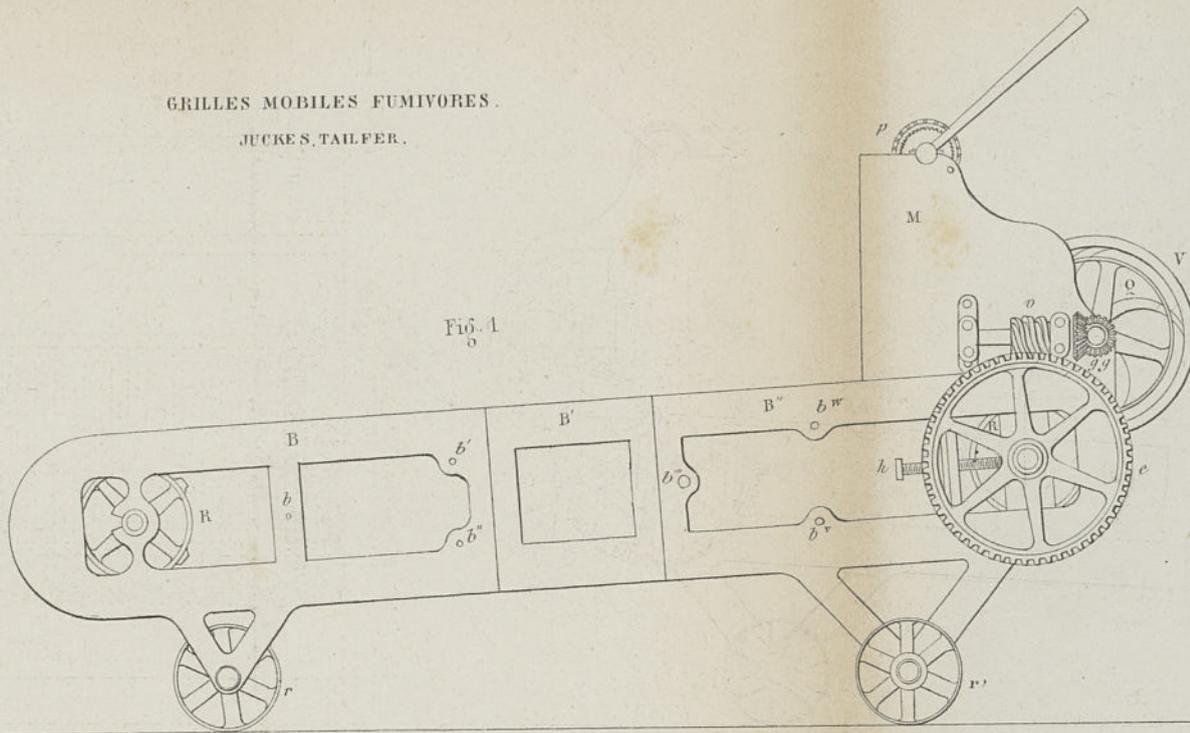


Fig. 2

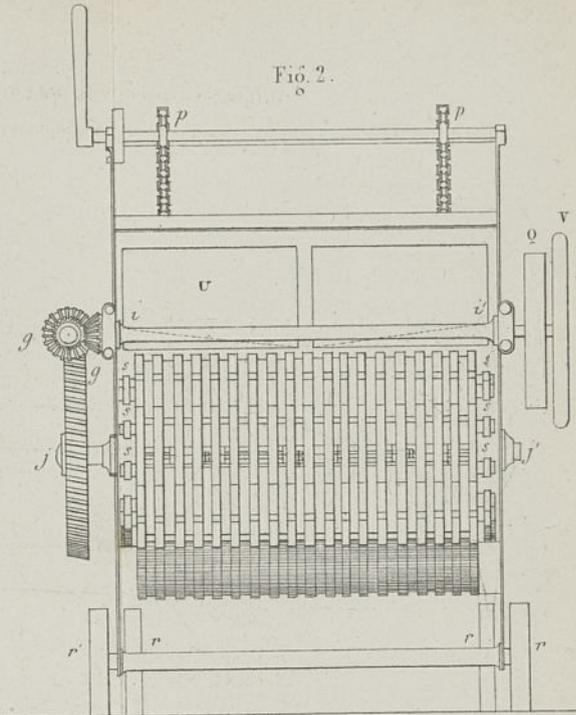


Fig. 3

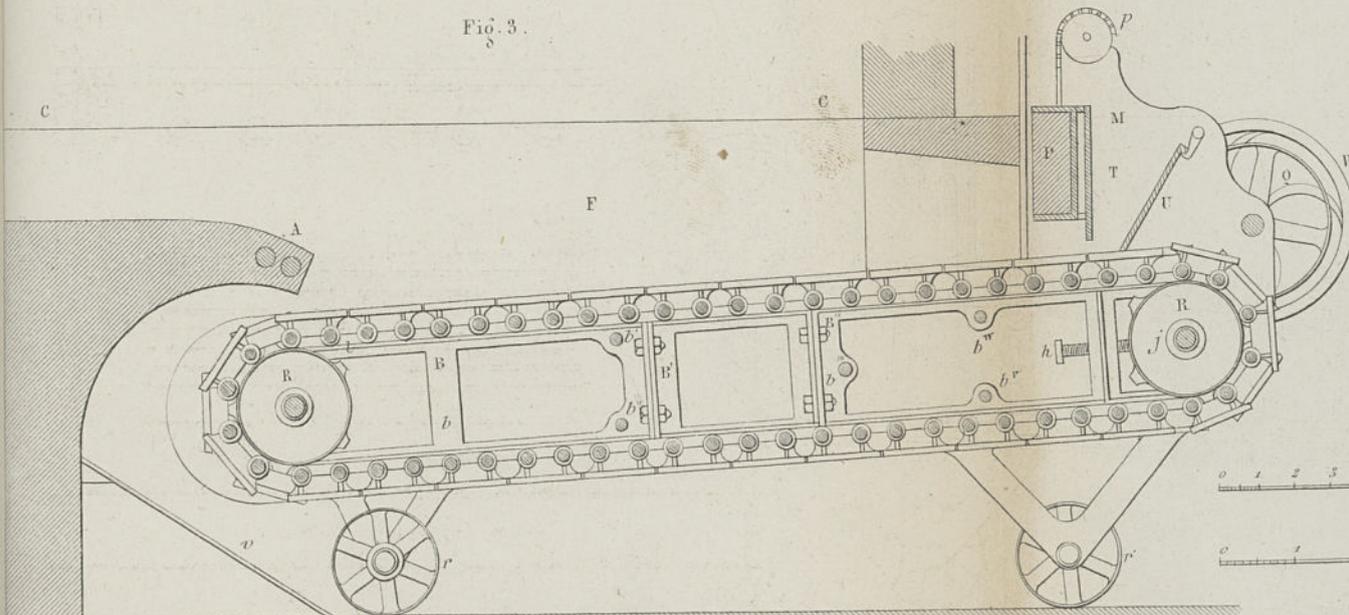


Fig. 4

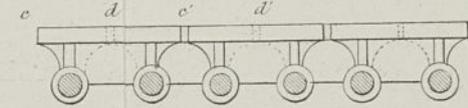


Fig. 5

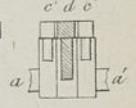
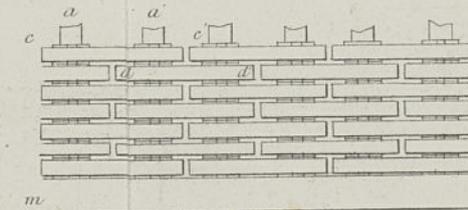


Fig. 6



Echelle 1/20 pour les fig. 1, 2, 3

Echelle 1/10 pour les fig. 4, 5, 6



Fig. 1.

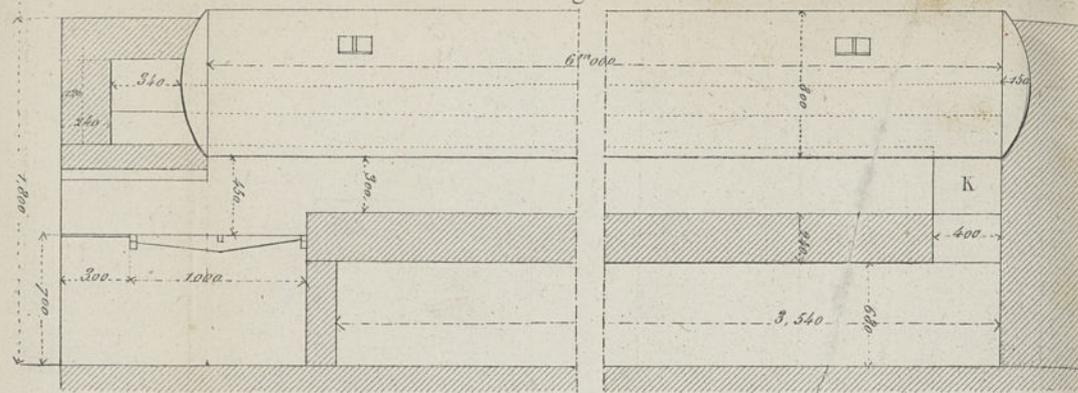


Fig. 2.

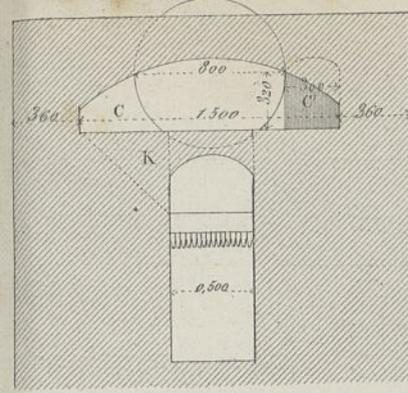


Fig. 5.

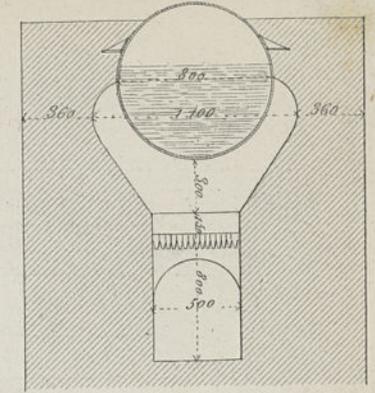


Fig. 6.

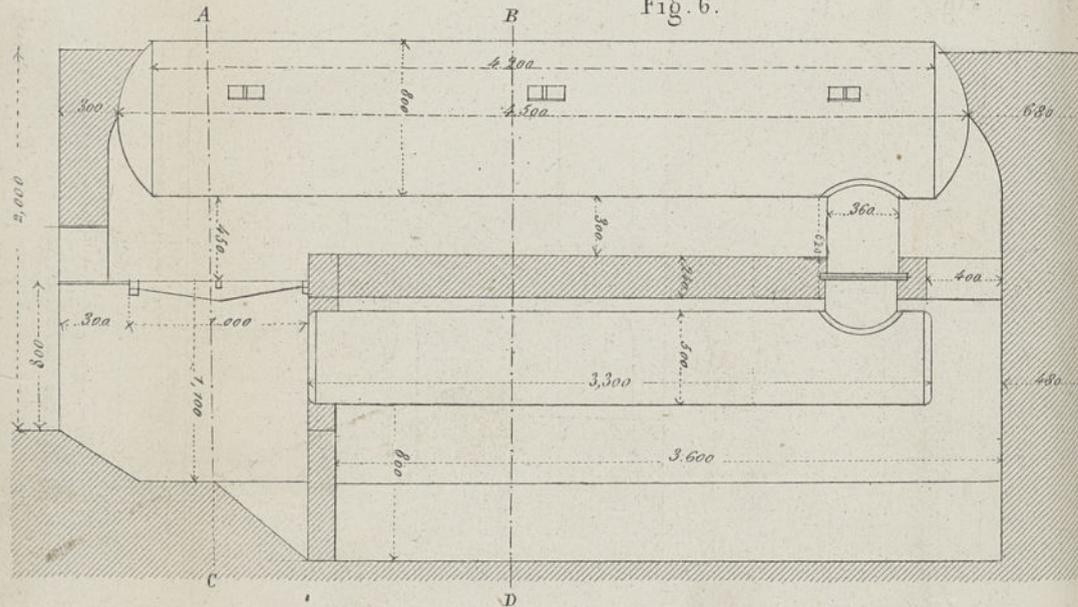


Fig. 7.

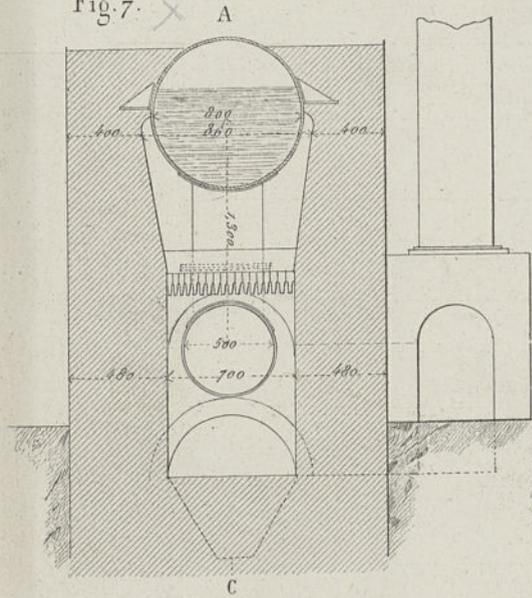


Fig. 8.

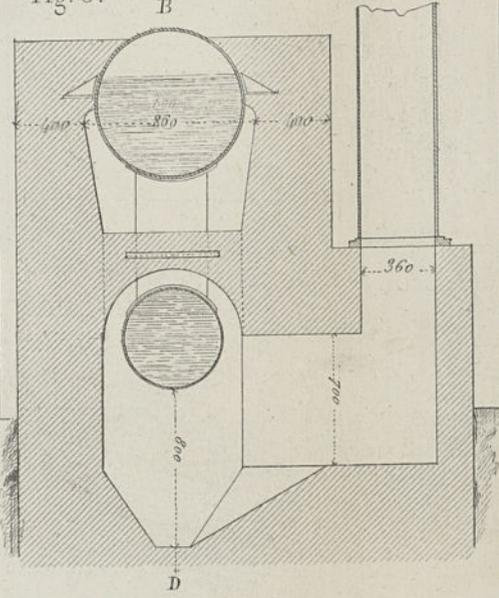


Fig. 5.

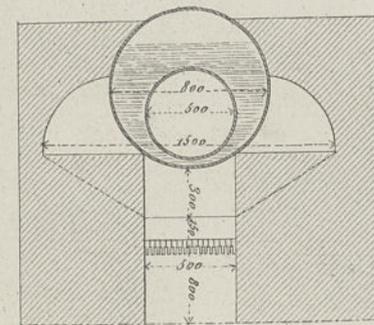


Fig. 4.

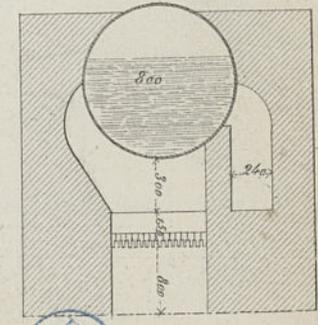


Fig. 9.

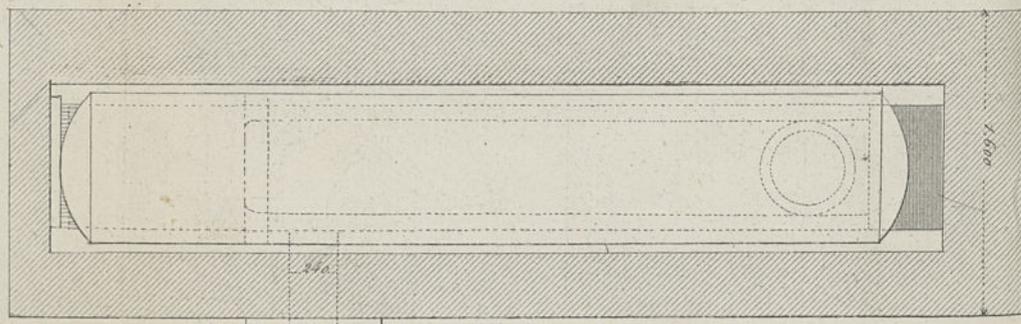


Fig. 1.

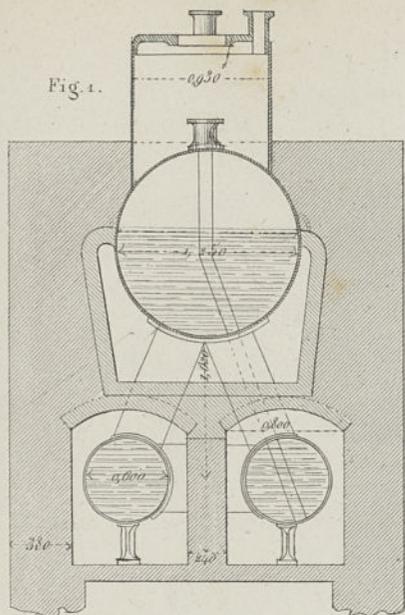


Fig. 2.

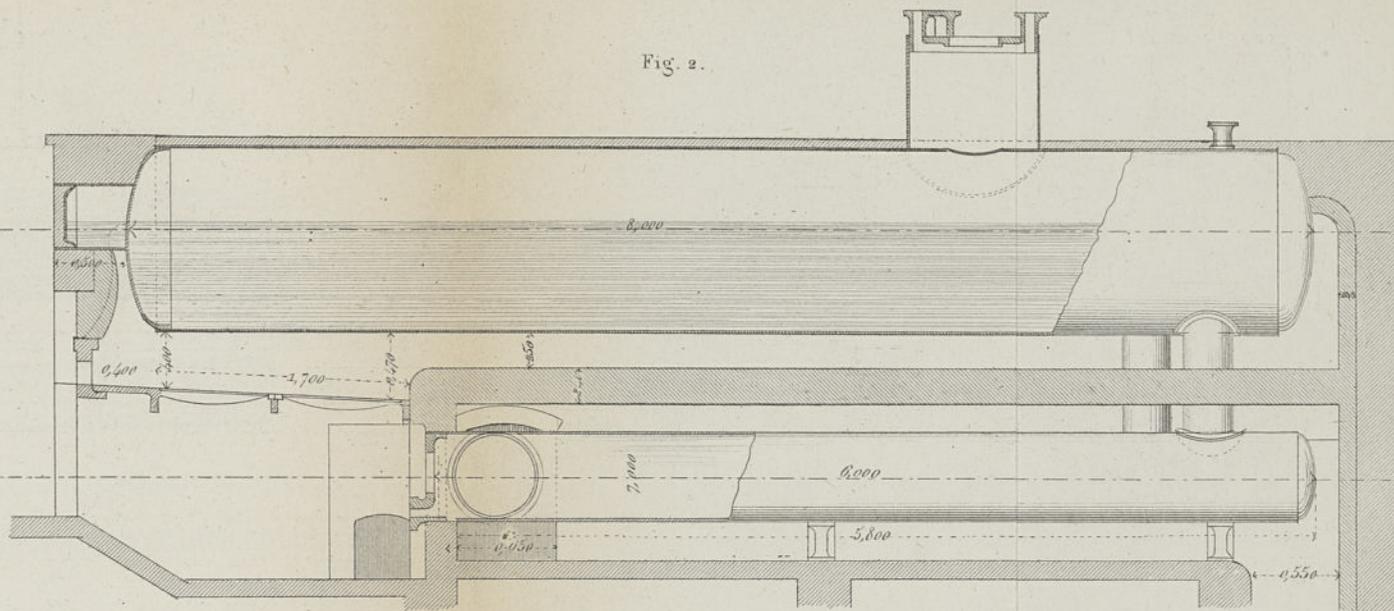


Fig. 5.

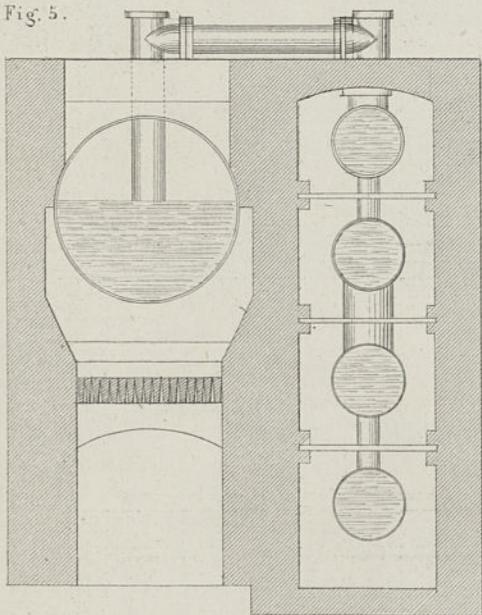


Fig. 3.

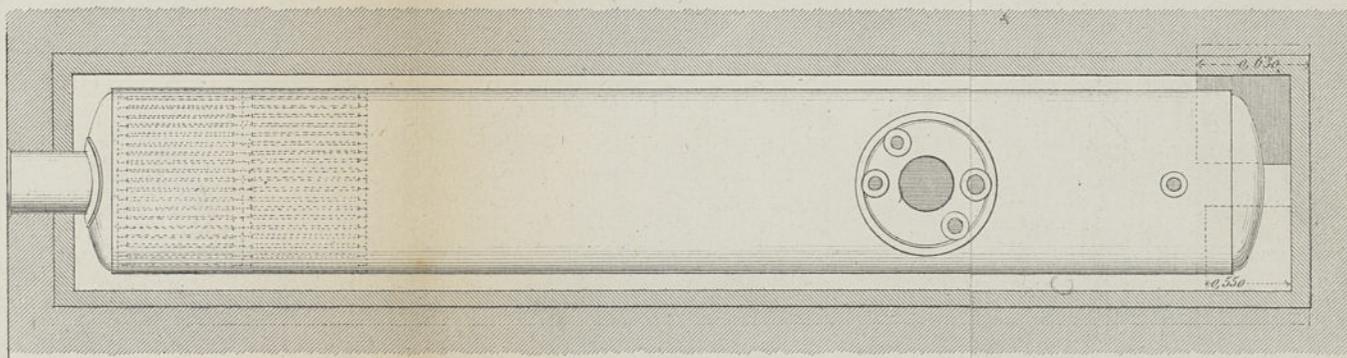
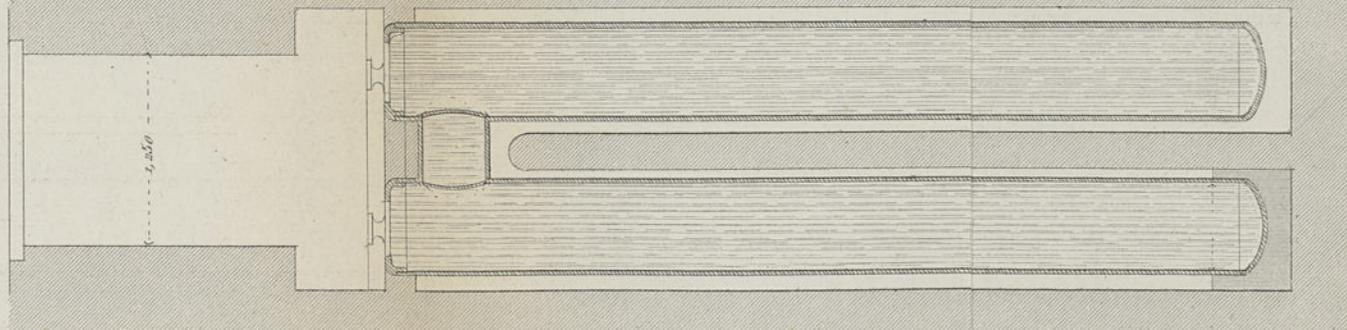


Fig. 4.



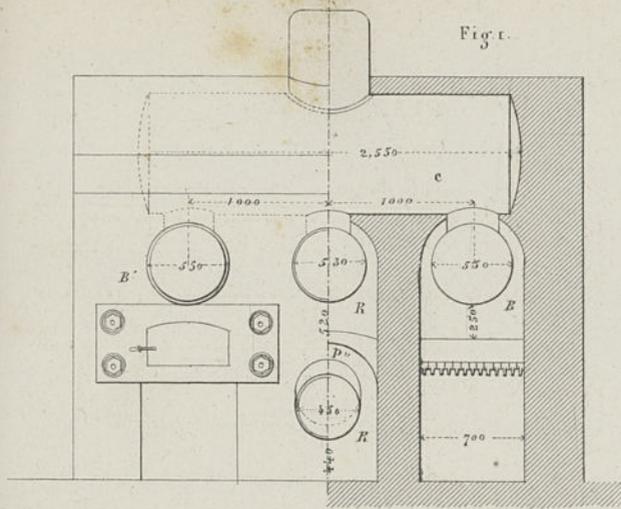


Fig. 1.

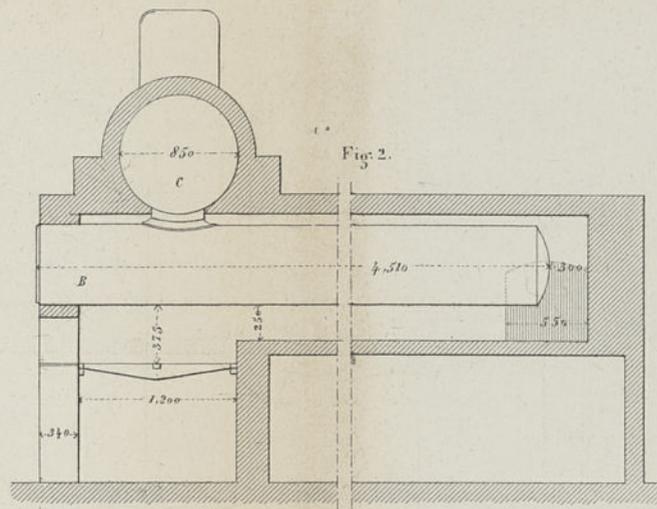


Fig. 2.

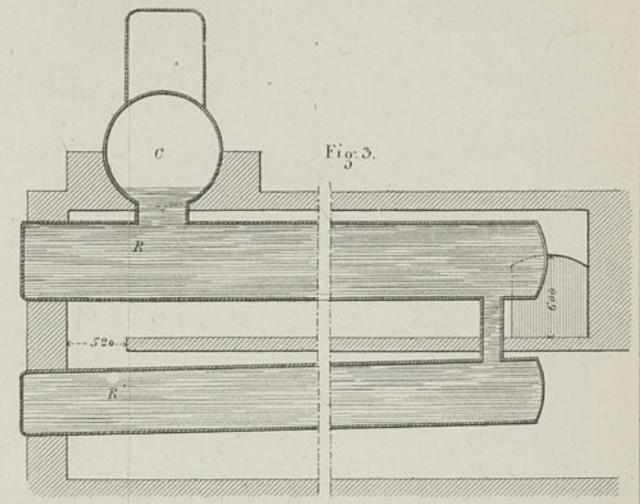


Fig. 3.

Fig. 4.

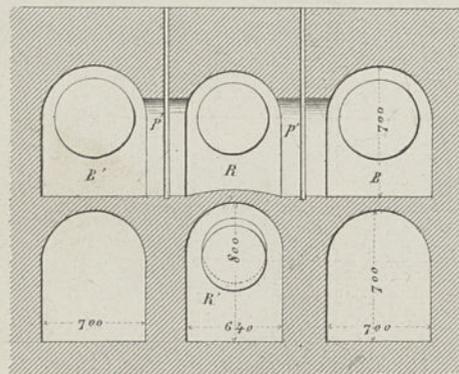


Fig. 5.

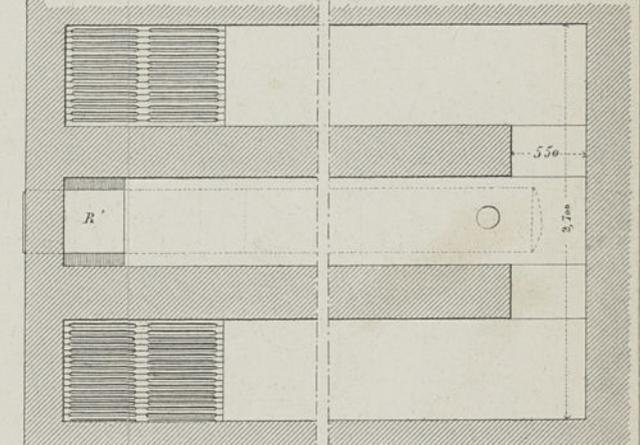
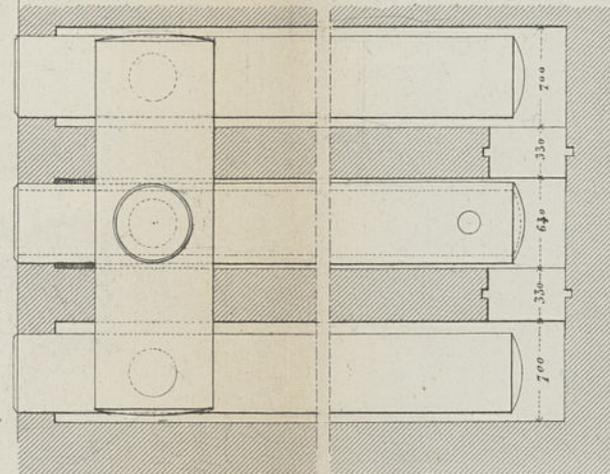


Fig. 6.

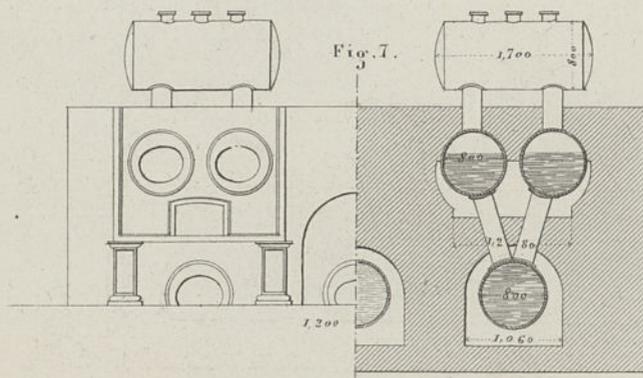


Fig. 7.

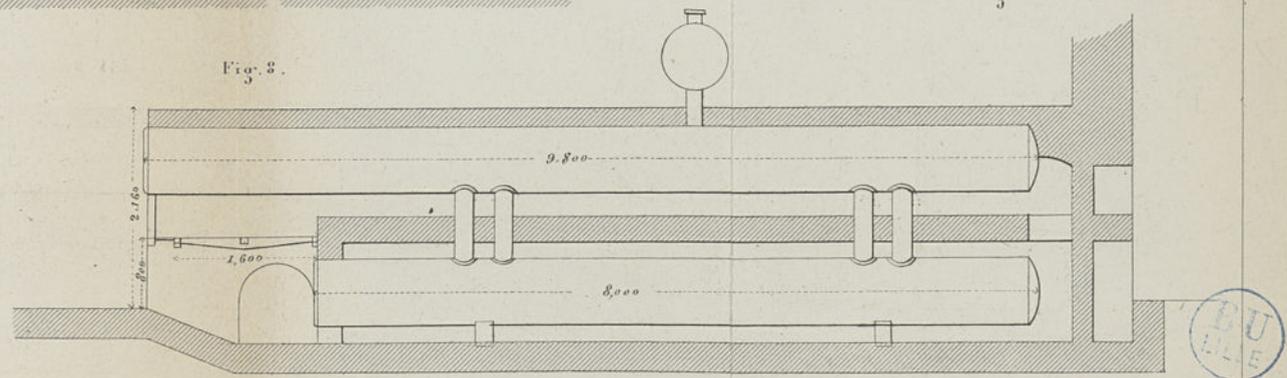


Fig. 8.



Fig. 1. Coupe suivant AB. Fig. 2.

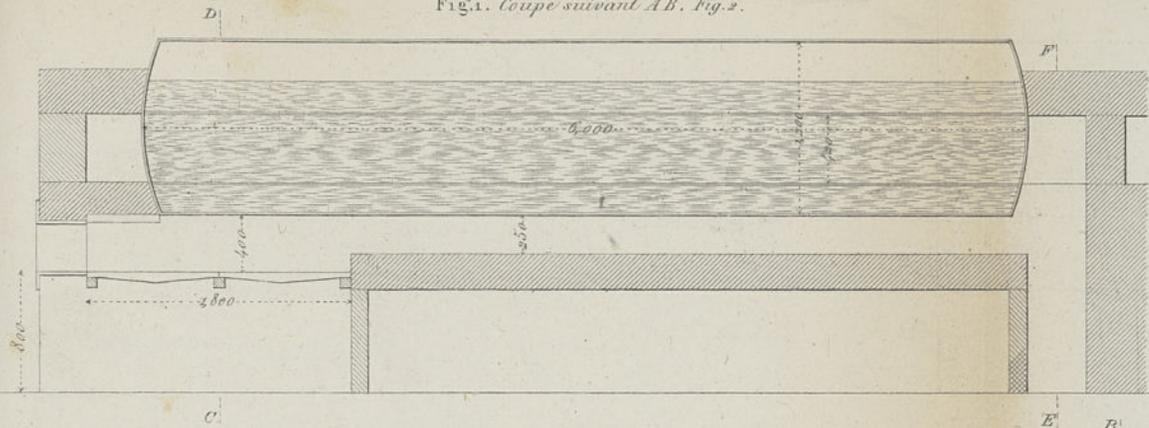


Fig. 2. Coupe suivant CD. Fig. 1.

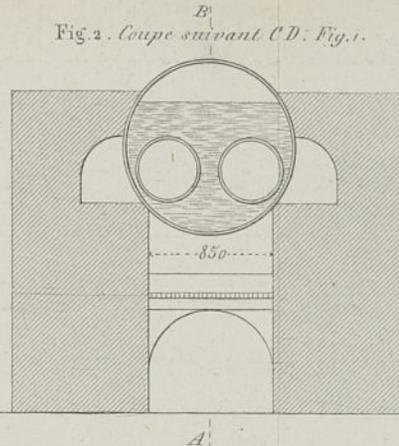


Fig. 3. Coupe suivant EF. Fig. 1.

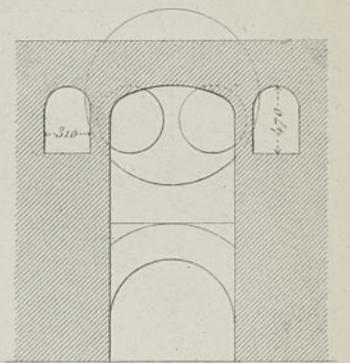


Fig. 4. Coupe suivant AB. Fig. 5.

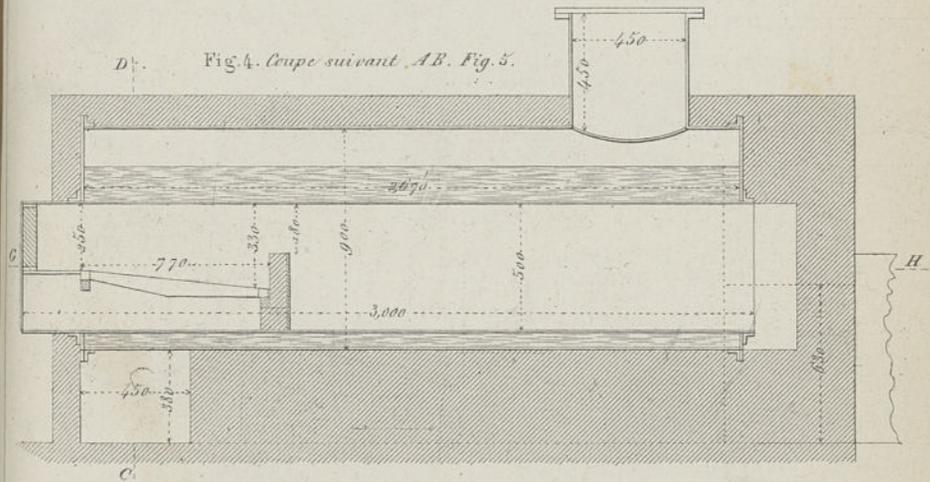


Fig. 5. Coupe suivant CD. Fig. 4.

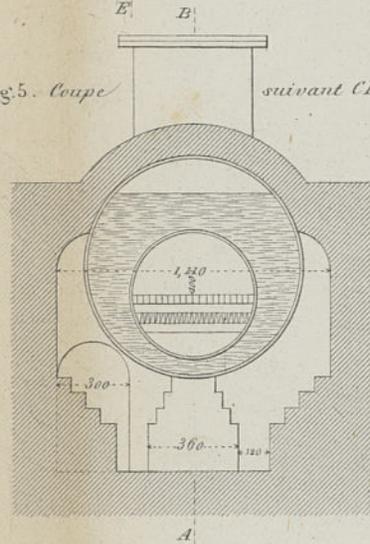


Fig. 6.

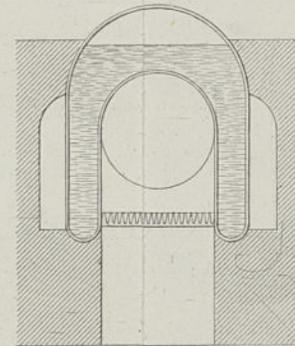


Fig. 7.

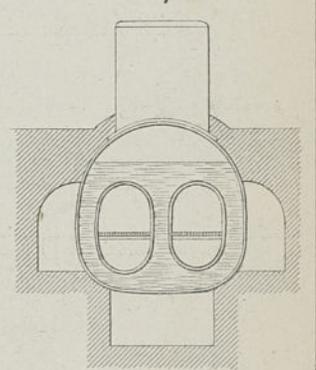


Fig. 6. Coupe suivant CH. Fig. 4.

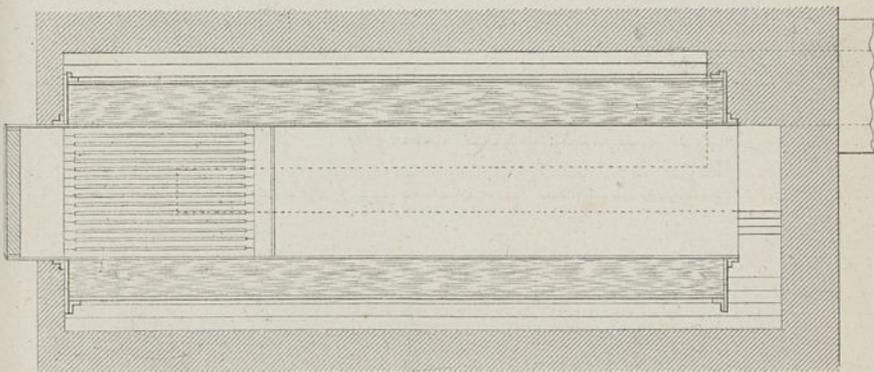


Fig. 9.

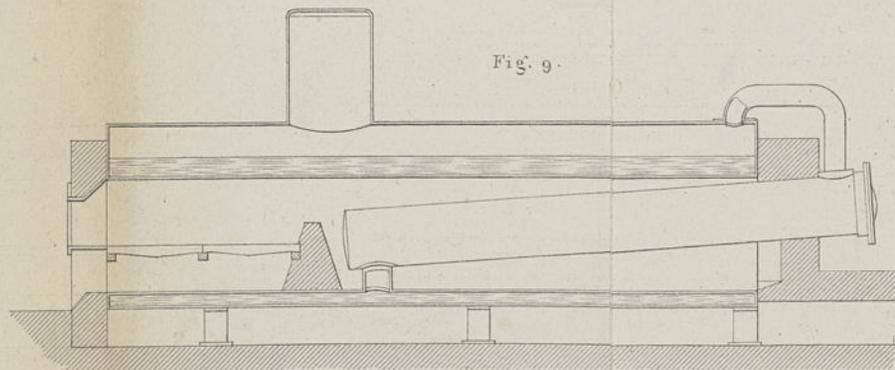
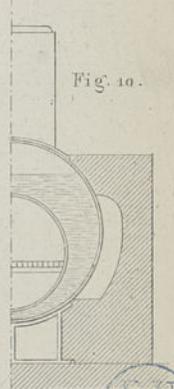
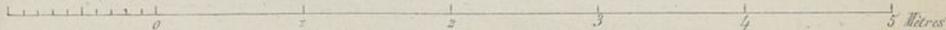


Fig. 10.



Echelle au 50^e des fig. 1, 2, 3-9, 10



Echelle au 30^e des fig. 4, 5, 6.

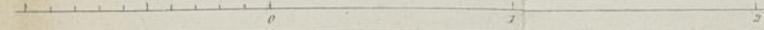


Fig. 1.

Coupe suivant AA.

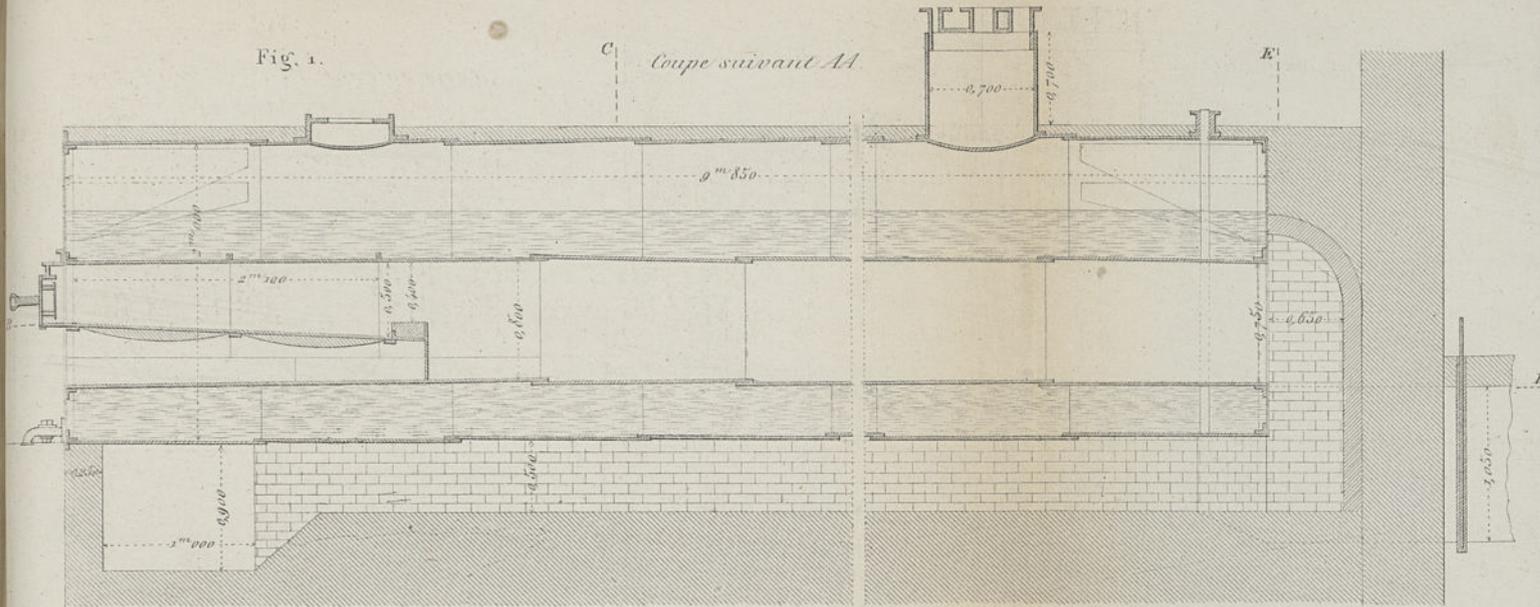


Fig. 2.

Coupe suivant CC. Vue de face.

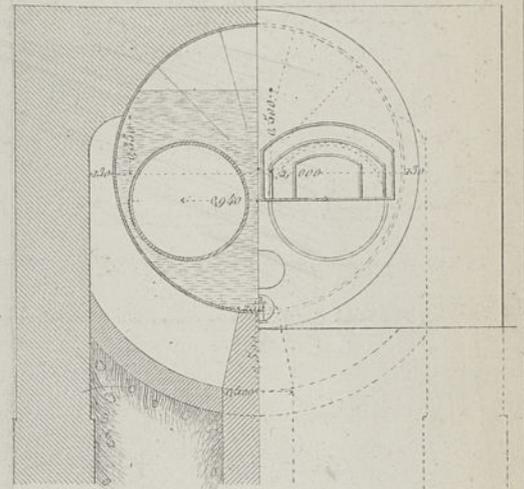


Fig. 3.

Coupe suivant BB.

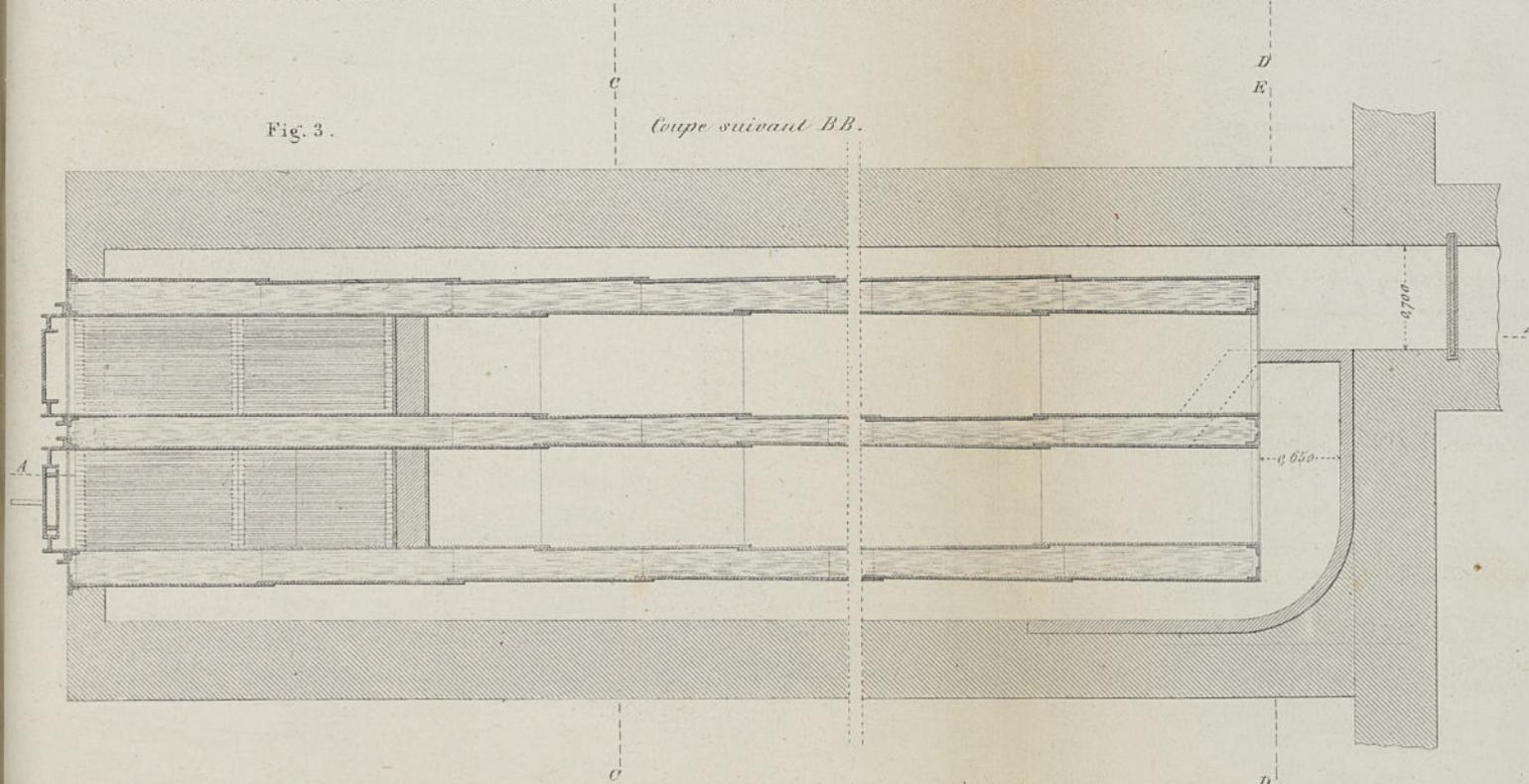
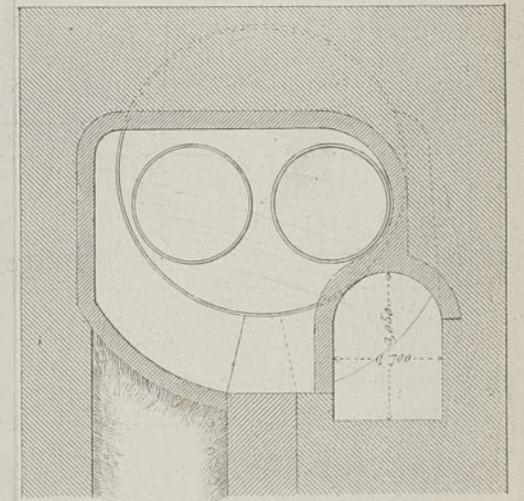
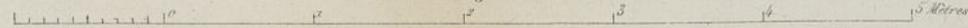


Fig. 4.

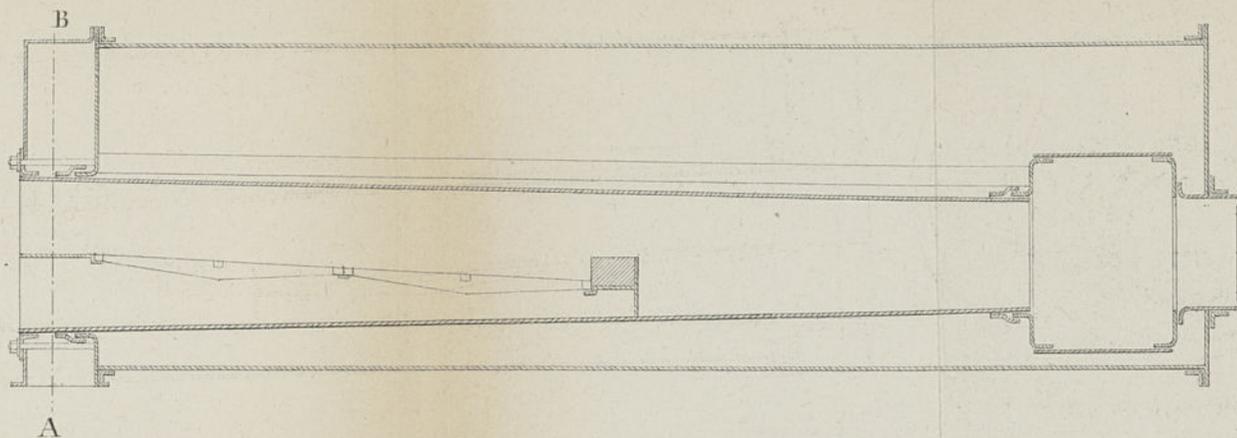
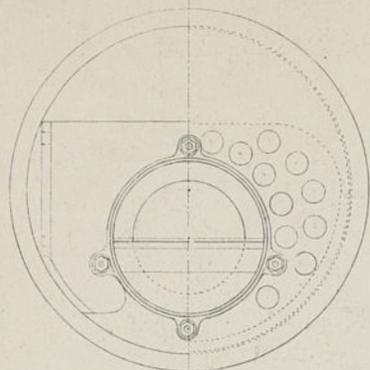
Coupe suivant DE.



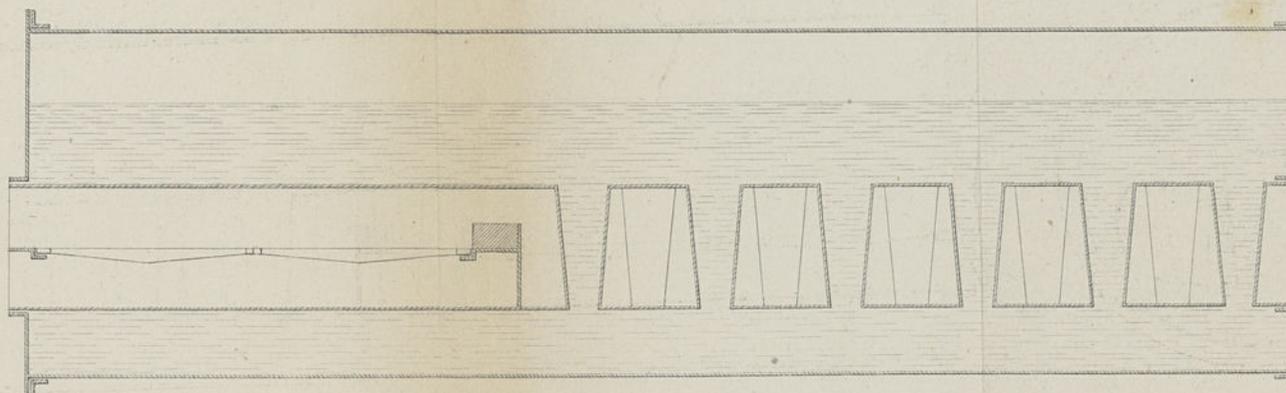
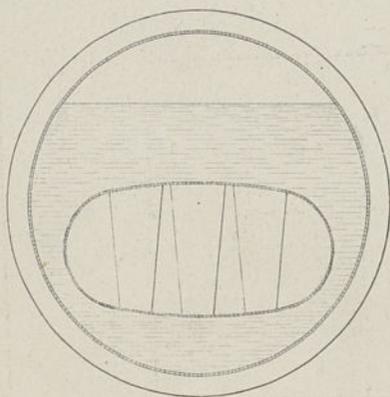
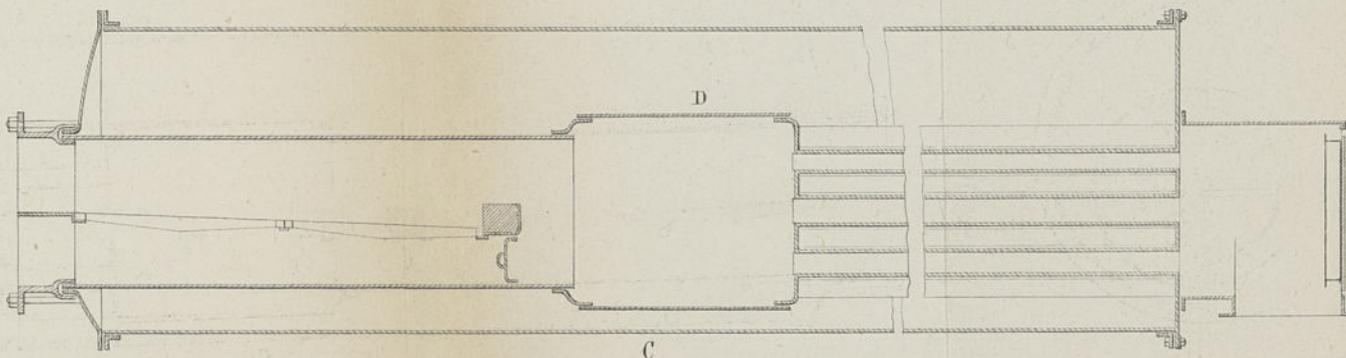
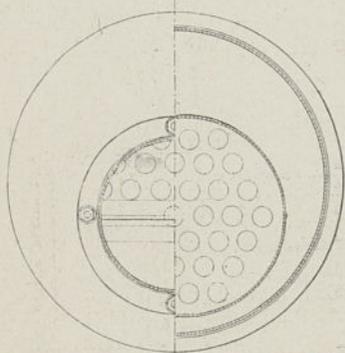
Echelle au 50^{ème} de la grandeur naturelle.



Vue de face Coupe AB.



Vue de face Coupe en CD.



Echelle de 1/30.

