

M É M O I R E

Le rendement des installations motrices à vapeur

PAR

H. PAQUAY,

Ingénieur civil des Mines et Ingénieur-Electricien A. I. Lg. à Liège (1)

INTRODUCTION

Pour étudier le rendement total d'une installation motrice à vapeur, on doit considérer :

1° Le rendement de production qui est le rapport entre la quantité de chaleur que fournit le générateur et celle qui lui a été livrée dans le combustible.

2° Le rendement de transmission qui est le rapport entre la quantité de chaleur livrée à l'appareil d'utilisation et celle qui est fournie par le générateur de vapeur.

3° Le rendement d'utilisation qui est le rapport entre la quantité de chaleur transformée en travail utile sur l'arbre du moteur ou de la turbine et la quantité de chaleur livrée à l'appareil considéré.

Le produit de ces trois rendements est égal au rendement thermique total.

(1) Lauréat du Concours Universitaire 1930-1932.

Dans l'étude de chaque système proposé pour l'amélioration du rendement total, nous aurons à examiner son influence sur chacun des rendements définis ci-dessus.

Dans la critique, nous étudierons l'effet du système proposé sur le coût de l'installation, sur la facilité d'exploitation et sur la sécurité de la marche. Ce sont là des facteurs qui interviennent en même temps que le rendement thermique total pour juger l'économie d'une installation et son aptitude à assurer un service régulier.

Un industriel ne doit pas simplement viser à obtenir le rendement optimum de son installation. Il doit chercher le **minimum** de prix de revient du kwh. sur l'arbre de ses moteurs; l'amortissement de ses installations, les frais d'entretien et de salaires, le service du capital, sont des termes de ce prix de revient au même titre que le coût du combustible. De plus la facilité de conduite et la souplesse de marche d'une installation doivent permettre de répondre à tout instant à la demande d'énergie. Enfin, la sécurité de marche doit être telle que l'on ne doive pas être constamment dans l'appréhension d'un arrêt dû à une panne pouvant provoquer dans certains cas l'arrêt de nombreuses usines et de nombreux ateliers que la centrale alimente.

Dans notre recherche du rendement optimum, nous devons d'ailleurs veiller à ce que l'amélioration apportée à l'un des rendements partiels considérés ne soit annihilée par la diminution concomitante de l'un des autres rendements.

Nous aurons aussi à tenir compte des auxiliaires qui consomment de l'énergie et qui occasionnent des immobilisations et des frais d'entretien.

CHAPITRE PREMIER

RENDEMENT DE PRODUCTION

C'est ce que l'on appelle habituellement le rendement de la chaudière. Ce rendement sera d'autant plus élevé que les pertes de chaleur de la chaudière seront faibles. Or, les pertes à considérer dans une chaudière proviennent :

- 1° des imbrûlés tombant au cendrier;
- 2° de la chaleur sensible des cendres;
- 3° de la chaleur perdue par rayonnement, conduction et convection par les parois de la chaudière;
- 4° de la chaleur perdue par les fumées.

Article premier. — Imbrûlés tombant au cendrier.

On constate dans les chaudières que le cendrier contient non seulement les cendres qui proviendraient d'une combustion complète du charbon mais encore des cendres qui peuvent dans certaines circonstances avoir une teneur élevée en produits combustibles, notamment en carbone imbrûlé.

Ces imbrûlés proviennent :

- a) dans le cas de combustion sur grille fixe :
 - A) du fait que des fines ont pu traverser la grille dès le chargement sans même avoir subi une distillation ou bien après avoir subi une distillation;

B) du fait que des particules de carbone ont pu être englobées dans un mâchefer constitué de cendres fusibles et être ainsi mises à l'abri de l'oxydation;

C) du fait d'un décrassage prématuré.

b) dans le cas de combustion sur grille mécanique :

Les imbrûlés proviennent des deux premières raisons ci-dessus et en plus :

D) du fait que, par suite de la trop grande hétérogénéité dans la charge, des morceaux de charbon trop gros arrivent au bout de la grille sans être complètement brûlés.

c) dans le cas de combustion au pulvérisé, ces imbrûlés proviennent :

E) du fait que des particules trop grosses n'ont pas eu le temps d'être complètement brûlées avant d'arriver au cendrier;

F) du fait que des particules de grosseur convenable ont été amenées trop vite au contact de parois froides et ont cessé de participer à la combustion.

A. — Fines de tamisage.

Le remède préconisé est d'employer des barreaux de grille de forme convenable, cette forme dépendant de la nature du combustible. Il convient d'ailleurs d'utiliser autant que possible des charbons classés et non pas du tout-venant. Il serait bon sous ce rapport que les barreaux soient aussi minces que possible et que les intervalles entre deux barreaux consécutifs soient très petits de façon que, d'une part, les espaces par où le tamisage des fines peut se produire soient très petits et que le

courant d'air s'oppose à la chute des fines; que d'autre part toutes les particules du charbon puissent être en contact avec l'air. Mais si les intervalles entre barreaux sont très petits, la résistance au passage de l'air deviendra trop forte. Il existe évidemment une limite dans cette voie : les barreaux doivent être suffisamment rigides pour supporter la charge du combustible, pour ne pas

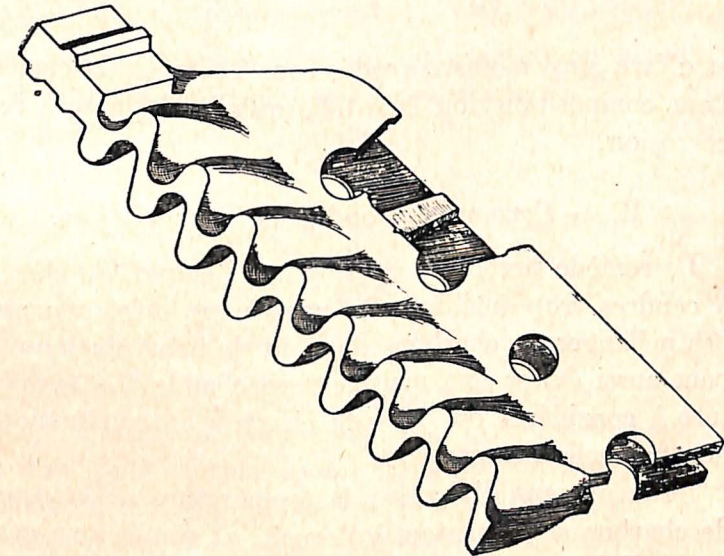


Fig. 1. — Barreau Aires.

se gondoler sous l'effet de la chaleur et du raclage manuel ou mécanique et ils doivent être disposés de façon à ne pas présenter une trop grande résistance au passage de l'air. Les barreaux Aires (fig. 1) et les barreaux Bennis (fig. 2) ont été étudiés spécialement pour réaliser les desiderata énoncés ci-dessus.

Des barreaux relativement minces auront d'ailleurs l'avantage d'être bien refroidis par le courant d'air

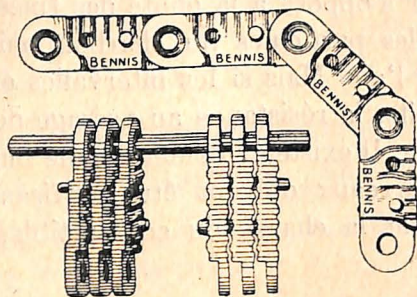


Fig. 2. — Barreaux Bennis.

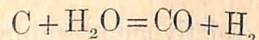
et d'être ainsi moins corrodés sous l'effet de la chaleur. Leur composition doit être telle qu'elle s'oppose à cette corrosion.

B. — Carbone englobé dans les mâchefers.

Le remède préconisé est d'éviter l'emploi de charbon à cendres trop fusibles. On peut à cet effet constituer des mélanges de charbons donnant de bons résultats. On peut aussi éviter une marche trop chaude. La température à considérer est celle du charbon en combustion et non pas celle des gaz.

Deux moyens d'abaisser la température de la couche de charbon se présentent à l'esprit: a) souffler un grand excès d'air sur une couche trop mince de charbon. L'excès d'air amène un abaissement de la température des gaz et un abaissement concomitant de la température du charbon, mais d'autre part, il entraîne une grande perte à la cheminée, il exige un soufflage important et il serait plus nuisible qu'utile. (Voir pertes à la cheminée.)

b) souffler de la vapeur sous la grille. La décomposition de la vapeur d'eau par le charbon incandescent :



est une réaction très endothermique qui permettrait de

maintenir une température suffisamment basse dans la masse en combustion. Au point de vue du rendement, cette opération serait nuisible car la combustion de l'hydrogène qui en proviendrait donnant de la vapeur d'eau ne permettrait pas d'épuiser les calories des fumées aussi bien qu'on le souhaiterait; la vapeur d'eau qui sort d'une chaudière avec les fumées entraîne une grande quantité de calories. Cette opération équivaldrait à une diminution du pouvoir calorifique inférieur du combustible. L'injection de vapeur qui devrait être dosée correctement de façon à n'abaisser la température qu'au minimum strictement nécessaire amènerait d'ailleurs une complication notable d'autant plus que le dosage exact de l'air en serait rendu plus difficile.

Nous verrons en (D) un autre moyen de récupérer le pouvoir calorifique du carbone inclus dans les mâchefers. La combustion sur grille d'un charbon à cendres trop fusibles s'opposerait d'ailleurs à l'emploi d'air chaud pour la combustion.

Sous le rapport du rendement, il convient donc de n'utiliser pour la combustion sur grille que des combustibles dont les cendres ont un point de fusion très élevé ou dont la teneur en cendres fusibles est faible.

Il peut se faire que l'emploi de charbons à cendres fusibles soit avantageux au point de vue économique, grâce au bas prix de tels charbons.

C. — Décrassage prématuré.

On n'a aucun moyen d'action sur cet élément. Tout dépend de l'habileté du chauffeur et de sa conscience professionnelle.

D. — *Imbrûlés en bout de grille.*

Un bon classement du charbon remédie à cet inconvénient. Il arrive souvent d'ailleurs qu'en pratique on brise les morceaux de charbon trop gros avant de les charger sur la grille.

Un moyen préconisé pour récupérer les pertes de pouvoir calorifique provenant de B) et D) en cas d'emploi de grille mécanique consiste à faire tomber en bout de grille les mâchefers et les imbrûlés dans un gazogène à air (fig. 3).

Il est indispensable dans ce cas que le gazogène soit à air, car il ne dispose que d'un combustible très pauvre.

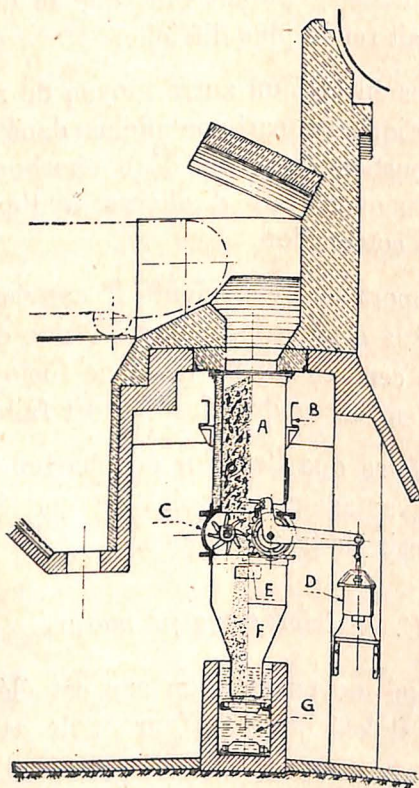


Fig. 3. — Gazogène placé en bout de grille.

Le fait qu'il est à air ne présente aucun inconvénient dans le cas présent, car la chaleur sensible du gaz qui en provient est récupérée, ce gaz se dégageant directement dans la chaudière. La marche du gazogène pourra être efficace si le combustible possède encore un pouvoir calorifique suffisant pour que sa température de marche soit convenable. C'est d'ailleurs le seul cas que l'on doive examiner. On ne pensera jamais à récupérer le pouvoir calorifique des escarbilles dont la teneur en carbone serait inférieure à 20 %. En effet, en supposant que les escarbilles aient un poids de 20 % du charbon chargé sur la grille, le carbone contenu dans les escarbilles correspondrait à 4 % du poids de ce charbon. En admettant que le gazogène ait un rendement de 50 %, on récupérerait une quantité de chaleur de 2 % du poids du charbon chargé sur la grille. Si nous admettons que le charbon ait un PC de 7.500 calories/kg., on récupère

$$97,6 \times 20$$

$$20 \text{ gr. de carbone dont le PC est } \frac{\quad}{12} = 160 \text{ calories}$$

soit une amélioration de 2 % de la chaleur dégagée. Cette amélioration qui paraît être surévaluée pour les installations normales (20 % d'escarbilles à 20 % de C) n'est obtenue qu'au prix d'une complication notable (conduite du gazogène) et d'une élévation assez importante du coût de l'installation.

L'estimation à 50 % du rendement du gazogène marchant avec un tel combustible est certainement aussi très généreuse. Il faut noter en effet que les fines de tamisage à fort pouvoir calorifique n'atteindront pas le gazogène. Celui-ci sera alimenté seulement par les résidus de la combustion arrivant au bout de la grille. Une notable quantité du carbone inclus dans les mâchefers échappera à la gazéification, car ces mâchefers ne seront

vraisemblablement pas fondus dans le gazogène. Celui-ci dont la base est noyée (les mâchefers sortent donc à basse température) possède cependant un avantage d'un autre ordre; il permet de récupérer une partie de la chaleur sensible des cendres et si sa marche peut être satisfaisante dans certains cas, ce ne sera que grâce à la haute température des escarbilles. Il en résulte que l'adjonction d'un gazogène en bout de grille pour la récupération ne s'indique que dans des cas tout à fait spéciaux.

Remarque. — Les pertes spécifiques des grilles fixes et mobiles ci-dessus indiquées sont notablement aggravées s'il s'agit de grilles à chargement manuel. Dans ce cas, il est très difficile d'adopter la combustion à l'air chaud. L'habileté du chauffeur a une influence considérable sur le rendement. Le concours de chauffeurs qui a eu lieu à Liège en 1922 l'a montré d'une façon frappante : les rendements ont varié pour le moins du simple au double. Cela s'explique aisément: si le décrassage se fait trop tôt, il y a des pertes notables de carbone; s'il se fait trop tard, l'air qui traverse la couche des escarbilles n'amène plus de combustion. Il emporte seulement la chaleur sensible des escarbilles. Comme il arrive presque froid au contact de la chaudière, il s'échauffe aux dépens de celle-ci en emportant à la cheminée de grandes quantités de chaleur. L'adresse dans le chargement a aussi une importance énorme : une trop grande épaisseur de combustible entraîne un défaut d'air, avec perte de matières volatiles du charbon et combustion incomplète du coke. En plus, les rentrées d'air froid au moment du chargement entraînent des pertes énormes à la cheminée avec danger de déboîter des tubes et inconvénient de produire des contractions pouvant amener des surtensions et des dislocations de tout ordre. Aussi dans

les centrales modernes, les grilles à chargement manuel sont tout à fait abandonnées sauf pour les chaudières de réserve. Nous ne considérerons plus dans la suite que les foyers à chargement automatique qui éliminent autant que possible le facteur humain.

Parmi ces foyers, il en existe de deux systèmes: ceux à grille-chaîne et ceux à grille mécanique simple.

1) Les premiers sont constitués d'une chaîne sans fin qui transporte le combustible vers le bout du foyer où se trouve le cendrier. Il n'y existe pas de mouvement relatif entre la chaîne et le combustible qui se consume.

2) Les seconds sont constitués par des grilles à poussoirs ou par des grilles dont les barreaux ont un mouvement tel qu'ils entraînent la progression du charbon vers le cendrier.

Au point de vue du rendement, il ne semble pas que l'on puisse départager ces deux systèmes qui sont alimentés l'un et l'autre par des trémies à charbon placées à l'avant du foyer.

Les grilles à chaîne étant entraînées par des dispositifs plus simples, ayant un mouvement continu et consommant moins d'énergie que les autres systèmes sont particulièrement en faveur au point qu'en 1928, elles équipèrent les 42,7 % des nouvelles installations en Allemagne. Il est à remarquer qu'elles s'adaptent bien à la plupart des grandes chaudières modernes.

Les autres systèmes de grilles mécaniques sont surtout employés en liaison avec des chaudières moins modernes, à tubes foyers par exemple, c'est-à-dire dans les cas où les grilles chaînes ne peuvent guère s'appliquer. Nous ne nous occuperons plus dans ce qui suivra que des foyers à grilles-chaînes et des foyers au charbon pulvérisé. Il existe cependant des grilles à poussoirs (Underfeed Sto-

kers) qui donnent d'excellents résultats et qui sont employées dans des chaudières modernes de grandes dimensions.

E. — *Particules trop grosses dans le pulvérisé.*

Le seul remède consiste à pulvériser le charbon à la finesse convenable. L'obtention d'une grande finesse coûte beaucoup d'énergie. La pratique semble consacrer l'usage des broyeurs ventilés aux dépens des tubes compound non ventilés. Le classement des poussières y est très bien réalisé. Les poussières trop grosses ne sont pas emportées par le courant d'air, mais sitôt qu'une poussière atteint la finesse voulue, elle est entraînée.

Cela présente le grand avantage d'une faible consommation d'énergie par tonne de charbon pulvérisé. La technique de la pulvérisation n'est pas encore suffisamment bien établie pour qu'on puisse dire quel est, parmi les divers systèmes de broyeurs présentés par les constructeurs, celui qui est le plus économique. Un autre remède à ces pertes (E) ou à la nécessité de broyer très fin consiste aussi à utiliser de l'air comburant préchauffé. On sait en effet que les vitesses de réaction air-charbon sont d'autant plus grandes que la température est plus élevée. En pratique, on pulvérise à la plus grande finesse compatible avec une dépense d'énergie non excessive.

F. — *Extinction par les parois froides.*

Le remède consiste en une bonne disposition de la chambre de combustion, disposition qui doit permettre que la combustion soit sensiblement achevée avant que les gaz viennent en contact avec les parois froides. L'injection d'air préchauffé produisant une combustion plus

rapide donne encore du bénéfice dans le cas considéré, de même qu'une grande finesse du pulvérisé.

Art. 2. — **Chaleur sensible des cendres.**

La chaleur sensible des cendres est toujours faible comparée au pouvoir calorifique du charbon dont elles proviennent. Ainsi, supposons qu'un charbon donne 20 % d'escarbilles. Admettons que leur chaleur spécifique à 0° soit 0,22 (chiffre élevé). (Voir Damour: *Les sources de l'énergie calorifique.*)

Nous trouvons pour chaleur spécifique moyenne :

$$S_m (o \text{ à } t) = 0,22 (1 + 0,00039 t)$$

soit $0,22 (1 + 0,39) = 0,31$ cal./gr. ou 310 cal./kg. d'escarbilles, ce qui revient à 62 cal. par kg. de charbon soit moins de 1 % de perte si les cendres sortent à 1.000°, ce qui est certainement leur température maximum.

Sans que l'on poursuive ce but, il arrive fréquemment que l'on récupère une bonne partie de cette chaleur sensible. Ainsi dans le système à grille mécanique, la partie des cendres qui tombe dans les compartiments de soufflage est épuisée au point de vue chaleur sensible par l'air qui arrive dans ces compartiments. Dans le système de combustion au charbon pulvérisé, pour éviter que les cendres viennent fondues dans la trémie du cendrier, il arrive que l'air secondaire soit injecté à travers cette trémie de façon que les cendres soient refroidies par cet air secondaire avant d'arriver au cendrier et qu'elles y tombent sous forme de cendres pulvérulentes (fig. 4). Leur chaleur sensible est ainsi récupérée par l'air secondaire et réintroduite dans le foyer. Les écrans d'eau contribuent aussi à refroidir les cendres. Le gazogène auquel il a été fait allusion plus haut permet aussi de récupérer

une bonne partie de la chaleur sensible des escarbilles provenant de la grille.

Art. 3. — **Chaleur perdue par les parois.**

Les pertes de chaleur par les parois sont inévitables. On peut les atténuer par une forte épaisseur de réfractaire et par un bon calorifugeage.

On utilise aussi des écrans d'eau constitués par des tubes d'eau placés parallèlement aux murs du foyer. Ils refroidissent fortement les fumées qui les traversent et par suite, diminuent la température des parois; les pertes à travers celles-ci sont ainsi beaucoup moins fortes.

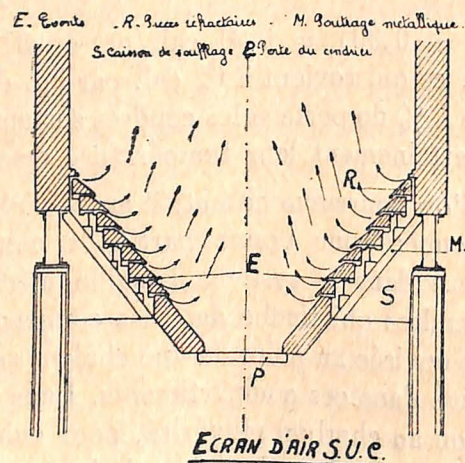


Fig. 4.

L'écran d'air secondaire défini plus haut et ayant pour but le dépôt des cendres sous forme pulvérulente a aussi pour effet de diminuer la température d'une partie des parois et leurs pertes de chaleur. On utilise encore des murs doubles parcourus par l'air secondaire qui emporte la chaleur tendant à traverser les murs ou des tubes d'eau placés dans l'épaisseur de la paroi (foyers Bailey).

Art. 4. — **Chaleur perdue par la cheminée.**

La chaleur contenue dans les fumées comprend :

- a) leur chaleur sensible;
- b) leur chaleur latente.

La chaleur sensible des fumées est proportionnelle à leur poids et elle croît avec leur température.

Le poids des fumées par kg. de charbon dépend des conditions de la combustion. En tout état de cause, la combustion doit être complète. Pour réaliser une combustion complète, il faut que le poids d'air contribuant à la combustion d'un kg. de charbon soit au moins égal au poids d'air théorique. Pour une température donnée de sortie des fumées, il faut que leur poids soit le plus faible possible. A cet effet, il faudrait réaliser la combustion théorique sans excès d'air ou du moins s'en rapprocher autant que possible. On pourra se rapprocher d'autant plus de la combustion théorique sans excès d'air que le mélange comburant-combustible sera plus homogène. Or, le mélange est tout à fait hétérogène en cas de combustion sur grille. Il sera impossible de réaliser la combustion théorique dans ce cas. On s'explique très bien ce fait en examinant le processus de la combustion sur grille. Soit h_0 la hauteur du combustible sur la grille au début de la combustion (fig. 5). Cette hauteur ira en diminuant par le fait de la combustion elle-même.

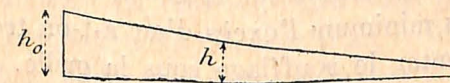


Fig. 5. — Epaisseur de la couche de charbon.

Supposons que l'on souffle de l'air à une pression telle que la combustion soit complète pour une épaisseur h de combustible. Aux endroits où la hauteur est plus forte

que h la combustion sera incomplète : la couche de combustible se comportera comme un gazogène. En revanche, aux endroits où la hauteur est inférieure à h , il y aura un excès d'air. Lorsque les gaz provenant des diverses régions de la grille auront diffusé, l'excès d'air se combinera d'ailleurs avec les gaz non complètement oxydés (CO) provenant de la zone de la grille fonctionnant comme gazogène. C'est ce qui explique la présence de flammes bleues dans le foyer. Le résultat final amènera une combustion complète. Il semble donc qu'il puisse être possible de régler exactement la pression de l'air pour obtenir la combustion théorique. Mais avec le temps, varient les conditions dans lesquelles se présente le combustible sur la grille. A un moment donné, en un point A de la grille, les morceaux de charbon peuvent se présenter très bien entremêlés de façon que l'air soit obligé de lécher tous les grains en suivant un parcours sinueux. Un instant plus tard, au même endroit, tout le charbon sera consumé ou bien les morceaux se présenteront de façon que le passage de l'air soit beaucoup plus aisé. Pour être certain que la combustion soit toujours complète, on sera forcé d'adopter une pression de soufflage ou un réglage du tirage tel que l'air passe en excès.

On conçoit que plus la grille est longue, plus l'excès d'air en temps normal sera grand car plus la grille est longue, plus sont grandes les chances de variation de la disposition du combustible sur la grille. Aussi pour pouvoir réduire au minimum l'excès d'air a-t-on trouvé bon de compartimenter le soufflage sous la grille. La pression de l'air sera la plus forte à l'endroit où l'épaisseur de combustible est la plus grande (1) ; elle est la moindre

(1) On fait ici abstraction de la zone où se trouve du charbon qui n'a pas encore commencé à brûler et qui se réchauffe en donnant lieu à un dégagement de matières volatiles, qui doivent aussi être mélangées à de l'air si l'on veut en assurer une combustion convenable.

On ne considère donc que la zone où le charbon est vraiment en combustion.

à l'endroit où le combustible est presque complètement consumé et cela pour deux raisons : d'abord à cause de la moindre épaisseur de combustible en cet endroit et en second lieu parce que le combustible déjà bien épuisé en carbone et se refroidissant présente une moindre aptitude réactionnelle avec l'O de l'air. C'est ainsi que l'on utilise souvent deux, trois ou quatre compartiments de soufflage sous la grille.

L'air comburant arrive au premier compartiment avec la pression que lui a communiqué le ventilateur. Entre le premier et le deuxième compartiment se trouve une ouverture réglée par registre de façon telle qu'elle produise une perte de charge convenable. On obtient ainsi une pression plus basse dans le deuxième que dans le premier compartiment. Par le même moyen, on règle la pression dans les compartiments suivants.

Lorsque le ventilateur produit une pression p , cette pression convient pour une certaine vitesse de la grille et une certaine épaisseur initiale du combustible, c'est-à-dire pour une certaine allure de la chaudière. Si l'on veut forcer l'allure, on pourrait croire qu'il suffirait de forcer la pression, toutes les autres conditions restant les mêmes. Cela produirait un plus fort débit d'air dans le premier compartiment avec comme résultat une plus forte diminution de l'épaisseur du combustible (fig. 6). Le résultat global serait une combustion plus rapide dans ce compartiment. La pression étant aussi plus forte dans le second compartiment, l'excès d'air y serait beaucoup trop grand, de même que dans les compartiments suivants. La consommation de combustible resterait d'ailleurs la même qu'en marche normale. Il ne suffit donc pas de forcer la pression de soufflage, il faut aussi augmenter la vitesse de translation de la chaîne. Ceci aurait pour effet de maintenir l'épaisseur du combustible que l'on

avait dans les conditions normales ou une épaisseur un peu moindre, ce qui est indispensable car le charbon doit être complètement consumé lorsqu'il arrivera en bout de grille.

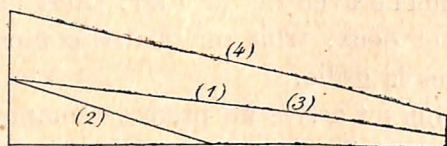


Fig. 6. — Epaisseur de charbon sur la grille-chaîne.

- (1) Marche en allure normale;
- (2) Marche à pression forcée avec même vitesse de chaîne;
- (3) Marche à pression forcée avec plus grande vitesse de chaîne;
- (4) Marche à pression forcée avec plus grande vitesse de chaîne et plus grande épaisseur de charbon.

Mais dans ces conditions il y aurait encore excès d'air puisque la pression est plus forte, l'air passe plus vite à travers la couche et la réaction de combustion n'aurait pas le temps de se produire, c'est-à-dire qu'il y aurait excès d'air; il faut donc encore, en plus des conditions énumérées plus haut, que l'on augmente l'épaisseur de combustible à l'entrée.

En résumé pour forcer l'allure, il faut forcer la pression et la vitesse de la chaîne et augmenter l'épaisseur du combustible.

S'il s'agit d'une grille non compartimentée à tirage naturel, il faut forcer la vitesse de la chaîne et le tirage en agissant sur le registre et augmenter l'épaisseur de la couche de charbon.

Nous réalisons ainsi les meilleures conditions pour obtenir la masse minima de fumées avec grille mécanique.

Pour ce qui concerne le charbon pulvérisé, le réglage de l'excès d'air est beaucoup plus aisé: il suffit de régler la pression d'injection de l'air secondaire pour obtenir

une combustion neutre, oxydante ou même réductrice. Dans le cas de combustion du pulvérisé en chaudière, on utilisera un excès très faible d'air. La forte division du combustible et son mélange intime avec le comburant permet une combustion complète avec un très léger excès d'air. Il semble que, sous le rapport de l'homogénéité du mélange, les brûleurs qui injectent tout l'air de combustion soient à préférer à ceux qui n'injectent que le mélange air primaire-charbon.

Cependant, les essais effectués sur des chaudières dont l'injection d'air secondaire se fait sous forme d'écran d'air à partir de la trémie du cendrier ont donné d'aussi bons résultats.

Les installations à charbon pulvérisé semblent donc constituer la solution idéale sous le rapport du rendement de la chaudière: si celle-ci est bien conduite, on doit pouvoir obtenir la combustion complète sans excès d'air notable.

Les grilles mécaniques suivent de très près sous le rapport du rendement.

Au point de vue des auxiliaires, le charbon pulvérisé entraîne des immobilisations assez conséquentes: broyeurs, habituellement séchage du charbon, ventilateurs, canalisations à air pulvérisé, brûleurs, trémies à charbon pulvérisé, distributeurs.

Les broyeurs et les ventilateurs ont des pièces qui s'usent assez rapidement. Donc les frais d'entretien sont relativement élevés. Il en est de même pour ce qui concerne la force motrice. Le séchage du charbon doit habituellement ramener sa teneur en humidité à 1 ou 2%. On le réalise par un soufflage d'air chaud ou de fumées.

Il existe d'ailleurs deux écoles sous le rapport du système de pulvérisation: la première préconise l'installa-

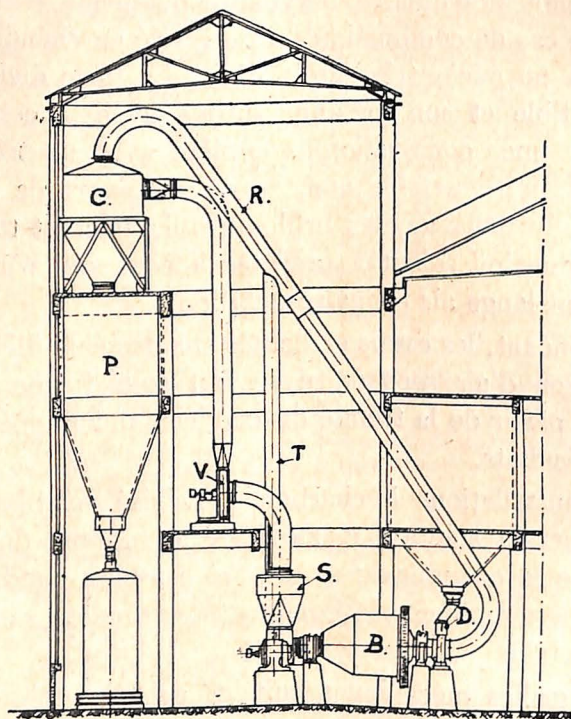


Fig. 7. — Centrale de pulvérisation.

- D : arrivée du charbon séché venant de la trémie;
 B : broyeur à boulets;
 S : sélecteur;
 V : ventilateur aspirant dans le broyeur et refoulant l'air chargé de poussière dans le séparateur-cyclone C;
 C : séparateur-cyclone;
 P : trémie à charbon pulvérisé;
 R : conduite de retour de l'air au broyeur.

tion d'une centrale de broyage où le séchage et la pulvérisation de tout le pulvérisé destiné à la centrale s'effectuent dans de gros appareils centralisés. On peut ainsi diminuer au minimum la consommation d'énergie. Mais le transport du pulvérisé de la centrale de pulvérisation jusqu'aux divers appareils consommateurs exige aussi une dépense d'énergie. Un accident conséquent à la cen-

trale de pulvérisation serait de nature à immobiliser toute l'installation motrice. En outre des obstructions de canalisations peuvent se produire entraînant des suites désagréables. Nous donnons ci-contre le schéma d'une installation centrale à pulvérisé (fig. 7). Ce schéma montre bien l'importance de l'installation et laisse deviner que son coût doit être élevé (SUC).

La seconde école préconise l'installation de petits broyeurs individuels auprès de chaque chaudière. Dans ce cas, il arrive souvent que l'on n'installe pas de séparateurs cyclones : le charbon est directement envoyé dans le brûleur avec l'air qui l'a enlevé du broyeur (pulvéro-brûleurs type D. SUC) (fig. 8).

Les divers petits broyeurs complètement indépendants n'entraînent pas d'inconvénients graves si l'on doit arrêter l'un d'entre eux. Le transport par un courant d'air est aisé, n'amène pas d'obstructions et n'exige pas un séchage aussi poussé que dans le cas de la centrale de pulvérisation.

Si le charbon utilisé n'est pas trop humide, il ne sera même pas nécessaire de le sécher préalablement. Il suffira d'alimenter le pulvéro-brûleur en air chaud.

Cet air étant constamment emporté avec le pulvérisé permet un séchage suffisant mais il entraîne dans la chaudière avec l'air primaire toute la vapeur d'eau provenant du charbon, ce qui produit des pertes à la cheminée comme nous le savons. Ces pertes sont faibles dans ce cas cependant puisque de toute façon il faudrait enlever l'eau d'imprégnation du charbon sous forme de vapeur.

Dans le cas de la centrale de pulvérisation, un charbon trop humide aurait tôt fait d'obstruer les conduites de transport du pulvérisé. Il existe cependant un avan-

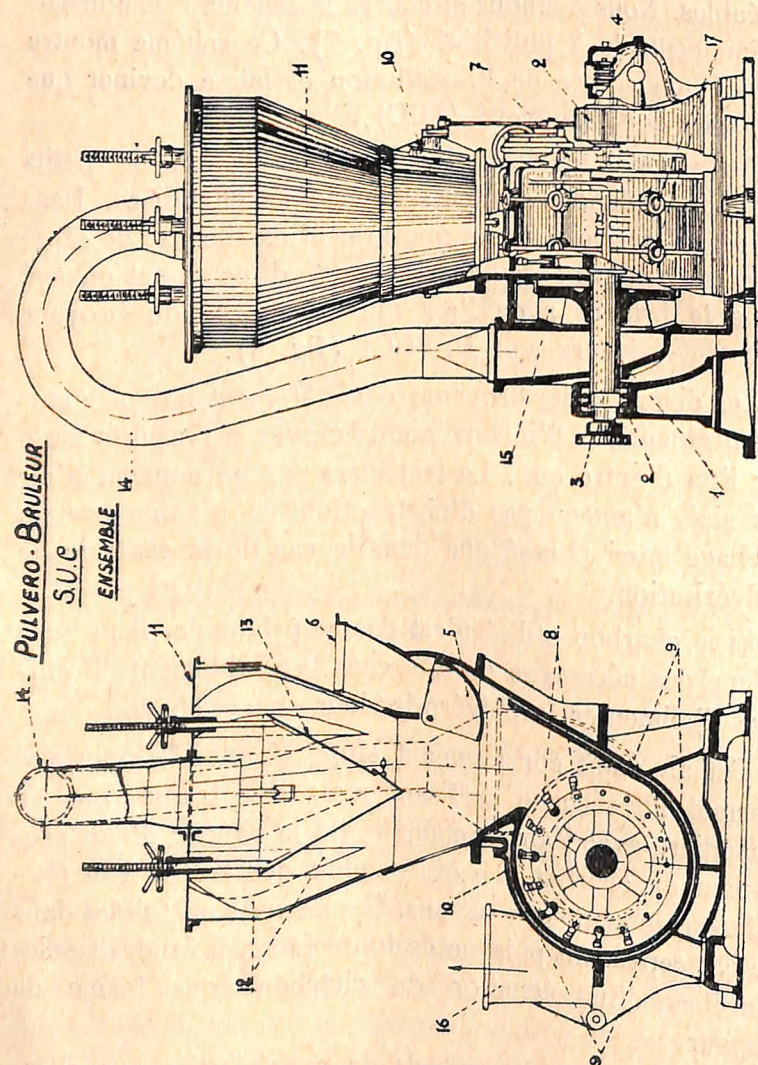


Fig. 8.

tage non négligeable en faveur de la centrale de pulvérisation : la finesse du charbon est régulière, la marche des broyeurs étant toujours la même. Il arrive aussi fréquemment que la centrale de pulvérisation produise en huit heures la quantité de charbon nécessaire pour toute la journée. La finesse n'est donc pas affectée par l'allure des chaudières et il est possible d'effectuer certaines réparations sans arrêter les chaudières.

Au contraire, s'il s'agit de broyeurs individuels, lorsqu'on voudra forcer la marche d'une chaudière, il faudra aussi forcer la marche du broyeur correspondant s'il s'agit d'un broyeur sans trémie, donc sans réserve de pulvérisé. Le pulvéro-brûleur indiqué plus haut ne pourra augmenter sa production qu'en forçant sa vitesse, ce qui entraîne une ventilation exagérée de nature à emporter des grains de charbon plus gros si l'on n'y pourvoyait en réglant en conséquence le sélecteur dont la position devra d'ailleurs varier avec la nature du combustible.

On voit donc qu'il est possible quel que soit le système employé, d'obtenir la finesse voulue en dépit des variations d'allure de la chaudière et que le pulvéro-brûleur permet une grande souplesse avec une marche à plein rendement de la combustion.

En cas de centrale de pulvérisation, la souplesse est aussi grande : l'alimentation peut se faire par un dispositif tel que le contrôleur-distributeur à plateau (voir fig. 9 SUC) qui permet de varier instantanément la quantité du pulvérisé injecté. En résumé, la centrale de pulvérisation amène tous les avantages des broyeurs individuels, elle centralise tout le broyage. Il est vraisemblable que le coût d'une centrale et que sa consommation d'énergie sont moindres que ceux des divers broyeurs individuels. La plus grande sécurité de marche doit cependant à

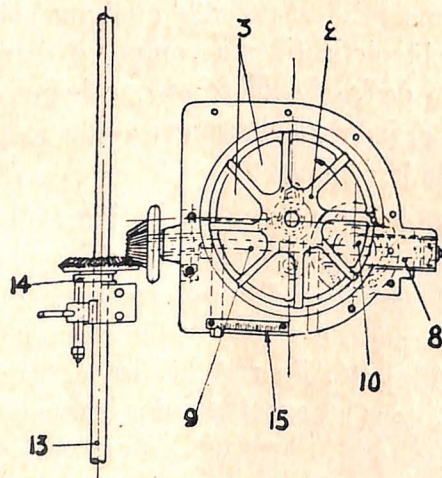
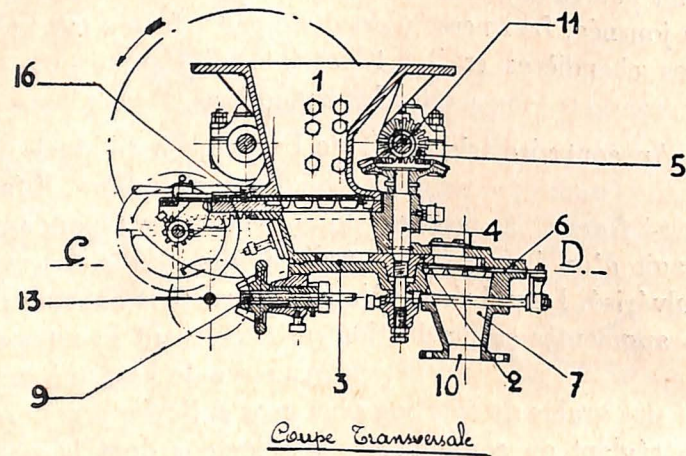
CONTRÔLEUR-DISTRIBUTEUR A PLATEAU

Fig 9.

ceux-ci d'avoir la préférence dans la plupart des installations.

Comparons à présent la combustion sur grille et la combustion au pulvérisé.

Cette dernière comporte vraisemblablement de plus grands frais d'installation et certainement une plus grande consommation d'énergie.

Au point de vue de l'installation, les grilles-chaînes sont aussi très coûteuses : grand poids de la chaîne, des poulies et des tourteaux de commande (roues dentées), grand nombre de maillons, compartimentage du soufflage, changement de vitesse de la grille, moteur de commande, porte réglant l'épaisseur de combustible, trémie à combustible (fig. 10).

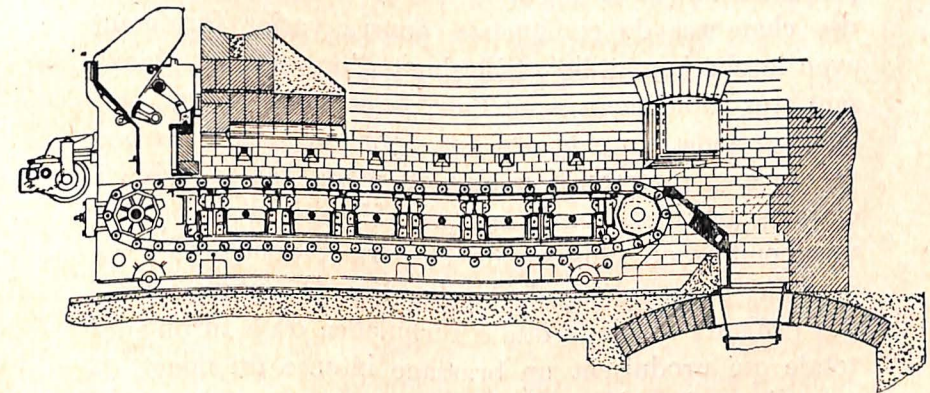


Fig. 10. — Grille-chaîne Bennis.

La puissance du moteur sans être négligeable est néanmoins beaucoup moindre que celle nécessaire pour le broyage et le transport du charbon pulvérisé.

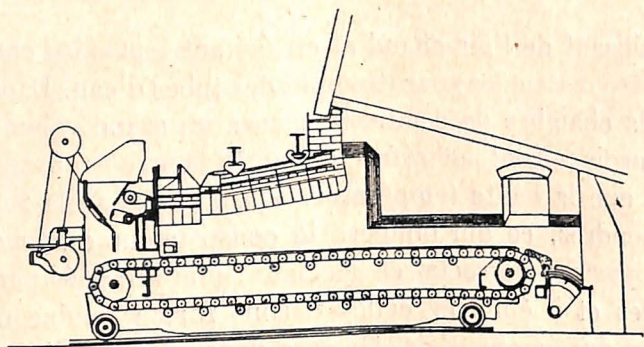
Au point de vue de la sécurité de marche, le charbon pulvérisé est au moins aussi avantageux que la grille-chaîne : si un maillon de celle-ci vient à se rompre, la chaîne doit être réparée sinon du charbon non brûlé

en utilisant de l'air chaud et en évitant toutes les causes de refroidissement ; par exemple des tubes d'eau. Dans ce cas, la chambre de combustion aura un grand volume et les parois seront en réfractaires. Il pourra se produire alors que la haute température atteinte amène la fusion des cendres, ce qui obligera le constructeur du foyer à employer des réfractaires spéciaux, non attaqués par les cendres et à éliminer celles-ci sous forme fondue ou à utiliser des écrans d'air. On sera dans ce cas si l'on doit brûler des anthracites dont la teneur en matières volatiles est très faible et dont la teneur en cendres peut être très élevée.

On se rend ainsi compte que la chambre de combustion doit être conçue d'après la nature du combustible qui y sera brûlé et il faudra lui donner des dimensions telles que le charbon convenant le moins bien pour brûler sous forme pulvérisée puisse y être consumé complètement.

La combustion sur grille n'a évidemment pas de raison pour exiger une chambre de combustion aussi vaste. La combustion y est en effet presque terminée lorsque l'air sort de la couche de charbon. Nous avons cependant déjà signalé que certaines zones du foyer peuvent se comporter comme gazogène et, en tous cas, à l'entrée de la grille, il se produira une distillation dont les produits ne seraient pas brûlés s'ils n'étaient au préalable portés à haute température.

Le charbon lui-même ne commencera à brûler que s'il est porté à haute température. Aussi disposera-t-on au-dessus de l'entrée de la grille une voûte réfractaire (Ben- nis — fig. 11) maintenue à l'incandescence qui chauffe- ra la couche de combustible par rayonnement et les gaz distillés par convection.



GRILLE A CHAÎNE "BENNIS" MUNIE DE VOÛTE PLATE.

Fig. 11.

Ces gaz dès qu'ils seront portés à une température suffisamment élevée, brûleront avec l'air qui y est mélangé. Le charbon sera chauffé davantage sur les côtés de la grille si la voûte a la forme d'une arche et il y brûlera plus rapidement. Aussi avec ces voûtes faudra-t-il y donner une plus forte épaisseur de combustible. Actuellement on cherche à employer les voûtes planes suspendues qui résistent beaucoup mieux s'il s'agit de grandes largeurs de chaînes. Les réparations et la construction de ces voûtes sont d'ailleurs beaucoup plus simples que celles des anciennes voûtes en arche (voir fig. 12 et 13).

Remarquons que, par suite de l'introduction continue de charbon, il sera toujours possible d'obtenir la combustion complète des gaz distillés. Dans l'ancien système à chargement manuel, il était difficile de brûler complètement ces gaz distillés. Aussi, au moment du chargement, voyait-on sortir de la cheminée des fumées noires, preuve d'une mauvaise combustion.

Les foyers modernes peuvent réaliser une excellente fumivorté, c'est-à-dire supprimer à tout instant la présence d'imbrûlés dans les fumées.

Résumons la comparaison grille mécanique - pulvérisé.

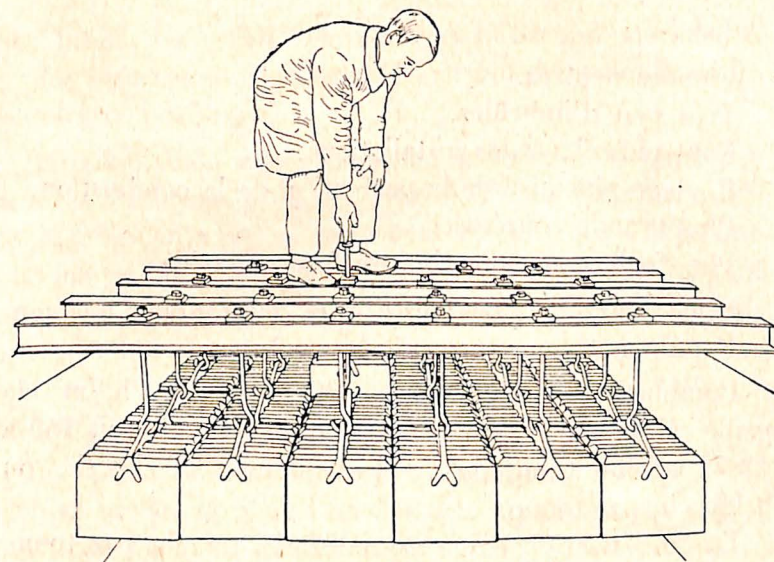
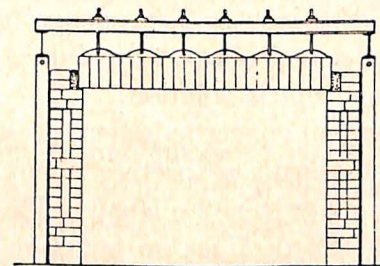


Fig. 12. — Voûte suspendue Wanson.



VOÛTE SUSPENDUE "WANSON"

Fig. 13.

Grille mécanique :

- Fumées neutres.
- Imbrûlés en bout de grille et dans les compartiments de soufflage.
- Coût moins élevé.
- Réglage moins aisé.
- Souplesse moins grande.
- Moindre consommation de force motrice.

Pulvérisé :

Fumées neutres.

Très peu d'imbrûlés.

Coût plus élevé des installations.

Règlage plus aisé de la perfection de la combustion.

Plus grande souplesse.

Plus forte consommation de force motrice.

Nous donnons ci-dessous l'ordre de grandeur des consommations d'énergie des deux systèmes.

Combustion de l'ordre de 100 à 250 kg./h./m² de grille. Moteur de 3 kw. pour grille de 7,5 m², soit 750 à 1.875 kg./h. Comptons 3 kw. pour 1.500 kg./h. ou 2 kw./h. par tonne.

La pulvérisation exige au moins 12 kw./h. par tonne dans les conditions les plus avantageuses.

Il est donc très malaisé de départager ces deux systèmes. Des considérations de lieu, de nature du charbon dont on dispose, de voisinage et aussi de goût de l'exploitant régleront souvent la solution.

Ainsi, pour ce qui concerne le lieu, il est certain qu'un combustible tout-venant se prêtera mieux à la combustion sous forme de pulvérisé que sur grille : les pertes de la grille sous forme de fines de tamisage et sous forme d'autres imbrûlés y seraient fortes, le broyage sera aisé et coûtera peu de force motrice puisque une grande partie du combustible s'y trouve sous forme de fines.

Or, il sera particulièrement avantageux de brûler des combustibles de faible valeur au voisinage des mines, car les frais de transport sont les mêmes pour un combustible inférieur que pour un combustible mieux classé et lavé. Il est donc vraisemblable que la combustion de combustibles de peu de valeur sera surtout avantageuse au voisinage des mines, tandis que l'avantage de ces combusti-

bles inférieurs serait relativement beaucoup moindre à grande distance de la mine où les grilles mécaniques pourraient être préférées.

La combustion sous forme de pulvérisé donnant des cendres très fines obligera souvent l'exploitant à un dépoussiérage très poussé si la centrale se trouve dans une agglomération importante. Or, le dépoussiérage, souvent électrique (procédé Cottrel ou autre), exige des installations coûteuses et entraîne encore une certaine consommation d'énergie. Il est possible qu'on puisse l'éviter si l'on brûle le combustible sur grille mécanique.

Il existe donc des conditions en très grand nombre pour influencer sur le choix de l'un des deux systèmes envisagés : pulvérisé ou grille mécanique.

Le dépoussiérage n'est pas toujours une opération improductive : il arrive qu'il récolte des suies dont le pouvoir calorifique soit intéressant. On les réinjecte alors dans le foyer, en mélange avec le pulvérisé (Centrale de Wérister).

Toutefois pour le but que nous poursuivons actuellement qui consiste à rechercher le rendement optimum, une installation bien conçue au pulvérisé doit être supérieure à une installation à grille mécanique.

Nous allons d'ailleurs voir qu'une autre raison milite encore en faveur du pulvérisé.

En effet, nous avons déjà constaté à plusieurs reprises l'heureux effet de la combustion à l'air préchauffé.

Or, nous sommes ici à la recherche des moindres pertes par la cheminée. Si l'on ne disposait d'aucun moyen de récupération de la chaleur sensible des fumées, la meilleure solution consisterait à abandonner celles-ci lorsqu'elles auraient atteint une température aussi rap-

prochée que possible de celle qui règne dans la chaudière. Il est d'ailleurs impossible d'amener les fumées à une température égale à celle qui règne dans la chaudière; cela exigerait une surface de chauffe infinie si l'on négligeait les pertes de chaleur. Les derniers éléments de cette surface ne transmettraient qu'une quantité infime de chaleur et le gain réalisé au point de vue du rendement serait compensé et bien au-delà par l'intérêt, l'amortissement, l'entretien, etc., redevables à ces éléments de surface de chauffe.

En pratique, les fumées quitteront donc la chaudière proprement dite à une température nettement plus élevée que celle de l'eau de cette chaudière. Or, cette dernière température tend à croître de plus en plus à mesure qu'on élève le timbre de la chaudière, tendance que nous aurons à justifier dans un chapitre subséquent. Aussi, les fumées sortent-elles toujours à une température que l'on peut évaluer au strict minimum à 300° pour toutes les chaudières modernes à haut rendement.

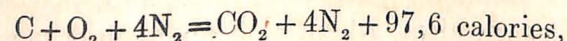
Evaluons la perte qui résulterait d'une absence de récupération.

Supposons que les fumées soient constituées pour 20 % de CO₂ et pour 80 % d'azote (produits de la combustion neutre du carbone pur).

La chaleur d'échauffement de l'N₂ à 300° est 2,1 et celle du CO₂ de 2,9, soit une chaleur d'échauffement moyenne par môle de fumée de

$$\frac{4 \times 2,1 + 2,9}{5} = \frac{11,3}{5} = 2,3 \text{ calories.}$$

Or, pour un atôme de C, la réaction est :



soit cinq môles de fumées pour un atôme de C, donc perte à la cheminée :

$$5 \times 2,3 = 11,3 \text{ calories, soit } \frac{11,3}{97,6} = 11 \text{ \% .}$$

Ce n'est là qu'une évaluation grossière mais qui donne bien l'ordre de grandeur des pertes à la cheminée.

Certaines chaudières modernes laissent échapper des fumées à 480° en marche normale et 520° en pointe (Centrale de Furst-Hardenberg). Cela occasionnerait une perte bien supérieure à 11 % et cette perte ne serait pas justifiée par des conditions de tirage naturel : on peut réaliser un tirage forcé à des conditions énormément plus avantageuses.

On ne tolère ces hautes températures de sortie des fumées que parce qu'elles diminuent considérablement la surface de chauffe nécessaire de la chaudière, et parce qu'on sait que l'on récupérera ces pertes, soit dans des réchauffeurs, soit dans des économiseurs. Les fluides circulant dans ces engins (air ou eau) y entrant à des températures beaucoup plus basses que l'eau de la chaudière permettront des taux de transmission de chaleur beaucoup plus élevés que dans la chaudière pour ce qui concerne l'économiseur et l'emploi de surfaces de chauffe beaucoup moins coûteuses que celles de la chaudière pour les réchauffeurs. Ajoutons que la circulation des fumées et du fluide froid se fera presque toujours à contre-courant de façon que le rendement soit maximum pour une surface d'échange donnée.

Toutes les calories extraites des fumées par le réchauffeur constituent un bénéfice net au point de vue thermique. Sans le réchauffeur, ces calories se seraient perdues dans l'atmosphère.

Réchauffairs.

Le problème du réchauffair pour être résolu de la façon la plus économique est encore très complexe.

Le constructeur ne possède que les données suivantes: produire un poids déterminé de vapeur par heure, à une température fixée, sous une pression imposée avec un certain rendement.

Connaissant le rendement, il existe une infinité de solutions : on peut donner à la chaudière une grande surface de chauffe et ne pas avoir de réchauffair ou avoir un réchauffair de faible surface, ou bien donner à la chaudière une faible surface de chauffe et récupérer une grande quantité de chaleur dans le réchauffair.

Le coût de l'installation varierait fortement suivant la disposition adoptée.

En tout état de cause, le rendement maximum sera obtenu si les fumées sortent du réchauffair à la température la plus basse possible. Théoriquement, en négligeant les pertes autres que celles à la cheminée, on obtiendrait un rendement de 100 % en ramenant les fumées à la température ambiante; cela exigerait un réchauffair d'une surface infinie.

Comme pour ce qui concerne la surface de chauffe, il arrive un moment où le gain réalisé, au point de vue du rendement, serait compensé et au-delà par le prix de revient annuel d'une surface supplémentaire du réchauffair. Ces dernières considérations imposent que l'on abandonne à la cheminée, les fumées lorsqu'elles atteignent une certaine température minima. Cette température minima est habituellement d'au moins 150° :

1. Issy-les-Moulineaux :
180° en régime normal;
Air réchauffé à 220°;
Fumées à l'entrée du réchauffair 330°;
2. Furst-Hardenberg :
Air porté à 350°, ce qui est particulièrement utile dans un foyer Lopulco à surfaces froides dans la chambre de combustion;
Gaz à la sortie des chaudières 480°;
Gaz à la sortie du réchauffair 210° en marche normale, 225° en pointe;
Pression d'air avant l'entrée au réchauffair 81 mm. en marche normale, 20 mm. en faible charge;
3. Chaudière Löffler :
Air chauffé à 300°;
4. Centrale au mercure de la Hartford Electric Light C°:
Air chauffé à 215°.

Les exemples ci-dessus montrent que la conception du foyer peut exiger une température minimum de l'air (foyers Lopulco). Pour que l'on puisse porter de l'air à une haute température, il faudra que les fumées sortent à une température encore beaucoup plus élevée : 480° à la centrale de Furst pour une pression de 21 kg./cm² à laquelle correspond une température de saturation de 210° environ, soit un écart de température de 270°, tandis qu'à Issy-les-Moulineaux, où l'on n'emploie pas non plus d'autres récupérateurs que les réchauffairs, les gaz à l'entrée du réchauffair sont à 330° alors que la température de saturation correspondant à la pression de 44 kg./cm² est d'environ 250°; l'écart de température entre les gaz et l'eau à la sortie de la chaudière n'est donc que 80°.

Ces deux exemples sont tellement dissemblables qu'ils en sont frappants et cependant les rendements des deux installations sont approximativement les mêmes en pleine charge. Seulement la centrale de Furst est destinée à avoir une charge peu variable, tandis que celle d'Issy doit pouvoir supporter des variations de charge considérables (de 20 à 120 tonnes de vapeur par heure, charge normale 72 t./h.). En cas de forte surcharge, les écarts de température ci-dessus mentionnés pour la centrale d'Issy deviendront notablement plus élevés et la température de sortie des fumées qui conditionne le rendement sera beaucoup augmentée. Grâce à la prudence du constructeur, le rendement pourra encore être très satisfaisant. La grande surface de chauffe admise par lui pour la chaudière (écart de 80° à sa sortie) permettra une vaporisation très élevée lorsqu'on forcera l'allure.

En tout état de cause, que le réchauffage de l'air soit obligatoire (Furst, Löffler), ou qu'il soit facultatif, il procurera toujours un bénéfice de rendement très appréciable. Chiffrons-le pour la centrale d'Issy qui donne sous ce rapport des indications plus intéressantes.

En effet, en l'absence du réchauffair, on aurait quand même été obligé de rejeter les fumées à 330°, l'écart de température fumées-vapeur saturée n'étant plus que 80°. Tout ce que l'on récupère dans le réchauffair est donc du bénéfice net.

Air réchauffé de 15 à 220°.

Cinq môles d'air par atôme de C.

L'air à 220° possède une chaleur sensible de 1,5 cal. par môle, soit 7,5 cal. par atôme de C dont la combustion à 0° développe 97,6 cal. La perte à la cheminée est la même que la combustion se fasse avec air froid ou air chaud : chaleur d'échauffement de $\text{CO}_2 + 4\text{N}_2$ à 330° C :

$$3,2 + 4 \times 2,3 = 3,2 + 9,2 = 12,4.$$

La chaleur récupérée par atôme de C est donc :

$$97,6 - 12,4 = 85,2 \text{ cal. avec air froid}$$

$$97,6 + 7,5 - 12,4 = 92,7 \text{ cal. avec air chaud}$$

soit un bénéfice de $7,5/97,6 = 8\%$ en ne tenant pas compte des autres pertes.

Les températures des gaz étant plus élevées, les taux de transmission de chaleur seront plus grands et une plus faible surface de chauffe suffira à une même vaporisation. Néanmoins, pour un même poids de combustible brûlé dans une chaudière existante, l'adjonction d'un réchauffair n'améliorerait pas le rendement de 8% dans le cas envisagé plus haut, car la température de sortie des fumées serait plus élevée avec réchauffair que sans lui. Pour une même production de vapeur, l'amélioration serait plus voisine des 8% calculés, car le poids des gaz à évacuer étant moindre, leur temps de contact avec la surface de chauffe serait plus grand et permettrait un meilleur épuisement calorifique qui pourrait même amener une amélioration du rendement supérieure à 8%. Ce moindre poids de gaz à évacuer provoquerait de moindres pertes de charge dans la chaudière, ce qui compenserait en partie la perte de tirage due au réchauffair.

L'emploi de l'air chaud permet encore de produire une combustion aussi complète que l'air froid avec un moindre excès d'air.

Le réchauffair provoque une perte de tirage qu'une bonne construction rend minime et qui doit être supportée par les ventilateurs de tirage. En revanche, les gaz sortants étant plus froids, un ventilateur aspirant à la base de la cheminée sera moins corrodé par ces gaz.

Le réchauffair exige un ventilateur de soufflage de l'air de puissance assez faible.

Nous résumons ici les effets avantageux de l'air chaud :

Combustion accélérée, moindre excès d'air, élévation de température dans la chambre de combustion, transmission plus rapide de la chaleur, vaporisation plus élevée par unité de surface de chauffe, donc vaporisation totale plus grande pour une même chaudière. Si le foyer

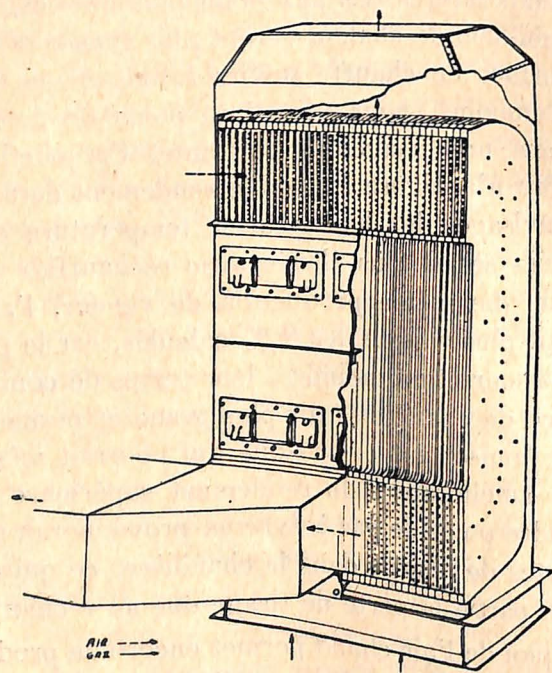


Fig. 14. — Réchauffair.

marche au pulvérisé, la plus grande rapidité de la combustion permettra de diminuer le volume de la chambre de combustion. On parera à l'érosion trop rapide des parois sous l'effet de la haute température par des écrans d'eau ou d'air. Pour ce qui concerne les foyers à grille mécanique, l'élévation de température produira une usure accélérée de la grille, la production sur celle-ci de mâchefers et de cendres fondues qui peuvent l'obstruer

et la corroder fortement. Aussi, un fort réchauffage de l'air est-il incompatible avec l'emploi des grilles. C'est là un avantage important du pulvérisé sur la grille que de s'adapter aisément au préchauffage de l'air qui comme nous l'avons vu amène une augmentation notable du rendement.

L'air chaud peut aussi être employé à d'autres usages ; par exemple pour le séchage du charbon à pulvériser.

Economiseurs.

Le principe des économiseurs est le même que celui des réchauffairs. Le fluide récupérant la chaleur des fumées est ici l'eau au lieu d'être l'air de combustion. La discussion est exactement la même que plus haut. L'amélioration du rendement est aussi très forte.

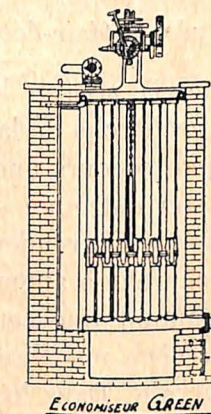


Fig. 15.

L'économiseur n'a évidemment aucune raison d'améliorer la combustion.

La chaleur communiquée à l'eau dans l'économiseur ne devra pas lui être transmise à travers la surface de chauff-

fe de la chaudière. La présence d'un économiseur permettra donc aussi de diminuer cette surface de chauffe pour une même vaporisation. L'adjonction d'un économiseur à une chaudière permet encore de diminuer la surface de chauffe de celle-ci pour une autre raison : l'écart de température fumées-eau dans les derniers tubes de la chaudière devient faible. Il serait beaucoup plus élevé dans l'économiseur. Le taux de transmission dans celui-ci sera donc meilleur et sa surface plus faible.

L'économiseur comme le réchauffair entraîne une perte de tirage par obstruction du carneau et par diminution de la température des fumées. L'eau pouvant y être réchauffée au-delà de 100°, la pompe alimentaire devra fouler l'eau sous pression dans l'économiseur qui produit encore des pertes de charge et par suite une faible consommation supplémentaire d'énergie.

Comparaison réchauffair-économiseur.

Nous nous sommes déjà aperçu lors des discussions faites plus haut que la recherche de la perfection du rendement entraîne presque toujours une élévation du prix de l'installation et de son entretien et qu'il faut savoir se limiter dans la poursuite du rendement optimum : un exploitant de centrale cherche à augmenter le rendement thermique pour autant que cette amélioration du rendement thermique amène une diminution du prix de revient de l'unité d'énergie. Dans les discussions subséquentes, nous n'aurons plus à faire la même remarque qui est générale. Nous nous bornerons à énumérer les avantages et les inconvénients du système proposé sans vouloir tirer une conclusion qui serait souvent bouleversée par des conditions économiques ou autres qui n'apparaissent pas à première vue telles que les conditions de lieu,

de voisinage, de main-d'œuvre, de sécurité, de facilité de conduite, etc. L'adoption d'une solution particulière doit toujours être le fruit d'une étude longue et minutieuse du problème et de toutes ses conditions.

En améliorant le rendement d'un organe de l'installation, on peut aussi mettre obstacle à l'amélioration d'un autre organe.

Nous venons de voir que le réchauffage de l'eau par les fumées est très avantageux.

Or, nous verrons plus loin que le réchauffage de l'eau par la vapeur partiellement détendue est aussi très avantageux. Le réchauffage par les fumées exclurait le réchauffage par la vapeur ou du moins restreindrait son champ d'application. Une solution s'indique dans ce cas : réchauffer l'eau par la vapeur et épuiser les fumées par l'air de combustion. Dans ce cas, la présence d'un économiseur serait contre-indiquée. En revanche, si la combustion se fait sur grille, la température de la combustion avec air chaud pourrait être élevée au point de détruire la grille assez rapidement. Si tel est le cas, on ne pourra pas épuiser les fumées par un réchauffair, l'économiseur s'imposera, s'opposant au réchauffage de l'eau par la vapeur semi-détendue (soutirage). On pourrait dans ce cas, employer une solution qui est assez courante : adopter un réchauffair et un économiseur en série dans le circuit des fumées, l'économiseur étant toujours placé dans les fumées les plus chaudes. Cela complique l'installation.

Si la solution n'était pas imposée comme ci-dessus, il faudrait encore faire une étude économique tenant compte du bénéfice dû à la récupération et du coût de celle-ci par intérêt au capital, amortissement, frais d'entretien, etc.

Il faudra prendre en considération : le moindre taux de transmission de la chaleur dans les réchauffairs, le

moindre coût de l'unité de surface du réchauffair, les pertes de tirage, l'énergie consommée par les ventilateurs de tirage et de soufflage de l'air, le surcroît de puissance demandé à la pompe d'alimentation par le fait des pertes de charges dans l'économiseur, de la température de sortie des gaz de la chaudière, température qui dépend elle-même du coût relatif de la surface de chauffe de la chaudière et de celle du réchauffair ou de l'économiseur.

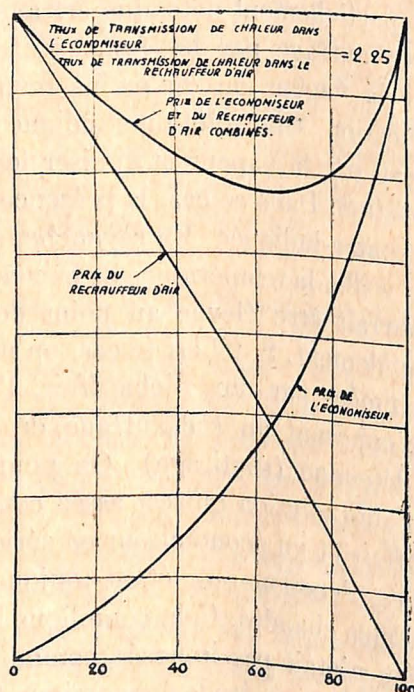


Fig. 16. — Diagramme de Green.

Le but de cette étude n'étant pas la recherche de la solution la plus économique, mais celle du maximum de rendement, il nous suffira de donner le diagramme de Green renseignant la solution économique optima (fig. 16). Ce

diagramme est basé sur quelques hypothèses qui doivent être assez proches de la vérité puisque Green est à la fois constructeur d'économiseurs et de réchauffairs.

Comparons les masses calorifiques des fluides en jeu dans l'économiseur et dans le réchauffair.

Pour cela, considérons une chaudière à 85 % de rendement produisant de la vapeur à 100 kg./cm² et 470° de surchauffe, vapeur dont la chaleur totale est 780 cal./kg. Une môle de C (12 gr.) dégageant 97,6 cal. par la réaction $C + O_2 + 4N_2 = CO_2 + 4N_2$, donnera donc

$$\frac{97,6 \times 0,85}{780} = 0,106 \text{ kg. de vapeur.}$$

Les fumées en provenant sortent de la chaudière à une température T et du réchauffair à T₀. La chaleur récupérée est :

$$CO_2 : 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 3,7 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$$

$$4 N_2 : 26 \frac{T - T_0}{1000} + 2,4 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$$

soit en tout :

$$32,5 \frac{T - T_0}{1000} + 6,1 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$$

Cette chaleur réchauffe l'air de T_c à T_s en lui communiquant une chaleur

$$32,5 \frac{T_s - T_c}{1000} + 3 \frac{T_s^2 - T_c^2}{1000^2}$$

Donc

$$32,5 \frac{T - T_0}{1000} + 6,1 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2} = 32,5 \frac{T_s - T_c}{1000} + 3 \frac{T_s^2 - T_c^2}{1000^2}$$

Cela peut s'écrire :

$$(T - T_o) \left[\frac{32,5}{1000} + \frac{6,1 (T + T_o)}{1000^2} \right] \\ = (T_s - T_e) \left[\frac{32,5}{1000} + \frac{3 (T_s + T_e)}{1000^2} \right]$$

Or, $T > T_s$, $T_o > T_e$, donc le crochet du second membre est plus petit que celui du premier et $T_s - T_e > T - T_o$.

La récupération par l'air ne peut donc jamais être complète parce que la masse calorifique des fumées est plus grande que celle de l'air. Si celui-ci sortait du réchauffair à la température $T_s = T$, on aurait encore $T_o > T_e$; à fortiori si $T > T_s$, ce qui a toujours lieu, aura-t-on $T_o > T_e$.

Si la récupération se fait par l'eau, les 0,106 kg. d'eau absorberont une chaleur : 0,106 ($T_s - T_e$).

Donc

$$(T - T_o) \left[\frac{32,5}{1000} + \frac{6,1 (T + T_o)}{1000^2} \right] = 0,106 (T_s - T_e).$$

Pour que le crochet = 0,106, il faudrait que

$$32,500 + 6,1 (T + T_o) = 106,000 \text{ ou} \\ T + T_o = \frac{106,000 - 32,500}{6,1} = \frac{73,500}{6,1} > 10,000$$

ce qui ne se présentera jamais.

La masse calorifique de l'eau est donc plus grande que celle des fumées et il serait possible d'obtenir une récupération complète par l'eau, car on aura toujours

$$T - T_o > T_s - T_e.$$

Si T_o était égal à T_e , on aurait $T > T_s$.

Donc théoriquement, c'est le réchauffage de l'eau qui permettrait d'obtenir le meilleur rendement.

Les deux instruments permettront l'un comme l'autre d'atteindre d'excellents rendements économiques. Aussi

le jugement de Damour (« Les sources de l'énergie calorifique », p. 159) nous paraît-il un peu hâtif :

« De même dans les chaudières, on s'est souvent demandé s'il valait mieux épuiser les calories des fumées par un réchauffeur d'eau ou par un réchauffair. La réponse n'est pas douteuse. Le réchauffage de l'air est plus intéressant parce qu'il est aussi économique et parce que augmentant la température de combustion, il accroît aussi la puissance de vaporisation au m² de la chaudière. »

Il n'en reste pas moins que le réchauffage de l'air pratiqué en même temps que le réchauffage de l'eau par vapeur soutirée semble constituer la solution de l'avenir.

Un bon quinconçage et l'adoption des tubes à ailettes pour les économiseurs paraît devoir donner de bons résultats économiques par la forte diminution du nombre de tubes et par une faible perte de charge des gaz et de l'eau.

Remarquons pour terminer que si l'on abandonne encore à la cheminée des fumées assez chaudes (environ 200°), ces fumées contribueront au tirage et on ne peut pas dire que leur chaleur sensible soit complètement perdue.

Rentrées d'air.

Des rentrées d'air peuvent se produire soit par le pourtour de la grille, soit à travers les réfractaires de la chaudière. Ces rentrées d'air sont nuisibles à divers titres. Elles abaissent la température des fumées, diminuent la transmission de la chaleur, produisent des pertes de charge supplémentaires en diminuant le tirage, exigent un plus grand travail des ventilateurs et entraînent de grandes pertes à la cheminée.

Il faut donc s'opposer à ces rentrées d'air en veillant toujours à l'étanchéité des maçonneries, de la grille, du réchauffair et de l'économiseur s'il y a lieu.

Conclusion à propos de la combustion.

Nous avons ainsi épuisé aussi bien que possible la chaleur sensible des fumées en réduisant au minimum leur poids et leur température. Il faut encore que leur chaleur latente soit épuisée.

En diminuant autant que possible l'excès d'air de combustion pour éviter les pertes à la cheminée, nous risquons de produire une combustion incomplète. Nous avons déjà vu plus haut les divers éléments qui agissent sur la combustion : température de l'air et de la combustion, finesse du pulvérisé, forme et dimensions des chambres de combustion. Il ne reste plus après cela qu'un élément sur lequel nous puissions agir. C'est la quantité d'air injecté. Nous l'avons réglée au minimum. Il est possible qu'à certains moments, ce minimum soit insuffisant. Il suffira alors d'augmenter la quantité d'air en agissant sur les organes de tirage ou de soufflage ou en diminuant la quantité de combustible.

On sera prévenu de la nécessité de modifier la quantité d'air par des appareils de mesure de diverses natures.

Certains appareils donnent la pression. Ils ont été l'origine d'un grand progrès.

Damour l'explique ainsi :

« C'est depuis peu d'années que, dans la pratique des foyers de chaudières, on s'aperçut qu'en réglant la différence des pressions au-dessous et en dessus de la grille, on régularisait aussi le passage de l'air à travers l'orifice équivalent de cette grille et par suite la combustion, ce qui permettait de se rendre maître du taux moyen de l'excès d'air et d'améliorer presque automatiquement le rendement. De là, ces pressiomètres enregistreurs et ces manomètres différentiels dont beaucoup de chaufferies se sont pourvues. »

Il explique la nécessité des pressiomètres comme suit :

« Dans les foyers de chaudières, la combustion est commandée par trois pressions : à la sortie, c'est-à-dire au pied de la cheminée, il faut surveiller les tirages auxquels la production totale de vapeur est directement intéressée ; à l'entrée sous le foyer, la connaissance des pressions n'est pas moins nécessaire, surtout dans les chaudières à gaz, pour régler les admissions de combustible et de comburant ; enfin, au-dessus de la grille, ou après combustion dans les foyers sans grille, on a besoin de connaître la pression qui indique la résistance au passage des gaz et ses variations, d'où dépendent les variations du chauffage lui-même. De là l'intérêt de ces manomètres différentiels fournissant, non les pressions absolues mais la différence entre deux pressions amont et aval qui est fonction de la résistance au passage du courant gazeux (orifice équivalent) de l'appareil ; de là encore ces appareils duplex et triplex mesurant des pressions étagées sur tout un circuit. »

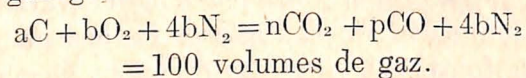
Il cite le cas où l'on peut déceler de fortes inégalités de travail des foyers d'une même centrale par les indications des manomètres. Ceux-ci indiqueront encore les pressions d'air secondaire et d'air primaire aux brûleurs et à l'entrée des réchauffeurs ; ils décèleront aussi des rentrées d'air conséquentes et permettront d'y parer.

Les pyromètres et thermomètres placés en différents endroits donneront aussi d'utiles indications quant à l'allure de la combustion, à la transmission de chaleur, aux rentrées d'air, à la récupération par économiseur ou par réchauffeur et aux pertes par la cheminée.

Enfin, l'analyse des fumées en divers endroits donnera souvent les indications les plus précises en ce qui concerne la perfection de la combustion et les rentrées d'air.

On s'adresse habituellement aux doseurs de CO_2 qui doivent indiquer un certain pourcentage minimum pour que la combustion soit parfaite. Une faible teneur en CO_2 indiquera un excès d'air qu'il faudra corriger en diminuant le tirage ou la pression de soufflage ou en augmentant l'épaisseur de combustible sur grille. On se borne souvent dans les centrales au contrôle de la teneur en CO_2 dans les fumées. C'est une erreur comme nous allons le montrer :

Supposons que la combustion se fasse avec un manque d'air, c'est-à-dire que le foyer se comporte comme un mauvais gazogène :



L'équilibre de la réaction impose que :

$$a = n + p$$

$$b = n + \frac{p}{2}$$

$$n + p + 4b = 100$$

n , p et $4b$ étant alors les pourcentages respectifs de CO_2 , CO et N_2 dans les produits de la combustion.

Remplaçons b par sa valeur dans la troisième équation. On en tire :

$$n + p + 4 \left(n + \frac{p}{2} \right) = 100$$

ou

$$5n + 3p = 100$$

ou encore

$$n = \frac{100 - 3p}{5}$$

C'est là une relation obligée entre la teneur des fumées en CO_2 et en CO en cas de combustion incomplète de carbone pur.

La teneur exacte en CO_2 serait donc de 20 % en cas de combustion complète du carbone pur et s'il y avait du CO , n serait plus petit que 20 % tout comme en cas de combustion complète avec excès d'air.

Il pourrait donc se faire que constatant 17 % de CO_2 par exemple, on ait une combustion complète avec excès d'air, ou bien que la combustion soit très incomplète avec une teneur de

$$p = \frac{100 - 5n}{3} = \frac{100 - 85}{3} = 5 \text{ \% de CO.}$$

Tous les calculs ci-dessus ne seraient exacts que si le combustible était du carbone pur mais la conclusion que l'indicateur de CO_2 peut donner une indication convenable avec une forte teneur d'imbrûlés est indépendante de la nature du combustible.

Les imbrûlés pourraient aussi bien être des hydrocarbures distillés que du CO . Il faudrait donc avoir en plus de l'indicateur de CO_2 un indicateur d'imbrûlés.

Il existe des enregistreurs simultanés de CO et CO_2 donnant les teneurs en CO jusqu'à 5 %. Ce sont donc des appareils bien adaptés pour les chaudières.

Il existe encore d'autres appareils donnant des indications quant aux teneurs en divers imbrûlés (Cambridge, Siemens, Carpentier, etc.). Certains de ces appareils devront être tarés de temps à autre par comparaison avec une analyse rigoureuse faite par les méthodes chimiques classiques (burette d'Orsat par exemple).

Enfin, signalons qu'un enregistreur de vapeur d'eau permettrait aussi de déceler une fuite dans la chaudière et d'y apporter remède avant qu'un désastre se produise. Il existe des enregistreurs de vapeur d'eau portant le nom d'hygromètres ou de psychromètres.

Nous possédons à présent tous les moyens propres à faire rendre à une chaudière son rendement maximum et les appareils enregistreurs qui nous indiqueront les perturbations qui peuvent se présenter. Il ne suffit pas que la chaudière puisse théoriquement donner un rendement maximum, il faut encore la maintenir en état de *pouvoir donner en permanence* ce rendement.

Suies, incrustations, fuites d'eau, gaz dans l'eau, huile, mauvaise circulation.

La marche de la chaudière produit divers effets de nature à faire baisser le rendement : dépôt de suies et de cendres sur les tubes de vaporisation, de l'économiseur et du réchauffair; formation d'incrustations à l'intérieur des tubes vaporisateurs et de l'économiseur; présence de gaz dissous dans l'eau, formant des bulles à l'intérieur des tubes de l'économiseur; présence dans l'eau d'huile qui se dépose en couche mince à la face intérieure des tubes. Toutes ces causes tendent à diminuer la transmission de la chaleur et par suite à faire baisser le rendement. Une mauvaise circulation de l'eau dans les tubes de vaporisation et dans l'économiseur ou de l'air dans le réchauffair produit le même effet, car on sait que les échanges par convection ne sont pas seulement fonction de la différence de température entre corps chauffants et corps chauffés, mais aussi de leurs vitesses de circulation. Un moyen simple d'éviter ces pertes, est de supprimer leurs causes.

Il existe dans ce but des souffleurs de suie: souffleurs à air ou souffleurs à vapeur envoyant des jets violents d'air ou de vapeur sur les tubes à nettoyer.

Les souffleurs à vapeur présentent un inconvénient par rapport aux souffleurs à air, la vapeur envoyée dans

les carneaux pourra se condenser sous forme de rosée au contact des tubes froids de l'économiseur ou du réchauffair; la présence d'eau sur ces tubes entraîne le collage des suies et surtout une corrosion rapide du récupérateur par combinaison de l'eau avec SO_2 ou SO_3 qui existe presque toujours dans les fumées.

La perte de chaleur et d'eau distillée correspondant à la vapeur soufflée n'est d'ailleurs pas tout à fait négligeable. Par contre, le soufflage à l'air refroidira les tubes d'une façon plus brusque et plus intense, il exigera l'installation de compresseurs d'air et de réservoirs d'air comprimé. La dépense d'air comprimé étant forte et l'utilisation de l'installation étant fort intermittente, le coût du soufflage sera élevé.

Les rampes de soufflage n'étant pas parcourues en permanence par un fluide froid doivent être prévues pour résister à des températures élevées sans détérioration rapide (acier calorisé ou alliage réfractaire spécial résistant à 1.200° minimum pour les tubes de coup de feu).

Lorsque la vapeur est produite à haute pression, l'installation de soufflage deviendra coûteuse par le fait de cette pression et parce qu'on devra y utiliser des détendeurs et y provoquer des pertes de charge telles que la quantité de vapeur soufflée ne soit pas excessive et que la vitesse de soufflage n'atteigne pas des valeurs astronomiques, ce qui serait de nature à détériorer les tubes.

Pour coûteux que soient ces appareils, il reste à leur actif une telle amélioration du rendement de chaudière qu'il faut toujours les prévoir (fig. 17 Neu : Ramonage des chaudières modernes). Avec certains économiseurs à tubes lisses, le ramonage peut se faire à l'aide de racloirs qui glissent sur ces tubes (voir économiseurs Green).

On pare aisément aux incrustations grâce aux épurateurs d'eau dont certains donnent un degré hydrotimé-

trique nul (épurateurs à permutite). L'épuration chimique serait coûteuse et parfois nuisible (formation de mousse due à l'alcalinité provenant de certains épurateurs) si elle s'appliquait à toute l'eau vaporisée. On y remédie en employant l'eau en cycle fermé : l'eau condensée retourne à la chaudière. Il suffit alors d'épurer l'eau d'appoint, correspondant aux fuites de vapeur par les canalisations, par les turbines, par le soufflage des suies, par entraînement avec les gaz incondensables du condenseur, etc.

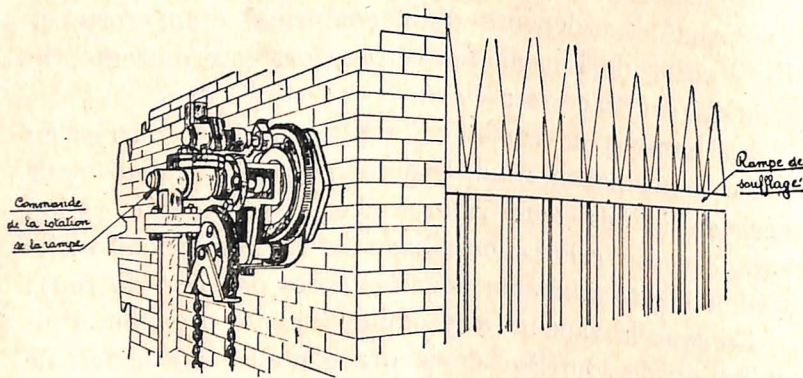


Fig. 17. — Rampe de soufflage Neu.

L'épuration peut être chimique ou physique, cette dernière s'effectuant par distillation de l'eau d'appoint.

Cette distillation peut se faire avantageusement à basse pression par un appareil à multiple effet, cet appareil étant chauffé par une partie de la vapeur du premier soutirage. Cette vapeur, en se condensant, communique sa chaleur à l'eau du premier effet qui se vaporise sous une pression assez faible.

La vapeur provenant ainsi du premier effet se condense à son tour en réchauffant l'eau d'alimentation de

la chaudière, le réchauffeur constituant le deuxième effet.

Les divers condensats servent alors pour l'alimentation de la chaudière (exemple: Filatures de Laine Desurmont, à Tourcoing) (fig. 18).

Les condensations à basse pression exigent des pompes à air qui contribuent en même temps au dégazage de l'eau. On sait d'ailleurs que le dégazage est d'autant plus nécessaire que l'épuration est plus poussée, car en cas d'épuration parfaite, les tubes de vaporisation ne sont pas recouverts d'une couche d'incrustant qui les protège contre l'attaque des gaz.

Le dégazage s'effectue habituellement dans un réchauffeur d'eau d'alimentation par mélange faisant fonction en même temps de dégazeur. La vapeur servant au dégazage peut provenir soit d'un soutirage, soit de l'échappement des auxiliaires, soit encore du distillateur d'appoint (fig. Kreg n^{os} 19, 20 et 21).

L'élimination de l'huile ne devra pas s'effectuer lorsque la vapeur évolue dans des turbines, mais si elle se détend dans une machine alternative dont les parois sont toujours graissées, il faudra procéder au déshuilage de la vapeur d'échappement. L'huile est entraînée par la vapeur d'échappement sous forme de gouttelettes qui se précipitent par inertie sur un écran qui oblige la vapeur à décrire un coude prononcé (Kreg-Cochrane) (fig. 22).

La bonne circulation des gaz, de l'air et de l'eau dans les réchauffeurs et dans les économiseurs est réalisée par un bon quinconçage des tubes, par la grande vitesse de circulation produite par pompe ou ventilateur au prix de pertes de tirage et de consommation d'énergie. Il faut donc augmenter les vitesses de circulation en vue de diminuer les surfaces de chauffe jusqu'au moment où l'avantage ainsi obtenu est compensé par le surcroît de

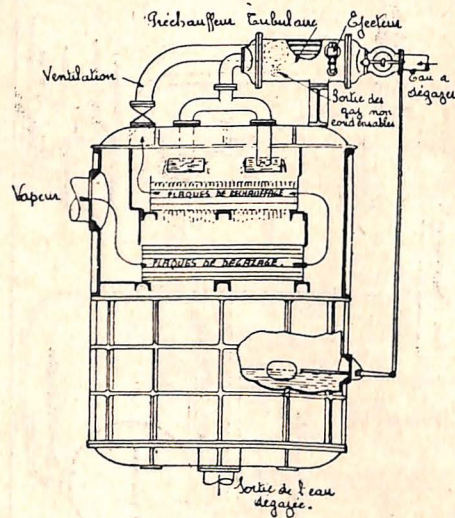
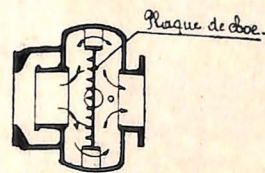
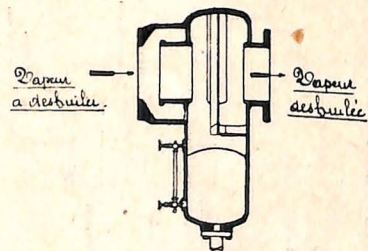


Fig. 21.



DÉSHUILEUR KREG-COCHRANE

Fig. 22.

la consommation d'énergie et d'autres frais. Le phénomène de la circulation de l'eau dans la chaudière est mal connu mais il est très nécessaire au point que dans les chaudières à mercure (système Emmet), on a dû, pour y pourvoir, créer de toutes pièces des tubes très coûteux. La nécessité de la circulation s'explique par la meilleure transmission de la chaleur, par un bon refroidissement et une plus longue vie des tubes de vaporisation et par une diminution de la surface de chauffe.

La circulation est elle-même fonction de la rapidité de la vaporisation, car les bulles de vapeur en se dégageant et en augmentant de volume entraînent l'eau dans les tubes. Ceux-ci devront s'opposer aussi peu que possible à la circulation, donc être lisses et l'eau devra être peu visqueuse, donc ne pas contenir d'huile ou de produits alcalins provenant de l'épuration.

Ajoutons, sans pouvoir entrer dans des détails, qu'une bonne disposition des tubes vaporisateurs et un chicaneage bien conçu contribueront pour beaucoup à l'efficacité de la transmission de la chaleur, à une diminution de la surface de chauffe et du prix de la chaudière et parfois même à un bon tirage.

Partant de ce principe, Rauber a pu construire la chaudière portant son nom (chaudière R. L. fabriquée par Babcock et Wilcox) (voir fig. 23).

Cette chaudière possède des tubes à ailettes qui accroissent considérablement le taux de transmission par unité de surface intérieure de tube, améliorant donc la circulation, permettent de supprimer les chicanes, les ailettes en tenant lieu; en outre, les ailettes obligent les gaz à suivre un parcours sinueux, elles les découpent en tranches qui se ressoudent par après améliorant ainsi les échanges par convection au point que le nombre des tubes est très réduit pour un rendement donné de la chau-

Benson dont la chambre de combustion est complètement tapissée de tubes parcourus par une circulation continue d'eau. Ces tubes sont d'ailleurs employés en conjonction avec un fort réchauffage de l'air de combustion et un réchauffage préliminaire de l'eau dans les économiseurs.

Conclusions.

En résumé de tout ce qui précède, nous dirons que la construction la plus économique des générateurs de vapeur paraît être la suivante :

chauffage au pulvérisé avec air fortement préchauffé.
réchauffage de l'eau d'alimentation par soutirage parfois en série avec des économiseurs.

épuration et dégazage poussés de l'eau.

fortes surfaces de rayonnement.

surface de convection en tubes à ailettes ou circulation très rapide des gaz provenant de la combustion avec accroissement considérable du taux de transmission de la chaleur (nouvelles chaudières Brown-Boveri à combustion sous pression).

CHAPITRE II

RENDEMENT DE TRANSMISSION

Ce rendement est égal au rapport entre la chaleur livrée à l'appareil d'utilisation et celle qui est fournie par le générateur.

Les pertes des canalisations de vapeur ne peuvent provenir que de deux causes : pertes de chaleur par transmission à travers les parois, fuites de vapeur.

Les remèdes à ces pertes sont simples à imaginer :

1. On évite les pertes par transmission de chaleur à travers les parois en les calorifugeant soigneusement.

2. On évite les fuites de vapeur en donnant une bonne étanchéité aux conduites de vapeur, en veillant spécialement à une bonne disposition des joints et à un bon serrage.

Il ne sera pas nécessaire de s'étendre davantage à ce propos. Remarquons cependant que le principe de la conservation de l'énergie qui fait bien ressortir ces deux causes de pertes en néglige une autre qui n'est pas à proprement parler une perte d'énergie mais simplement une transformation de l'énergie sous une forme moins avantageuse pour l'obtention de force motrice. En effet, les conduites de vapeur sont le siège de transformations irréversibles dues au frottement de la vapeur sur les parois des conduites. Ce frottement est la cause d'une diminution de la pression de la vapeur, donc d'une détente sans travail de celle-ci, détente irréversible qui accroît

l'entropie de la vapeur et qui la rend moins apte à la production d'énergie mécanique en augmentant la perte au condenseur.

On réduira cet accroissement d'entropie en donnant de fortes sections aux tuyauteries et en évitant les rugosités dans leur intérieur. L'adoption de fortes sections aura par contre l'inconvénient de donner une surface de contact très grande avec l'air froid, d'augmenter le prix des conduites et les pertes par transmission de chaleur à travers les parois.

On se voit donc encore obligé de rechercher un compromis entre deux solutions extrêmes : faible accroissement d'entropie et faibles pertes par les parois.

Il ne faut cependant pas s'exagérer l'importance de ces causes de pertes. Le rendement des conduites de vapeur est toujours très élevé, pratiquement égal à l'unité.

(A suivre.)

NOTES DIVERSES

Etude graphique du fonctionnement de plusieurs ventilateurs souterrains en parallèle

PAR

M. J. LAURENT,

Ingénieur au Corps des Mines, à Charleroi. (*)

La présente note a pour but d'exposer une méthode graphique de détermination du régime de plusieurs ventilateurs souterrains fonctionnant en parallèle, dont on connaît la courbe de fonctionnement caractéristique, donnant la pression engendrée en fonction du débit.

Supposons d'abord une mine comportant deux ventilateurs I et II, schématisée à la figure 1. Décomposons ses circuits d'aérage en trois parties distinctes: 1, 2, et 3. La partie 1, propre au ventilateur I, est composée uniquement du circuit B I E; la partie 2, propre au ventilateur II, se compose du tronçon B C II D E. Enfin, la partie 3 comprend les puits d'entrée d'air de A à B et le puits de retour d'air de E à F.

Les signes W , q et h représentent respectivement les orifices équivalents, les débits et les pressions motrices des parties 1, 2 et 3. H_1 et H_2 sont les pressions engendrées par les ventilateurs I et II.

Calculons d'abord les orifices équivalents W_1 , W_2 et W_3 . Appelons δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , δ_5 et δ_6 les poids spécifiques moyens de l'air, respectivement dans les tronçons AB, BIE, EF, BC, CIID et DE.

(*) Présentée par M. G. DES ENFANS, Ingénieur en Chef-Directeur des Mines, à Charleroi.