

la méthode graphique un point de combustion voisin de 3000° (fig. 4). D'où l'on peut conclure que les fours à simple récupération, à gaz à l'air, peuvent donner toutes les températures ordinaires de l'industrie et même qu'entre les limites industrielles l'utilisation de la chaleur pourra toujours atteindre 50 %.

Aux basses températures, et en particulier dans le cas le plus intéressant de l'industrie du gaz, le rendement atteint le chiffre très satisfaisant de 75 %, ce qui explique comment la Compagnie Parisienne a pu s'en tenir à un système de four où la récupération n'est, sans doute, pas parfaite, mais où l'économie de calories restant à réaliser ne justifie pas la complication et les frais de construction de fours à quatre chambres avec gaz à l'eau. Nous retrouvons donc, *a priori*, par la théorie, un résultat que l'expérience des usines a déjà démontré.

§ 3. Deuxième cas : Fours à double récupération par l'air secondaire et le gaz. — Les fours Siemens primitifs, et en particulier tous les fours Martin-Siemens construits au début, appartiennent à cette catégorie.

Ils sont généralement munis du siphon dont nous avons indiqué le rôle, au point de vue du tirage, mais que l'on a blâmé et condamné depuis que l'on a réussi à construire des fours sans cet organe accessoire. La discussion et les calculs qui suivent permettront de juger cette question encore controversée et intéressante par suite du grand nombre d'aciéries possédant des gazogènes à siphon.

Pour établir le bilan du four à double récupération, nous devons, à la récupération par l'air secondaire, ajouter la chaleur absorbée par le gaz. Mais, on sait que, par suite de la chaleur dégagée par la formation de l'oxyde de carbone, ce gaz n'est pas froid, et sort du gazogène à 1325° (1). Il en résulte qu'au-dessous de cette température, toute récupération par le gaz est impossible, que les fours à quatre chambres sont inutiles, et que le rendement théorique de tels fours est le même que celui des fours à simple récupération. Nous n'avons donc à faire le calcul que pour la température de 1300°, ce qui

(1) En négligeant, suivant notre hypothèse, le refroidissement du gazogène

donne une perte de $33^{\text{cal}} 7 \%$, correspondant à une amélioration de $5,8 \%$ par rapport au rendement du four à simple récupération, ainsi qu'il ressort du tableau ci-dessous :

Tableau du calcul de P dans les fours Siemens à double récupération, à 1500° .

Chaleur dégagée : $97^{\text{cal}} 6 = Q$.	1500°
F : Chaleur emportée par les fumées.	67,5
R : Calories récupérées $\left\{ \begin{array}{l} \text{par l'air secondaire de } 0^{\circ} \text{ à } 1500^{\circ} \dots\dots\dots \\ \text{par le gaz de } 1325^{\circ} \text{ à } 1500^{\circ} \dots\dots\dots \end{array} \right.$	29,0 5,8
TOTAL.	34,8
Différence $F - R$ ou perte à la cheminée.	32,7
Rapport $\frac{F - R}{Q}$ ou perte $\%$	33,7
Chaleur utilisée $\%$ ou rendement U	66,3
OBSERVATION. — Le calcul à 1000° est impossible et donne les mêmes résultats que la simple récupération.	

On voit que, malgré l'amélioration de $5,8 \%$, il reste encore disponible à la cheminée un tiers de la chaleur totale; c'est plus qu'il n'en faut pour porter le gaz de 0° à la température de 1325° ($29^{\text{cal}} 4$). Il s'ensuit qu'avec une bonne récupération, on peut, sans perte de chaleur, et en profitant de celle qui reste disponible, réchauffer le gaz si ce gaz a été refroidi par le siphon ou par une canalisation trop longue, avant son entrée dans le four.

Il n'y a donc pas, *dans les fours à gaz à l'air* gaspillage de calories par le fait du siphon, mais seulement perte d'un côté, et gain équivalent d'un autre; il n'y a pas davantage absurdité à établir la batterie de gazogènes loin du laboratoire, car ces dispositifs ne sont nuisibles ni au point de vue de l'utilisation de la chaleur, ni pour l'obtention de hautes températures ⁽¹⁾.

(1) Ces remarques ne s'appliquent pas au cas de fours à gaz mixte.

Le siphon Siemens et les trop longs carneaux ont, sans doute, des inconvénients : ils provoquent le dépôt de goudron et de suie, et peuvent un peu appauvrir le gaz. Mais ce n'est pas dans la perte inutile de la chaleur qu'il faut trouver leur condamnation : à cet égard, ils n'ont rien que de rationnel. Ils ont rendu de grands services au début et peuvent encore en rendre, lorsque, par exemple, on s'interdit l'emploi de l'eau et du gaz mixte et qu'on s'impose le tirage naturel.

Nous donnons ici, à titre d'exemple des fours à double récupération avec gaz à l'air, la vue d'un four de verrerie (fig. 5) construit en Russie et pourvu de gazogènes au bois. Le gaz sortant de tels générateurs est refroidi par une pluie d'eau, de façon à condenser la vapeur d'eau provenant de la distillation ; il entre donc dans la chambre de récupération tout à fait froid. C'est, on le voit, le cas extrême, celui où la récupération par le gaz s'impose et a son effet maximum.

§ 4. Troisième cas : Double récupération par l'air primaire et l'air secondaire. — La double récupération complète par l'air primaire et par l'air secondaire est impossible dans l'état actuel de l'industrie. La température qui s'établirait dans un gazogène où l'air primaire serait admis à la température même du four serait tellement élevée qu'aucun des gazogènes actuels ne saurait y résister. Nous avons vu qu'elle dépasserait 2000°.

En supposant que le gazogène Ebelsen à fusion de cendres puisse supporter un tel régime, le rayonnement extérieur en serait très élevé et compenserait en partie les avantages de la récupération.

Ce qui, d'ailleurs, arrête bien plus encore les applications actuelles de ce système, c'est la question de conservation de la grille : il est difficile, sans détruire rapidement les barreaux, de dépasser la température de 500° dans le cendrier. Telle est la limite de chauffage de l'air primaire, et encore les applications ont-elles été très limitées.

En dehors du four Klönne, de Dortmund, qui fonctionne au gaz mixte, et sur lequel nous aurons à revenir, et de quelques tentatives de chauffage de l'air primaire sur des gazogènes Taylor, Lencachez, Siemens, etc., il n'y a que le four Siemens nouvelle disposition qui réalise un chauffage partiel de l'air primaire. Ce four est très bien disposé à cet effet, car il suffit de le faire marcher à l'inverse du fonction-

nement qu'ont indiqué MM. Biedermann et Harvey (en mettant le cendrier en communication avec la chambre où circule l'air et non plus avec la chambre des fumées), pour avoir très simplement le chauffage d'air primaire, que l'on dilue d'une quantité d'air froid suffisante pour que la température ne s'élève pas au-dessus de 500°. Quelques-uns des nouveaux fours fonctionnent d'après cette méthode : la plupart ont une marche mixte, admettant à la fois fumées, air chaud et air froid sous le cendrier. Dans tous les cas, il est nécessaire d'étudier la double récupération par l'air primaire et l'air secondaire pour en apprécier la valeur.

Le calcul est ici fort simple, car l'air primaire étant égal en quantité à l'air secondaire, il suffit de doubler le chiffre de la chaleur récupérée dans le cas du four à simple récupération ; nous avons donc immédiatement les résultats indiqués dans le tableau ci-après.

Tableau du calcul de P dans les fours à double récupération par l'air total.

Chaleur dégagée : 97 ^{cal} 6.	1 000°	1 500°
F Calories emportées par les produits de combustion . . .	42,1	67,5
R Calories récupérées par l'air total	37,0	57,8
DIFFÉRENCE F—R ou perte à la cheminée . . .	5,1	9,7
Perte % P	5,2	10
Rendement, ou chaleur utilisée U	94,8	90

On voit, à l'examen de ce tableau, que la double récupération par chauffage préalable de l'air total, actuellement inutilisée, ou pratiquée d'une façon rudimentaire dans l'industrie, est cependant d'un grand intérêt. A 1 500°, il reste bien une perte de 10 %, et surtout la question des gazogènes est un obstacle presque insurmontable à l'application de ce système, mais, à 1 000°, l'utilisation de la chaleur peut être considérée comme parfaite, puisque les 6 % qui restent sont à peu

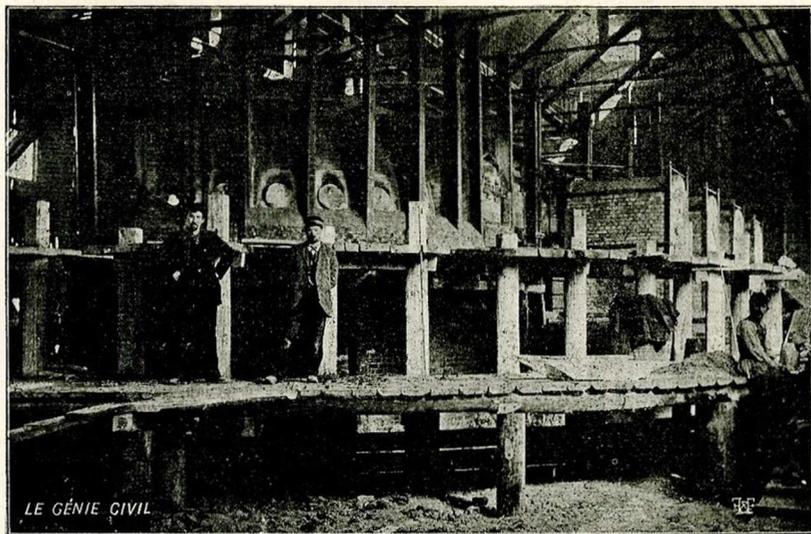


Fig. 5. — Four à bassin de 500 tonnes, système Gobbe, pour la fabrication du verre à vitres à l'usine de Raditza (Russie) (avec gazogènes en bois et régénérateurs Siemens).

près ce qui est nécessaire au tirage de la cheminée, et d'autre part, la construction de gazogènes admettant l'air à 1000° ne paraît pas absolument irréalisable (1).

La théorie nous semble donc donner ici une indication très nette, une orientation pour les progrès encore réalisables dans ces fours à température moyenne où la récupération est loin d'avoir donné tout ce qu'elle peut.

C'est, en résumé, du côté de la construction de gazogènes à haute température que doivent tendre les efforts, et c'est la conclusion se dégageant le plus nettement de l'étude des fours à gaz à l'air.

Les avantages de gazogènes à haute température, à air chaud, ont été depuis longtemps pressentis par Ebelmen qui préconisait un gazogène sans grille, à fusion de cendre à vent forcé, comme un cubilot. Cette idée, après être restée longtemps dans l'oubli, a été récemment reprise, et le gazogène Saillers, dont on peut voir la description dans le *Traité de Métallurgie* de Ledebur (2), n'est qu'un cubilot à vent soufflé, inspiré du gazogène Ebelmen; mais les applications en sont encore peu nombreuses. D'autre part, l'emploi de plus en plus fréquent du tirage forcé par ventilateurs, substitué au tirage par Kœrting, donne au problème du gaz à l'air un nouvel intérêt, et constitue, dans une certaine mesure, un acheminement vers la solution du gazogène à air chaud.

Et si l'on tient compte du fait signalé par Ledebur que l'élévation de température d'un gazogène diminue beaucoup la combustion anticipée du gaz et produit un gaz plus riche, on conclura avec nous que cette question du chauffage de l'air primaire et des gazogènes à air chaud est une de celle dont la solution intéresse le plus le progrès des fours.

(1) Le cas de triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz est possible dans le cas d'emploi d'air sec; en effet, la température du gaz, lorsque l'air primaire est chauffé, est trop élevée pour permettre aucune récupération.

(2) *Manuel théorique et pratique de la Métallurgie du fer*, par A. LEDEBUR. — Baudry et Cie, éditeurs, Paris.

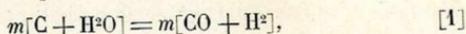
CHAPITRE VI

DEUXIÈME GROUPE DE FOURS A GAZ. GAZ A L'EAU. GAZ MIXTE.

§ 1. Réactions de combustion. — La production du gaz à l'eau théorique $\text{CO} + \text{H}^2$ est impossible sans l'intervention d'une source de chaleur extérieure au gazogène, ce qui, industriellement, est peu réalisable. Le gaz à l'eau d'industrie est donc toujours un gaz mélangé d'oxyde de carbone ou gaz mixte.

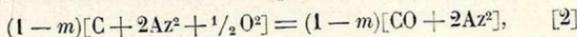
Les réactions de gazéification et de combustion dans un four à gaz mixte se font comme suit :

Brûlons notre unité (12 grammes) de carbone; une fraction m du combustible est gazéifié par l'eau :



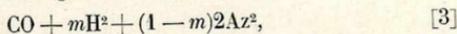
avec absorption de $[58,2 - 29,4]m = 28,8 m$.

Le reste du combustible est brûlé par l'air :

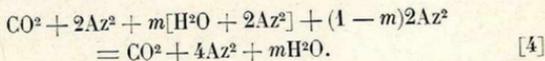


avec dégagement de $(1 - m) 29,4$ calories.

Le mélange de ces deux gaz a la composition :



et brûlera dans le four par l'air secondaire en donnant des fumées dont la composition sera :



La proportion m suivant laquelle les réactions de gazéification [1] et [2] interviennent est arbitraire, au moins entre certaines limites, et ne dépend que de la quantité d'eau injectée sous la grille, dont on est maître; suivant que la proportion de gaz à l'eau sera plus ou



moins grande, la température du gaz mixte sera plus ou moins basse. Cette température ne peut cependant être abaissée au delà d'une certaine limite, sinon le gazogène s'éteindrait et l'expérience a montré qu'au-dessous de 600°, la combustion du carbone à l'air s'arrête.

Il s'ensuit que la température d'un gaz mixte sera toujours comprise entre 600° et la température de gazéification supposée faite à l'air sec (1325° par exemple si l'air primaire est froid), et qu'elle pourra osciller arbitrairement entre ces limites, la composition du gaz subissant une variation correspondante.

Pratiquement, lorsque le gaz à l'eau est avantageux, on aura presque toujours intérêt à en produire le plus possible, c'est-à-dire à se rapprocher de la limite de 600° : c'est donc cette température limite que nous adopterons pour nos calculs.

Ce point étant fixé, il devient possible de calculer m , c'est-à-dire la composition du gaz. Supposons, par exemple, l'air primaire froid; il suffira d'exprimer que la chaleur dégagée par la combustion en oxyde de carbone par l'air de $(1 - m)$ de carbone, diminuée de la chaleur absorbée par la gazéification par l'eau de m , donne assez de calories pour porter le gaz produit à 600°.

$$-28,8m + 29,4(1 - m) \geq C_0^{300}(m[\text{CO} + \text{H}^2] + (1 - m)[\text{CO} + 4\text{Az}^2]).$$

Le calcul montre que pour $m = \frac{1}{3}$ cette condition est plus que remplie, en sorte qu'avec $\frac{1}{3}$ de gaz à l'eau et $\frac{2}{3}$ de gaz à l'air, la température se maintiendra un peu supérieure à 600°, et le gazogène à gaz mixte pourra fonctionner de façon satisfaisante. Ce résultat est remarquablement d'accord avec la pratique qui a établi, depuis la généralisation du gaz à l'eau, que le meilleur effet qu'on en peut obtenir est atteint en envoyant au gazogène la vapeur d'eau correspondant au $\frac{1}{3}$ du combustible.

Si l'air primaire est chauffé, la chaleur latente contenue dans cet air vient s'ajouter aux 29^{cal} 4 que produit la combustion du carbone, et la valeur de m est accrue d'autant. Aux températures de 1000° et 1500°, qui nous intéressent, le chauffage de l'air primaire permettrait

de gazéifier par la vapeur d'eau (1) 48 % et 54 % du combustible en maintenant le gazogène à 600°.

Si, de même, on chauffait la vapeur d'eau, on accroîtrait la proportion de gaz à l'eau (2).

§ 2. Premier cas : Simple récupération par l'air secondaire. — Ce cas est réalisé dans les fours de la Compagnie Parisienne du Gaz, les

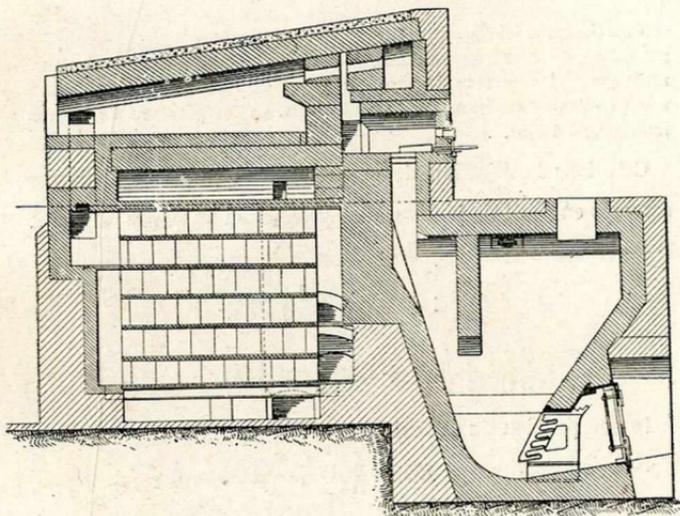


Fig. 1. — Four à laiton à gaz mixte, à simple récupération, à récupérateurs Lencauchez.

mêmes que nous avons déjà rencontrés avec le gaz à l'air et qui fon-

(1) Le calcul permettant de déterminer la proportion de gaz à l'eau dans le cas du chauffage de l'air primaire se fait comme ci-dessus :

$$+ 29,4 - 58,2 m + (1 - m) C_0^{600} [1/2 O_2 + 2Az^2] = C_0^{600} [CO + mH^2 + (1 - m) 2Az^2]$$

$$29,4 + 18,2 - m [58,2 + 18,2] = 12,6 - m \cdot 4,2$$

$$m = \frac{35}{72,2} = 0,48.$$

(2) Dans toute la discussion qui va suivre sur les fours à gaz mixte, nous supposons l'eau introduite sous forme de vapeur, c'est-à-dire que nous négligerons la chaleur latente de vaporisation.

tionnent tantôt à l'air avec cendrier ouvert et tirage naturel, tantôt avec eau sous la grille avec cendrier fermé à tirage naturel, tantôt avec injection de vapeur par Kœrting.

On rencontre également des fours de verrerie à bassin des systèmes Siemens, Gobbe, Radot-Lencachez employant un gaz mixte.

Enfin, la métallurgie du cuivre en offre d'assez nombreux exemples, appliqués en particulier par la Société des Métaux.

Nous donnons ici (fig. 1), à titre d'exemple de four à simple récupération à gaz mixte, un four à laiton de la Société des Métaux avec récupérateur à courants parallèles en sens inverse. Les gazogènes de ce four donnent un gaz mixte contenant environ 12 % d'hydrogène. La température de régime y est inférieure à 1 000°.

Calculons l'utilisation de la chaleur, en admettant, comme nous sommes en droit de le faire, une production de $\frac{1}{3}$ gaz à l'eau. Les réactions du gazogène sont :

$$\frac{1}{3} [C + H_2O] = \frac{1}{3} [CO + H_2]$$

$$\frac{2}{3} [C + \frac{1}{2} O_2 + 2Az^2] = \frac{2}{3} [CO + 2Az^2].$$

La composition du gaz est :

$$CO + \frac{1}{3} H_2 + \frac{4}{3} Az^2.$$

La quantité d'air secondaire nécessaire à sa composition est :

$$\underbrace{\frac{1}{2} O_2 + 2Az^2}_{\text{Pour combustion de CO}} + \underbrace{\frac{1}{6} O_2 + \frac{2}{3} Az^2}_{\text{Pour combustion de } \frac{1}{3} H_2}$$

Cette quantité est, on le voit, supérieure de $\frac{1}{3}$ à celle que comporte un four à gaz à l'air.

La composition des fumées est :

$$CO_2 + 4Az^2 + \frac{1}{3} H_2O$$

dont la chaleur d'échauffement, est plus grande que dans le cas de gaz à l'air, de toute la chaleur d'échauffement de la vapeur d'eau (1).

Le tableau ci-dessous résume le calcul d'utilisation de la chaleur :

Tableau de calcul des chaleurs utilisées et perdue dans un four à gaz à l'eau, à simple récupération par l'air secondaire.

Chaleur disponible : 97 ^{cal} 6.	1 000°	1 500°
Calories emportées par les produits de combustion		
CO ₂	12,4	21,4
4 Az ²	29,7	46,0
$\frac{1}{3}$ H ₂ O	3,7	6,3
F.	45,8	73,7
Calories récupérées par l'air secondaire porté de 0 à 1 000 ou 1 500°.		
$\frac{1}{2}$ O ₂ + 2Az ²	18,5	28,9
$\frac{1}{6}$ O ₂ + $\frac{2}{3}$ Az ²	6,1	9,6
R.	24,6	38,5
Chaleur perdue par les fumées (F - R)	21,2	35,2
Perte % $\frac{F - R}{97,6} = P$	22	36
Chaleur utilisée ou rendement U.	78	64,1

Le fait le plus saillant résultant de ce calcul, rapproché du cas correspondant du gaz à l'air, est le peu d'avantage du gaz à l'eau dans les fours à simple récupération : l'amélioration de récupération, résultant de la plus forte proportion d'air secondaire, est compensée par la perte de calories qu'entraîne la vapeur d'eau dont la chaleur spécifique est très élevée. Ainsi à 1 500° on ne gagne que 3^{cal} 5 ; à 1 000° 0^{cal} 8 seulement.

Ce dernier chiffre est particulièrement intéressant, car il concerne les fours à cornues à gaz : on peut en déduire qu'il n'y a pas dans ces

(1) Cette chaleur n'est nullement négligeable, puisque l'échauffement du volume molaire de vapeur d'eau de 0 à 1 000° absorbe 11 calories, et de 0 à 1 500° 18 calories.

fours, grand avantage à marcher avec gaz à l'eau plutôt qu'avec gaz à l'air. Nous retrouvons ainsi par la théorie l'explication et la confirmation d'un fait qu'une longue expérience a déjà établi.

On peut enfin conclure, au point de vue pratique que, dans ce cas d'opérations industrielles à 1 000° et au-dessous, il est inutile d'employer le gaz mixte et même que cette pratique est souvent nuisible comme grevant le coût de construction des fours et compliquant les gazogènes, sans profit.

§ 3. Deuxième cas : Double récupération par l'air secondaire et le gaz.

— Ce cas est le plus important de la théorie du chauffage par gaz à l'eau. La plupart des fours Siemens, fours à acier, fours de verrerie, emploient un gaz plus ou moins enrichi d'hydrogène, soit qu'ils aient des gazogènes ouverts avec cendrier noyé d'eau, soit qu'ils possèdent des Kœrting injectant de la vapeur dans un cendrier fermé.

La suppression du siphon dans les nouveaux fours accentue encore cette tendance à l'emploi de l'eau, puisque cet auxiliaire abaisse la température du gaz et permet ainsi à la chambre de récupération du gaz de remplir son rôle, tout en enrichissant le gaz, ce que le siphon ne faisait pas.

L'examen de ce cas est, enfin, d'un grand intérêt pratique, car dans les fours à deux groupes de chambres, il serait souvent facile de passer du gaz à l'air à un gaz mixte, par des transformations insignifiantes du gazogène; il est donc utile de connaître l'avantage qu'on en peut tirer.

Nous donnons ici (fig. 2), comme exemple de four à double récupération, à gaz mixte, un four de verrerie à bassin de 150 tonnes, dont les gazogènes Siemens sont à cendrier noyé d'eau donnant un gaz tenant de 8 à 10 % d'hydrogène. La température de régime y est de 1 450°.

La gazéification et la récupération par l'air secondaire se font ici de la même façon que dans le cas précédent; il n'y a donc, pour avoir la valeur de la chaleur utilisée, qu'à ajouter les calories récupérées par le gaz porté de 600° à la température de régime 1 000° ou 1 500°. Nous avons ainsi immédiatement le tableau suivant :

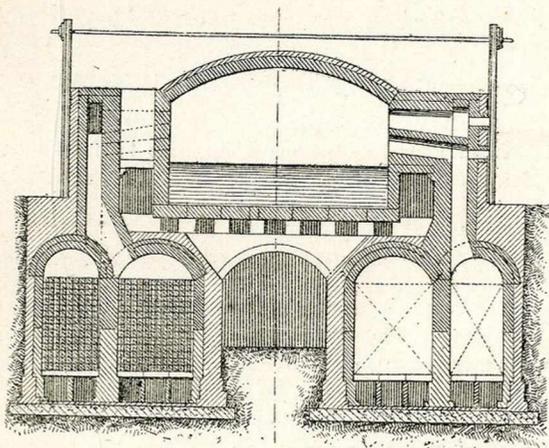
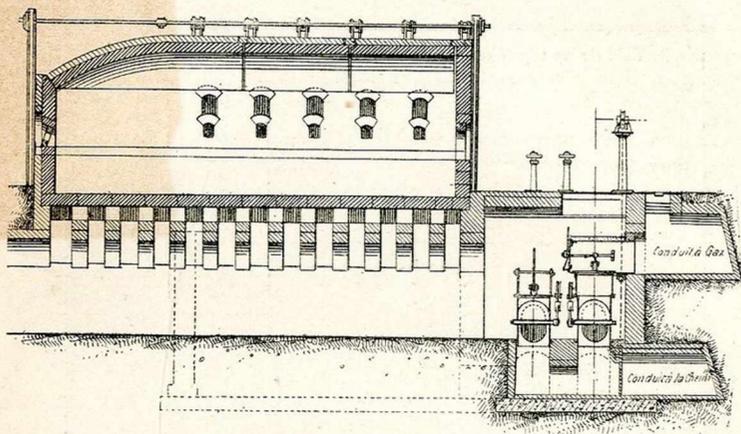


FIG. 2. — Four de verrerie à bassin, à double récupération, système Siemens.

Tableau de calcul des chaleurs utilisée et perdue dans les fours à double récupération, à gaz mixte.

Chaleur totale disponible : 97 ^{ca} 6.	1 000°	1 500°
Calories emportées par les fumées F	45,8	73,7
— récupérées par l'air secondaire	24,6	38,5
— récupérées par le gaz $(CO + \frac{1}{3} H_2 + \frac{4}{3} Az^2)$ porté de 600° à 1 000° ou 1 500°	6,3	19,7
Chaleur totale récupérée R.	30,9	58,2
Chaleur perdue par les fumées F — R.	14,9	15,5
Chaleur, perdue $\% \frac{F-R}{97,6} = P$	15,2	15,8
Chaleur utilisée ou rendement U	84,8	84,2

L'avantage résultant de l'emploi de gaz mixte est ici évident : dans un four à 1 000° l'économie sera de $84,8 - 73,7 = 9,1 \%$; à 1 500° elle atteint $84,3 - 66,3 = 18 \%$ et peut réaliser une diminution de près de $\frac{1}{5}$ de la consommation de combustible. Plus la température sera élevée, plus l'économie sera grande.

Il y a donc un intérêt de premier ordre, dans les fours à double récupération, à employer du gaz à l'eau, et, dans les limites que présente l'industrie, l'économie pourra varier de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{4}$ de combustible.

L'économie de $\frac{1}{4}$ qui peut être réalisée dans les fours à acier (1 800°) explique la très grande faveur qu'a rencontrée le gaz à l'eau à son origine, et dans une certaine mesure les illusions qui ont pu naître de la prétendue transformation de l'eau en combustible. Aussi est-il intéressant de retrouver, par le calcul, les résultats que la pratique avait donnés ; mais pour éviter de nouvelles erreurs sur l'emploi du gaz à l'eau, il convient de ne pas perdre de vue que l'économie résulte uniquement d'une meilleure récupération.

La récupération par l'air est accrue de $\frac{1}{3}$ par l'augmentation équivalente de l'air secondaire; la récupération par le gaz est facilitée par l'abaissement de température de ce gaz de $1\ 350^{\circ}$ à 600° , et c'est ce double résultat qui peut faire gagner jusqu'à 25 % de combustible, sur les calories qui se perdraient à la cheminée.

§ 4. Troisième cas : Double récupération par l'air primaire et l'air secondaire; chauffage de l'air total. — L'industrie actuelle ne donne pas d'exemple complet d'application de ce système, par la raison déjà énoncée de l'élévation excessive de la température sous la grille des gazogènes; mais on a tenté une application partielle pour le chauffage des fours à cornues. D'autre part, le nouveau four Siemens fonctionne partiellement d'après ce système, car dans beaucoup d'usines on insuffle sous la grille de ce four, en même temps que beaucoup d'air froid, un peu d'air chaud, et de la vapeur d'eau, de façon à maintenir sous la grille une température d'environ 500° .

L'examen de ce cas est donc utile tant au point de vue de la critique du nouveau four Siemens que pour examiner les progrès qui pourraient être accomplis dans la voie des fours à double récupération par l'air total, primaire et secondaire.

Nous donnons ici (fig. 3) le dessin schématique du four à cornues à gaz système Klönne, d'après le dessin du brevet anglais Henry. On peut y voir que la récupération se fait par le système des courants parallèles en sens inverse, au moyen de deux récupérateurs, l'un pour l'air primaire, l'autre pour l'air secondaire.

Rappelons que, par le fait du chauffage de l'air primaire à $1\ 000^{\circ}$ ou $1\ 500^{\circ}$, la proportion de gaz à l'eau peut être portée à 48 % et 54 %, en maintenant à 600° le gazogène. Le calcul fait d'après ces données, et qu'il est sans intérêt de reproduire ici dans tous ses détails, donne les résultats suivants indiqués dans le tableau ci-après.

On voit, par ce tableau, que l'utilisation de la chaleur est excellente, à toutes températures, aussi bonne et parfois meilleure qu'avec la double récupération par l'air et le gaz.

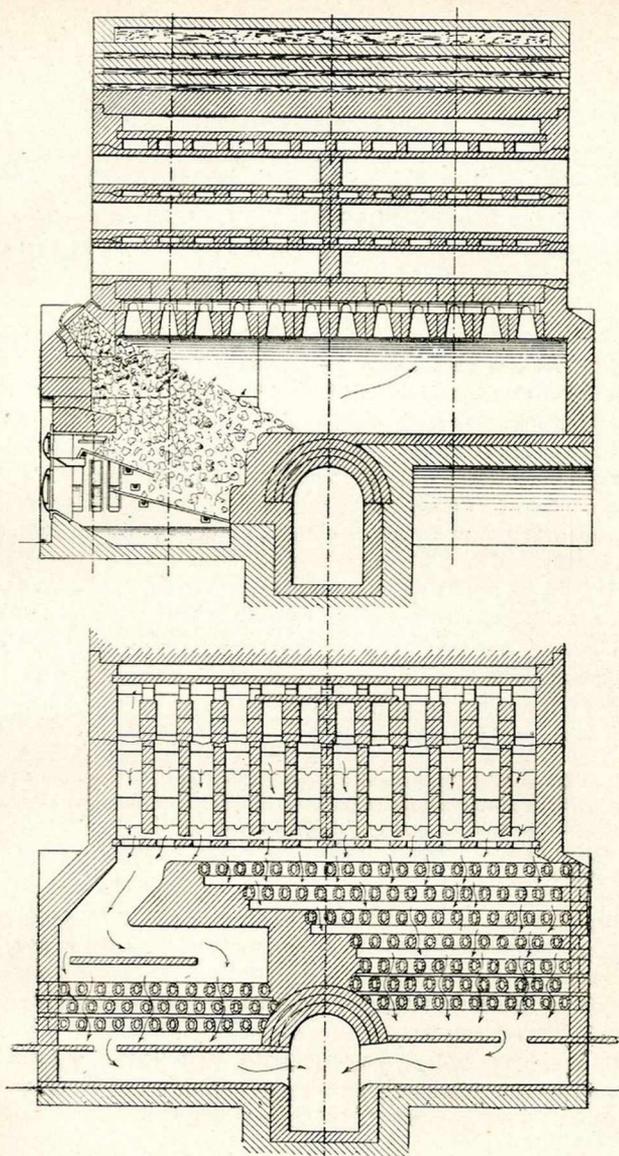


FIG. 3. — Four à cornues, système Klönne.

Tableau de calcul des chaleurs perdue et utilisée dans les fours à double récupération, par l'air total avec gaz à l'eau, en supposant le gazogène maintenu à 600°.

Chaleur disponible : 97 ^{cal} 6.	1 000°	1 500°
Calories emportées pour les fumées F	47,4	77,5
Calories récupérées par l'air total R.	37,0	57,8
Chaleur perdue par les fumées F — R.	10,4	19,7
Perte $\% \frac{F - R}{97,6} = P.$	10,6	20,2
Chaleur utilisée ou rendement U	89,4	79,8

C'est un résultat intéressant et qui nous semble de nature à diriger les progrès à venir vers cette solution encore peu essayée. La récupération par l'air total a, en effet, l'avantage de réduire les quatre chambres des fours Siemens à une seule paire de chambres conjuguées, d'où l'on puiserait à la fois l'air primaire et l'air secondaire, et de simplifier beaucoup la construction des fours.

Rapproché de la même double récupération par l'air total avec gaz à l'air, le cas que nous étudions présente une infériorité assez sensible, et qu'il était facile de prévoir, puisque la vapeur d'eau emporte à la cheminée, sans compensation, toute la chaleur nécessaire à son échauffement jusqu'à la température de régime du four. Il ne faudrait pas en conclure que le gaz à l'eau est sans intérêt avec la récupération par l'air total ; sans cet auxiliaire, le gazogène alimenté d'air très chaud atteindrait, on le sait, une température excessive : la vapeur d'eau, par sa décomposition, permet de refroidir le gazogène à 600°, et ramène le problème à la seule question de conservation de la grille ou à la réalisation d'un gazogène à fusion de cendres. L'infériorité est donc plus apparente que réelle.

Il nous semble qu'il y a là, surtout aux températures moyennes, une solution du problème de la récupération qui pourrait être féconde ; et elle ne paraît pas irréalisable, puisque, par exemple, il suffirait,

dans le four Siemens nouvelle disposition, de remplacer le gazogène Siemens par un gazogène à l'air chaud pour avoir immédiatement un four à double récupération par l'air total (1).

§ 5. Quatrième cas : Triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz. — La triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz n'a pas été réalisée industriellement, à notre connaissance. Elle comporterait trois récupérateurs, le troisième recueillant par le chauffage de l'air primaire la chaleur restant disponible dans les fumées à la sortie des deux premières chambres, et que nous avons vu être de 13,2 % à 1 000° et de 13,8 % à 1 500°.

Ce système n'est applicable qu'avec une gazéification à l'eau qui, en abaissant la température du gaz, permet la récupération après le chauffage de l'air primaire ; malgré la complication des trois chambres, il présente un réel intérêt, car son rendement, évidemment supérieur à celui du four Siemens, et le plus élevé que l'on connaisse, atteint la limite compatible avec les principes de la récupération. Cette limite est même, en quelque sorte, dépassée en ce sens que la masse des gaz récupérants est supérieure à celle des fumées : l'air envoyé au gazogène après avoir bénéficié d'un premier échauffement dans la troisième chambre, transformé en gaz à l'eau, se trouve refroidi assez pour participer une seconde fois à la récupération ; les fumées, au contraire, ne traversent qu'une fois les récupérateurs et leur chaleur d'échauffement est évidemment inférieure à la somme des chaleurs d'échauffement de l'air total et du gaz ; la limite de récupération est dépassée au point de vue des masses de gaz. Dans ces conditions, on pourrait, par un calcul irraisonné, conclure à une récupération parfaite, à un rendement de 100 %, tandis qu'il y a toujours une légère perte résultant de ce qu'au-dessous de 600° il ne reste

(1) Bien des tentatives ont déjà été faites dans ce sens et nous devons signaler en particulier celle de F. Siemens qui a tenté de substituer à son gazogène à grille un gazogène à talus d'éboulement, sans barreaux. Mais nous ne croyons pas qu'il y ait encore de solution complète du problème, car les températures les plus élevées dont nous ayons connaissance dans les cendriers de gazogènes sont 400° à 450°. Au delà de ces températures, les gazogènes fonctionnent mal ; il y a encore fort à gagner pour atteindre la récupération par l'air primaire, qu'on ne doit considérer comme complète qu'à partir de 1 000° mesurés sous la grille ou dans le cendrier.

plus en présence des fumées que l'air total, dont la chaleur d'échauffement est moindre. *(le gaz arrive à 600°)*

Tableau de calcul des chaleurs perdues et utilisées dans les fours à triple récupération, à gaz mixte.

Calories disponibles : 97 ^{est} 6.	FOUR A 1 600°		FOUR A 1 500°	
	48 % de gaz à l'eau 52 % de gaz à l'air Gaz : CO + 0,48H ² + 1,04Az ² Fumées : CO ² + 4Az ² + 0,48H ² O		54 % de gaz à l'eau 46 % de gaz à l'air. Gaz : CO + 0,54H ² + 0,92 Az ² Fumées : CO ² + 4Az ² + 0,54H ² O	
Récupération de	1 600° à 600°	600° à 0°	1 500° à 600°	600° à 0°
Calories emportées par les fumées F.	45,6	26,5	50,6	26,8
Calories pouvant être récupérées par l'air total	45,5	21,5	36,3	21,5
Calories pouvant être récupérées par le gaz	7,8	0,0	18,2	0,0
TOTAL	23,4	21,5	54,5	21,5
Excédent de la chaleur d'échauffement des gaz récupérants sur celle des fumées	2,5 ⁽¹⁾	»	4,2 ⁽²⁾	»
Excédent de la chaleur d'échauffement des fumées sur les gaz récupérants, perte F — R.	»	5,4	»	5,4
Perte % P	0	5,2	»	5,7
Chaleur utilisée U.	94,8		94,3	

(1) La limite de récupération est dépassée de 3^{est} 3 entre 1 600° et 600° ; la récupération est parfaite.

(2) La limite de récupération étant dépassée entre 1 500° et 600°, la récupération est parfaite.

Pour calculer l'utilisation de la chaleur dans ce four, il faut donc fractionner la récupération en deux étapes : la première entre la

température de régime du four et 600°, qui est parfaite, et où la limite de récupération étant dépassée, les gaz récupérants ne pourront atteindre la température des fumées; la seconde entre 600° et 0°, qui sera limitée par la différence des chaleurs d'échauffement des fumées et de l'air, et par conséquent incomplète.

Le tableau ci-dessus résume cette discussion.

Deux résultats remarquables se déduisent immédiatement de l'examen du tableau : le rendement élevé du système de triple récupération, et le peu d'influence de la température sur l'utilisation de la chaleur. Les fours construits sur ce type conviennent donc surtout aux très hautes températures, et dans ce cas l'économie résultant de leur emploi pourra atteindre 40 % du combustible brûlé.

Enfin, il est un cas particulier où la triple récupération présentera un avantage plus grand encore que cette économie de $\frac{1}{10}$: c'est celui où les fumées contiennent, outre les produits de combustion, des gaz dégagés du laboratoire, eau, acide carbonique, acide sulfureux, emportant eux-mêmes des calories. Dans tous les systèmes précédemment étudiés ces calories sont entièrement perdues, puisque les produits de combustion ont déjà une chaleur d'échauffement supérieure à celle des gaz récupérants : avec la triple récupération on pourra, au contraire, les ramener dans le four.

Les fours de verrerie sont l'exemple le plus intéressant de cette récupération supplémentaire utilisant la chaleur emportée par l'acide carbonique et l'eau des lits de fusion.

Les matières premières composant le verre tiennent jusqu'à 45 % de matières volatiles, tandis que la houille nécessaire à la fusion n'est pas supérieure, dans certains fours, à 60 % du poids de verre fondu; les produits volatils dégagés dans les laboratoires ont donc une masse comparable à celle des produits de combustion, et le rapport peut parfois atteindre $\frac{1}{20}$, correspondant à peu près à une perte de calories de $\frac{1}{20}$ de la chaleur totale disponible. Récupérer ces calories perdues est un avantage appréciable qui pourra porter à 45 % l'économie

totale résultant de la triple récupération : on ne saurait donc trop recommander ce système dans les grands fours à bassin de verrerie et nous estimons à environ 1 tonne de houille par jour l'économie réalisable dans un grand four produisant de 15 à 20 tonnes de verre.

En résumé, le gaz à l'eau, dont nous venons d'examiner toutes les applications possibles, n'a d'intérêt pour les fours à simple récupération que s'il s'agit d'industries à températures élevées; il est très avantageux dans le cas de double récupération; enfin, il donnerait avec la triple récupération le rendement maximum obtenu jusqu'ici dans les fours et, mieux encore, une solution à peu près parfaite du problème de l'utilisation complète de la chaleur à toutes températures.

CHAPITRE VII

FOURS A RETOUR DES FUMÉES. FOUR SIEMENS. NOUVELLE DISPOSITION. ALIMENTATION DES GAZOGÈNES PAR L'ACIDE CARBONIQUE.

§ 1. Réactions de combustion. Caractères généraux. — L'emploi d'acide carbonique comme auxiliaire de la gazéification, basé sur la réaction bien connue de ce gaz sur le charbon au rouge, a été mis à l'ordre du jour par la réalisation du nouveau four Siemens, très heureusement combiné pour permettre le passage des fumées sous le gazogène en telle proportion que l'on veut.

L'idée de renvoyer sous le cendrier une partie des fumées pour les transformer en gaz combustible n'était pas nouvelle, et nous devons rappeler que M. E. Gobbe avait avant MM. Biedermann et Harvey pris un brevet sur la même idée, sans toutefois réussir à faire pénétrer dans l'industrie ce nouveau système; mais ce n'est que depuis cinq ans que l'on est passé de l'idée théorique à une application partielle.

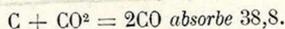
A la suite de cette nouveauté, quelques Ingénieurs, séduits par la *régénération du carbone* comme on l'avait été dans les débuts du gaz à l'eau par l'*extraction de l'hydrogène de l'eau*, émirent l'opinion qu'il pourrait être avantageux d'alimenter les gazogènes avec de l'acide carbonique non emprunté aux fumées, par exemple avec celui qui se dégage d'un four à chaux. Nous ne connaissons pas de réalisation industrielle de ce principe, mais, sans la difficulté de se procurer à bon compte de l'acide carbonique exempt d'azote, l'idée n'est pas théoriquement moins juste que celle qui a inspiré le gaz à l'eau: elle mérite au moins examen.

Nous avons donc deux cas à examiner: emploi des fumées, emploi d'acide carbonique pur.

Rappelons d'abord le rôle de l'acide carbonique dans les fours à récupération:

Très analogue dans ses effets à la vapeur d'eau, ce gaz a un double

rôle : 1° Diminution de l'air primaire et accroissement égal de l'air secondaire ; 2° Abaissement de la température du gaz, par suite de la chaleur nécessaire à sa décomposition :



Il ne peut par lui-même fournir aucune calorie et n'ajoute rien à la chaleur totale disponible contenue dans le combustible.

Il se distingue de la vapeur d'eau en ce qu'étant gazeux à la température ordinaire, il n'a pas de chaleur latente de vaporisation, ce qui est un avantage par rapport à l'eau.

Si on l'injecte froid, sans azote, sous le gazogène, son effet sur l'utilisation de la chaleur est (sous la réserve de la chaleur de vaporisation) identiquement le même que celui de l'eau. Il n'y a donc pas lieu d'examiner ce cas qui n'est pas industriel.

L'alimentation par des fumées froides est moins intéressante encore puisqu'elle introduit sans profit de l'azote dans la circulation du four.

Deux cas restent seuls à examiner au point de vue d'applications industrielles possibles : celui qu'ont mis en avant MM. Biedermann et Harvey et celui d'une alimentation par de l'acide carbonique chaud sortant d'un autre four, four à chaux, par exemple.

§ 2. Premier cas : Alimentation des gazogènes par de l'acide carbonique exempt d'azote et chaud. — Ce cas ne rentre pas réellement dans l'étude de la récupération, car il comporte un apport de calories étrangères au combustible ; nous croyons bon de l'étudier comme étant le seul cas de véritable régénération du carbone.

Supposons donc que l'on dispose, à proximité du gazogène, d'acide carbonique sortant à 1000° d'un four voisin, et cherchons l'économie qui en peut résulter.

Le maximum de cette économie, qui correspond au cas d'un four où la récupération serait double par l'air et le gaz, est facile à calculer, car toute la chaleur sensible contenue dans l'acide carbonique est alors transformée en chaleur latente, en combustible régénéré. Il suffit d'évaluer la proportion d'acide carbonique qui pourra être envoyée sous le gazogène sans en abaisser la température au-dessous de 600°. Le calcul est en tous points semblable à celui du gaz à l'eau.

Soit m la proportion de charbon gazéifié par l'acide carbonique pour une unité de carbone brûlé :

$$m[C + CO^2] = 2mCO \text{ dégage } m[-38,8 + 12,7] \text{ cal.}$$

12,7 étant la chaleur d'échauffement de l'acide carbonique de 0 à 1 000°,

$$(1 - m)\left[C + \frac{1}{2}O^2 + 2Az^2\right] = (1 - m)[CO + 2Az^2] \text{ dégage } (1 - m)29^{\text{cal}}4.$$

La composition du gaz sera :

$$(1 + m)CO + (1 - m)2Az^2,$$

dont la chaleur d'échauffement de 0 à 600°, température minimum du gazogène, est $(3 - m)4,3$, d'où l'équation :

$$\begin{aligned} -26,1m + 29,4(1 - m) &= (3 - m)4,3 \\ m &= 0,33. \end{aligned}$$

On voit donc que le tiers du combustible sera gazéifié par l'acide carbonique à 1 000°, le reste par l'air. Et pour chaque unité de combustible brûlé dégageant 97^{cal}6, l'économie maximum sera du tiers de la chaleur d'échauffement de l'acide carbonique de 0° à 1 000°, c'est-à-dire $\frac{12,7}{3}$, ce qui représente une économie de carbone régénéré de 4,3 %.

A cette économie viendraient évidemment s'ajouter celle résultant de la meilleure récupération dont le groupe du gaz à l'eau donnera une valeur très approchée, et l'économie de la chaleur de vaporisation de l'eau; mais, au demeurant, les avantages ne sont peut-être pas suffisants pour provoquer des essais qui, comme la récupération par l'air primaire, se heurteraient aux difficultés non résolues des gazogènes à allure chaude.

§ 3. Deuxième cas : Alimentation du gazogène par les fumées. Nouveau four Siemens. — L'alimentation des gazogènes par les fumées sortant du laboratoire peut s'appliquer comme le gaz à l'eau à tous les systèmes de récupération simple, double ou triple. Il y aurait donc théoriquement quatre cas à examiner, mais comme les applications de ce système sont très limitées, que deux d'entre elles (triple récupéra-

tion et double récupération par l'air et le gaz) n'ont jamais été essayées, que les deux autres, enfin, n'ont jamais reçu que des réalisations partielles, il est sans intérêt de développer tous les calculs d'une discussion dont nous indiquerons seulement les résultats.

Ce qui caractérise l'alimentation par les fumées, c'est que l'acide carbonique y est accompagné d'un volume d'azote qu'on sait invariable dans tous les fours où le combustible est du carbone et où le comburant est l'air, et qui augmente beaucoup la chaleur sensible disponible pour une masse donnée d'acide carbonique envoyé sous la grille. Il en résulte que l'on peut envoyer sous le gazogène, sans le refroidir au-dessous de 600°, un volume d'acide carbonique beaucoup plus grand que s'il s'agissait d'acide carbonique pur ou de vapeur d'eau et que, toutes choses égales, son influence sur la récupération sera d'autant accrue. Il est aisé de calculer, par exemple, que, si les fumées sont à 1450°, tout le charbon pourra être gazéifié par l'acide carbonique des fumées, il n'y aura plus d'air primaire, tout l'air sera secondaire : à 1000°, on pourra encore envoyer 44 % d'acide carbonique.

Il peut en résulter, théoriquement du moins, des avantages sérieux et une amélioration du rendement, mais il ne faut pas perdre de vue que c'est uniquement par le mécanisme de la récupération que le gain se produit et qu'il n'y a ni accroissement du nombre de calories disponibles, ni régénération du carbone (1). Le tableau suivant n'est qu'un résumé de l'étude de la récupération dans le cas du nouveau four Siemens, faite par les mêmes méthodes que pour le gaz à l'eau (voir p. 96).

Le fait le plus important se dégageant de ce tableau est l'excellence des rendements théoriques qui sont presque tous supérieurs aux cas correspondants du gaz à l'eau et du gaz à l'air. Ce résultat n'est pas surprenant, puisque les fumées chaudes agissent plus complètement, à égalité de volume moléculaire, sur la récupération, et que l'emploi de cet auxiliaire ne modifie pas la masse des fumées, n'augmente pas, par conséquent, la quantité de calories inutilement déversées dans l'atmosphère. Mais il ne faut pas perdre de vue que ces résultats sont

(1) Nous avons indiqué précédemment la double circulation du four à retour de fumée et le cercle vicieux qui a pu faire croire à une régénération du carbone.

Tableau de calcul des chaleurs perdue et utilisée dans les fours à retour de fumées aux gazogènes.

Chaleur disponible : $Q = 97^{ca} 6$.	Simple récupération par l'air secondaire		Double récupération par l'air et le gaz		Double récupération par l'air primaire et secondaire		Triple récupération par l'air total et le gaz		
	1 000°	1 500°	1 000°	1 500°	1 000°	1 500°	1 000°	1 500°	
Calories emportées par les fumées F . . .	42,1	67,5	42,1	67,5	42,1	67,5	42,1	67,5	
Calories récupérées par le chauffage . . .	26,5	57,8 (1)	26,5	57,8	37,0	57,8 (1)	37,0	57,8 (1)	
	—	—	7,5 (1)	7,3 (1)					—
TOTAL F	26,3	57,8	34 »	65,4	37,0	57,8	42,1	64,5	
Différence F — R ou perte	15,6	19,7	8,1	2,4	5,1	9,7	2,4	2,4	
Perte % $\frac{F-R}{Q} = P$	16 »	20 »	8,5	2,5	5,6	10 »	2,5	2,5	
Chaleur utilisée ou rendement U	84 »	80 »	94,5	97,5	94,4	90 »	97,5	97,5	
OBSERVATIONS	<i>Ce chiffre est inférieur à celui de la récupé- ration de l'air se- condaire et du gaz pour fours à gaz mètre (84,2)</i>			(1) La limite de récupération est ici dépassée, et le gaz pour- rait absorber à 1 000° : 43 ^{ca} 42 à 1 500° 44 ^{ca} 4, si la récupéra- tion n'était limitée par l'équi- valence des masses.		(1) Air total		(1) Air total. (2) La limite de récupération est dépassée, et le gaz pourrait absorber à 1 000° 43 ^{ca} 4, à 1 500° 44 ^{ca} 4, si la récupération n'était limitée par l'équivalence des masses.	

ici tout à fait théoriques. Les seuls cas réalisés jusqu'à présent, sont la simple récupération et la double récupération par l'air primaire et secondaire, et encore ne le sont-ils que pour une portion de fumées assez faible (1). Des autres cas il ne saurait être question, tant que l'étude des gazogènes n'aura été sensiblement avancée, et jusque-là il est même inutile de tirer aucune conséquence, aucune indication d'avenir sur l'emploi des fumées.

Les seules conclusions pratiques intéressantes sont relatives au rendement du nouveau four Siemens fonctionnant comme on sait le faire marcher de nos jours. Or, en général, ce four muni de trois appareils Kœrting communiquant l'un avec la chambre à fumée, l'autre avec la chambre à air chaud, l'autre avec l'air extérieur, marche avec les trois injecteurs constamment ouverts, avec débit variable d'ailleurs d'une usine à l'autre, mais réglés de façon que la température dans le cendrier soit d'environ 450°, et que l'admission d'air chaud et de fumées soit commandée par des Kœrting égaux et également ouverts. Dans ces conditions, il y a chauffage total de l'air secondaire, chauffage partiel de l'air primaire, gazéification partielle par les fumées, gazéification à l'eau nécessitée par les Kœrting, et gazéification à l'air. Le rendement du four Biedermann sera une résultante des rendements correspondant à ces différents systèmes suivant des coefficients proportionnels à la part de chacun d'eux.

Prenons, par exemple, le cas d'un four à 1 000°. Le chauffage de l'air primaire assure un rendement maximum de 75,7 % avec gaz à l'air, de 78 avec gaz à l'eau et de 84 % avec les fumées. Le chauffage de l'air secondaire porte ces divers rendements à 94,8, 89,4 et 94. Le four « Siemens, nouvelle disposition » aura un rendement intermédiaire entre ces divers nombres. Remarquons que le plus faible de ces chiffres est celui du four à simple récupération avec gaz à l'air, et que, comme nous l'avons déjà fait observer, ce dernier chiffre de 75 % est très voisin de celui que donne le four à simple récupération avec gaz à

(1) F. Siemens a cependant encore pris un brevet pour l'application du retour des fumées aux fours à quatre chambres, qui équivaldrait à peu près au cas de la triple récupération.

l'eau. On en peut déduire que le nouveau four sera à 1 000° un peu plus avantageux que tout autre système de four à simple récupération (1).

Mais il importe d'observer que, lorsqu'on chauffe l'air primaire, le rendement est le même (94 % maximum) avec du gaz à l'air qu'avec du gaz régénéré des fumées, et que, par conséquent, il est rationnel d'alimenter le gazogène avec un mélange en parties égales d'air chaud et de fumées. La supériorité éventuelle du four « Siemens nouvelle disposition » ne tient donc pas tant à la régénération des fumées qu'à la faculté qu'il donne de chauffer l'air primaire dans la même chambre que l'air secondaire. En tout cas il paraît hors de doute que le nouveau four, dans ce cas de basses températures où les systèmes à simple récupération sont seuls employés, constitue un progrès dans l'art du chauffage.

À 1 500°, au contraire, les rendements des fours à simple récupération (60,5 avec gaz à l'air, 64,4 avec gaz à l'eau) que l'injecteur de fumées se propose d'améliorer, et le rendement du four à double récupération à gaz mixte (84,3 %) sont trop considérables pour qu'une application partielle de cette régénération des fumées puisse combler la différence, si parfaits que soient les rendements théoriques du nouveau four. On pourra peut-être atteindre et même dépasser le rendement des premiers fours Siemens à siphon et à gaz à l'air, mais nous ne pensons pas, jusqu'à preuve expérimentale du contraire, qu'on obtienne les résultats des fours Siemens à gaz mixte à double récupération.

Le nouveau four Siemens est de construction plus économique que les fours à double récupération : il convient mieux qu'un autre aux appareils de petite dimension : il est plus maniable et réglable que les fours à tirage naturel. Ce sont des avantages assez appréciables en industrie pour qu'on ne veuille pas, en outre, leur attribuer *a priori* une meilleure utilisation du combustible que la théorie conteste et que la pratique n'a pas suffisamment confirmée.

(1) Dans les conditions actuelles, avec emploi d'une fraction des fumées qui n'est pas de $\frac{1}{2}$ de la quantité disponible, l'économie ne serait que de quelques unités, 1 à 3 %. Le calcul en serait facile.

CHAPITRE VIII

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS. CLASSEMENT DES FOURS.

Nous avons résumé sous forme de tableau synoptique la discussion générale traitée dans les chapitres précédents.

Ce tableau donne la valeur absolue du maximum d'utilisation de chaleur dans les fours, sans tenir compte de la possibilité ou de l'impossibilité de réalisation pratique de chaque système; aussi ne doit-on pas en déduire immédiatement et sans examen un classement des fours d'après la valeur de U. La classification n'est exacte que pour les systèmes susceptibles d'une application industrielle complète; dans les autres cas, il y a lieu à une appréciation.

C'est sur de telles bases, et sans revenir ici sur une discussion longuement détaillée dans ce qui précède, que nous résumerons brièvement nos conclusions antérieures :

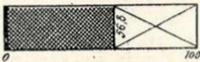
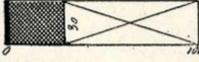
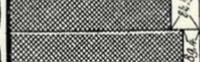
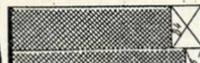
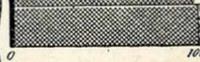
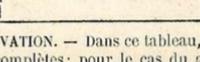
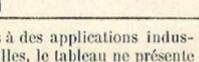
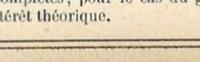
1^o Aux températures de 1 500° et au delà, le meilleur des fours à gaz actuellement en usage (au point de vue de l'utilisation de la chaleur), est le four Siemens à double récupération par l'air et le gaz, sans siphon, avec gaz à l'eau : son rendement de récupération est de 85 %.

On pourrait gagner encore une quantité de chaleur importante (10 %) en chauffant l'air primaire, puisque la limite d'utilisation dans les fours à triple récupération est de 95 %, et la solution du chauffage de l'air primaire n'est pas ici aussi difficile que dans les fours à simple récupération, puisque, pour gagner ces 10 %, il suffirait de porter à 800° l'air d'alimentation du gazogène et la vapeur d'eau qui y est mélangée. Ce progrès, réalisable par les fours à triple récupération, avec gaz à l'eau, sans siphon, donnerait à 1 500° une utili-

Tableau comparatif de tous les systèmes de fours aux températures de régime de 1000° et 1500°, donnant :

1° Maximum de chaleur utilisée U

2° Perte minimum par les fumées 

CLASSIFICATION	1000 DEGRÉS		MODE DE RÉCUPÉRATION	1500 DEGRÉS	
	DIAGRAMMES DES CHALEURS UTILISÉES ET PERDUES (U. ET P.)	APPLICATIONS INDUSTRIELLES		APPLICATIONS INDUSTRIELLES	DIAGRAMMES DES CHALEURS UTILISÉES ET PERDUES (U. ET P.)
Chauffage direct.		Fours à cuivre, Fours Biche-roux, Boëtius, etc.	Pas de récupération.	Fours à puddler, fours de verrerie et céramique.	
Gaz à l'air.		Fours à cornues à gaz.	Simple récupération par l'air secondaire.	Fours de verrerie à bassin.	
		Sans application possible.	Double récupération par { air secondaire, gaz.	Fours Martin-Siemens, etc. pour métallurgie et verrerie.	
Gaz à l'eau mixte.		Fours à cornues, à laiton Siemens, Lencauchez, etc.	Double récupération par { air secondaire, air primaire.	?	
		Fours Siemens.	Simple récupération par l'air secondaire.	Fours de verrerie à bassin.	
		Four Klönne à cornues (application partielle).	Double récupération par { air secondaire, air primaire.	Four Siemens.	
Gaz régénéré des fumées.		?	Triple récupération par { air secondaire, gaz, air primaire.	?	
		Application partielle. (Four Biedermann et Harvey).	Simple récupération par l'air secondaire.	Application partielle.	
		Sans application.	Double récupération par { air secondaire, gaz.	Sans application.	
		Application partielle.	Double récupération par { air secondaire, air primaire.	Application partielle.	
		Sans application.	Triple récupération par { air secondaire, gaz, air primaire.	Sans application.	

OBSERVATION. — Dans ce tableau, les cas du chauffage direct, du gaz à l'air et du gaz à l'eau correspondent seuls à des applications industrielles complètes; pour le cas du gaz de fumées, les applications n'ayant encore été que très imparfaites ou nulles, le tableau ne présente qu'un intérêt théorique.



sation vraiment très parfaite des calories, et une solution du problème que l'on pourrait considérer comme définitive (1).

En seconde ligne, et avec une grande infériorité (66 %), viennent les fours à double récupération avec gaz à l'air (four Siemens primitif); puis, avec un faible écart (64 %), les fours à simple récupération avec gaz à l'eau; enfin (60 %) les fours à simple récupération avec gaz à l'air.

Les fours à double récupération à chauffage d'air primaire ou à retour de fumées ne peuvent pas être rangés dans le classement précédent, puisque les applications actuelles sont incomplètes; tout ce qu'on peut affirmer, c'est qu'ils sont supérieurs aux deux précédents. Dans l'état actuel, c'est-à-dire avec une température de 400 à 500° au cendrier, ils peuvent donner un meilleur rendement que le four Siemens primitif, mais sont inférieurs au four Siemens à gaz mixte.

Le classement serait donc le suivant :

- 1° Fours à triple récupération, à gaz mixte;
- 2° Fours à gaz mixte à double récupération par l'air et le gaz;
- 3° Fours à gaz à l'air à double récupération par l'air et le gaz;
- 2 bis ou 3° bis (?) Fours à double récupération par l'air primaire ou à retour de fumées; four Siemens nouvelle disposition;
- 4° Fours à simple récupération à gaz mixte;
- 5° Fours à simple récupération à gaz à l'air;
- 6° Fours à chauffage direct.

2° Aux températures moyennes, 1 000° pour fixer les idées, la tête du classement est encore occupée par le four Siemens à double récupération à gaz mixte, mais il ne semble pas que la double récupération ait un intérêt très grand: l'écart entre le rendement d'un four à une paire de chambres (78 %), et celui du four à double récupération

(1) Rappelons d'ailleurs que le four à triple récupération présente un intérêt spécial dans le cas où, à la masse des fumées, vient s'ajouter une masse gazeuse provenant des matières mises en œuvre dans le laboratoire, ce qui est le cas des fours de verrerie. Nous avons vu que l'économie supplémentaire qui en résulterait peut atteindre de 3 à 4 %; on pourrait donc, dans cette industrie, escompter une économie de 10 à 14 % de combustible. C'est un avantage très appréciable dans une industrie où le chauffage est rigoureusement continu, et où le charbon est un élément important du prix de revient.

avec gaz à l'eau (85 %), est trop faible pour justifier la complication, le coût élevé d'un appareil récupérateur quadruple, et peut-être pour compenser le rayonnement des chambres de récupération du gaz. C'est donc sur les fours à récupérateur unique que l'attention et la critique doivent se porter.

Actuellement on se sert surtout de fours à simple récupération par l'air secondaire seul, avec gaz ordinaire à l'air et avec gaz à l'eau. La théorie nous a montré qu'à 1000° ces systèmes sont équivalents, en sorte qu'il n'y a pas intérêt à marcher avec injection de vapeur, ou simplement à grille noyée, dans ces fours qui intéressent surtout l'industrie du gaz.

Mais il serait avantageux, si l'on ne se heurte pas à des difficultés de construction, de substituer aux fours actuels un système permettant, sans augmenter le nombre des chambres, soit de chauffer l'air primaire comme dans le four Klönne⁽¹⁾, soit de renvoyer une partie des fumées sous la grille, soit de faire l'un et l'autre, comme dans le nouveau four Siemens. D'après notre discussion, ces divers progrès tendent à la même limite, une utilisation maximum de 94 %, et leurs effets dans le cas d'applications partielles seraient à peu près les mêmes; tous sont d'ailleurs limités par la question de conservation de la grille, qui n'est pas encore résolue. En supposant que l'on chauffe à 400° seulement l'air primaire, ce qui est actuellement possible, l'économie réalisable serait 6 %; elle ne nous paraît pas négligeable pour une industrie aussi continue que celle du gaz d'éclairage, et il y a ici encore une solution intéressante à poursuivre dans la construction des fours.

D'après ces conclusions, le classement des fours à 1000°, d'un intérêt industriel, serait le suivant :

- 1° Fours à double récupération par chauffage de l'air primaire ou par retour des fumées four Siemens nouvelle disposition;
- 2° Fours à simple récupération à gaz à l'eau;
- 3° Fours à simple récupération à gaz à l'air (*presque ex æquo*);
- 4° Fours à chauffage direct.

(1) Les fours à chauffage d'air primaire, tels que le four Klönne de Dortmund et le four Liegel de Stralshund, commencent à se répandre en Angleterre et en Allemagne.

Signalons enfin un point qui, plus que tout autre peut-être, mérite examen et étude, dans ces fours à 1 000°, c'est l'adoption du chauffage au gaz à récupération par toutes les industries qui s'en tiennent toujours aux fours à chauffage direct. Il semble que l'économie de 30 %, sur laquelle on pourrait compter, n'est pas négligeable, et l'on a même de la peine à s'expliquer les résistances que ce progrès rencontre auprès de beaucoup d'industries, les hésitations et même les reculs, à moins qu'il ne soit beaucoup plus difficile de trouver un personnel technique connaissant la science de la conduite des fours à gaz qu'un maître fondeur expert dans l'art de chauffer un four à grille. En tout cas, il est hors de doute qu'il y a un sérieux effort à faire de ce côté.

3° Aux basses températures, et en particulier pour les chaudières à vapeur, la récupération est sans grand effort sur l'utilisation de la chaleur, et c'est du côté de la combustion complète, sans excès d'air, que les efforts doivent peut-être se porter.

En résumé, aux trois grandes étapes de la question : 1 500°, 1 000°, 500°, il reste un pas à franchir pour atteindre une utilisation rationnelle de toutes les calories contenues dans le combustible. Ce progrès, en vérité, n'est pas énorme : 10 à 15 % de la chaleur totale disponible, en amélioration du rendement, par rapport aux meilleurs appareils actuels; mais, dans l'industrie moderne, une telle économie n'est pas négligeable.

Il reste, plus encore, à gagner à la cause du chauffage au gaz beaucoup d'industries qui semblent en redouter l'essai.

Il reste enfin à perfectionner la technique des fours et à vulgariser la science de leur conduite. L'étude théorique qui précède a tendu à ce premier but; la seconde partie, visant le second desideratum, traitera de l'étude expérimentale, physique et chimique des fours, et indiquera les moyens de les surveiller et de les conduire.

ANNEXE ⁽¹⁾

CALCULS DES TEMPÉRATURES DE COMBUSTION DES COMBUSTIBLES ET GAZ LE PLUS FRÉQUEMMENT RENCONTRÉS EN INDUSTRIE. — Nous croyons utile d'ajouter ici une série de calculs de températures de combustion dont la connaissance peut être utile aux Ingénieurs et que nous empruntons au cours de M. Le Chatelier.

1° Combustion de l'oxyde de carbone dans l'air froid. — Brûlons 28 grammes de CO occupant le volume moléculaire 22^{lit} 32. La chaleur dégagée est 68^{cal} 2, d'où le tableau de chaleurs d'échauffement et le graphique suivants (fig. 1) :

Produits brûlés.	1 800°	2 000°	2 200°
	calories	calories	calories
CO ²	27,2	34,8	36,6
2AZ ²	28,4	32,4	35,8
TOTAUX	55,6	63,9	71,4
	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>c</u>

On trouve environ 2 100°.

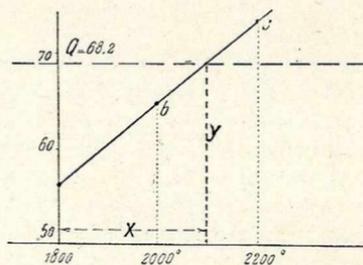


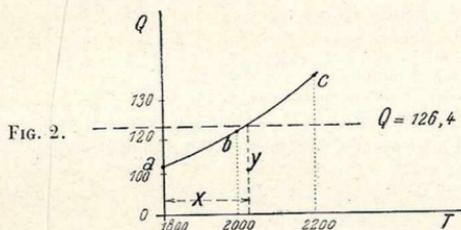
FIG. 1.

(1) Les calculs suivants se rapportent au chapitre I, paragraphe 3. (Températures de combustion.)

Température de combustion du gaz à l'eau théorique (CO + H²) dans l'air froid. — Brûlons deux volumes moléculaires de ce gaz; le nombre de calories dégagées dans cette réaction est $68,2 + 58,2 = 126^{\text{cal}}$, d'où le tableau des chaleurs d'échauffement des produits brûlés et le graphique suivants (fig. 2) :

Produits brûlés.	1 800°	2 000°	2 200°
	calories	calories	calories
CO ²	27,2	31,8	36,6
H ² O	23,8	27,7	31,8
4AZ ²	56,8	64,2	71,6
TOTAUX	<u>107,8</u>	<u>123,7</u>	<u>140,0</u>

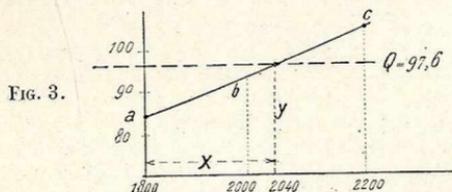
Nous trouvons ainsi $X = 2 030^{\circ}$.



Température de combustion du carbone dans l'air froid. — Brûlons 12 grammes de charbon amorphe, donnant un volume moléculaire (22^{lit} 32) d'acide carbonique. La chaleur dégagée dans cette réaction est 97^{cal} , d'où le tableau et le graphique suivants (fig. 3) :

Produits de combustion.	1 800°	2 000°	2 200°
	calories	calories	calories
CO ²	27,2	31,8	36,6
4AZ ²	56,8	64,2	71,6
TOTAUX	<u>84,0</u>	<u>96,0</u>	<u>108,2</u>

Nous trouvons ainsi $X = 2 040^{\circ}$.





Température de combustion d'une houille à l'air froid. — Soit la houille, dont la composition en poids est :

Carbone	75,2
Hydrogène.	5,2
Oxygène.	8,2
Azote	1,0
Eau hygrométrique.	3,4
Cendres.	7,0
	<hr/>
	100,0

Le pouvoir calorifique déterminé dans la bombe Mahler a été trouvé, pour 1 kilogr., égal à 7423 calories.

Brûlons 100 grammes de cette houille; les produits gazeux de la combustion seront formés des corps suivants :

- Acide carbonique;
- Eau de combinaison;
- Eau hygrométrique;
- Azote provenant du combustible;
- Azote de l'air.

Nous pouvons facilement calculer la composition, en volumes moléculaires (22^{lit} 32), de ces gaz brûlés.

12 grammes de carbone donnent, par leur combustion, 1 volume moléculaire d'acide carbonique; 75^{gr} 2 donneront 6^{vol} 27.

De même, nous trouvons :

- 2^{vol} 6 d'eau de combinaison;
- 0^{vol} 6 d'eau hygrométrique.

Quant à l'azote, la plus grande partie provient de l'air, qui a brûlé le carbone et l'hydrogène. Or, l'oxygène utilisé a été :

$$\begin{array}{r} 6^{\text{vol}} 27 \text{ pour brûler le carbone} \\ 4^{\text{vol}} 30 \text{ — l'hydrogène} \\ \hline 7^{\text{vol}} 57 \end{array}$$

Le combustible contenant $\frac{8,2}{32} = 0^{\text{vol}} 25$ d'oxygène, 7^{vol} 32 seulement provient de l'air; par suite l'azote provenant de l'air a un volume de 29 v. 28 m.

La composition des fumées en volume sera donc :

Acide carbonique.	6 ^{vol} 27
Eau	2 ^{vol} 6 + 0 ^{vol} 6 = 2 ^{vol} 12
Azote	29 ^{vol} 28

Le nombre de calories dégagées dans la combustion de ces 100 grammes de houille est de 7423^{cal} 3. D'après la lecture du tableau des chaleurs d'échauffement, on voit immédiatement, sans qu'il soit nécessaire de tracer une courbe, que la température cherchée est voisine de 2000°.

Produits de combustion	Volumes	1 600°	1 800°	2 000°
		calories	calories	calories
CO ²	6,27	144,8	170,6	199,6
H ² O	2,78	36,3	66,3	77,1
Az ²	29,04	361,8	412,6	466,1
TOTAUX		<u>562,9</u>	<u>649,5</u>	<u>742,8</u>

Cette température donne évidemment le maximum de température que pourra réaliser cette houille dans un four à chauffage direct.

Températures de combustion de gaz de gazogènes avec de l'air chaud. — Soit le gaz de gazogène théorique CO + 2Az², chauffé à 1 000°, et brûlant avec de l'air porté également à cette température :

Calories dégagées par la combustion	Cal.	68,2
Calories apportées par 1 volume de CO	}	44,6
— — par 1 volume d'oxygène de l'air		
— — par 4 volumes d'azote du gaz et de l'air		
TOTAL	Cal.	<u>112,8</u>

Le tableau des chaleurs d'échauffement est :

Produits de combustion	1 800°	2 000°	2 200°	2 400°
	calories	calories	calories	calories
CO ²	27,2	31,8	36,6	41,8
4Az ²	56,8	64,2	71,6	79,4
TOTAUX	<u>84,0</u>	<u>96,0</u>	<u>108,2</u>	<u>121,2</u>

d'où le graphique suivant (fig. 4) :

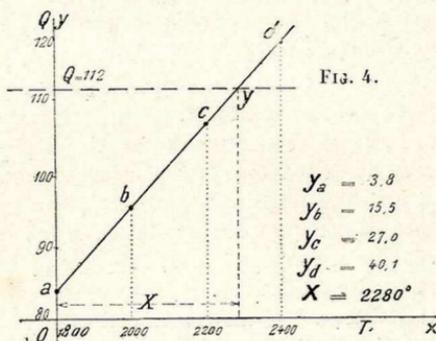
On déduit du graphique :

$$X = 2\ 280^{\circ}$$

On trouverait de même :

$$\text{Gaz et air à } 500^{\circ} = 1\ 860^{\circ}$$

$$\text{— air froid} = 1\ 500^{\circ}$$





DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE PRATIQUE ET EXPÉRIMENTALE

DE

L'UTILISATION DE LA CHALEUR DANS LES FOURS

L'étude expérimentale du rendement des fours peut et doit se faire exactement suivant la même méthode que l'étude théorique qui nous a donné un classement général de tous les systèmes de chauffage à récupération.

Le point de départ de toute recherche sera nécessairement la connaissance exacte de la puissance calorifique disponible, à laquelle on devra rapporter toutes les chaleurs perdues ou utilisées dans les différentes parties du four; quant à ces chaleurs elles-mêmes, on les calculera par les formules d'échauffement (voir p. 10), si l'on connaît la composition des gaz et les températures aux points de séparation des différents organes des fours.

Mais, de même que les données scientifiques que nous avons exposées au début de l'étude théorique sont récentes, les appareils permettant les études expérimentales sont plus récents encore, puisque la bombe Mahler qui a rendu industrielle la méthode calorimétrique de M. Berthelot remonte à 1892, et que le pyromètre thermo-électrique Le Chatelier est de 1889.

Il est donc utile d'indiquer ici brièvement l'outillage qui nous semble le plus pratique, celui dont nous avons fait longtemps usage, tant pour exercer le contrôle régulier d'un four à gaz que pour toutes les études expérimentales s'y rapportant.

CHAPITRE IX.

OUTILLAGE NÉCESSAIRE A L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET A LA SURVEILLANCE DES FOURS.

§ 1. Détermination de la puissance calorifique disponible. — Cette détermination comporte deux opérations distinctes qui se complètent et se contrôlent l'une l'autre : la recherche du pouvoir calorifique au moyen de la bombe Mahler et l'analyse organique. La première est très simple et ne demande qu'une demi-heure environ ; la seconde est plus longue et exige de trois à quatre heures lorsqu'on a un matériel tout prêt. Chacune de ces opérations a été exposée avec grand soin dans le rapport présenté par M. Mahler à la Société d'Encouragement à la suite de ses remarquables études sur les houilles ; elles sont connues des lecteurs du *Génie Civil*. Il est donc inutile d'en donner ici une nouvelle description et nous n'avons qu'à montrer leur utilité dans l'étude empirique des fours (1).

La connaissance du pouvoir calorifique du combustible ne peut pas, comme dans le cas théorique de combustion du carbone, suffire à une étude complète de four. Elle serait suffisante si l'on pouvait mesurer les masses de gaz et de vapeur d'eau circulant dans le four pendant l'unité de temps, et les rapporter au poids de charbon brûlé correspondant ; mais la détermination exacte de la vitesse de circulation des gaz dans les carneaux est presque impossible, et l'évaluation de la consommation de houille pendant un temps limité est elle-même fort délicate (2).

(1) Contribution à l'étude des combustibles. Détermination industrielle de leur puissance calorifique par P. Mahler. Extrait du *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* (Baudry et Cie).

(2) L'épaisse couche de combustible entassée sur la grille du gazogène peut, au cours d'une mesure, s'abaisser ou s'élever de quelques centimètres, de sorte que le charbon introduit dans le gazogène ne représente pas ce qui a été effectivement brûlé.

On doit donc se contenter d'établir le bilan d'un four d'après les compositions chimiques du combustible, du gaz et des fumées en rapportant toujours les chaleurs d'échauffement et de combustion à un seul et même corps, le carbone par exemple; le pouvoir calorifique de la houille sera rapporté au poids moléculaire 12 grammes de carbone et les calories contenues dans les gaz aux volumes moléculaires d'oxyde de carbone et d'acide carbonique. — De là la nécessité de l'analyse organique concernant le dosage rigoureux du carbone.

Le dosage exact de l'hydrogène n'est pas moins nécessaire, car il permettra de calculer la quantité de vapeur d'eau introduite dans le gazogène, et celle qui résulte de la combustion de l'hydrogène de la houille. Il dispensera donc de la mesure de la quantité d'eau vaporisée dans le gazogène, mesure parfois très difficile dans le cas des Kœrting comme dans celui des cendriers ouverts, et qui ne pourrait avoir d'intérêt qu'autant que la pesée du charbon consommé serait elle-même rigoureuse. L'analyse organique de la houille est donc indispensable à une étude de bilan calorifique d'un four (1).

§ 2. Mesure des températures. — L'appareil se prêtant le mieux aux évaluations des températures en tous les points d'un four est le pyromètre thermo-électrique Le Chatelier.

Cet appareil, aujourd'hui très usité, se compose de deux fils de platine et de platine rhodié soudés ou simplement réunis en torsade à une extrémité, de façon à former un couple. On introduit la soudure au point dont on veut mesurer la température. Le courant électrique, provoqué par la différence de température entre la sou-

(1) Les laboratoires industriels ne sont pas, en général, outillés de façon à effectuer l'analyse organique et la détermination du pouvoir calorifique des combustibles. Il semble donc que les bilans de fours se heurtent, partout où l'on voudrait les tenter, à des difficultés très grandes. Aussi est-il bon de faire remarquer que les études de houilles n'ont pas besoin d'être effectuées dans les usines: il suffit d'y faire une prise d'essai soignée et d'en envoyer un échantillon à un laboratoire de recherches. Nous ne considérons pas, même, comme très utile dans les laboratoires d'usines l'existence de ce matériel un peu compliqué de l'analyse organique qui, entre des mains insuffisamment exercées, peut donner des résultats inexacts; mais il serait très désirable au contraire, que les analyses de houilles puissent être faites avec toutes garanties dans des laboratoires centraux ou commerciaux. Actuellement il en existe très peu qui soient en état de faire semblables études: c'est certainement une lacune à combler dans la chimie analytique d'industrie.

OUTILLAGE NÉCESSAIRE A L'ÉTUDE D'UN FOUR 111

ture chaude et les contacts avec les fils conducteurs auxquels le couple est relié, est reçu dans un galvanomètre (1).

Pour les applications industrielles et en particulier les mesures de température dans l'intérieur des fours à une certaine distance des portes, il est commode de placer les deux fils isolés l'un de l'autre par des tuyaux de pipe ou des cylindres d'argile, dans un tube de fer de la longueur du couple et pouvant atteindre 3 mètres et plus ; de cette façon, la soudure platine-rhodium peut être plongée à 2^m 50 en avant du four, sans que l'autre extrémité (soudure froide), subisse un échauffement sensible.

Les formes de galvanomètre mesurant la force électromotrice ont été plusieurs fois modifiées depuis l'origine. Le premier appareil était un galvanomètre apériodique Desprez et d'Arsonval ; depuis, M. Le Chatelier a fait construire un appareil d'usine plus portatif s'accrochant à un mur dont nous avons donné la description et indiqué le fonctionnement en vue des applications industrielles ; récemment, M. Carpentier a substitué au galvanomètre à réflexion en deux parties un appareil à microscope à suspension en spirale plus portatif. Enfin on a réalisé, en Allemagne, un galvanomètre à aiguille, à cadran, donnant à la fois la force électromotrice et les degrés centigrades correspondants : ce dernier appareil a l'avantage d'éviter la graduation nécessaire avec les autres systèmes, pourvu que les couples soient tous conformes à un couple étalon d'après lequel a été fait le cadran.

Aucun de ces appareils ne présente, à l'emploi, de difficulté sérieuse, et nous avons même pu constater que, lorsque l'installation est bien faite, on peut, sans inconvénient, les mettre entre les mains de contre-maitres. La graduation elle-même, qui passe souvent pour difficile, est une opération fort simple : elle consiste à tracer une courbe des températures en fonction des déviations du galvanomètre, à l'aide de quelques points fixes convenablement choisis : ébullition de l'eau (100°), ébullition du soufre (448°), fusion de l'aluminium (623°), fusion de

(1) Pour les détails d'agencement et de réglage de cet appareil, nous pouvons renvoyer à l'étude que nous avons publiée en 1889 dans le Bulletin de l'Association des anciens élèves de l'École des Mines : *Étude sur la mesure des températures élevées dans l'Industrie et sur le pyromètre thermo-électrique Le Chatelier*. (Librairie centrale des sciences, quai des Grands Augustins, 17.)

l'or (1045°) ou du cuivre (1084), et d'y rapporter toutes les déviations observées lorsque le couple est porté dans l'enceinte dont on veut mesurer la température (4). Nous n'insisterons donc ici que sur les précautions à prendre pour présenter le couple au point dont on veut mesurer la température.

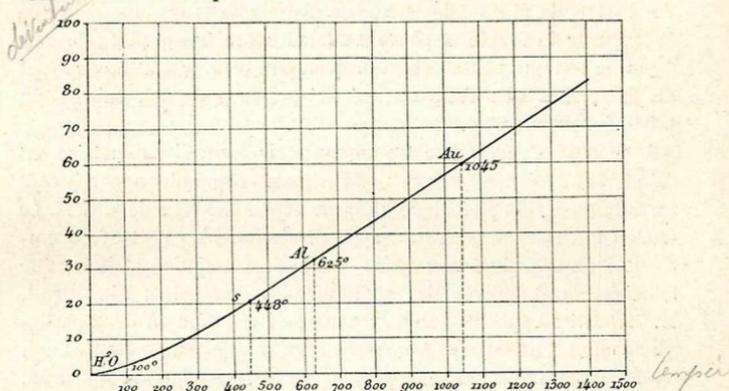


FIG. 1.

Lorsqu'il s'agit d'une enceinte à température modérée (800° par exemple), on introduit la canne en fer par un orifice convenablement disposé, on achève de fermer cet orifice par un tampon d'argile, pour éviter l'accès de l'air, et on laisse le couple en place aussi longtemps qu'il est nécessaire pour faire l'observation, mais sans

(4) Les degrés relatifs à l'ébullition de l'eau et à celle du soufre s'obtiennent immédiatement en plongeant la soudure du couple dans ces liquides à ébullition : la fixité du galvanomètre est alors absolue, et la lecture facile. Les seules déterminations un peu délicates sont celles qui correspondent aux fusions de métaux. Dans ce cas, on entoure la soudure du couple d'un certain nombre de spires du fil de métal choisi, or ou aluminium, et on la plonge dans un creuset contenant une substance mauvaise conductrice de la chaleur (magnésie calcinée), puis on chauffe sur un four soufflé (four Leclerc et Forquignon, par exemple); on suit le déplacement du galvanomètre et au moment de la fusion, par suite de la chaleur latente, on observe un petit temps d'arrêt suivi d'un saut d'une ou deux divisions, qui donne exactement le point de fusion. Avec un peu d'habitude, on arrive à faire la graduation, sans ces précautions, sur un simple bec Bunsen, en suivant la fusion de l'or sur le couple et faisant signe à un second observateur qui regarde le galvanomètre.

OUTILLAGE NÉCESSAIRE A L'ÉTUDE D'UN FOUR 113

cependant le placer à demeure pour ne pas détériorer les fils de platine.

Quand la température est très élevée 1500° ou 1800°, on ne peut laisser la canne en fer dans le four, car elle se déforme et fond ; deux moyens s'offrent alors : introduire le couple par la voute du four, les fils se soutenant eux-mêmes, et les laisser à demeure, en les protégeant contre l'action des flammes par une enveloppe isolante imperméable au gaz (tube de porcelaine) ; ou bien entrer la canne dans le four pendant un temps assez court pour qu'elle ne puisse se déformer ou fondre, mais suffisant pour que le couple, dont l'extrémité doit dépasser la canne de quelques centimètres, prenne son équilibre. Cette dernière méthode est très facile dans les enceintes qui sont en *refoulement* c'est-à-dire à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique ; dans ce cas, en effet, le refroidissement par le petit orifice servant à l'introduction de la canne est insignifiant. Mais, dans les fours en aspiration (fours céramiques) l'ouverture d'un orifice même très étroit provoque un courant d'air qui peut parfois nuire au four et qui, suivant la canne, arrive jusqu'à la soudure, et fausse les indications ; il faut, dans ce cas, pourvoir l'orifice d'observation d'un bouchon que l'on retire au moment même de la mesure, puis avoir une motte d'argile grasse pour boucher hermétiquement cet orifice, dès que la canne est introduite à la profondeur convenable ; on laisse la canne environ 10 secondes (7 secondes suffisent pour que l'équilibre s'établisse) et on la retire aussitôt sans lui laisser le temps de se déformer.

Grâce à ces précautions, on peut aisément explorer toutes les parties d'un four.

§ 3. **Analyses de gaz.** — Les analyses de gaz nécessaires à l'établissement d'un bilan de four doivent se faire dans les usines, sur place ; le dosage de l'eau qui en est une partie indispensable, ne peut, en effet, se faire qu'au four même ; quant aux gaz, ils sont assez difficilement transportables et, d'ailleurs, leur solubilité partielle dans l'eau conseille d'éviter les transports et transvasements.

Si l'on tient compte enfin du fait établi par l'expérience de qui-

conque en a fait l'essai, que le contrôle et la surveillance des fours ne peuvent se faire efficacement que par des analyses de gaz, on admettra avec nous que toute usine possédant des fours de quelque importance, n'eût-elle pas de laboratoire et de service chimique, doit se mettre en état de faire couramment des analyses de gaz.

Il est donc très utile de connaître un matériel commode, bien que d'une exactitude suffisante, comblant ce desideratum, et nous croyons nécessaire de décrire avec quelques détails celui qui nous paraît le plus simple et dont nous nous sommes servi pour nos études expérimentales de fours.

1^o DOSAGE DE L'EAU. — Il serait à peine besoin de décrire, tant sa simplicité est grande, le dispositif à employer pour doser la vapeur d'eau contenue dans les gaz, si le dosage n'avait presque toujours été négligé dans les études expérimentales de fours, ce qui leur ôte en général la moitié de leur intérêt.

On introduit dans l'enceinte contenant le gaz à étudier un tube de fer ou de cuivre, et on lute pour éviter les rentrées d'air ; à la suite de ce tube on place deux tubes absorbants à acide sulfurique et à ponce sulfurique, puis un aspirateur à écoulement d'eau constitué par un vase de Mariotte, de façon que la prise d'essai se fasse sous une dépression constante et représente bien la composition moyenne du gaz pendant le temps d'aspiration ; entre l'aspirateur et les tubes absorbants on place un vase desséchant destiné à retenir l'humidité de l'aspirateur ; enfin il faut placer l'ensemble de cette installation assez près du four pour qu'il n'y ait pas condensation anticipée dans le tube collecteur qu'il sera d'ailleurs prudent de chauffer avec une lampe à alcool à la fin de l'opération. On mesure exactement le volume de gaz qui a traversé les tubes absorbants, en pesant l'eau écoulée de l'aspirateur et la teneur en eau est donnée par l'augmentation de poids des absorbants.

2^o PRISE D'ESSAI. — Le gaz ainsi recueilli dans l'aspirateur pourra servir à continuer l'analyse et c'est même la meilleure méthode de prise d'échantillon, puisqu'elle porte sur un temps aussi long que l'on veut. Il peut cependant être parfois plus commode d'employer une

OUTILLAGE NÉCESSAIRE A L'ÉTUDE D'UN FOUR 115

méthode rapide, et si l'on ne veut pas doser l'eau, il est commode de se servir d'une poire en caoutchouc d'un demi-litre, que l'on met en

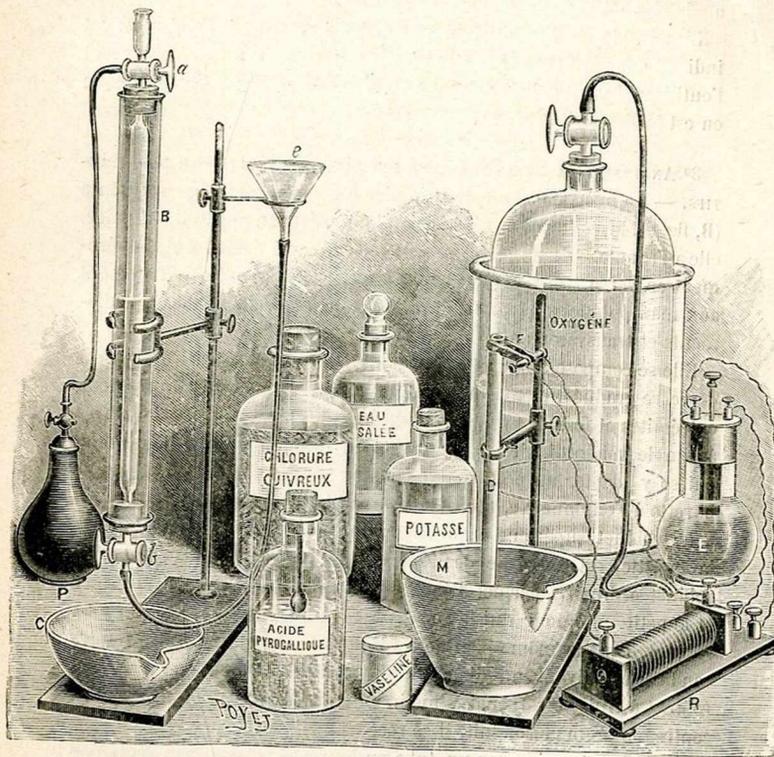


FIG. 2. — Outillage industriel des analyses de gaz.

communication avec le tube de prise de gaz, et que l'on vide plusieurs fois pour chasser complètement l'air.

La prise d'essai étant faite, l'analyse des gaz comporte deux étapes : dosage des éléments immédiatement absorbables par des réactifs

appropriés, dosage de ceux qui ne le deviennent qu'après combustion par l'oxygène, en d'autres termes, analyse à la burette d'absorption et analyses eudiométriques.

L'ensemble de l'installation nécessaire à cette série de dosages est indiqué dans la figure ci-contre où nous avons tenu à représenter tout l'outillage industriel d'analyses de gaz, pour mieux montrer quelle en est la simplicité (fig. 2).

3^o ANALYSE A LA BURETTE BÜNTE DES GAZ ABSORBABLES PAR DES RÉACTIFS. — La burette d'absorption la plus commode est la burette Bünte (B, fig. 2). Plus simple et plus économique qu'aucun appareil similaire, elle a l'avantage de ne pas exiger de caoutchouc à demeure et, entièrement en verre, d'être toujours prête à servir ; elle se prête parfaitement aux manipulations de gaz : aspirations et prises d'échantillons, refoulements et transvasements.

Elle se compose essentiellement d'une cloche à gaz, sorte d'éprouvette de verre graduée, d'environ 50 centimètres de long, effilée à ses deux extrémités et fermée par deux robinets *a*, *b*. Le robinet inférieur *b* est à simple voie ordinaire, terminé par un tube assez étroit pour qu'on puisse y adapter un petit caoutchouc, au moyen duquel on reliera la burette à l'entonnoir *e*, toutes les fois qu'il sera nécessaire (1).

Le robinet supérieur *a* qui constitue l'organe le plus ingénieux de la burette, est percé de deux conduits, l'un, identique à celui d'un robinet ordinaire, permet d'établir la communication entre la cloche et le petit entonnoir qui la surmonte ; l'autre, s'insère sur le fût du robinet, dans le même plan de révolution (*a*, *b* fig. 3) que le premier conduit et suivant un diamètre perpendiculaire (comme dans un robinet à trois voies) ; mais s'inclinant aussitôt de façon à ne pas rencontrer le premier conduit, il se recourbe suivant l'axe de rotation du robinet et se termine par un tube prolongeant cet axe, sur lequel on peut adapter un tuyau de caoutchouc. Grâce à cette seconde voie, on peut établir la communication entre l'extérieur, la poire P ou tout autre réservoir contenant le gaz à analyser et la cloche graduée

(1) Dans la figure, nous avons dû représenter les caoutchoucs adaptés à la burette mais pendant l'analyse on doit évidemment les enlever.

OUTILLAGE NÉCESSAIRE A L'ÉTUDE D'UN FOUR 117

de la burette; on peut encore mettre en communication l'entonnoir de la burette et le tuyau de caoutchouc adapté au robinet supérieur; on peut enfin, en inclinant à 45° la tête du robinet, fermer les deux conduites et intercepter toute communication.

Pour faire une analyse, on commencera par remplir d'eau salée (1) la cloche à gaz, en élevant l'entonnoir *e* au-dessus du robinet supérieur *a*, et en y versant le liquide, qui chasse l'air et remplit la cloche et une partie de l'entonnoir de la burette.

On adapte alors au robinet *a* un caoutchouc, et on le remplit d'eau salée, ce qui est facile, en tournant la clef de façon que le conduit

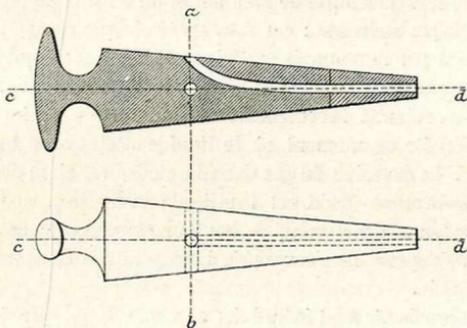


FIG. 3.

courbe du robinet mette en communication l'entonnoir et le tuyau de caoutchouc; puis, on ajuste ce dernier au réservoir où se trouve le gaz, poire ou aspirateur. Tournant alors de 180° le robinet *a*, on établit la communication entre le tuyau de caoutchouc et la burette, et ouvrant le robinet *b*, on abaisse l'entonnoir *e* suffisamment pour que le gaz soit aspiré et remplisse la burette jusqu'à une division convenablement choisie, voisine du 0 de la graduation.

La burette étant remplie, on ferme les deux robinets, on ôte les deux tuyaux de caoutchouc, et l'on fait la lecture précise du volume

(1) Toutes les manipulations de gaz doivent se faire avec de l'eau salée qui dissout beaucoup moins les gaz que l'eau pure.

de gaz introduit. Cette lecture, ainsi que toutes celles qui se feront au cours de l'analyse, doit se faire dans des conditions de température de pression et de tension de vapeur précises; et si ces données sont maintenues invariables dans tout le cours de l'analyse, les lectures de volumes se feront sans aucune correction; c'est ce qui rend l'usage de la burette très pratique pour des analyses rapides. L'égalité de température est assurée, en effet, par un manchon de verre plein d'eau qui protège contre l'échauffement dû aux mains de l'opérateur ou provoqué par la formation du carbonate de potasse; on peut encore l'obtenir en plongeant la burette, avant chaque lecture, dans une cuve à eau profonde. L'invariabilité de pression et de tension de vapeur est assurée de la façon suivante: on fait, après chaque absorption, un lavage en versant par l'entonnoir supérieur de l'eau salée qui reflue et fait écouler par le robinet *b* le réactif; lorsque cet entonnoir est presque vide, on ralentit l'écoulement en tournant le robinet inférieur *b* et on l'arrête au moment où le liquide atteint en *a* un point de repère fixe. La pression du gaz dans la cloche est alors égale à la pression atmosphérique (qu'il est inutile de connaître), augmentée d'une petite colonne d'eau salée de hauteur connue et constante et de la tension de vapeur de l'eau salée à température constante; elle est donc invariable.

Les réactifs absorbants sont introduits successivement par le petit entonnoir en ouvrant d'abord le robinet *a* puis le robinet inférieur; le gaz est lavé et brassé par l'écoulement du liquide qui se fait très également le long des parois; il est cependant nécessaire d'agiter la burette pour être sûr d'une absorption complète; on fait ensuite le lavage prescrit à l'eau salée.

Le premier réactif à introduire est la potasse qui absorbe très rapidement l'acide carbonique; puis le pyrogallate de potasse obtenu en versant une cuillerée d'acide pyrogallique dans la dissolution de potasse dans le petit entonnoir *a*. Enfin, on termine par le chlorure cuivreux, qui absorbe l'oxyde de carbone ⁽¹⁾. Cette dernière absorption

(1) Ce réactif se renouvelle indéfiniment en traitant par de l'eau salée légèrement acidulée par l'acide chlorhydrique, la tournure de cuivre, en présence du chlorure cuivreux restant dans le flacon.

OUTILLAGE NÉCESSAIRE A L'ÉTUDE D'UN FOUR 419

se fait plus lentement et exige non seulement une agitation énergique, mais deux additions successives du réactif.

L'ensemble de ces opérations demande à peine un quart d'heure : on peut les faire commodément sur place, au four, et dans ce cas la burette pourra servir à la prise d'échantillon, en la remplissant plusieurs fois de suite pour chasser l'air du tube adducteur. On voit donc de quelle ressource cet appareil sera pour la surveillance régulière des fours.

En vue de l'étude complète du bilan d'un four qui seul nous occupe ici, la burette ne permet d'analyser complètement que les fumées. Elle ne donnera pour les gaz de gazogènes que le rapport $\frac{CO}{CO_2}$ et devra être terminée à l'eudiomètre.

§ 4. *Analyse eudiométrique.* — Cette analyse portera sur le résidu gazeux restant dans la burette après absorption de l'oxygène, de l'oxyde de carbone et de l'acide carbonique, c'est-à-dire sur un mélange d'azote, d'hydrogène et de formène (méthane). Il peut y avoir dans ce résidu des hydrocarbures plus carburés que le méthane, puisqu'il s'en produit dans la distillation de la houille, mais la proportion en est tout à fait négligeable. Il ne faut, en effet, pas perdre de vue que la méthode que nous indiquons s'applique seulement aux analyses de gaz de gazogènes, c'est-à-dire contenant au maximum 5 % d'hydrocarbures : dans ces conditions, si l'on observe que la proportion d'hydrocarbures plus carburés que le méthane n'y est que $\frac{1}{50}$ soit $0,05 \times 0,2$, on comprendra que l'erreur commise, lorsqu'on suppose qu'il n'y a que du formène est négligeable. Cette remarque simplifie l'analyse d'autant plus que le méthane donne naissance par sa combustion à un volume d'acide carbonique égal au sien.

Le matériel suffisant à cette étude se compose d'un eudiomètre de Bunsen ou mieux d'un *eudiomètre de Riban* à fils de platine (D, fig. 2), d'un mortier de porcelaine contenant environ 6 kilogr. de mercure, d'une pile et d'une bobine d'induction permettant de faire passer par le moyen de la pince F une étincelle dans l'eudiomètre (1), d'un réservoir d'oxygène, enfin d'un thermomètre et d'un baromètre.

(1) Ou de tout autre appareil permettant la production d'une étincelle électrique, électrophore, machine électrique, etc.

On commence par mélanger le gaz à analyser avec un volume d'oxygène suffisant à assurer la combustion complète du gaz, d'après sa composition approchée qui, dans l'industrie, est presque toujours connue ($1/2$ volume d'oxygène pour la combustion de l'hydrogène et 2 volumes d'oxygène pour celle du formène). Il est commode de faire ce mélange dans la burette de Bunte qui se prête très bien à l'introduction et à l'exacte mesure du volume d'oxygène introduit, ainsi qu'au brassage de ces gaz comburant et combustible très nécessaire à l'inflammation lorsqu'on est près de la limite d'inflammabilité (1).

Après avoir rempli l'eudiomètre de mercure et l'avoir renversé sur la cuve on y transvase le mélange de gaz à analyser et d'oxygène. Pour cela on adapte au robinet *a* un tube de caoutchouc que l'on remplit d'eau salée pour le purger d'air, et où l'on chasse ensuite le gaz ; introduisant alors l'extrémité du tube sous l'eudiomètre et levant l'entonnoir on refoule le gaz jusqu'à ce qu'il remplisse environ les trois quarts de l'eudiomètre. On lit le volume et la pression qu'il suffit de mesurer avec une règle graduée placée verticalement. On bouche partiellement l'eudiomètre à l'aide d'un bouchon de liège échancré que l'on appuie fortement, à l'aide du support, contre le fond de la cuvette, et qui empêche la projection du mercure au moment de l'explosion. On fait enfin passer l'étincelle : la combustion se produit plus ou moins vivement et aussitôt après on observe une ascension du mercure résultant de la condensation de l'eau. On laisse refroidir, ce qui exige une dizaine de minutes à l'air mais peut s'obtenir immédiatement en plongeant l'eudiomètre à l'aide d'une cuiller à long manche dans une cuve à eau profonde ; on fait une seconde lecture de volume et de pression.

Enfin on introduit un fragment de potasse (potasse en cylindres) qui s'élevant au-dessus du mercure, se dissout dans la petite quantité d'eau inévitablement entraînée dans les manipulations de gaz et absorbe l'acide carbonique. Cette absorption sera facilitée en agitant l'eudiomètre solidement maintenu entre la main gauche et le pouce de la main droite ; mais cette agitation demande quelque précaution

(1) Si l'on est au-dessous de la limite d'inflammabilité on devra ajouter une quantité mesurée d'hydrogène.

pour éviter toute rentrée de gaz dans l'eudiomètre qui se trouve forcément en dépression, elle n'est pas indispensable. On fait alors une troisième lecture de volume et de pression.

Les trois lectures ainsi opérées suffisent à déterminer les deux rapports donnant les volumes relatifs des trois gaz, par la résolution de deux équations du premier degré. Le calcul est d'ailleurs simplifié encore par l'égalité de volume du formène et de l'acide carbonique produit.

On ramène tous les volumes à 0 et à 760° ce qui exige la connaissance de la température extérieure et de la pression atmosphérique, en tenant compte de la tension de vapeur d'eau. La deuxième contraction C_2 , différence entre les volumes 2 et 3, donne immédiatement la teneur en formène; la première contraction C_1 représente la disparition de l'oxygène nécessaire à la combustion du formène soit deux fois le volume de ce dernier, et la disparition de l'hydrogène et du demi-volume d'oxygène nécessaire à sa combustion. On en déduira immédiatement la proportion d'hydrogène :

$$C_1 = 2CH^4 + \frac{3}{2} H^2.$$

Toutes ces opérations ne demandent pas plus de trois quarts d'heure, en tenant compte du temps nécessaire au refroidissement. Elles n'ont évidemment pas la précision des méthodes de Bunsen et de Winckler, mais elles permettent des dosages avec une approximation de ⁽¹⁾ 1/100 toujours suffisante en industrie. Elles n'exigent — c'est là, rappelons-le, le mobile qui les a inspirées — qu'un matériel très simple, facile à constituer dans n'importe quelle usine.

(1) Avec un eudiomètre de Riban de 20 centimètres de hauteur utile, si l'on suppose une erreur de lecture de 1 millimètre sur les volumes, et de 2 millimètres, soit 2/100 sur les hauteurs de mercure, et si l'on admet encore que les erreurs s'ajoutent, on a, pour le formène une erreur relative de 1/2 % et pour l'hydrogène une erreur maximum de 1 %.



CHAPITRE X

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UN FOUR. BILAN D'UTILISATION DE LA CHALEUR.

La recherche expérimentale du bilan d'utilisation de la chaleur dans un four consiste à déterminer le rapport de la chaleur utilisée, c'est-à-dire consommée dans le four (laboratoire) à la chaleur totale disponible, et accessoirement les valeurs des diverses pertes de chaleur par rayonnement, par les fumées, etc., enfin la quantité de chaleur effectivement récupérée.

L'utilité de semblables études est évidente : elles permettent seules de déterminer exactement la valeur d'un four et, si l'on constate que le rendement en est défectueux, de diagnostiquer la cause de ce défaut. Elles sont, pour les fours, l'équivalent des études aussi nombreuses que complètes sur les moteurs à vapeur qui ont tant contribué à en hater le progrès et à en assurer la bonne marche.

Malgré cet intérêt, il n'a été fait que très rarement de bilans complets de fours ce qui rend très difficile la comparaison entre les différents systèmes de fours applicables à une même industrie, et laisse planer sur ces questions de chauffage une incertitude très contraire au progrès. Il serait très désirable que l'exemple donné par les Ingénieurs s'occupant de machines à vapeur fût suivi par ceux que peut intéresser l'économie de combustible dans les fours.

Nous venons de montrer que l'outillage nécessaire à ces études est simple et pratique; il nous reste à montrer que l'étude elle-même ne présente pas de difficulté, en l'appliquant à un cas choisi parmi les plus complexes que l'industrie puisse présenter, par exemple celui d'un four Siemens à double récupération à gaz mixte, brûlant de la houille imparfaitement, avec résidu d'escarbilles.

§ 1. Programme de bilans d'utilisation de la chaleur dans un four.
— Bilan en partie double. — Bilan en partie simple. — Le bilan d'utilisation de la chaleur dans un four comporte les déterminations suivantes :

- 1° Chaleur utilisée c'est-à-dire consommée dans le laboratoire;
- 2° Chaleur perdue par les fumées;
- 3° Chaleur perdue dans les gazogènes par conductibilité ou rayonnement;
- 4° Chaleur perdue par le rayonnement des chambres de récupération.

La somme de ces quatre quantités de chaleur, lorsque l'on donne aux divers organes des fours les limites précises que nous leur avons assignées, comprenant tout le four depuis la grille jusqu'à la cheminée, doit évidemment être égale à la chaleur totale disponible, c'est-à-dire produite par la combustion de la houille. Il s'ensuit que l'une d'elles pourra être déterminée par différence pourvu que les autres soient mesurées d'une façon précise : c'est ainsi que l'on pourra apprécier avec exactitude la *perte par rayonnement des chambres* qui échappe à toute mesure directe, en raison de la double action qu'y éprouvent les gaz, échauffements ou refroidissements par les empilages et refroidissement par les parois;

5° Une cinquième donnée fort utile à la critique d'un four bien que ne faisant plus partie du bilan est la *quantité de chaleur effectivement récupérée* par le passage des gaz dans les chambres. Elle pourra être exactement calculée en fonction des compositions des gaz et de leurs températures et, rapportée à la chaleur utilisée dans le four, donnera le seul élément de comparaison un peu rigoureux entre les systèmes de récupération différents.

Si l'on veut établir le bilan d'un four par une méthode absolument rigoureuse c'est-à-dire comportant des vérifications des principales mesures, en un mot dresser une véritable *comptabilité en partie double de la chaleur utilisée et perdue*, il faudra, outre les analyses de gaz et les mesures de température faire des mesures exactes des consommations de houille et d'eau qui permettront de contrôler par un

calcul synthétique les analyses de gaz (1). Dans ce cas il faudra faire l'expérience pendant un temps suffisamment long pour que les pesées d'eau et de houille soient faites avec précision, et les prises de gaz devront être convenablement dirigées et espacées de façon que les chiffres d'analyse représentent bien la composition moyenne pendant la période totale de l'expérience. Enfin les analyses de houille devront porter sur une prise d'échantillon faite sur la houille qu'on brûlera pendant l'expérience. Une durée de 24 heures pour l'établissement du bilan en partie double est nécessaire (2).

Cette méthode qui a l'avantage de donner des indications précises sur les consommations d'un four correspondant à une marche donnée, est malheureusement un peu longue et délicate; elle exige une présence à peu près ininterrompue de vingt-quatre heures au four. Mais elle n'est généralement pas indispensable, et dans la plupart des cas un bilan basé uniquement sur des analyses chimiques et indépendant des chiffres de consommation, suffira à résoudre le problème expérimental que nous nous sommes posé; il pourra s'effectuer en quelques heures mais ne donnera que les rapports des chaleurs perdues ou utilisées. C'est cette seconde méthode que nous désignons sous le nom de *bilan simple* et dont nous donnons un exemple détaillé.

§ 2. Données expérimentales concernant un four Siemens à double récupération, à gaz mixte. — Les données expérimentales nécessaires à l'étude du rendement et des pertes de chaleur dans un four sont les suivantes :

1° COMPOSITION DU COMBUSTIBLE. ANALYSE ORGANIQUE ET POUVOIR CALORIFIQUE DE LA HOUILLE. ESCARBILLES. — Ces déterminations effectuées

(1) C'est par cette méthode que nous avons fait le bilan de four Siemens de verrerie dont nous avons donné les résultats dans les *Annales des Mines*. L'expérience avait été poursuivie pendant une période de 36 heures pendant lesquelles on avait pesé l'eau et la houille. Ce dosage nous a permis, non seulement de contrôler quelques-unes des analyses de gaz, mais encore de suppléer à un chiffre que l'analyse faite au laboratoire avait omis.

(2) Le dosage rigoureux de la consommation de l'eau pendant un temps limité peut présenter des difficultés aussi bien quand le gazogène est alimenté par une chaudière que lorsqu'il reçoit l'eau liquide dans le cendrier. L'évaluation exacte de la consommation de charbon pendant un temps limité est elle-même impossible, en raison des variations de niveau du combustible dans le gazogène. Voilà pourquoi la durée minimum de 24 heures est indispensable.



par les méthodes indiquées doivent être faites sur une prise d'essai très soignée, car les gros morceaux de houille ont souvent une composition différente de celle des menus; l'échantillonnage sera fait sur une ou deux tonnes de tout-venant dont on cassera les gros.

Dans le bilan de notre four à double récupération, nous brûlerons une houille à gazogène dont la composition est la suivante (1).

Carbone.	82,5
Hydrogène	5
Azote.	1,2
Oxygène	6
Cendres.	4,1
Eau hygroskopique.	1,2
	100,0
	8210 calories.

Dans la plupart des fours, la combustion de la houille n'est pas complète, et il se forme des escarbilles; le carbone entrant avec les cendres et l'eau dans la composition de ces escarbilles échappe évidemment à la combustion et devra être retranché de la houille. On le fera aisément en pesant pendant un temps quelconque suffisamment long, le charbon brûlé, les escarbilles produites, et en analysant ces dernières.

Prenons pour notre bilan les chiffres suivants :

Consommation de houille : 14500 kilogr. (en 36 heures).

Production d'escarbilles : 3500 kilogr.

Composition des escarbilles	}	Eau.	28
		Carbone.	40
		Cendres.	32

Le carbone de la houille = 14500 × 82,5 = 11960

Le carbone des escarbilles = 3500 × 40 = 1400

Le carbone de la houille échappant à la combustion est donc égal

(1) Tous les chiffres que nous donnons ici sont empruntés à des études expérimentales faites dans l'industrie; mais elles n'ont pas toutes été faites en même temps ni sur le même four; le bilan que nous donnons est donc un exemple numérique destiné à servir de modèle à des calculs analogues, non une étude réelle de four.

aux $^{140}/_{4198}$ du carbone contenu dans la houille, d'où l'on déduit la composition suivante par kilogramme :

Carbone brûlé.	728
Carbone échappant à la combustion	97
Hydrogène	50
Azote	12
Oxygène	69
Cendres.	41
Eau hygroscopique.	12
	<hr/>
	1000
	<hr/>

Le pouvoir calorifique devra être diminué de la chaleur de combustion du carbone des escarilles soit $\frac{97 \times 97,6}{12} = 788$;

$$P = 8210 - 788 = 7422.$$

Rapportons ce pouvoir calorifique au carbone brûlé dans la houille, nous avons pour une molécule (12^s)

$$\frac{7422 \times 12}{72,8} = 122 \text{ calories.}$$

c'est-à dire que la combustion de cette molécule correspond à un dégagement de 122 calories provenant tant du carbone que de l'hydrogène.

Il est utile de rapporter ainsi à la molécule de charbon brûlé, non seulement la chaleur totale disponible, mais toutes les quantités de chaleur mises en jeu dans le four, et toutes les analyses de gaz. En effet, le carbone n'étant introduit dans le four que par le combustible (si l'on néglige l'acide carbonique de l'air) c'est ce corps qui convient le mieux comme terme de comparaison (1) : le dosage du carbone dans un gaz permettra seul de calculer le poids de combustible correspondant à un volume donné de gaz et, par conséquent de

(1) Il peut arriver qu'il y ait apport de carbone par la matière mise en œuvre dans le four : c'est le cas des fours à bassin de verrerie, où les matières premières dégagent de l'acide carbonique qui entre dans la circulation du four. Il faudra évidemment en tenir compte, par un calcul analogue à celui qui a fait intervenir les escarilles dans notre bilan ; il suffira de connaître les poids de houille brûlée et de matières premières (de composition connue) correspondants pendant un temps donné.

calculer le rapport de la puissance calorifique contenue dans ce gaz à la chaleur totale disponible ; d'autre part comme les chaleurs d'échauffement sont toutes données pour les volumes moléculaires, c'est la molécule (12^{es}) qui sera commodément prise pour unité.

2° ANALYSES DE GAZ. — Les deux analyses à faire, sont celles du gaz de gazogènes et celle des fumées.

L'une et l'autre doivent être faites sur des prises d'essai suffisamment prolongées pour bien donner la composition moyenne. Pour les fumées on recueillera le gaz pendant deux périodes d'inversion, c'est-à-dire entre deux états identiques du four : si les inversions se font toutes les heures, la prise de fumées et le dosage de l'eau se feront en deux heures. Pour le gaz, on se basera sur le chargement des gazogènes : la composition du gaz varie en effet au moment des charges, qui amènent un abondant dégagement d'hydrocarbures : on devra donc faire la prise d'essai et le dosage de l'eau pendant un cycle complet de chargement des gazogènes, en ayant soin de placer le tube de prise d'essai sur le collecteur commun à tous les gazogènes et non sur l'un de ces appareils.

Les analyses ainsi conduites pour notre bilan ont donné les résultats suivants exprimés en volumes.

1° Gaz des gazogènes:

CO ²	5,2	} 100
CO	20,3	
H ²	13,2	
CH ⁴	3,1	
Az ²	58,2	
Eau		2,5
		<u>102,5</u>

Rapportons cette composition à la molécule de carbone, en admettant que, dans l'analyse précédente, l'unité soit le volume moléculaire. Les chiffres de CO² et CO correspondent à un nombre de molécules de carbone égal à leur volume, mais le formène CH⁴ a un volume double de la molécule de carbone. Il s'ensuit que les 100 volumes de notre

gaz sec ou les 102,5 volumes du même gaz humide correspondent à un chiffre de carbone brûlé exprimé en molécules par :

$$5,2 + 20,3 + \frac{3,1}{2} = 29 \text{ molécules.}$$

CO² CO CH⁴

chaque molécule correspondant nous l'avons vu à un dégagement de 122 calories.

2° *Fumées.*

CO ²	14,3	}	100
Az ²	84		
O ²	8,7		
Eau			8,7
			108,7

En prenant toujours pour unité ce volume moléculaire, on voit que, comme ci-dessus, tous les chiffres d'analyse doivent être rapportés à 14,3 molécules de carbone, chacune de ces molécules correspondant au dégagement de 122 calories.

3° MESURES DE TEMPÉRATURES. — Les points où il est utile de prendre la température, sont les suivants :

1° *A la sortie du gazogène*, c'est-à-dire à la valve d'inversion ou à la cloche. La température y est très constante, et une seule mesure suffira.

Cette température dans notre bilan est 600° (1);

2° *A l'entrée dans le four*, dans les lunettes d'arrivée de l'air et du gaz. En ces points, la température peut changer, au cours d'une période d'inversion; elle peut, même accidentellement, différer d'une lunette à une autre; il sera donc utile de prendre plusieurs mesures espacées de quart d'heure en quart d'heure pour avoir la température moyenne.

(1) Les chiffres que nous donnons pour le bilan, sont un peu différents de ceux que nous avons effectivement observés en industrie. Il était préférable, pour que le lecteur pût facilement suivre le calcul, de prendre des températures pour lesquelles les chaleurs d'échauffement ont été calculées dans le barème, p. 11. Les différences sont, d'ailleurs, très faibles.



Des expériences, ainsi conduites nous ont montré que ces écarts atteignent 50°, et nous permettent de prendre 1200° pour notre bilan, en supposant égales les températures d'admission de l'air et du gaz.

3° *Dans le four.* — Une seule mesure est suffisante, s'il s'agit d'un four à travail continu, car la température de régime y est invariable.

Nous la prendrons égale à 1500°, un peu supérieure à celle que nous avons observée en verrerie.

4° *A la cheminée.* — La cheminée commençant aux deux valves d'inversion de l'air et du gaz, c'est en ces points que la température est prise : elle devra l'être dans les deux carneaux sortant des deux chambres, et plusieurs fois pendant l'intervalle entre deux inversions.

Lorsque les carneaux se rendant des valves à la base de la cheminée de tirage sont courts, on pourra se contenter d'une seule mesure représentant la température du mélange des deux courants gazeux. C'est ainsi que nous avons opéré pour faire la mesure de température qui nous permet d'adopter 400° à la cheminée pour le calcul de notre bilan.

Ces quatre déterminations suffisent, mais il pourra être utile de mesurer encore la température dans le gazogène au-dessus du combustible, pour calculer la perte de chaleur dans les carneaux et, s'il y a lieu, par l'effet du siphon : on pourra de même explorer la cheminée en différents points.

Ces mesures sont si rapides et faciles, lorsque le pyromètre est installé avec un fil assez long, qu'il est très utile de les multiplier pour bien étudier un four.

§ 3. **Calculs du bilan simple de four Siemens à gaz mixte.** — Au moyen des données expérimentales qui précèdent, il est facile de calculer le bilan du four à double récupération à gaz mixte, que nous avons pris comme exemple.

On sait que la chaleur totale disponible, par suite de la combustion d'un poids de houille correspondant à une molécule (12g) de carbone est 122 calories.

Cherchons, d'abord, la quantité de chaleur sensible ou latente con-

130 ÉTUDE PRATIQUE DE L'UTILISATION DE LA CHALEUR

tenue à 600°, température à la sortie du gazogène, dans un volume de gaz correspondant à cette unité de carbone (12^g) brûlé.

Le calcul est résumé dans le tableau ci-dessous :

Calcul de la puissance calorifique du gaz à sa sortie du gazogène.

GAZ	COMPOSITION	CHALEUR SENSIBLE A 600°		CHALEUR LATENTE	
		par volume	DANS	par volume	DANS
		moléculaire	LE GAZ	moléculaire	LE GAZ
CO ²	5,2	6,4	32,2	—	—
CO	20,3	4,3	87,3	68,2	1 384
H ²	13,2	4,3	56,7	58,2	768
CH ⁴	3,4	8,0	24,8	195,2	545
Az ²	58,2	4,3	250,3	—	—
H ² O	2,5	5,8	14,5	—	—
			466,8		2 667
Chaleur totale.				3 134	
Puissance calorifique par molécule de carbone brûlé.				$\frac{3\ 134}{29}$	= 108

De ce calcul on déduit immédiatement la réponse à la première partie de notre problème, c'est-à-dire la valeur de la quantité de *chaleur perdue* par rayonnement ou conductibilité dans le gazogène :

$$P_y = \frac{122^{\text{cal}} - 108^{\text{cal}}}{122} = \frac{14}{122} = 11,5\ \text{\%};$$

2° Proposons-nous maintenant de déterminer la quantité de chaleur utilisée dans le four, en calculant, d'une part, la puissance calorifique apportée par le gaz et l'air nécessaire à sa combustion à 1 200°, d'autre part, la chaleur emportée par les fumées s'échappant à la température de régime 1 500°.

La chaleur apportée par le gaz à 1 200° calculée exactement comme ci-dessus donne 3 670 calories, et par molécule de carbone $\frac{3\ 670}{29}$ = 126 calories.

Le volume d'air nécessaire à la combustion du gaz, en tenant compte

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UN FOUR

131

de l'excès d'air, se déduit aisément de l'analyse des fumées et de l'analyse du gaz (1).

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Pour } 20,3 \text{ CO} & = & 10,1 \text{ O}^2 + 40,6 \text{ Az}^2 \\
 - 13,2 \text{ H}^2 & = & 6,6 \text{ O}^2 + 26,4 \text{ Az}^2 \\
 - 3,1 \text{ CH}^2 & = & 6,2 \text{ O}^2 + 24,8 \text{ Az}^2 \\
 \text{Excès d'air: } \left(1,7 \times \frac{29}{14,3}\right) & = & 3,5 \text{ O}^2 + 14 \text{ Az}^2 \\
 \hline
 & & \underbrace{26,2 \quad 105,8}_{132}
 \end{array}$$

et la chaleur sensible apportée par cet air est, à 1 200° de 1 188 calories ou par molécule de charbon brûlé : $\frac{1188}{29} = 41$.

En additionnant les deux apports de calories, on trouve pour 100 volumes de gaz de gazogène sec : $3670 + 1188 = 4858$ calories et par molécule de carbone : $126 + 41 = 167$ calories, chiffre très supérieur, on le voit, à la puissance calorifique disponible dans la houille.

L'excédent : $\frac{167 - 122}{122} = 37\%$, auquel il conviendrait encore d'ajouter les 11,5 calories perdues dans le gazogène donne la mesure de l'effet de la récupération; ces 48^{cal} 5 sont reprises sur les fumées qui sans la récupération les emporteraient à la cheminée.

La quantité de chaleur sortant du laboratoire du four emporté par les fumées qui s'en échappent à la température de régime de 1 500° se calculera de la même manière en fonction de la composition en volume et des chaleurs d'échauffement.

Composition.		Chaleur d'échauffement à 1 500°.		Produit en calories.	
CO ²	14,3	×	21,4	=	305
O	1,7	}	×		
Az ²	84				
Eau	8,7	×	18,9	=	164
TOTAL					<u>1 454</u>

(1) Rappelons l'analyse des fumées :

CO² = 14,3
Az² = 84
O = 1,7
Eau = 8,7

132 ÉTUDE PRATIQUE DE L'UTILISATION DE LA CHALEUR

Rapportons ce chiffre de calories aux molécules de carbone :

$$\frac{1454}{14,3} = 101 \text{ calories.}$$

La différence entre la chaleur apportée au laboratoire par l'air et le gaz chauds et celle emportée du laboratoire par les fumées donnera la chaleur utilisée :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Chaleur utilisée par} \\ \text{Molécule de carbone brûlé :} \end{array} \right\} 167 - 101 = 66 \text{ calories.}$$

$$\text{Chaleur utilisée \%} = \frac{66}{122} = 54 \text{ \%};$$

3° Calculons enfin la chaleur perdue par les fumées s'échappant dans la cheminée et dans l'atmosphère à 400°.

Composition.	Échauffement à 400°.			
CO ² :	14,3	×	4,0	= 57,2
O ² + Az ² :	85,7	×	2,8	= 239,9
Eau :	8,7	×	3,7	= 32,2
			TOTAL	<u>329,3</u>
Chaleur perdue par molécule de carbone . .			$\frac{329}{14,3}$	= 23
Chaleur perdue %			$\frac{23}{122}$	= 18,8;

4° Bilan.

Nous arrivons ainsi au bilan suivant :

Chaleur perdue dans le gazogène	11,5
Chaleur utilisée.	54
Chaleur perdue par les fumées	18,8
Chaleur perdue par refroidissement des chambres de récupération (par différence).	15,7
TOTAL	<u>100,0</u>

CHAPITRE XI

DISCUSSION DE LA THÉORIE DE LA RÉCUPÉRATION

D'APRÈS LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES CONCERNANT LES FOURS.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET CLASSEMENT.

Il résulte de l'étude pratique que nous venons d'exposer qu'il peut y avoir entre le rendement théorique d'un four et son rendement industriel un écart assez sensible : ainsi le four à double récupération à gaz mixte qui nous avait donné en théorie une utilisation de la chaleur de 85 % n'a plus en pratique qu'un rendement de 54 %. Les pertes par rayonnement du gazogène et des chambres de récupération, la combustion anticipée du carbone dans le gazogène, et, en général, toutes les conditions de la pratique en contradiction avec les hypothèses que nous avons dû faire pour notre théorie mathématique ont une influence sensible sur le rendement.

Aussi, pour conserver à cette théorie toute sa portée, et aux conclusions que nous en avons tirées toute leur valeur, est-il nécessaire de reprendre les hypothèses et de montrer que, bien que modifiant la valeur absolue des chiffres de rendement calculé, elles n'en altèrent que peu les valeurs relatives et ne peuvent pas, du moins, intervertir le classement.

Observons d'abord, avant toute discussion de détail, que le tableau que nous avons donné, indiquant les rendements maxima des différents systèmes, tous ces chiffres sont des limites dont les fours tendront à se rapprocher de plus en plus à mesure que progresseront la construction des fours et les solutions du problème d'utilisation de la chaleur. Notre classement est donc un classement limite dont les

divers systèmes de fours tendront à se rapprocher de plus en plus, et qui, à supposer qu'il ne soit pas tout à fait exact de nos jours, le deviendra certainement dans l'avenir. De ce fait seul, il nous semblerait présenter de l'intérêt.

Mais il y a mieux, car en repassant en revue nos hypothèses, nous constaterons aisément que l'ordre de classement ne saurait être interverti, pourvu que les fours soient construits dans des conditions analogues au point de vue du groupement des appareils et des surfaces de refroidissement (1).

1) La première hypothèse (2), *gazéification complète du carbone en oxyde de carbone*, est loin d'être réalisée : il y a presque toujours 5 % d'acide carbonique contre 20 à 22 % d'oxyde de carbone. Cette combustion anticipée nuit évidemment au rendement en augmentant l'air primaire et élevant la température du gaz, double effet qui tend à nuire à la récupération. Mais si l'on ne tient pas compte du léger accroissement de rayonnement du gazogène résultant de l'élévation de température du gaz, accroissement tout à fait négligeable puisque le rayonnement total est d'environ 10 %, il est facile de voir que cette combustion anticipée ne peut modifier le classement. On peut, en effet, considérer que les fours marchant avec 5 % d'acide carbonique aux gazogènes fonctionnent pour $\frac{1}{5}$ comme des fours à chauffage direct, et pour $\frac{4}{5}$ suivant les rendements que nous avons calculés : les différences entre les rendements seront donc modifiées proportionnellement dans le rapport de 4:5, l'ordre de classement ne sera en rien altéré.

2) Une seconde hypothèse est relative à l'invariabilité du régime dans les gazogènes, chambres de récupérations et laboratoires : or, dans les fours continus, les chambres subissent des oscillations de 50° du début

(1) Il est bien évident que deux fours construits dans des conditions très différentes, à ces points de vue pourront présenter des anomalies : un four à simple récupération, bien condensé aura un rendement supérieur à un four à quatre chambres. On pourra dans un four Siemens nouvelle disposition, constater une consommation de houille moindre que dans un four ancien type, dont les surfaces de refroidissement seraient considérables. Ceci ne saurait, en aucune manière, porter échec à notre théorie et modifier nos conclusions.

(2) Voir page 44 les hypothèses ayant servi de base à la théorie.

à la fin d'une inversion. Ces différences, qui ne portent que sur les chaleurs sensibles des gaz entrant dans le four, sont négligeables.

3) Le refroidissement du gazogène que nous avons négligé par une troisième hypothèse a une importance plus grande; nous l'avons trouvé de 10 %. Mais pour un même mode de gazéification, et si les gazogènes fonctionnent de même, cette perte de chaleur sera une constante qui ne changera pas le classement; et si l'on passe du gaz à l'air au gaz à l'eau, le refroidissement sera moindre dans le dernier cas que dans le premier, ce sera un avantage à ajouter aux autres au profit du gaz à l'eau. Cet avantage ne fera qu'accroître les différences indiquées par la théorie dans le même sens que la récupération et accentuer le classement.

4) Il reste les deux hypothèses les plus importantes et le plus en contradiction avec la pratique: celle relatives au rayonnement des chambres de récupération et celle qui suppose complet l'échange de calories entre les gaz froids et les fumées chaudes. L'expérience nous a montré que le refroidissement des chambres peut atteindre 20 % et que l'écart de température entre les gaz brûlés et les gaz combustibles peut être de 300° pour une température de régime de 1500°, qu'enfin malgré cet écart qui réduit de plus de $\frac{1}{5}$ l'effet de la récupération, la chaleur récupérée est encore de 40 à 50 %; chiffres qui sont loin d'être négligeables et qu'il importe de discuter. Pour en apprécier l'influence sur les rendements, remarquons que ces deux causes d'erreurs sont l'une et l'autre liées à l'existence de l'appareil de récupération, et si nous montrons qu'elles sont, en outre, fonctions proportionnelles de la récupération même, c'est-à-dire de la chaleur reprise aux fumées dans le récupérateur, nous aurons, par-là, prouvé qu'elles agissent sur les rendements proportionnellement à ces rendements mêmes et ne peuvent modifier le classement.

Or, les volumes ou plutôt les surfaces utiles des chambres de récupération doivent être calculées en raison des échanges de calories qui doivent s'y produire, d'après les chaleurs spécifiques des briques de récupération; ces chambres seront donc d'autant plus grandes et donneront lieu à un rayonnement d'autant plus considérable que la récupération sera plus parfaite; il y a donc, dans une certaine mesure,

proportionnalité entre les pertes par refroidissement des chambres et la chaleur récupérée.

L'écart entre les gaz et les fumées, que l'on peut appeler le *déchet à la récupération*, aura la même influence proportionnelle; ce déchet ne se produit, en effet, que sur les gaz qui prennent part à la récupération; il entraînera une perte de calories d'autant plus grande que la masse de gaz passant dans le récupérateur sera plus considérable, que le rendement sera plus élevé.

Cette proportionnalité serait rigoureusement vraie si la récupération ne portait que sur l'air; dans les récupérateurs à gaz, où le corps récupérant est à température élevée, le rayonnement et le déchet à la récupération auront une importance plus grande; mais ici encore les différences croîtront avec la température initiale du gaz, le gaz à l'eau sera plus avantageux que tout autre système, ce qui ne fait qu'accentuer notre classement.

Il resterait encore à apprécier l'influence de la nature du combustible sur le rendement. Nous avons admis que ce combustible était du carbone: ceci, en vérité, n'est pas une hypothèse, car bien des fours fonctionnent avec du coke. Il est clair que l'on pourrait refaire tous les calculs de rendement en prenant pour combustible l'hydrogène et le formène; mais ces corps existent en si faible proportion par rapport au carbone dans les houilles, que les calculs ne présentent pas d'intérêt. Il nous suffira de constater ici que l'existence de ces corps, qui enrichissent singulièrement les combustibles, agira en sens inverse de la combustion anticipée dans le gazogène, en contre-balancera l'effet et, par suite, pourra rapprocher le classement réel du classement théorique sans jamais, en tous cas, en intervertir l'ordre.

Il nous est permis, après cette discussion, d'affirmer que le classement des fours, basé sur leur rendement calculé, est bien d'accord avec la réalité industrielle et pourra servir de guide sûr dans les études et constructions de fours. Sans doute, la pratique industrielle pourra fournir quelques exceptions apparentes à ces lois; sans doute, un mauvais four à double récupération pourra consommer plus de combustible pour une opération donnée qu'un bon four à simple

récupération, mais il est impossible et il n'est pas légitime d'en déduire aucune conclusion concernant la supériorité du second système sur le premier.

Les seules objections que l'on puisse prendre en considération sont celles qui seraient tirées de bilans complets qui permettent seuls une critique raisonnée d'un système de chauffage (1).

Nous ne croyons pas qu'il ait été fait jusqu'ici un nombre de bilans suffisants pour contrôler expérimentalement la théorie de la récupération, mais il serait très utile au progrès de la question de chauffage que de telles études devinssent plus fréquentes; elles constitueraient un ensemble de documents expérimentaux très profitables aux industriels et qui, rapprochés des chiffres indiscutables de la théorie, permettraient de juger en toute connaissance de cause la question des fours.

A défaut de ces résultats d'expériences, le meilleur guide sera le calcul théorique des rendements, d'autant que la discussion qui précède n'a fait qu'en confirmer la valeur.

Nous croyons donc pouvoir conclure :

1° En affirmant de nouveau la valeur pratique du tableau des rendements (p. 100), sous réserve des interprétations que nous lui avons données;

2° En signalant une fois de plus les deux résultats qui nous semblent le plus intéressants; — la supériorité actuelle des fours à double récupération à gaz mixte dans le cas de chauffage à température élevée — l'intérêt que présente le perfectionnement des gazogènes à haute température, qui seuls permettront, quel que soit d'ailleurs, le mode

(1) Nous insistons d'autant plus sur la nécessité de ces bilans complets, avec analyse de gaz et mesures de températures, que les constructeurs de fours ne s'en préoccupent jamais. La seule donnée qui les intéresse est le rapport des poids de charbon brûlé et de métal fondu dans le four. Cette donnée, intéressante évidemment pour les industriels est tout à fait insuffisante pour juger le rendement d'un four, surtout lorsqu'elle n'est pas jointe à des indications sur les dimensions des appareils et la durée des opérations. Dans l'étude d'ensemble qui nous occupe nous n'attachons aucune importance à ces chiffres de consommation mal définis, et n'avons pas jugé intéressant de reproduire les quelques données que les constructeurs nous avaient fournies en faveur de leurs fours et qui ne jetaient aucune lumière sur les questions controversées.

de gazéification, d'obtenir avec un récupérateur plus simple des rendements supérieurs aux rendements actuels.

La première de ces indications concerne l'état actuel de l'industrie ; la seconde est une indication d'avenir qui pourra peut être diriger le progrès, qui montre en tout cas que, bien que la théorie des rendements maxima soit établie de façon définitive et invariable, les rendements industriels sont encore sujets à variation, et que le classement actuel des fours pourra être modifié dans l'avenir, suivant le progrès incessant de la science du chauffage.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE.	Pages. 1
------------------	-------------

PREMIÈRE PARTIE

Théorie de la récupération.

CHAPITRE PREMIER.

Données scientifiques nécessaires à l'étude des phénomènes de combustion.	6
§ 1. Chaleurs de combustion et pouvoirs calorifiques.	6
§ 2. Chaleurs d'échauffement et chaleurs spécifiques des gaz	7
§ 3. Températures de combustion	10
Équation générale donnant la température de combustion	12
Combustion de l'hydrogène dans l'air froid	13
Combustion du carbone.	14
Cas général	15
§ 4. Dissociation	17
Dissociation de l'oxyde de carbone.	18

CHAPITRE II.

Progrès de la question du chauffage dans l'industrie depuis l'origine des fours à gaz. — Classification des différents systèmes de fours à gaz	19
§ 1. Origine et développement rapide des fours à gaz	19
§ 2. Description et rôle des organes essentiels des fours à gaz	23
§ 3. Modifications et perfectionnements apportés depuis l'origine, aux différents organes des fours à gaz	25
1° Gazogènes.	25
2° Organes de récupération	29
3° Four proprement dit ou laboratoire	30

CHAPITRE III.

	Pages.
Objet de la théorie de la récupération. — Équation fondamentale de l'utilisation de la chaleur. — Données, hypothèses, principes généraux . . .	32
§ 1. Exposé du problème. — Influence de la température sur l'utilisation de la chaleur dans les fours	32
§ 2. Définition des expressions : chaleur utilisée, chaleur perdue, rendement. — Équation de l'utilisation de la chaleur.	35
§ 3. Principes fondamentaux dominant l'étude de l'utilisation de la chaleur dans les fours.	37
A. Principes relatifs à la combustion et à la chaleur totale disponible	38
B. Rôle de la vapeur d'eau dans les fours à gaz. — Autres auxiliaires de la gazéification	40
C. Principes relatifs à la récupération	43
§ 4. Hypothèses servant de base à la théorie mathématique de la combustion dans les fours à gaz à récupération. — Choix de la méthode de calcul du rendement	44

CHAPITRE IV.

Fours à chauffage direct sans gazogènes. — Chaudières à vapeur	49
§ 1. Caractères des fours à chauffage direct	49
§ 2. Calcul de la chaleur perdue par les fumées P à toutes températures, dans le cas théorique de combustion sans excès d'air	51
§ 3. Cas des fours suivis de chaudières à vapeur. — Calcul de la chaleur perdue P dans un four à puddler	55
§ 4. Chaudières à vapeur. — Calcul de la chaleur perdue P dans le cas de combustion avec grand excès d'air	57

CHAPITRE V.

Premier groupe de fours à gaz. — Gaz à l'air. — Fours à récupération à oxyde de carbone ou à gaz Siemens.	65
§ 1. Réactions de combustion	65
§ 2. Premier cas : Récupération par l'air secondaire seul.	66
§ 3. Deuxième cas : Double récupération par l'air secondaire et le gaz	71
§ 4. Troisième cas : Double récupération par l'air primaire et l'air secondaire.	73



TABLE DES MATIÈRES

141

• CHAPITRE VI.

	Pages.
Deuxième groupe de fours à gaz. — Gaz à l'eau, gaz mixte	77
§ 1. Réactions de combustion	77
§ 2. Premier cas : Simple récupération par l'air secondaire.	79
§ 3. Deuxième cas : Double récupération par l'air secondaire et le gaz.	82
§ 4. Troisième cas : Double récupération par l'air total, primaire et secondaire.	85
§ 5. Quatrième cas : Triple récupération	88

CHAPITRE VII.

Fours à retour des fumées. — Nouveau four Siemens, alimentation des gazogènes par l'acide carbonique.	92
§ 1. Réactions de combustion, caractères généraux.	92
§ 2. Premier cas : Alimentation des gazogènes par de l'acide carbonique exempt d'azote et chaud.	93
§ 3. Deuxième cas : Alimentation du gazogène par les fumées. — Nouveau four Siemens	94

CHAPITRE VIII.

Résumé et conclusions. — Classement des fours.	99
Annexe. — Températures de combustion des principaux gaz et combustibles industriels	104

DEUXIÈME PARTIE

Étude pratique et expérimentale de l'utilisation de la chaleur dans les fours.	108
---	------------

CHAPITRE IX.

Outillage nécessaire à l'étude expérimentale et à la surveillance des fours.	109
§ 1. Détermination de la puissance calorifique disponible	109
§ 2. Mesure des températures	110
§ 3. Analyses de gaz	113
1° Dosage de l'eau	114
2° Prise d'essai	114
3° Analyse à la burette Bünte des gaz absorbables par des réactifs	116
4° Analyse eudiométrique.	119

CHAPITRE X.

	Pages.
Étude expérimentale d'un four. Bilan d'utilisation de la chaleur	122
§ 1. Programme de bilans d'utilisation de la chaleur dans un four.	
Bilan en partie double, bilan simple	123
§ 2. Données expérimentales concernant un four Siemens à double récupération à gaz mixte	124
1° Composition du combustible. Analyse organique et pouvoir calorifique de la houille. Escarbilles	124
2° Analyses de gaz	127
3° Mesures de températures.	128
§ 3. Calculs du bilan	129

CHAPITRE XI.

Discussion de la théorie de la récupération d'après les données expé- rimentales concernant les fours. — Conclusions générales et classement.	133
--	-----



E. DAMOUR
—
LE
CHAUFFAGE
INDUSTRIEL