

excès d'air, combustion incomplète, ont pour conséquence un rendement peu satisfaisant.

Malgré ce mauvais rendement, les fours à grille sans récupération sont encore assez répandus, à cause de leur simplicité et de l'économie de leur construction.

Les vieux fours à pots de verrerie, la plupart des réverbères de la métallurgie des métaux autres que le fer, les fours à alandiers pour porcelaine et faïence, les mouffes, les fours à recuire le laiton ou le verre, les fours à cornues des petites usines à gaz, etc. sont sans récupération.

Même certains fours perfectionnés à grille profonde constituant un véritable gazogène, et où l'on obtient une flamme plus chaude par un chauffage préalable de l'air, tels que les fours Bicheroux en métallurgie, les fours Boëtius et leurs dérivés en verrerie et cristallerie, ne sont encore que des fours sans récupération à chauffage direct dégageant les fumées directement dans l'atmosphère.

Dans la métallurgie du fer, les fours à puddler et à réchauffer sont aussi à chauffage direct, mais on y accole toujours des chaudières à vapeur, excellents organes de récupération, et, à ce titre, ils méritent une étude spéciale.

Enfin, les chaudières à vapeur forment la classe la plus nombreuse de ce groupe.

Il est juste de remarquer que, si tous ces fours sont dénués de récupérateurs par les gaz, ils ne sont pas tous dépourvus de tout organe d'utilisation des chaleurs perdues. Sans parler de ceux qui, comme les fours à puddler, sont munis de chaudières à vapeur, beaucoup de fours à réverbères sont à plusieurs compartiments de température décroissante, chaque échelon utilisant la chaleur perdue du précédent; les fours de cuisson céramique ont de même le *globe* où la première cuisson pour biscuit se fait à une température de régime inférieure à celle de la cuisson pour émail.

Grâce à ces artifices, le rendement peut être amélioré et devenir parfois très satisfaisant.

Dans l'étude des fours à combustion directe qui va suivre, nous nous proposons de calculer l'utilisation de la chaleur à toutes températures, d'abord dans le cas d'une combustion neutre sans excès d'air, puis pour des compositions de fumées avec excès d'air variant dans les limites que présente l'industrie (25 p. 100, 50 p. 100, 100 p. 100, 150 p. 100 d'air en excès) le combustible étant supposé du carbone ou du coke.



prussienne est construit de façon à n'envoyer les fumées à la cheminée qu'à très basse température.

Au contraire, la perte de chaleur est totale et l'utilisation nulle, à partir de la température de combustion du carbone à l'air froid, que nous savons être de 2040°.

A l'aide des cinq points ainsi calculés, nous pouvons tracer la courbe de l'utilisation de la chaleur en fonction de la température.

L'équation de cette courbe parabolique qui se déduit immédiatement des chaleurs d'échauffement et de leur formule est la suivante :

$$\frac{P}{Q} = 5 \times 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + [4 \times 0,6 + 3,7] \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$$

conduisant à la courbe suivante

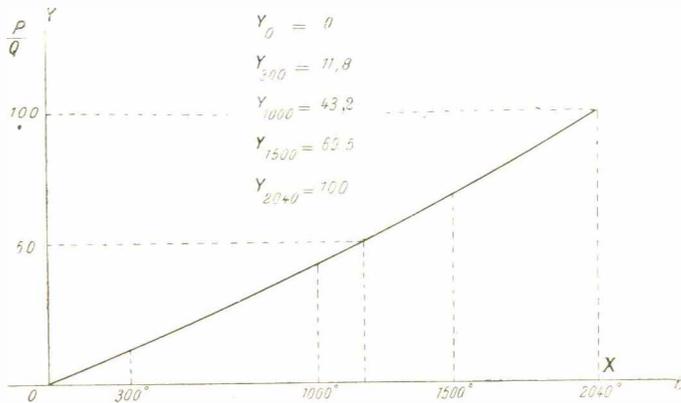


Fig. 18. — Courbe de l'utilisation de la chaleur dans les fours à chauffage direct dans le cas de combustion neutre.

b) CALCUL DE LA CHALEUR UTILISÉE DANS LE CAS DE COMBUSTION AVEC DES EXCÈS D'AIR CROISSANTS

Examinons les excès d'air de 25, 50, 100, 150 p. 100. Si l'on tient compte de la composition de l'air contenant $\frac{1}{5} O_2$ et $\frac{4}{5} Az_2$, les excès d'air ci-dessus correspondent aux compositions suivantes des fumées :



Tableau de la composition des fumées de carbone.
brûlant avec excès d'air croissant.

AIR EN EXCÈS p. 100.	COMPOSITION MOLÉCULAIRE des fumées.	COMPOSITION CENTÉSIMALE	
		O p. 100.	CO ² p. 100.
25	20 CO ² + 5 O ² + (80 + 20) Az ²	4	16
50	20 CO ² + 10 O ² + 80 + 40 Az ²	8	12
100	20 CO ² + 20 O ² + 80 + 80 Az ²	10	10
150	20 CO ² + 30 O ² + 80 + 120 Az ²	12	8

Ces compositions se rencontrent fréquemment en industrie et il n'est pas rare, même dans des foyers de chaudières bien conduites, de trouver dans les fumées une proportion de 12 p. 100 d'oxygène contre 8 p. 100 d'acide carbonique, correspondant à un excès d'air de 150 p. 100.

Pour calculer la chaleur utilisée aux températures de 300°, 1000°, 1500°, dans ces différentes hypothèses, il suffit de se reporter au tableau ci-dessus, d'ajouter à la chaleur emportée par les fumées neutres la chaleur emportée par l'oxygène et l'azote en excès, soit respectivement, 1,25, 2,50, 5 et 7,50 molécules de gaz parfaits, d'où le nouveau tableau :

	FUMÉES	1.25 g. p.	2.50	5	7.50
300°	11,5	+ 2,62	+ 5,25	+ 10,5	+ 15,75
1 000°	42,1	+ 9,28	+ 19,56	+ 37	+ 56,56
1 500°	67,5	+ 14,5	+ 29		

d'où nous déduisons le tableau des calories emportées par les fumées correspondant à la molécule de carbone :

AIR EN EXCÈS :	25 p. 100	50 p. 100	100 p. 100	150 p. 100
300°	14,12	46,75	22	27,25
1 000°	51,38	71,56	79,1	»
1 500°	82	96,5		

pour une chaleur totale disponible de 97,6. Retranchons ces nombres de la chaleur disponible, et prenons le quotient de ces différences par cette chaleur disponible 97,6, nous aurons toutes les valeurs de $\frac{U}{Q}$ c'est-à-dire du rendement, dans toutes nos hypothèses :



Tableau du rendement dans les fours à chauffage direct, chauffés au coke.

TEMPÉRATURE de régime.	COMBUSTION neutre.	25 P. 100 air en excès.	50 P. 100 air en excès.	100 P. 100 air en excès.	150 P. 100 air en excès.
15°	100	100	100	100	100
300°	88,2	85,5	81,9	77,5	72,1
1 000°	56,8	47,3	36,9	18,9	0
1 500°	30,5	16,0	1,1	0	0

Au moyen de ce tableau, on peut tracer quatre courbes qui donneront l'utilisation de la chaleur à toutes températures pour les compositions de fumées que nous avons choisies : on peut également tracer des courbes isothermes qui montreront l'influence du réglage de la combustion à différentes températures.

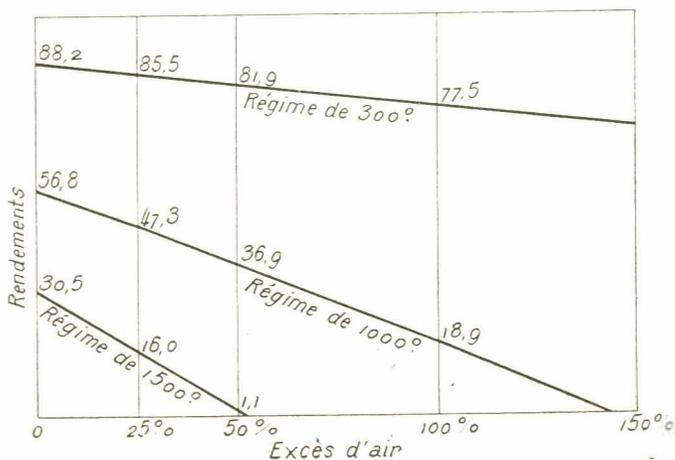


Fig. 19. — Graphique des rendements dans les fours à chauffage direct.

L'étude que nous venons de faire comporte de nombreux enseignements tant pour la température de combustion que pour les rendements et permet, au moins qualitativement, de mettre au point la question de la récupération, c'est-à-dire de l'économie dans les fours que notre prochain chapitre abordera.

Si nous suivons d'abord la courbe de la combustion neutre (fig. 7, p 83), nous retrouvons, à 2040°, la limite d'emploi des fours à chauff-



fage direct. Au delà de cette température, l'emploi des foyers à grille est évidemment impossible, à moins que l'on ne chauffe préalablement l'air par un dispositif quelconque, soit la récupération, soit un système utilisant le rayonnement d'une partie du laboratoire, comme dans le four Bieheroux, soit un appareil de chauffage d'air indépendant du four.

A 1500°, le rendement est acceptable, atteignant 30 p. 100, c'est à peu près (1450°) la température de régime des fours de verrerie : c'est ce qui explique que la verrerie ait conservé si longtemps ses vieux fours à creusets à grille dont on rencontre encore quelques spécimens. Mais il est bon de constater par une théorie rigoureuse que lorsque les constructeurs de fours à gaz promettaient une économie de 60 p. 100 sur le combustible, dans cette industrie, cette promesse était loin d'être excessive, d'autant que si la combustion n'est pas parfaitement réglée, et s'il y a par exemple seulement 5 p. 100 d'oxygène dans les fumées, la température de combustion descend à 1650° et le rendement tombe à 16 p. 100.

A 1000°, il atteint 56,8 p. 100 et cette utilisation relativement bonne explique comment toutes les industries qui gravitent autour de cette température ont tant de peine à abandonner les vieux fours : petites usines à gaz avec leurs fours à cornue, métallurgie avec les fours Bieheroux, gobeletteries et cristalleries avec les fours Boëtius, industrie céramique avec les mouffles, etc. Il reste cependant encore une économie de plus du tiers à réaliser, ce qui n'est certes pas négligeable.

Il est juste de reconnaître que de nombreuses applications ont été faites dans ce domaine des industries à 1000° : fours à gaz d'éclairage, fours à cuivre, et même fours céramiques. Mais le chauffage au gaz avec récupération a encore bien des places à gagner, et nous pensons qu'avec les progrès incessants dans la construction des gazogènes, l'agencement des fours et la science de les conduire, il pourrait avec avantage, et sans grand risque, supplanter partout le chauffage direct. C'est même actuellement, selon nous, le but le plus intéressant à poursuivre pour les ingénieurs et constructeurs, aujourd'hui que le problème des grands fours à très haute température est résolu.

A partir de 500° l'utilisation de la chaleur devient satisfaisante et l'opportunité de la récupération devient douteuse. Sans condamner absolument les tentatives faites dans ce domaine, rappelons que tous les essais faits pour appliquer le système Siemens au chauffage des chaudières à vapeur sont restés sans résultats.



§ 2. — ÉTUDE DES FOURS A CHAUFFAGE DIRECT, A PLUSIEURS LABORATOIRES ET PLUSIEURS RÉGIMES

Le tableau et le graphique permettent encore de faire l'étude de cette seconde catégorie de notre classification des laboratoires, le cas des fours comportant deux laboratoires à températures différentes,

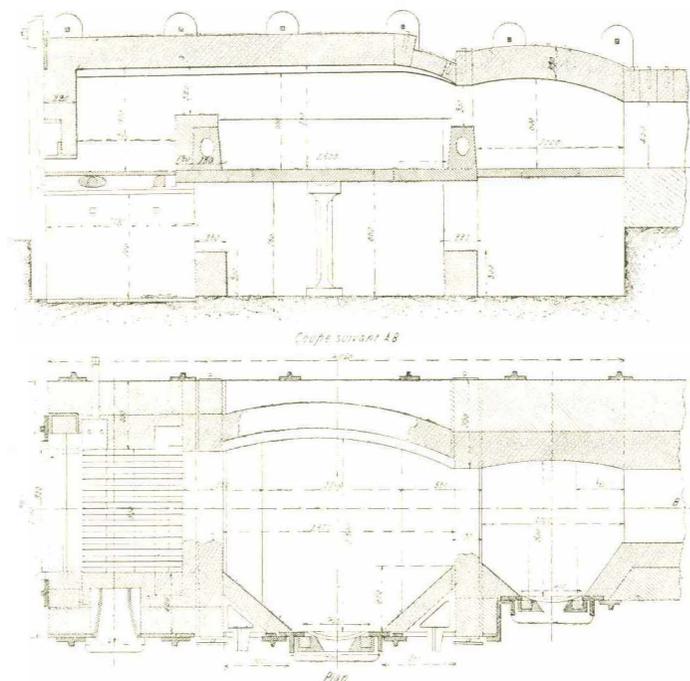


Fig. 20. — Four à puddler.

et en particulier le cas du four à puddler ou à réchauffer suivi de chaudière.

Dans les forges, la nécessité d'avoir une force motrice considérable a depuis longtemps conduit à accoler à ces fours des chaudières à vapeur faisant corps avec eux et utilisant les chaleurs perdues. Ces chaudières actionnant le plus souvent des machines fixes à condensation n'ont pas besoin d'être à très haute pression, ni, par conséquent, à très haute température : on est maître de leur donner les formes et les surfaces de chauffe fournissant le meilleur rendement, on ne peut jamais leur donner une marche forcée, puisque la conduite du feu est subordonnée au puddlage ; le foyer de la chaudière



constitué par tout le four à puddler est assez grand pour assurer la combustion sans grand excès d'air. Il y a là un ensemble de conditions très avantageuses spéciales aux fours métallurgiques suivis de chaudières, et qui permettent de présumer que l'utilisation de la chaleur doit y être très complète. Il est intéressant d'en préciser la valeur.

En se reportant au tableau de rendement, il est aisé de voir que la chaleur cédée au four à puddler supposé à la température de $1\ 500^{\circ}$ est celle qui est contenue dans les fumées au delà de cette température, c'est-à-dire 30,5 p. 100 si la combustion est neutre, et 16,0 p. 100 s'il y a excès d'air de 25 p. 100. La quantité de chaleur cédée à la chaudière sera au contraire la chaleur d'échauffement entre 300° , température de régime à la sortie de la chaudière, et $1\ 500^{\circ}$, température d'admission à la suite du four à puddler.

Dans le cas de la combustion neutre, la chaudière absorbera donc $88,2 - 30,5 = 57,7$ p. 100 des calories disponibles; avec l'excès d'air de 25 p. 100, la chaudière recueillera $85,5 - 16 = 69,5$ p. 100 et le bilan du four à puddler s'établit comme suit :

Chaleur absorbée par le puddlage.	30,5	ou	16	p. 100
— — — la chaudière	57,7	69	—	
— perdue.	11,8	14,3	—	
	<u>100</u>	<u>100</u>		

Ces chiffres montrent combien est efficace l'emploi des chaudières au bout du four; elles assurent, quelle que soit la conduite plus ou moins bonne du feu, une utilisation de la chaleur d'au moins 85 p. 100, c'est un rendement total supérieur à ce que donnent bien des systèmes perfectionnés de récupération.

Il n'y a donc pas lieu dans les forges de substituer aux fours à puddler anciens suivis de chaudières des fours plus perfectionnés, au seul point de vue du chauffage; les fours à récupération ne réalisent pas une grande économie de combustible.



C. — DE L'OBTENTION DES TRÈS HAUTES TEMPÉRATURES

L'obtention des hautes températures n'est pas théoriquement limitée à des températures aussi basses que celles que les exemples précédemment calculés nous ont données. On peut en effet imaginer des fours dans lesquels le gaz combustible et l'air servant à la combustion soient portés à des températures de plus en plus élevées ; cette conception est d'autant plus légitime que dans les fours à récupération la température des gaz et de l'air avant combustion suit la température de régime et s'élève avec elle. La dissociation n'est même pas un obstacle absolu à la température, puisque l'oxyde de carbone ne se décompose pas en $\text{CO}^2 + \text{C}$ au delà de $1\,000^\circ$ et ne se dissocie en $\text{C} + \text{O}$ qu'à des températures très élevées, $3\,000$ à $4\,000^\circ$.

Mais, aux hautes températures, dans les fours à combustion par l'air, la dilatation des gaz est telle que la masse des gaz traversant un laboratoire va décroissant assez vite ce qui obligerait à accroître les dimensions du four. En même temps le rayonnement du laboratoire croît rapidement avec la température, quelles que soient les méthodes employées pour protéger les fours contre ces pertes et malgré les matériaux employés.

Il y a donc une limite pratique infranchissable aux températures développées, et, de fait, on n'a jamais pu dépasser la température de $2\,000^\circ$ dans les fours où le comburant est l'air atmosphérique.

Cependant, les hautes températures développées dans le four électrique et les remarquables résultats industriels qu'on y a obtenus ont amené peu à peu à envisager comme industrielles des températures auxquelles la technique ancienne ne songeait même pas.

Pour atteindre ce but, la première condition était de diminuer le volume du laboratoire et en même temps d'augmenter ce que l'on peut appeler la concentration des calories.

Le premier moyen qui se présentait à l'esprit dans cette voie était la suppression de l'azote, corps inerte et nuisible dans toutes les combustions, et la réalisation s'en trouvait facilitée par l'abaissement



du prix de l'oxygène devenu un sous-produit de la fabrication de l'azote et un produit dérivé de l'air liquide fabriqué lui-même à l'aide de la houille blanche. De là les applications industrielles du chalumeau à oxygène, chalumeau oxyhydrique ou oxyacétylénique et le procédé qu'on a désigné du nom générique de *soudure autogène*.

En même temps le four électrique se perfectionnait et atteignait des dimensions énormes, réalisant des fusions de plusieurs tonnes d'acier ou la fabrication de plusieurs tonnes de carbure de calcium.

Enfin, on songeait à utiliser des sources d'énergie chimique puissantes, où l'air atmosphérique n'avait plus à intervenir, et où l'oxygène était emprunté à un composé du corps à préparer, la réaction se faisant dans un laboratoire réduit au volume strictement nécessaire au chargement des matières en œuvre. De là l'*aluminothermie*.

Ces trois méthodes sont celles qui, à l'heure actuelle, permettent d'obtenir les plus hautes températures que la Science comme l'Industrie aient encore réalisées.

§ 1. — ALUMINOTHERMIE

Le principe de l'aluminothermie¹ consiste essentiellement dans l'utilisation de la chaleur dégagée par la combustion de l'aluminium et la formation de l'alumine pour produire la réduction de certains oxydes métalliques et la fusion concomitante du métal obtenu. Il en résulte que, dans ce procédé, le combustible est constitué par l'aluminium jouant en même temps le rôle de réducteur vis-à-vis des oxydes métalliques en présence desquels il se trouve, — le comburant étant précisément l'oxygène de ces mêmes oxydes.

La formule générale qui représente la réaction — M étant un métal monovalent — est la suivante :



La chaleur de combustion de l'aluminium (rapportée au kilogramme) vient au troisième rang :

Hydrogène.	34,200 Cal.
Carbone	8,317 —
Aluminium.	7,140 —

¹ Le paragraphe traitant des procédés d'aluminothermie nous a été donné par le Dr Aug. Perret qui a pratiqué cette nouvelle méthode industrielle principalement dans l'industrie du vanadium pour la fabrication du ferro-vanadium et des alliages vanadiés.



L'aluminium est, cependant, un combustible extrêmement énergétique et un réducteur d'une grande puissance, car on doit dans les réactions chimiques considérer non pas des poids égaux, mais des quantités équivalentes.

La chaleur de formation de l'alumine est de 396,6 Cal. : si Q est la chaleur de formation de l'oxyde M^2O de la formule précédente, la quantité de chaleur dégagée par la réaction est donc égale à 396,6 Cal. — Q, pour 54 grammes d'aluminium employé.

Si la quantité Q est relativement faible, on voit que cette réaction est extrêmement exothermique.

Néanmoins, il faut que l'oxyde du métal à obtenir présente un degré d'oxydation d'autant plus élevé que la quantité de chaleur nécessaire à la fusion est plus grande.

D'autre part, et pour les mêmes raisons, un oxyde est d'autant plus facilement réductible que son degré d'oxydation est plus élevé.

La réaction exothermique est donc constituée par un foyer très particulier brûlant en vase clos, hors de la présence de tout corps gazeux, dans lequel le combustible et le comburant sont tous deux solides.

Le dégagement de chaleur considérable que produit un tel foyer a pour conséquences, d'une part, un allumage très facile, d'autre part, la fusion possible de corps extrêmement réfractaires, de l'alumine en particulier.

Le départ de la réaction ne peut se faire que par l'élévation de la température en un point de la masse ; elle ne saurait être provoquée par la détonation d'une capsule de fulminate ou de tout autre corps de même nature, la réaction aluminothermique, pour très violente qu'elle soit, n'étant pas explosive.

L'allumage peut se faire, soit par un foyer extérieur portant un point de la masse du mélange à une température suffisante pour que l'aluminium puisse s'allumer et que la combustion se propage ainsi dans toute la masse ; elle peut se faire encore, au moyen d'un foyer superficiel, formé par une couche de magnésium pulvérisé, placée à la surface du mélange aluminothermique, soit enfin, au moyen d'une cartouche formée d'un mélange de bioxyde de baryum et d'aluminium porphyrisé.

Suivant que l'on opère la réduction d'un oxyde au laboratoire ou dans l'industrie, l'une ou l'autre de ces méthodes peut être employée de préférence.

La fabrication par exemple, du chrome, du manganèse, des alliages de fer et de vanadium, au laboratoire, peut, de préférence,



utiliser l'allumage au moyen d'un foyer extérieur ou d'une couche de magnésium pulvérisé.

Les réactions industrielles emploient au contraire l'allumage au moyen d'une cartouche.

Si l'on opère avec des quantités un peu importantes de substances, la quantité de chaleur dégagée devient suffisante pour que l'alumine formée puisse entrer en fusion complète.

A une telle température, les métaux sont tous, également, à l'état liquide, de telle sorte que la réaction aluminothermique est surtout avantageuse à employer pour la fabrication des métaux à point de fusion très élevé : chrome, tungstène, molybdène, vanadium.

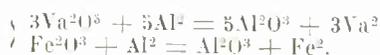
Dans une réaction aluminothermique, le corindon formé vient nager à la surface sous la forme d'une scorie liquide, tandis que le métal obtenu se rassemble dans le fond en un culot métallique.

Cette fusion de l'alumine et cette séparation sont encore heureusement facilitées par ce fait que l'élévation de la température est très rapide alors que les parois du four, toujours très épaisses, ne sont que très peu conductrices de la chaleur.

L'aluminothermie peut être appliquée non seulement à la fabrication de métaux, mais également à celle de certains alliages métalliques. Il faut alors employer un mélange des oxydes des deux métaux qui doivent constituer l'alliage et y incorporer la quantité d'aluminium correspondante à la réduction totale des oxydes.

La fabrication des ferro-chrome, ferro-tungstène, ferro-molybdène, ferro-vanadium peut être ainsi réalisée.

Dans ce dernier cas, par exemple, le mélange employé sera constitué de l'oxyde de fer, de l'anhydride vanadique ou un autre oxyde du vanadium et par de l'aluminium en grenaille :



La plus grande difficulté réside dans la violence de la réaction qui nécessite le fractionnement de l'opération lorsqu'elle doit porter sur une quantité un peu importante de matière.

Le four employé peut être constitué essentiellement par un creuset en terre réfractaire ou en plombagine garni intérieurement d'une brasque en magnésie dont l'épaisseur va en augmentant des bords au fond du creuset. Au-dessus de lui, on dispose un entonnoir de chargement permettant de recevoir à l'avance la moitié du mélange à employer.



L'orifice inférieur de cet entonnoir est fermé par une boule métallique suspendue à une chaîne pouvant être maniée à distance. Un entonnoir renversé sert de hotte et provoque l'évacuation des fumées.

Dans le creuset, on verse la seconde moitié du mélange et on l'enflamme à l'aide d'une cartouche formée par un mélange de peroxyde de baryum et d'aluminium, allumée à l'aide d'un fer rouge.

La réaction s'effectue avec une très grande violence, dégagement de chaleur et de lumière; lorsqu'elle est calmée, on soulève la boule et on laisse tomber le contenu de la trémie. On recueille d'une part l'alliage fabriqué, et de l'autre, le laitier.

§ 2. — TEMPÉRATURES OBTENUES PAR LE FOUR ÉLECTRIQUE¹

La découverte de l'arc voltaïque par Davy avait déjà donné l'idée à quelques savants de se servir de la haute température qu'il fournit pour effectuer certaines expériences, mais ce n'est que lorsque les physiciens possédèrent la dynamo capable de fournir un courant puissant que les recherches se multiplièrent et aboutirent au succès.

Toute une série de fourneaux électriques furent inventés, depuis le brevet Pichon en 1853 jusqu'au four Moissan en 1892, qui fut le véritable début de l'ère pratique.

C'est encore aujourd'hui le four conçu par Moissan qui permet d'atteindre les plus hautes de toutes les températures réalisées : le platine y fond comme la cire à la flamme d'une bougie, les corps réfractaires y sont rapidement fondus et même volatilisés, et l'on peut y couder et y souder sur elle-même une baguette de charbon aussi facilement qu'on le fait d'une baguette de verre à la flamme d'un Bunsen.

L'étude de la température de l'arc électrique a fait l'objet, depuis sa découverte, de beaucoup de recherches. Sa détermination est un problème très complexe car elle varie suivant les différentes parties de l'arc et suivant l'intensité du courant.

En réalité, lorsque l'on examine les spectres des charbons et celui de l'arc, en même temps que l'on fait varier l'intensité du courant, on constate que le spectre du charbon positif ne change pas; le cra-

¹ Le paragraphe 2, comme toute la partie électrique de cet ouvrage, est dû à notre collaborateur M. Jean Carnot.



tère du charbon positif est le siège d'un phénomène physique bien défini qui est l'ébullition du carbone, mais les spectres du charbon négatif et de l'arc changent d'un moment à l'autre et deviennent d'autant plus vifs que l'intensité est plus grande.

Voici les principaux résultats obtenus par différents savants :

Arc électrique, d'après Rosetti	charbon négatif.	3 000°
	— positif.	4 000°
	arc	4 800°
D'après Wilson et Gray		3 400°
D'après Wanner (charbon à mèche).		3 427°
Fery	(loi de Stefan)	3 490°
	(loi de Wien.)	3 897°
Violle (calorimètre).		3 500°
Wanner et Bruyen (pyromètre Wanner).		3 680°
— (pyromètre Holborn et Karlbarnn)		3 690°
— (pyromètre Le Chatelier).		3 720°
Le Chatelier (pyromètre optique).		4 100°

Une application intéressante au point de vue industriel de la haute température réalisée dans l'arc électrique est celle de la soudure électrique.

C'est à Elihu Thomson que l'on doit les premiers essais pratiques de cette application.

Généralement, les soudures de deux métaux homogènes ou hétérogènes sont caractérisées par une augmentation de volume au point de jonction et, par conséquent, par un manque de symétrie qui présente souvent de grands inconvénients.

Elihu Thomson parvint à réaliser des soudures autogènes et en particulier à réunir des fils métalliques bout à bout, sans que l'on puisse s'apercevoir ultérieurement de l'opération.

Sa méthode consistait simplement à rapprocher les parties à réunir et à opérer la fusion nécessaire par le passage d'un courant de grande intensité : au moment du rapprochement il se produit un arc qui fond les extrémités et les soude l'une sur l'autre.

Aujourd'hui ce procédé est employé sur une grande échelle pour la soudure des fils de cuivre et de fer, des tubes de fer, laiton, cuivre et plomb, les lames de scies sans fin, etc.

Pour faciliter l'opération, on met un fondant sur le joint : du borax en poudre pour les métaux dont le point de fusion est élevé, et du chlorure de zinc pour ceux dont le point de fusion est bas.

La soudure est tout à fait homogène et la nature du métal à l'en-



droit du joint est absolument la même que dans toutes les autres parties de la pièce.

Une autre façon d'utiliser la haute température de l'arc, lorsque les deux parties à souder ne peuvent servir de conducteurs, consiste à dévier l'arc au moyen d'un électro-aimant et à diriger son dard comme on le ferait avec celui d'un chalumeau sur le point à chauffer.

C'est ainsi que l'on procède en particulier pour la réparation de certains corps de chaudières en partie corrodés dans la fabrication de la soude.



CHAPITRE III

DE L'ÉCONOMIE DANS LES FOURS

Le problème de l'économie dans les fours se pose en industrie sous une forme généralement moins impérative que celui de l'obtention des hautes températures. Tandis que l'ingénieur chargé du chauffage dans une industrie donnée trouve dans la température très précise qui correspond à la meilleure marche de son laboratoire, un but fixe, une barrière qu'il est obligé de franchir, s'il veut assurer la marche régulière de sa fabrication, son programme au point de vue de l'économie est beaucoup moins précis, tellement incertain parfois que l'on voit des industries, même de celles qui sont vitales et universelles, comme la production de la vapeur en chaudières, se contenter indéfiniment de rendements défectueux, admettant comme infranchissable une certaine moyenne d'observations consacrées par le temps.

Tandis que dans la conduite des fours la négligence dans l'obtention d'une température nécessaire est immédiatement constatée, se traduisant soit, par l'allongement d'une opération dans le cas d'une fusion d'acier se répercutant sur la production de tout l'atelier, soit par une mauvaise qualité du produit dans le cas du verre, matière la plus sensible aux moindres écarts dans le chauffage; tandis que, par suite, l'ingénieur est presque toujours rendu responsable d'un mauvais régime de température de ses fours, l'économie au contraire passe au second plan des préoccupations du chef des fours dont la tendance est invariablement de rejeter la faute sur ses ouvriers et leurs négligences personnelles, sans que le plus souvent il ait soin, sans que parfois il soit capable, d'indiquer le remède, de diagnostiquer la cause d'une surconsommation imprévue de charbon.

L'accroissement des températures de régime dans les laboratoires s'est faite par bonds successifs, d'abord avec le four à gaz à récupé-



ration qui a créé l'industrie de l'acier sur sole, ensuite avec le four électrique qui a fait naître l'électrometallurgie, plus récemment avec l'aluminothermie et les diverses méthodes de soudures autogènes. Chacun de ces progrès correspondant à autant de procédés nouveaux pour lesquels la nouvelle température industriellement acquise était une condition vitale, tous les efforts ont nécessairement tendu au maintien du progrès une fois réalisé dans le domaine des hautes températures.

Au contraire, l'économie, sacrifiée aux autres préoccupations plus pressantes dans les débuts, ne s'introduit qu'à grand-peine, dans la crainte exagérée et souvent fausse que la recherche de l'économie ne nuise à l'obtention certaine du but.

Enfin, cette poursuite de l'économie, est, on le verra une œuvre de patience, de raisonnement et de calcul méthodique beaucoup moins brillante en apparence, dont les résultats ne se font connaître qu'à la longue à la suite d'observations nombreuses et du dépouillement d'une comptabilité, à la fois scientifique et économique, minutieusement tenue.

L'étude de l'économie dans les fours est une véritable comptabilité, et le problème que nous voulons traiter ici et que nous avons déjà résolu dans notre livre *Le chauffage industriel et les fours à gaz* n'est pas autre chose que l'indication des méthodes à suivre tant au point de vue pratique et expérimental pour établir les bilans des fours en marche, qu'au point de vue théorique pour juger les systèmes de chauffage.

Avant d'aborder cette question nous croyons nécessaire de réagir contre l'indifférence à laquelle se heurte en général tout ce qui touche à l'économie dans les fours, et même contre le scepticisme que rencontre trop souvent l'ingénieur qui, muni de sa burette d'analyse de gaz et de son pyromètre, se présente à un chauffeur praticien se proposant simplement d'améliorer la marche de son four¹.

¹ L'affirmation que nous donnons ici de l'indifférence de beaucoup d'industriels à la question d'économie, tant qu'ils ne sont pas pressés par la concurrence, paraîtra peut-être exagérée à plusieurs de nos lecteurs. Qu'il nous soit permis de rappeler que la transformation des fours de verrerie qui réalise une économie de 23 du combustible, a mis trente ans (1867 à 1900) à se parfaire, en glacerie et verrerie à bouteille, et qu'elle n'atteint pas encore la gobeletterie et la cristallerie: qu'en céramique l'utilisation absolue de la chaleur est toujours inférieure à 40 p. 100, n'atteignant souvent que 3 à 4, sans qu'aucun effort vraiment sérieux ait été fait pour sortir de cette ornière: que dans les centrales électriques, industrie nouvelle mais appelée à un avenir colossal, la



Pour plaider la cause de l'économie nous demandons au lecteur de citer seulement trois exemples personnels.

Notre premier bilan de four, celui que nous donnons plus loin comme exemple, fut celui d'un four de verrerie que les Annales des Mines ont publié en 1883, résultant d'une étude complète pendant trente-six heures de la consommation de houille et de toutes les chaleurs utilisées et perdues. Cette étude servit à régler et contrôler périodiquement le four à bassin de Folembray. Or, dans cette verrerie la consommation de houille par tonne de verre ouvré ne dépasse pas 700 kilogrammes de houille. Nous savons que c'est le meilleur résultat qu'on puisse à l'heure actuelle encore obtenir pour la fusion du verre.

Plus récemment une étude de la combustion et un bilan de l'utilisation de la chaleur nous fut demandé dans une chaudière chauffée au pétrole pour contre-torpilleur : le but de cette étude était de régler exactement les conditions d'admission d'air et de pulvérisation de pétrole pour arriver au meilleur rendement en marche normale et en marche forcée. Nous savons que le contre-torpilleur muni de chaudières ainsi réglées avec même coque et même appareil propulseur a obtenu un avantage de plusieurs nœuds sur les concurrents soumis aux mêmes épreuves.

Plus récemment encore le problème de l'incinération des ordures ménagères avec production de vapeur nous fut soumis. Les fours mis à notre disposition étaient pourvus de chaudières Babcock-Wilcox. Nous avons, à l'aide des analyses de gaz, réglé les feux sur les grilles de façon que l'atmosphère des chambres de combustion soit à peu près neutre ou plutôt réductrice, évitant ainsi la perte de calories par excès d'air qui, dans les meilleures chaudières atteint jusqu'à 10 et 15 p. 100 de la chaleur disponible. Nous avons par cette méthode, c'est-à-dire avec notre burette et notre pyromètre, et en faisant accepter nos conseils par les ouvriers chauffeurs avec qui nous avons travaillé assez longtemps pour leur inspirer confiance, obtenu un résultat comme rendement par mètre carré de surface de chauffe (plus de 18 kilogrammes) supérieur à ce que les mêmes chaudières donnent en y brûlant le meilleur charbon ; notre

perte de chaleur résultant de l'excès d'air dans les foyers qui aux heures de pointes peut atteindre 15 et 20 p. 100 est considérée comme un mal nécessaire, sans que jamais à notre connaissance personne ait chiffré l'abaissement de température de combustion et la diminution de rendement considérable qui sont la conséquence de cette marche anti-économique. Dans les industries à températures moyennes les exemples de gaspillage du combustible seraient plus nombreux encore.



combustible était cependant la gadoue, c'est-à-dire le plus mauvais et le plus irrégulier des combustibles actuellement usités en industrie.

Nous avons donné ces trois exemples entre bien d'autres études de fours qu'il nous a été donné de poursuivre parce que chacun d'eux a conduit à un résultat pratique tangible, constaté par des résultats officiels, mais surtout parce que dans les deux derniers cas, la recherche de l'économie nous a conduit à des résultats beaucoup plus intéressants que la moindre dépense de combustible, d'une part une vitesse supérieure d'un navire, d'autre part un rendement de chaudière supérieur au rendement moyen.

Cette observation est générale et nous y trouverons un argument plus convaincant encore que l'amélioration toujours à rechercher du prix de revient, en faveur de l'économie du combustible. En général on peut affirmer que *la marche économique d'un four est toujours accompagnée d'un autre progrès constaté dans le laboratoire soit au point de vue de la régularité, soit au point de vue de la température.*

La preuve la plus éclatante de la vérité de notre affirmation nous a déjà été donnée par le four à aciers Siemens où nous avons déjà constaté que l'économie et la haute température résultaient simultanément de l'idée de régénération sans que l'on puisse dire si le génie de Siemens a poursuivi à l'origine l'un ou l'autre de ces buts.

Et si nous revenons à nos trois exemples, il est aisé de remarquer que, dans le cas du four à bassin, l'économie se traduit par une circulation moins rapide du gaz dans le laboratoire et par suite par un chauffage plus égal à flamme plus dormante très appréciable en verrerie : que dans le cas de la chaudière marine étant données les conditions de limitation stricte de place dans les constructions navales, toute amélioration de la combustion doit se manifester par un accroissement de vitesse : que dans le cas de four à gadoue, la suppression de l'excès d'air a été corrélative, ainsi que nous l'avons vu, de l'augmentation de la température de combustion, d'où l'explication de ce paradoxe apparent consistant à obtenir le maximum de rendement d'une chaudière avec le plus détestable des combustibles.

Un autre argument à faire valoir en faveur des études économiques des fours est la simplicité de l'outillage; nous en avons donné la description dans le chapitre précédent. Nous avons dit et redisons ici que nous n'avons aucune préférence pour tel ou tel appareil : ce



qui importe, c'est que l'ingénieur pratique ces outils de contrôle et sache en interpréter les résultats ¹.

Mais ce qui par dessus tout est nécessaire, c'est la connaissance des gaz de combustion, l'appréciation de leurs volumes, de leurs dilatations, le rapprochement des volumes aux poids, c'est cette arithmétique de la combustion, si simple et si claire avec la formule moléculaire que nous avons adoptée que — nous parlons ici par expérience — un chimiste peut l'acquérir en quelques semaines.

Les considérations qui précèdent prouvent à l'évidence l'utilité de l'étude pratique dans les fours, l'intérêt de ces bilans dont nous avons déjà donné et donnerons encore quelques exemples.

Il nous reste à démontrer l'utilité de l'étude théorique de l'économie, c'est-à-dire de cette théorie de la récupération que les données scientifiques de Berthelot, Mallard et Le Chatelier ont permis de rendre mathématique.

Cette démonstration nous est fournie par l'étude précédemment faite de la combustion dans les fours à chauffage direct, où nous avons pu voir que la chaleur perdue est essentiellement variable dans un four avec sa température de régime et avec l'excès d'air de combustion.

De cette constatation résulte que l'intérêt de la récupération, c'est-à-dire de l'économie, est essentiellement variable, au point d'être presque nul dans un four à basse température, une chaudière à vapeur par exemple, tandis qu'il peut atteindre une valeur de 80 à 95 p. 100 dans les fours à très hautes températures.

Cette vérité évidente a été cependant bien souvent méconnue, surtout au début des fours à gaz, et les mécomptes qui en ont été la conséquence ont certainement contribué à retarder le développement des fours à gaz et de la récupération.

A la suite du prodigieux succès du four Siemens, l'idée que le chauffage au gaz à récupération pouvait réaliser des économies de 40 et 50 p. 100 de combustible, fut tellement exploitée par des constructeurs de fours désireux de placer des appareils, que des industries où ce soi-disant progrès n'était nullement indiqué, par exemple les fours à puddler et à réchauffer suivis de chaudières ou même de simples chaudières, furent pourvus de régénérateurs à inversion, c'est-à-dire du plus coûteux des systèmes de récupération. De là, de grosses dépenses sans profit, de là de gros mécomptes qui atteigni-

¹ Nos préférences vont certainement vers l'appareil de Bunte, suivi s'il y a lieu de l'analyse sur l'eudiomètre à mercure.



rent même quelques industries à température modérée, comme la métallurgie du cuivre.

Les erreurs techniques commises dans ce sens résultaient de deux fautes : la première était la méconnaissance de la *limite de la puissance de récupération* qui est fonction de la chaleur d'échauffement des gaz récupérants dont la masse est limitée ; la seconde était l'oubli de l'influence de la température de régime sur la valeur relative des chaleurs perdues décroissant avec la température.

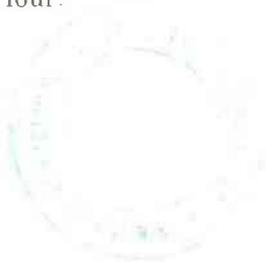
Il était indispensable de réfuter ces deux erreurs, et pour cela la meilleure méthode consistait à établir le maximum de récupération possible avec les divers systèmes de fours existants, dans toutes les hypothèses de gazéification, et à des températures suffisamment nombreuses pour permettre d'extrapoler ou d'interpoler, de façon à connaître toujours et dans chaque cas particulier, le maximum de l'économie à attendre d'un système de four à simple, double ou triple récupération.

En résumé, notre étude de l'économie dans les fours a un double but :

1° Donner la méthode expérimentale de détermination d'un bilan de four permettant à un industriel de connaître exactement la valeur d'un four en marche et de mettre en regard la chaleur utilisée et la chaleur perdue.

2° Donner pour toutes températures et tous systèmes de gazéification le maximum d'utilisation de la chaleur qu'on puisse obtenir d'un système donné de fours.

Le rapprochement de ces deux études, l'une essentiellement pratique et expérimentale, l'autre théorique et mathématique, donnera toujours une mesure exacte du maximum d'économie à attendre d'une transformation de four, évitera les mécomptes que nous avons signalés et servira utilement de guide pour le choix raisonné d'un four.



A. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ÉCONOMIQUE DE LA COMBUSTION DANS LES FOURS. BILANS DE COMBUSTION

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 hâter le progrès et à en assurer la bonne marche.

Malgré cet intérêt, il n'a été fait que très rarement des bilans complets de fours, ce qui rend 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 avons vu précédemment 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 résidus d'escarbilles.

Nous donnerons encore, à titre de second exemple, le bilan d'utilisation des calories dans une chaudière marine chauffée au pétrole.



§ 1. — PROGRAMME DES BILANS D'UTILISATION DE CHALEUR
DANS LES FOURS. BILAN SIMPLE. BILAN EN PARTIE DOUBLE

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, échauffement ou refroidissement 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 gaz¹. Dans ce cas, il faudra

¹ C'est par cette méthode que nous avons fait le bilan de fours Siemens de verrerie dont nous avons donné les résultats dans les *Annales des Mines*. L'expérience avait été poursuivie pendant une période de trente-six heures pendant lesquelles on avait pesé l'eau et la houille. Ce dosage nous a permis, non seulement de contrôler quelques-unes



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'analyses 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 vingt-quatre heures pour l'établissement du bilan en partie double est nécessaire¹.

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 dans l'étude d'une chaudière marine.

§ 2. — DONNÉES EXPÉRIMENTALES CONCERNANT UN FOUR SIEMENS A DOUBLE RÉCUPÉRATION A GAZ MIXTE, ET BILAN

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 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

des analyses de gaz, mais encore de suppléer à un chiffre que l'analyse faite au laboratoire avait omis, enfin de vérifier l'accord de nos analyses avec les lois des équilibres chimiques. Voir page 58.

¹ 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 les gazogènes. Voilà pourquoi la durée minima de vingt-quatre heures est nécessaire, toutes les fois que l'on veut faire un bilan complet, en partie double, avec vérification des dosages les uns par les autres.



fait sur une ou deux tonnes de tout venant dont on cassera les gros.

Dans le bilan de notre four à double récupération, nous brûlons une houille à gazogène dont la composition est la suivante :

Carbone	82,5 p. 100
Hydrogène	5 —
Azote	1,2 —
Oxygène	6 —
Cendres	4,4 —
Eau hygroscopique	1,2 —
	<hr/>
	100,0 p. 100
	<hr/>
Pouvoir calorifique	821,0 p. 100

Dans la plupart des fours, la combustion de la houille n'est pas complète, 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 (en 36 heures)	14 500 kilogrammes.
Production d'escarbilles	3 500 —
Composition des escarbilles	
Eau	28 —
Carbone	40 —
Cendres	32 —
Le carbone de la houille = $14\,500 \times 82,5$	= 11 960
Le carbone des escarbilles = $3\,500 \times 40$	= 1 400

Le carbone de la houille échappant à la combustion est donc égal aux $140\,1196$ 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	60
Cendres	41
Eau hygroscopique	12
	<hr/>
	1 000

Le pouvoir calorifique devra être diminué de la chaleur de combustion du carbone des escarbilles 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 grammes) :

$$7\,422 \times \frac{12}{72,8} = 122 \text{ calories ;}$$

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 du 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 comparaison¹ : le combustible correspondant à un volume donné de gaz, et, par conséquent de 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 grammes) qui sera commodément prise pour unité.

2° Analyses de gaz. — Les deux analyses à faire sont celles du gaz de gazogène 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.

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.



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		
		<u>2,5</u>
		102,5

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. Il s'ensuit que les 100 volumes de notre gaz sec ou les 102,5 vol. 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	44,3	} 100
Az ²	84	
O ²	8,7	
Eau		
		<u>8,7</u>
		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 mol. 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°.



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

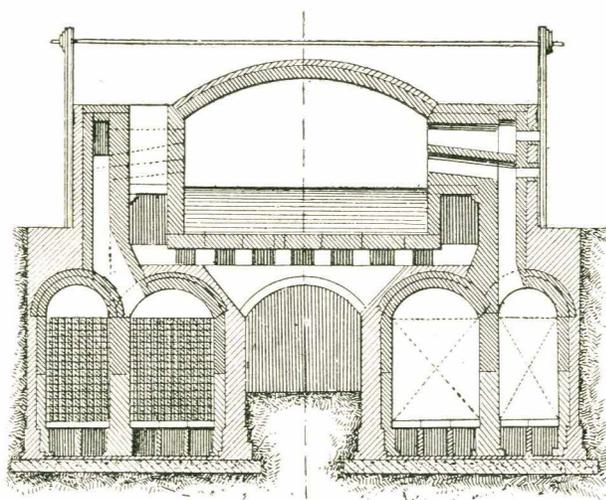
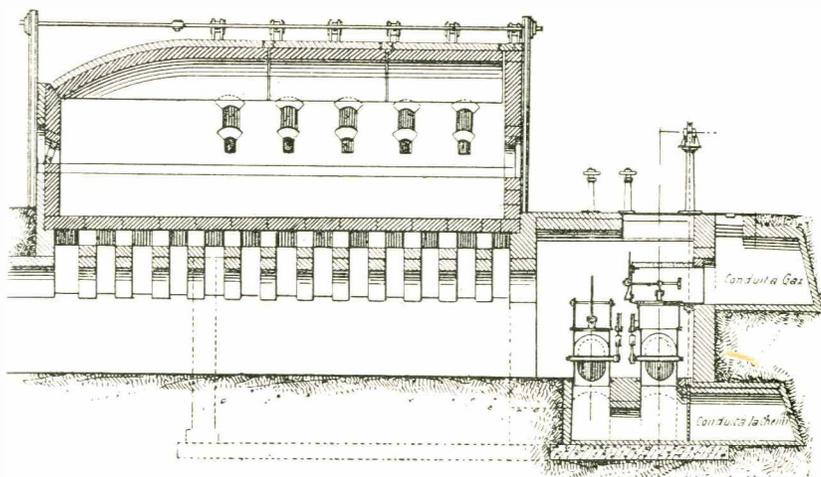


Fig. 21. — Four Siemens à bassin de la verrerie de Folembray ayant servi à l'établissement du bilan.

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.

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 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.

4° *Calculs du bilan de fours 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 (12 grammes) de carbone, est 122 calories.

1° Cherchons, d'abord, la quantité de chaleur sensible ou latente contenue à 600° , température à la sortie du gazogène, dans un volume de gaz correspondant à cette unité de carbone (12 grammes) brûlé. Le calcul est résumé dans le tableau ci-dessous :



Calcul de la puissance calorifique du gaz sortant du gazogène.

GAZ	COMPOSITION	CHALEUR SENSIBLE A 600°		CHALEUR LATENTE	
		à l'unité, volume moléculaire.	dans le gaz.	à l'unité, volume moléculaire.	dans le gaz.
CO ²	5,2	6,4	32,5	—	—
CO	20,3	4,3	87,3	68,2	1,384
H ²	13,2	4,3	56,7	58,2	768
CH ⁴	3,1	8,0	24,8	195,2	515
Az ²	58,1	4,3	250,3	—	—
H ² O	2,5	5,8	14,5	—	—
			166,8		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 :

$$P_{\text{gazog.}} = \frac{122 \text{ cal.} - 108 \text{ cal.}}{122} = \frac{14}{122} = 11,5 \text{ p. } 100.$$

2° Proposons-nous maintenant de déterminer la quantité de chaleur utilisée dans le four, en calculant, d'une part, la puissance calorifique apportée tant par le gaz que par l'air de combustion, d'autre part la puissance calorifique emportée par les fumées s'échappant à la température de régime 1500°.

La chaleur apportée par le gaz à 1200° calculée exactement comme ci-dessus donne 3670 calories et par molécule de carbone.

$$\frac{3670}{29} = 126 \text{ calories.}$$

Le volume d'air nécessaire à la combustion du gaz, en tenant compte de l'excès d'air, se déduit aisément de l'analyse des fumées et de l'analyse du gaz¹.

¹ Rappelons l'analyse des fumées :

CO² = 44,3
Az² = 84
O = 1,7
Eau = 8,7



Pour 20,3 CO ₂	=	40,1 O ₂	+ 40,6 Az ₂
= 13,2 H ₂	=	6,6 O ₂	+ 26,4 Az ₂
= 3,1 CH ₄	=	6,2 O ₂	+ 24,8 Az ₂
Excès d'air $\frac{1,7 \times 29}{(14,3)}$	=	3,5 O ₂	+ 14 Az ₂
		26,2	105,8
		132	

et la chaleur sensible apportée par cet air est, à 1200°, de 1188 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 $\frac{167 - 122}{122} = 37$ p. 100 auquel il conviendrait encore d'ajouter les 11,5 cal. perdues dans le gazogène donne la mesure de l'effet de la récupération ; ces 48,5 cal. sont reprises sur les fumées qui, sans la récupération, les emporteraient à la cheminée.

La quantité de chaleur sortant du laboratoire du four, emportée par les fumées qui s'en échappent à la température de régime de 1500°, se calculera de la même manière en fonction de la composition en volume et des chaleurs d'échauffement :

COMPOSITION	CHALEUR D'ÉCHAUFFEMENT A 1500°	PRODUIT EN CALORIES
CO ₂ 14,3	× 21,4	= 305
O 1,7	× 11,5	= 985
Az ₂ 84	× 18,9	= 164
Eau 8,7		= 164
Total		1454

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 :

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

$$\text{Chaleur utilisée } \frac{66}{122} = 54 \text{ p. 100.}$$



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

COMPOSITION	ÉCHAUFFEMENT A 400°		
CO ²	14,3	× 4,0	= 57,2
O ² + Az ²	83,7	× 2,8	= 239,9
Eau	8,7	× 3,7	= 32,2
Total			329,3
Chaleur perdue par molécule de carbone.		$\frac{320}{14,3}$	= 23
Chaleur perdue p. 100		$\frac{23}{122}$	= 18,8

4° Bilan de four Siemens.

Nous arrivons ainsi au bilan suivant :

Chaleur perdue dans le gazogène.	11,5
— utilisée.	54
— perdue par les fumées.	18,8
— — par refroidissement des chambres de récu- pération par (différence).	45,7
Total.	100,0

§ 3. — DONNÉES EXPÉRIMENTALES ET BILAN SIMPLE D'UNE CHAUDIÈRE A PÉTROLE

Le second exemple de bilan que nous donnerons pour montrer l'importance de telles études expérimentales en industrie a été effectué par nous sur une chaudière Normand, pendant des essais en chambre close qui durèrent environ quatre heures.

Le combustible employé était un pétrole de Bakou contenant 11 p. 100 H et 87 p. 100 C, d'un pouvoir calorifique de 11 000 calories : le même dont nous avons précédemment (chap. II, p. 110) étudié la combustion et la composition des fumées.

Cette composition des fumées, exprimée en molécules par kilogramme de pétrole brûlé, est la suivante :

$$\text{CO}^2 = 72,5 \quad \text{H}^2\text{O} = 53 \quad \text{O}^2 + \text{Az}^2 = 500 \quad (a)$$

correspondant à un excès d'air de 20 p. 100 et à une composition centésimale à la burette d'analyse :

$$\text{CO}^2 = 43,1 \quad \text{O} = 3 \quad \text{Az} = 83,9$$

Mesurons la température à la base de la cheminée, c'est-à-dire



dans la boîte à fumée : cette température pendant la marche forcée à pleine allure (atteignant 31 nœuds) est d'environ 500°.

Cherchons au moyen de ces données très simples, parmi lesquelles nous n'avons même pas fait figurer la température du foyer et la température de combustion inutiles pour le bilan simple, le rendement de notre chaudière.

Le maximum de vaporisation que l'on puisse obtenir par kilogramme de pétrole à 11 000 calories est 16,5 kg.

En effet, 190° étant la température correspondant à la pression de 12 kilogrammes dans la chaudière, la formule

$$(606,5 + 0,305 \times 190) x = 11\,000$$

donne

$$x = \frac{11\,000}{664,5} = 16,5 \text{ kg.}$$

Les essais effectués au Havre ont montré que l'on pouvait en marche forcée obtenir 11,7 kg. ¹ de vapeur par kilogramme de pétrole, ce qui correspond à une perte de $\frac{16,5 - 11,7}{16,5} = 29,1$ et à un rendement de 70,9.

Il est intéressant de se rendre compte comment se décomposent ces 29,1 pour 100 de chaleurs non utilisées à la vaporisation, afin d'examiner si l'on peut en récupérer une partie et améliorer la chaudière ou sa marche.

Prenons pour base de nos calculs la température de 500° dans la boîte à fumée et la composition des fumées déjà considérée p. 131 (a).

À 500° les chaleurs d'échauffement des gaz brûlés sont

$$(1) \quad \text{CO}_2 = 5,07, \quad \text{H}_2\text{O} = 4,78, \quad \text{O}_2 + \text{Az}_2 = 3,56$$

Calculons comme ci-dessus la chaleur totale contenue dans ces fumées, qui sont composées de

$$(2) \quad \text{CO}_2 = 72,5 \quad \text{H}_2\text{O} = 55, \quad \text{O}_2 + \text{Az}_2 = 500.$$

Nous trouvons 2 414 calories qui, rapportées à la chaleur totale disponible, représentent $\frac{2\,414}{11\,000} = 21,9$ pour 100.

¹ Ce chiffre de 11,7 kg. est la production brute à la pression de 12 kilogrammes et à la température de 190°. En ramenant à 0° et 760°, comme on a l'habitude de le faire, on aurait pour notre chaudière une puissance de vaporisation sensiblement supérieure. Ce calcul, qui ne s'applique qu'à des essais de réception, est sans intérêt pour notre étude.



Ces 21,9 pour 100 peuvent se décomposer en trois pertes de chaleur distinctes :

1^o La première est celle qui correspond à l'excès d'air contenu dans les fumées

$$100 (O^2 + Az^2) \times 3,56 = 356.$$

$$\frac{356}{11\ 000} = 3,2 \text{ p. } 100 ;$$

elle pourrait théoriquement être évitée par le réglage plus parfait de la combustion neutre ; mais l'économie pouvant en résulter est insignifiante.

2^o La seconde est celle qui correspond à la chaleur d'échauffement des fumées jusqu'à la température de la chaudière, soit 200° ; cette perte est inévitable, dans une chaudière non pourvue d'un économiseur, car il est impossible de refroidir des gaz au-dessous de la température du corps à qui ils cèdent leur chaleur ; un calcul identique à celui que nous venons de faire (1) et (2) conduit au chiffre 7,5.

3^o Le reste, soit 21,9 — 10,7 = 11,2, représente la chaleur sensible emportée par les fumées entre les températures de 200° et 500°, c'est-à-dire celle qu'on pourrait économiser en utilisant mieux le calorique des produits de combustion et en ne les renvoyant dans l'atmosphère qu'à une température sensiblement inférieure à 500°. Cette amélioration, dont le maximum serait 11 p. 100 de la chaleur totale disponible, n'est généralement pas possible dans les chaudières marines, car elle ne peut s'obtenir que par une augmentation de la surface de chauffe ou l'adjonction d'un économiseur que les dimensions des contre-torpilleurs rendent à peu près impossibles.

Le bilan de la chaudière peut, en résumé, s'établir comme suit :

Bilan d'une chaudière marine chauffée au pétrole.

Chaleur utilisée.	70,9
Chaleur em- } Excès d'air.	3,2
portée par } Echauffement de 0 à 200° (perte inévitable).	7,5
la fumée. } Echauffement de 200 à 500°.	11,2
Rayonnement, conductibilité et dissociation.	7,2
	<hr/> 100,0

§ 4. — REMARQUES SUR LES BILANS ET ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DES FOURS DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉCONOMIE DANS LES FOURS

Les deux bilans que nous avons donnés à titre d'exemple sont intéressants à des points de vue différents.



Le premier s'adressant au cas le plus complexe de fours à gaz montre qu'une étude raisonnée de la combustion dans un four en marche est toujours possible et que, par conséquent, tout ingénieur devrait connaître le rendement de son four en valeur absolue et non par simple comparaison avec des appareils similaires, qu'en un mot, la conduite des fours est une science raisonnée d'où l'empirisme peut être exclu.

Le second bilan, celui de la chaudière Normand, se recommande par sa simplicité : dans ce cas, en effet, pour arriver à raisonner l'emploi des calories que nous apportait le pétrole, il nous a suffi de la composition en hydrogène et carbone de ce combustible, de son pouvoir calorifique, d'une seule température facile à mesurer, celle de la boîte à fumée, et d'un seul dosage, celui de l'acide carbonique ; quelques heures nous ont suffi à fixer le bilan et à donner quelques indications au constructeur qui n'ont peut-être pas été étrangères au succès remarquable qu'il a remporté aux essais.

Il est donc bien établi que l'on peut toujours se rendre compte de la façon dont se dépensent les calories et que cette étude est parfois très facile.

Il s'ensuit évidemment qu'un industriel pourra toujours chiffrer le maximum d'économie qu'il peut réaliser sur une fabrication en cours et qu'il n'est plus permis de se laisser tromper par un constructeur ou inventeur de four promettant des économies irréalisables, comme cela a eu lieu si souvent dans les débuts du four à gaz.

Le principal intérêt des bilans de four est de donner à chaque élément, gain ou perte des calories, sa valeur absolue et d'être un guide très sûr, et le seul, dans la recherche de l'économie du combustible.

La seconde remarque que suggère l'examen comparé de nos deux bilans, est la conséquence des écarts énormes dans le mode de répartition des calories. Tandis que dans le four de verrerie, la chaleur consommée dans le laboratoire est de 54 p. 100, dans la chaudière elle dépasse 75 p. 100 ; tandis que la perte par rayonnement est inférieure à 10 p. 100 dans la chaudière, elle peut atteindre dans le four de verrerie 30 à 35 p. 100 à déduire des 54 p. 100 dépensés dans le laboratoire ; quant aux pertes par les fumées nous avons vu par la théorie des fours à chauffage direct qu'elle peut varier de 0 à 100 p. 100.

De ces constatations que tous les industriels peuvent faire, sans chiffrer même les valeurs relatives des diverses pertes de chaleur, à l'idée de récupérer ces calories perdues il n'y a qu'un pas. De là



toutes les tentatives souvent insuffisamment raisonnées pour réaliser des économies de combustibles en cherchant à diminuer, par des moyens de fortune, telle perte de calories qui, suivant les cas, frappe plus ou moins l'ingénieur ou le maître fondeur chargé d'un four. Nous les passerons rapidement en revue.

Il existe en réalité bien des manières de réaliser l'économie de combustible, et nous avons vu par l'étude de notre chaudière que l'une des plus efficaces consiste à bien régler la combustion en dosant exactement le combustible et le combinant. Mais cette méthode pratique d'économie qui distingue le bon chauffeur de l'ouvrier médiocre et qui donne des différences de rendement inattendues, a, nous le savons, une limite : celle des calories inévitablement perdues, conséquence soit de la température de régime, soit des dimensions d'un four.

Les pertes de chaleur se ramènent à trois chefs principaux :

1° Pertes par rayonnement et conductibilité.

2° Chaleur emportée par les matières ouvrées sortant du four.

3° Chaleur emportée par les fumées.

L'utilisation de la chaleur perdue sous ces diverses formes a été tentée avec plus ou moins de succès.

a) RAYONNEMENT ET CONDUCTIBILITÉ

Dans la plupart des cas, le rayonnement d'un four n'est pas récupérable, parce que le refroidissement qui en est la conséquence est nécessaire à la conservation des parois.

C'est le cas de la plupart des fours Siemens, tant en métallurgie qu'en verrerie, dans lesquels la bonne tenue de voûtes, qui ont jusqu'à six ou huit mètres d'ouverture, n'est assurée que par le refroidissement de la paroi extérieure des briques d'appareillage. Il n'est pas inutile de rappeler à ce sujet que dans les débuts des fours à gaz, nombreux furent les cas d'effondrement des voûtes et que la généralisation de l'emploi des briques de silice qui ne sont pas beaucoup plus réfractaires que les briques d'alumine est due à la conductibilité plus grande de la silice qui favorise la transmission de la chaleur, l'égalité de chauffage de la voûte et le refroidissement nécessaire.

Dans certains cas, le refroidissement est nécessaire non seulement pour combattre la température, mais pour s'opposer à la corrosion des parois par le bain de matière fondue contenue dans la cuvette du laboratoire.



C'est ainsi qu'en verrerie, les fonds de bassins sont généralement supportés par des dés en terre réfractaire supportant les coins de grandes briques sous lesquelles l'air circule librement.

Dans les mêmes fours, le long des parois verticales, au niveau appelé « ligne de sel » la corrosion est tellement rapide que des dispositifs de refroidissement plus énergiques sont employés, tels que gouttières en tôle avec circulation d'eau.

Beaucoup de fours à réverbère, fours à puddler ou fours de fusion, ont des soles portées sur plaques en fonte et sur colonnes, pour que le refroidissement de la sole soit parfaitement assuré par la circulation d'air.

Citons encore les water-jackets dans lesquels le refroidissement est poussé beaucoup plus loin, jusqu'à température de l'eau, soit 100°.

Dans tous ces cas, la perte de chaleur par rayonnement nécessaire à la conservation des ouvrages est à peu près impossible à récupérer. Il s'ensuit, — et c'est une conséquence sur laquelle nous devons insister, tant en nous référant au bilan de notre four Siemens de verrerie, que pour l'intelligence de la théorie de la récupération qui va suivre — que la perte par rayonnement est une fonction nécessaire de la chaleur utilisée dans le laboratoire, et que dans un bilan comme dans une théorie générale *toute la chaleur dépensée dans le laboratoire peut être considérée comme chaleur utilisée*¹.

Un cas de récupération possible de chaleur perdue par conductibilité mérite cependant d'être cité : celui des moteurs à explosion.

Le cylindre d'un moteur à gaz est un véritable laboratoire de four dans lequel l'énergie calorifique est immédiatement transformée en énergie mécanique par l'échauffement et la dilatation de produits de combustion. Or, en l'état actuel de la construction des moteurs à explosion, on compte que le bilan de l'utilisation d'énergie calorifique est à peu près le suivant : 1/3 est utilisé en énergie mécanique, 1/3 est perdu par les fumées, 1/3 est employé à échauffer l'eau enveloppant le cylindre. Or, cette eau qui peut arriver à une température de 60° et 80°, pourrait servir à alimenter une turbine à basse pression; et si on compte sur un rendement de 30 à 35 p. 100 réalisable dans les turbines, on arriverait ainsi à récupérer environ 10 p. 100 de l'énergie totale fournie au moteur à explosion, sous forme d'énergie

¹ Nous avons connu un four où l'on avait essayé de faire circuler l'air entre la voûte et une contre-voûte, avant de l'envoyer au laboratoire. La récupération fut efficace et la température très élevée. Mais le four ne dura que trois mois après lesquels la voûte était fondue.



mécanique supplémentaire. C'est peut-être le cas le plus intéressant de récupération des pertes par rayonnement et conductibilité.

Détermination de la perte par rayonnement dans le laboratoire d'un four. — Malgré l'impuissance que nous venons de constater dans les moyens de récupérer la chaleur rayonnante d'un four, il est intéressant de pouvoir déterminer exactement cette déperdition de chaleur, quand ce ne serait que pour apprécier l'intérêt de la solution électrique du chauffage, dans laquelle le rayonnement disparaît de façon presque complète avec la réduction de dimensions des fours.

Cette détermination est à peu près impossible à faire par le calcul et par l'application de la loi de refroidissement de Newton, parce que les pouvoirs émissifs et la conductibilité des matériaux constituant les fours sont mal connus. Le seul moyen précis d'arriver à cette mesure est une méthode empirique et par différence.

On peut, après avoir fait le bilan d'un four, calculer la chaleur nécessaire à l'opération industrielle à effectuer, et la différence avec la chaleur totale consommée dans le laboratoire donne le rayonnement. Dans notre four de verrerie par exemple, où la chaleur totale utilisée dans le laboratoire est 54 p. 100, on calculera la chaleur nécessaire à l'échauffement des matières composant le lit de fusion, puis la chaleur de décomposition des carbonates, et enfin la chaleur de réaction de la silice sur les bases ; en retranchant le total de ces calories des 54 p. 100 décelés par le bilan, on aura le rayonnement.

On peut encore, et là est la meilleure méthode, faire marcher un four à blanc pendant un certain temps et faire un bilan spécial pour cette marche où le travail du laboratoire sera compté pour zéro. On aura ainsi une mesure précise du rayonnement, si l'on a soin de régler le four de façon que la température de régime soit la même qu'en marche normale.

Nous n'avons pas d'exemple pratique d'un tel bilan à présenter faute de temps d'arrêts suffisants de la fabrication ; mais il est évident que de tels bilans seraient aussi faciles, sinon plus, que celui que nous avons donné.

b) CHALEURS EMPORTÉES PAR LES MATÉRIAUX
SORTANT DU LABORATOIRE

La chaleur sensible emportée par les matières sortant d'un four n'est pas toujours récupérable ; ainsi l'acier coulé d'un four Martin



est le plus souvent travaillé à chaud; ainsi en est-il du fer sortant du four à puddler, ou du verre puisé dans un bassin.

Il n'y a guère qu'en céramique que la récupération complète de la chaleur emmagasinée après cuisson soit possible, parce que dans cette industrie, tout le travail se fait à froid; on enfourne une matière froide et on défourne la même matière simplement deshydratée, froide. La quantité de chaleur théoriquement nécessaire à la cuisson est insignifiante (moins de 5 p. 100) par rapport aux calories effectivement dépensées dans les fours céramiques. Il y a là un problème d'un réel intérêt, dont nous savons la solution possible. Qu'il nous suffise de dire à présent que le four Hoffmann, qui a tant amélioré l'industrie céramique briquetière, n'est encore qu'une solution très imparfaite et très spacieuse du problème, parce que la récupération par les matériaux cuits et la récupération par les fumées y sont confondues; et ce n'est qu'en séparant ces deux facteurs de l'économie qu'on atteindra la vraie solution.

En dehors de la céramique, il convient de citer quelques tentatives d'utilisation des chaleurs sensibles des matériaux sortant des fours :

1° en métallurgie, avec les « Soaking-pits » ou puits de réchauffage où les lingots aussitôt coulés et démoulés égalisent leur température au moyen de leur chaleur interne au point de pouvoir être travaillés sans passer par un four à réchauffer, d'où économie évidente.

2° Dans l'industrie des ordures ménagères où certains constructeurs proposent de réchauffer l'air d'alimentation des fours destructeurs en le faisant circuler dans les fosses où le clinker (machefer) est déchargé.

3° Enfin, il convient de citer, bien que la récupération ne se fasse ici qu'après une première utilisation sous forme d'énergie mécanique, le récupérateur Rateau transformant en calories utilisables, en source d'énergie calorifique, les vapeurs des moteurs sans condensation.

Telles sont les principales formules d'économie s'appliquant aux deux premiers modes que nous avons indiqués : elles ne sont en résumé que des solutions d'espèces, plus ou moins ingénieuses, plus ou moins efficaces pour l'amélioration desquelles aucune règle générale ne pourrait être donnée.

Les seules lois, concernant ces procédés d'économie, que nous ayons à rappeler sont des lois restrictives, des limites infranchissables limitant leur effet, dont la principale est la suivante :



Quelques axiomes ou lois générales présidant à la récupération des chaleurs perdues.

Lorsque la récupération d'une chaleur perdue quelconque se fait au moyen d'air ou des gaz destinés à la combustion, *la récupération est strictement limitée à la puissance d'absorption des calories de l'air ou du gaz, c'est-à-dire à ce que nous appelons la masse calorifique du mélange gazeux servant d'intermédiaire.*

De là de fréquents double-emplois paralysant tout à fait les moyens d'économie que l'on a en vue : dans le four Hoffmann par exemple, la récupération par les briques chaudes se superpose à la récupération par les fumées, la masse du récupérant est insuffisante, il y a une limite à l'économie, quel que soit le nombre de cellules du four. Ceci est absolument vérifié par la pratique.

De là encore l'intérêt de certains systèmes de récupération absolument indépendants du régime général d'un four tels que des chaudières à vapeur placées entre un four et sa cheminée, appareils dont la capacité d'absorption est illimitée.

Lorsque l'on cherche à diminuer la perte par rayonnement d'un four, un point essentiel à observer si l'on veut que la récupération ne soit pas illusoire, c'est de ne pratiquer cette récupération qu'à partir du laboratoire, et jamais en arrière c'est-à-dire autour de la grille ou du gazogène. Tout carneau de refroidissement en arrière n'a d'autre effet que de refroidir le foyer et, par suite, la température des flammes, et si la chaleur ainsi empruntée au foyer se retrouve plus loin, on ne comprend pas l'intérêt de ces deux transports de calories en sens inverse se neutralisant dans le laboratoire. Nous ne citerons pas les fours assez nombreux qui sont tombés dans ce défaut et qui font parcourir à un certain nombre de calories un véritable cercle vicieux; contentons-nous d'énoncer la loi évidente : *Dans un four la récupération ne doit s'exercer qu'à partir du laboratoire, autour du laboratoire pour la chaleur rayonnante quand cela est possible, après le laboratoire par les fumées, ce qui est toujours possible.*

c) CHALEUR EMPORTÉE PAR LES FUMÉES

La chaleur emportée par les fumées d'un four, l'une des causes de pertes de calories les plus importantes, se distingue des deux autres dépenses de calories précédentes par ce fait qu'elle est toujours inutile.



Si l'on fait abstraction de la quantité de chaleur nécessaire au tirage qui est très faible puisqu'une température de 200° suffit toujours à assurer la marche d'un four, les calories emportées dans l'atmosphère sont toujours des calories perdues. Dans bien des cas, toutes les fois que la température est élevée dans un four, cette perte est énorme.

De tout temps la perte par les fumées a préoccupé les industriels : les fours à réverbère à plusieurs soles, les fours de porcelaine à dômes, les fours de verrerie à pots suivis de l'arche à frifter, enfin les fours à puddler suivis de chaudières sont autant de dispositifs dont le but est de retrouver une partie des calories sortant avec les fumées du premier laboratoire.

De ces dispositifs, quelques-uns sont très efficaces : ainsi le four à puddler ou à réchauffer muni d'une bonne chaudière a, nous l'avons vu, un rendement thermique excellent.

Mais ils ont tous l'inconvénient de rendre solidaires deux appareils dont le but est différent, ce qui rend souvent le réglage difficile, et ils imposent souvent des méthodes d'économie dont le produit n'est pas entièrement utilisable. C'est ce qui se passe en particulier dans les forges disposant d'une force motrice importante en houille blanche : dans ce cas point n'est besoin de produire beaucoup de vapeur, il faut trouver le moyen d'économiser la chaleur emportée par les fumées par le four même supposé autonome et isolé c'est-à-dire par récupération.

La *récupération de la chaleur dans les fours* est la science technique de l'utilisation la plus complète de la chaleur par le retour dans le laboratoire des calories emportées par les fumées, dans un four supposé isolé, c'est-à-dire ne comportant que gazogène, laboratoire, chambre de récupération et cheminée.

La récupération est de toutes les méthodes d'économie celle qui a pris la plus grande place dans l'industrie, celle qu'il importe de mieux connaître. C'est aussi celle qui est assujettie aux calculs les plus précis, soumis à des lois mathématiques qui permettent d'en fixer la valeur ou du moins la limite exacte dans tous les cas de gazéification que comporte l'industrie. Nous lui avons consacré notre premier livre, nous lui réservons ici un chapitre spécial.

Avant de l'aborder il est nécessaire de donner quelques indications sur les récupérateurs de chaleur.

Des récupérateurs. — On appelle récupérateurs, en général, les



appareils servant à effectuer un échange de calories entre les fumées chaudes sortant du laboratoire et les gaz froids, air ou gaz combustible destinés à la combustion dans le laboratoire.

Les récupérateurs sont de deux sortes. Les uns, appelés par les ingénieurs anglais *Régénérateurs*¹ (système Siemens) sont constitués

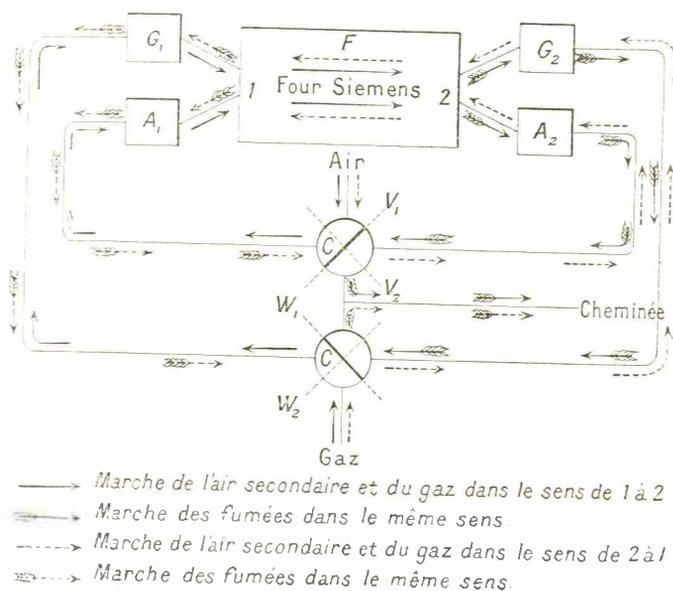


Fig. 22. — Régénérateur Siemens.

par des chambres symétriques dans lesquelles les fumées à refroidir et les gaz ou l'air à chauffer passent à tour de rôle, dirigés tantôt dans un sens tantôt dans l'autre par des appareils à inversion (voir p. 147, fig. 21.)

Les autres auxquels les ingénieurs anglais réservent le nom de *récupérateurs* sont des appareils à tuyaux métalliques ou réfractaires dans lesquels l'air ou les gaz à chauffer circulent sans interruption dans le même sens en se rendant au laboratoire, tandis que les fumées séparées par les parois des tuyaux progressent en sens inverse, du laboratoire vers la cheminée (voir p. 162, fig. 23).

Les régénérateurs sont toujours constitués par de grandes chambres remplies de briques en chicane : seuls les dispositifs pour l'in-

¹ La distinction entre régénérateurs et récupérateurs n'est pas aussi absolue dans le vocabulaire français que dans le vocabulaire anglais ; il est cependant nécessaire de la connaître sous peine de n'être pas compris des ingénieurs anglais.

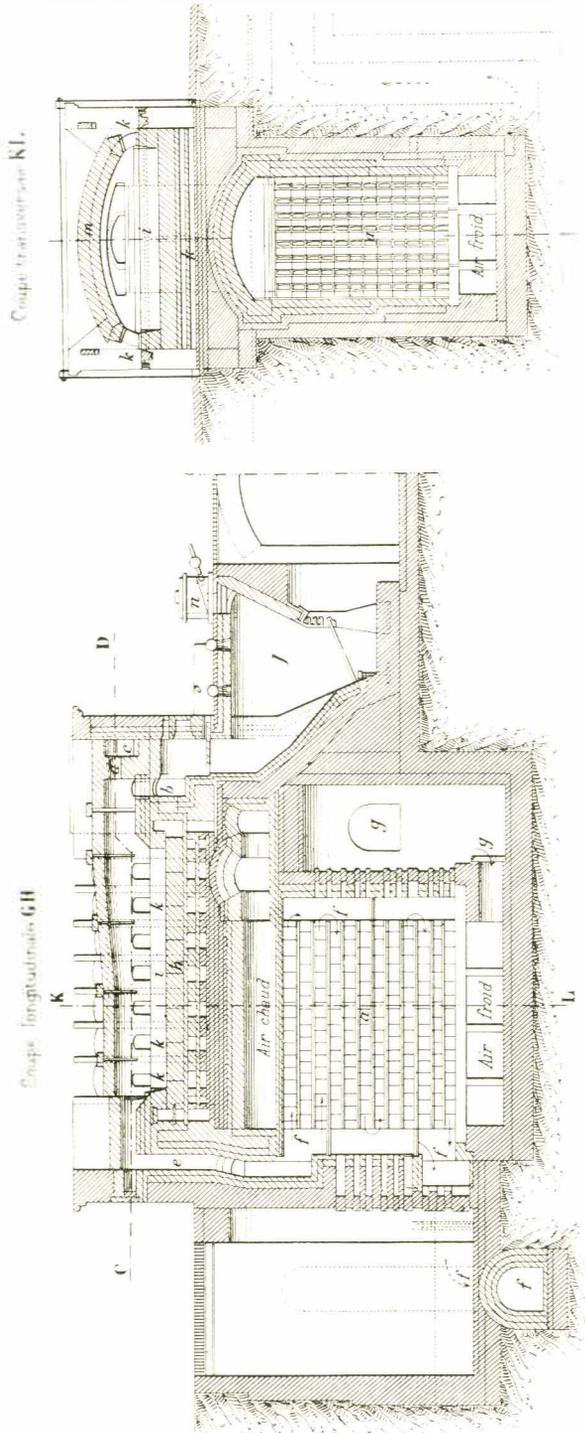


Fig. 24 — Four à récupération, système Lencanchedy.



version varie, présentant deux variantes : la cloche de distribution et le clapet d'inversion,

Les récupérateurs sont de deux types, suivant que les fumées chaudes entourent les tubes du récupérateur ou qu'au contraire les fumées passent à travers les tuyaux entourés par l'air froid à chauffer : au point de vue de la construction, il y a également lieu de distinguer ceux en fonte, excellents pour les températures inférieures à 800°, et ceux en terre seuls possibles pour les hautes températures. Pour tous

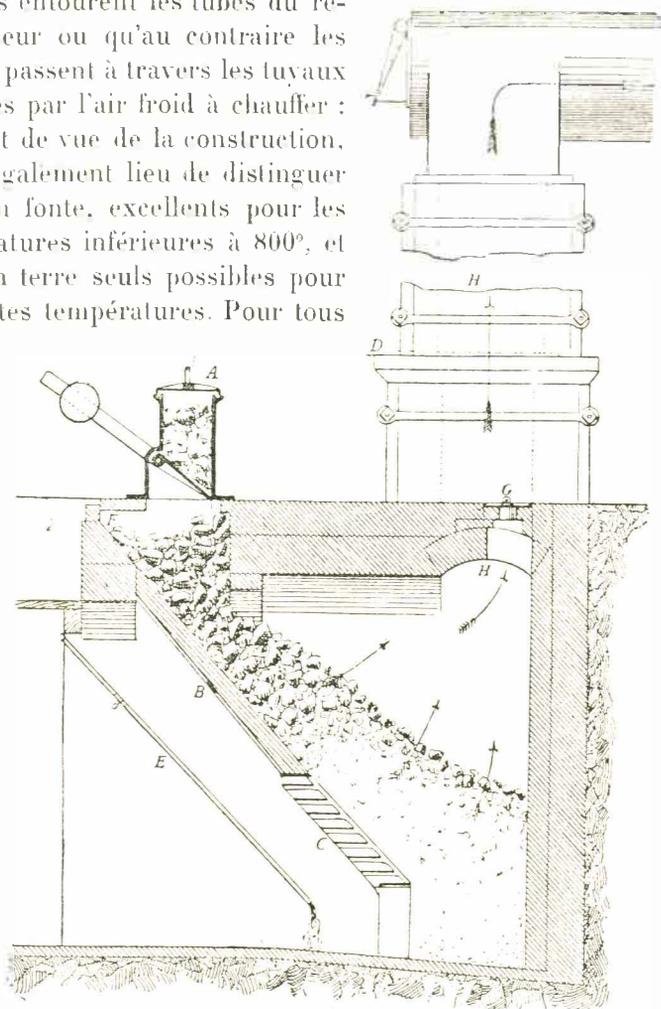


Fig. 24. — Gazogène Siemens ordinaire à grille inclinée, à siphon.

les détails de construction de ces appareils nous renvoyons au traité de Babu¹.

Au point de vue de la théorie qui va suivre, nous ne ferons pas de

¹ *Traité théorique et pratique de métallurgie générale*, par L. Babu; Ch. Béranger, éditeur, Paris, 1906.

distinction entre les récupérateurs et admettrons que l'on prend toujours le système le mieux approprié au cas étudié, celui qui permettra d'échauffer le gaz ou l'air récupérant à une température voisine de celle des fumées qui cèdent leur chaleur.

Rappelons enfin, avant d'aborder la théorie de la récupération que l'industrie présente différentes méthodes de gazéification, gaz à l'air ou gaz Siemens, gaz mixte (mélange de gaz Siemens et de gaz à l'eau), enfin la gazéification à peu près abandonnée aujourd'hui par décomposition de l'acide carbonique extrait des fumées mêmes et traversant le gazogène.

A chacune de ces méthodes de gazéification peuvent correspondre des méthodes de récupération différentes, simple récupération par l'air, double récupération par l'air et le gaz ou même triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz.

L'industrie présente donc une douzaine de cas différents qui tous correspondent à des rendements thermiques différents.

La théorie de la récupération est l'étude de ces douze cas avec l'indication du rendement maximum que l'on puisse obtenir dans chacun d'eux en utilisant au mieux les calories dans les fumées.



B. — THÉORIE GÉNÉRALE DE LA RÉCUPÉRATION

§ 1. — LOIS GÉNÉRALES PRÉSIDENT A LA RÉCUPÉRATION PAR LES FUMÉES DES FOURS

L'étude de la récupération de la chaleur emportée par les fumées est soumise à quelques lois générales dont la plupart ont déjà été énoncées, mais qu'il importe de résumer ici.

1° Un corps ne peut céder sa chaleur qu'à un corps dont la température est moindre.

2° Quand un corps est mis au contact d'un autre dont la température est supérieure, il absorbe de la chaleur et sa température s'élève jusqu'à ce qu'il soit en équilibre avec la source qui fournit de la chaleur.

De ces lois évidentes et connues, on déduit les corollaires suivants :

3° *Pour que la récupération totale des calories contenues dans les fumées soit possible, il faut que les gaz qui doivent absorber la chaleur soient à la température de l'atmosphère où les fumées sont déversées.*

Cette condition n'est remplie que par l'air; les gaz de gazogène sont toujours à une température élevée (600° au moins). Il en résulte que, dans les fours à double récupération, l'utilisation complète de la chaleur est toujours impossible, puisque la portion des fumées employée à réchauffer le gaz ne peut céder toutes les calories qu'elle contient. Seuls les fours à hydrocarbures, à gaz naturel, échappent à cette limitation de la récupération.

4° *Pour que l'échange de chaleur soit parfait entre deux masses gazeuses, de façon que, après récupération méthodique, la température de l'une devienne égale à la température initiale de l'autre, il faut que les chaleurs d'échauffement des masses en présence soient égales entre les températures considérées.*

Si les chaleurs spécifiques diffèrent, ou si, cas plus fréquent, les masses sont inégales, le gaz chaud qui cède sa chaleur s'échappera



à une température différente de celle du gaz qui doit l'absorber : lorsque la masse du premier sera trop grande, la récupération sera forcément incomplète, et les fumées s'échapperont à une température supérieure à la température ambiante; inversement, lorsque les gaz récupérants seront en excès, ces gaz absorberont bien toutes les calories disponibles, mais n'atteindront pas la températures des fumées.

Le premier cas, excès de fumée, se présente presque toujours dans les fours. L'air nécessaire à la combustion a, en effet, une chaleur d'échauffement moindre que les produits de combustion auxquels il donne naissance, de sorte que le chauffage, même de l'air total, est incapable d'assurer la récupération parfaite.

La double récupération par l'air et le gaz n'y réussit pas davantage dans le cas de gaz Siemens, car l'oxyde de carbone a une chaleur spécifique moindre que l'acide carbonique.

Il n'y a que la triple récupération, qui, par suite d'un double passage de l'air primaire dans les chambres, permette d'atteindre, au point de vue des masses, la limite de récupération, et même de la dépasser d'une façon sensible. Dans ce second cas d'inégalité des masses en présence, l'air et le gaz sortiront, nous l'avons vu, moins chauds que les fumées n'entrent dans les récupérateurs, quelque parfaits que soient ces appareils. Mais l'utilisation des calories pourra être complète.

§ 2. — HYPOTHÈSES SERVANT DE BASE A LA THÉORIE MATHÉMATIQUE DE LA COMBUSTION DANS LES FOURS A GAZ A RÉCUPÉRATION. — CHOIX DE LA MÉTHODE DE CALCUL DU RENDEMENT.

Quelques hypothèses sont nécessaires pour éliminer certaines variables de notre équation d'utilisation de la chaleur, et permettre d'aborder la théorie de la récupération.

1° Nous admettrons, dans les calculs, que la gazéification complète du carbone en oxyde de carbone, sans mélange d'acide carbonique, est possible.

Cette hypothèse n'est pas conforme à la réalité, car le gaz de gazogène contient toujours une proportion d'acide carbonique importante. Ledebur, dans son *Traité de Métallurgie*, indique bien des compositions de gaz où la teneur en acide carbonique est inférieure à 1 p. 100, ce qui justifierait notre hypothèse; mais, comme les gazogènes donnant de semblables résultats sont encore rares, il sera



nécessaire de discuter l'influence de ce qu'on peut appeler la combustion anticipée du gaz sur l'utilisation de la chaleur ;

2° Nous admettrons que l'échange de chaleur est parfait entre les deux masses gazeuses, fumées cédant leur chaleur et gaz récupérants, c'est-à-dire qu'on peut arriver à l'égalité de température entre les gaz brûlés à leur sortie du laboratoire et les gaz entrant dans le laboratoire à leur sortie des chambres de récupération.

Cette hypothèse est loin de la réalité, car l'échange de calories entre un gaz et un corps solide en contact, étant d'autant plus rapide que l'écart de température est plus grand, devient très lent pour des températures voisines. Comme la récupération implique un double échange de corps solides à gaz, l'échange de chaleur de gaz à gaz est limité pratiquement à un écart qui, dans la plupart des cas, est supérieur à 300°.

Aussi, s'il nous a été impossible d'introduire dans le calcul cet élément de perturbation qui, d'ailleurs, est une variable, sera-t-il nécessaire d'en discuter les conséquences sur les résultats de la théorie ;

3° Nous admettrons que le four est à un état de régime invariable, en toutes ses parties. Cette condition est remplie dans les fours continus à courants parallèles en sens inverse, mais ne l'est pas rigoureusement dans le cas de la régénération avec inversion : nous admettrons alors que les chambres sont assez grandes et les inversions assez fréquentes pour que l'invariabilité de température soit assurée dans le récupérateur entre deux inversions, hypothèse très voisine de la réalité.

Nous n'avons pas, dans ces conditions, à nous préoccuper de la méthode de récupération, et les résultats trouvés s'appliqueront aussi bien aux fours à récupération parallèle qu'à ceux à régénération inversée ;

4° Nous supposerons négligeable le rayonnement de tous les organes de récupération, chambres, gazogènes, carneaux, etc.

Cette hypothèse est évidemment inexacte, mais ce rayonnement étant essentiellement variable avec la forme des fours, il est impossible de le faire entrer dans les calculs. Nous aurons donc à en apprécier l'importance relative dans les différents systèmes, après la théorie générale.

Quant au rayonnement du laboratoire, rappelons qu'il fait, par définition, partie de la chaleur utilisée ;

5° Enfin, nous supposerons que le combustible est du carbone, c'est-à-dire du coke.



nécessaire de discuter l'influence de ce qu'on peut appeler la combustion anticipée du gaz sur l'utilisation de la chaleur ;

2° Nous admettons que l'échange de chaleur est parfait entre les deux masses gazeuses, fumées cédant leur chaleur et gaz récupérants, c'est-à-dire qu'on peut arriver à l'égalité de température entre les gaz brûlés à leur sortie du laboratoire et les gaz entrant dans le laboratoire à leur sortie des chambres de récupération.

Cette hypothèse est loin de la réalité, car l'échange de calories entre un gaz et un corps solide en contact, étant d'autant plus rapide que l'écart de température est plus grand, devient très lent pour des températures voisines. Comme la récupération implique un double échange de corps solides à gaz, l'échange de chaleur de gaz à gaz est limité pratiquement à un écart qui, dans la plupart des cas, est supérieur à 300°.

Aussi, s'il nous a été impossible d'introduire dans le calcul cet élément de perturbation qui, d'ailleurs, est une variable, sera-t-il nécessaire d'en discuter les conséquences sur les résultats de la théorie ;

3° Nous admettons que le four est à un état de régime invariable, en toutes ses parties. Cette condition est remplie dans les fours continus à courants parallèles en sens inverse, mais ne l'est pas rigoureusement dans le cas de la régénération avec inversion : nous admettons alors que les chambres sont assez grandes et les inversions assez fréquentes pour que l'invariabilité de température soit assurée dans le récupérateur entre deux inversions, hypothèse très voisine de la réalité.

Nous n'avons pas, dans ces conditions, à nous préoccuper de la méthode de récupération, et les résultats trouvés s'appliqueront aussi bien aux fours à récupération parallèle qu'à ceux à régénération inversée ;

4° Nous supposons négligeable le rayonnement de tous les organes de récupération, chambres, gazogènes, carneaux, etc.

Cette hypothèse est évidemment inexacte, mais ce rayonnement étant essentiellement variable avec la forme des fours, il est impossible de le faire entrer dans les calculs. Nous aurons donc à en apprécier l'importance relative dans les différents systèmes, après la théorie générale.

Quant au rayonnement du laboratoire, rappelons qu'il fait, par définition, partie de la chaleur utilisée ;

5° Enfin, nous supposons que le combustible est du carbone, c'est-à-dire du coke.



Toutes ces hypothèses reviennent à admettre que le gaz constitué d'oxyde de carbone ou d'hydrogène sans acide carbonique, eau, ni hydrocarbures, apporte au four toute sa chaleur sensible, que les gaz qui ont pris part à la récupération entrent dans le laboratoire à la température même du four, et que les fumées entrent dans les récupérateurs à cette température de régime arbitrairement choisie.

En d'autres termes, dans un four à 1 500°, par exemple, s'il y a double récupération, l'air et le gaz entrent dans le four à 1 500° ; s'il y a simple récupération, l'air entre à 1 500°, le gaz à la température de combustion calculée du carbone brûlant en oxyde de carbone par l'air mêlé ou non de vapeur d'eau. Les fumées s'échappent à 1 500° du laboratoire, et entrent dans les récupérateurs à cette même température.

Remarquons que toutes ces hypothèses sont en faveur de l'utilisation de la chaleur dans les fours. Elles supposent simplement que, dans tous les organes du four, on atteint, au point de vue de l'utilisation de la chaleur, la perfection, dont tous les progrès de construction doivent tendre à se rapprocher ; elles sont donc absolument légitimes. Mais le calcul théorique fait sur ces bases ne donnera d'une façon précise que les *maxima d'utilisation de la chaleur* ou les *minima de pertes*, dans les fours.

Ces chiffres ont, par eux-mêmes, leur intérêt et seront par exemple un guide très sûr dans une étude expérimentale d'un four donné, un moyen d'apprécier ses qualités de construction. Cependant, au point de vue que nous avons adopté, celui de la comparaison des fours entre eux, ils ne sont pas suffisants : rien n'autorise, en effet, *a priori*, à affirmer que le tableau de classement des fours, basé sur les rendements maxima, conserve le même ordre dans les conditions actuelles de la pratique.

Il sera donc nécessaire de passer en revue nos différentes hypothèses, afin de voir dans quelle mesure les conditions réelles peuvent modifier la valeur absolue des chiffres et surtout de juger si elles changent le classement.

Nous n'imposerons donc nos hypothèses que sous bénéfice d'une critique ultérieure. La théorie générale qui leur est soumise donnera la valeur absolue des rendements maxima ou les minima de pertes de chaleur. La discussion qui suivra, s'affranchissant de toute hypothèse, indiquera les valeurs relatives des différents systèmes ou, du moins, permettra de les classer.



§ 3. — MÉTHODE DU CALCUL DU RENDEMENT DES FOURS

Si nous nous reportons maintenant à l'équation fondamentale des fours :

$$Q = P + U \text{ } ^1$$

en donnant aux termes P , U , le sens spécial que nos hypothèses leur attribuent :

P , chaleur échappant forcément à la récupération, perdue par les fumées ;

U , maximum de la chaleur consommée dans le laboratoire ;
comme on connaît toujours Q , soit par une mesure directe du pouvoir calorifique, soit par les chaleurs de combustion des corps simples,

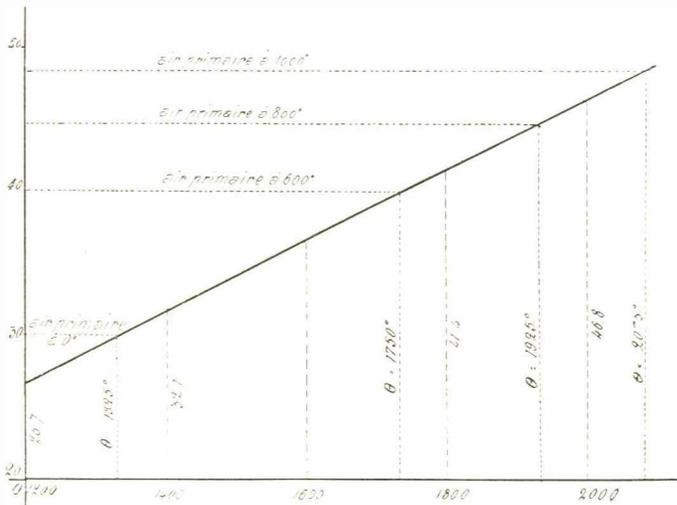
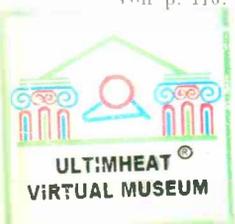


Fig. 25. — Graphique donnant les températures de gazéification du gaz Siemens théorique.

on peut indifféremment faire le calcul de U ou de P , et en déduire par différence P ou U .

De ces deux méthodes, nous avons choisi celle du calcul direct de P , pensant que la connaissance de la chaleur inévitablement perdue est le point essentiel dans une étude de la récupération. D'ailleurs, ce calcul de P permet aisément de rendre un compte exact de ce qui se passe dans l'appareil récupérateur.

¹ Voir p. 116.



Dans le cas des fours à chauffage direct, la méthode de calcul direct du rendement U était intéressante, et nous l'avons suivie parce que la chaleur utilisée est représentée par la chaleur d'échauf-

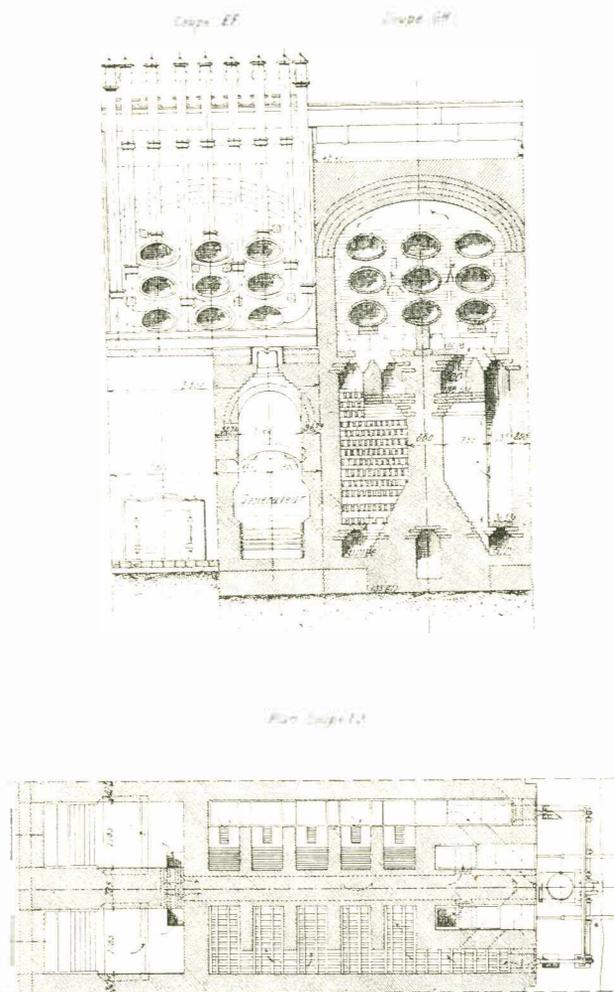


Fig. 26. — Four à cornues système Siemens, à simple récupération, de la C^{ie} Parisienne du gaz.

lement entre les températures de régime et de combustion, et est complémentaire de la chaleur perdue par les fumées P , le total formant la chaleur disponible totale Q , qui traverse le laboratoire.

Mais dans les fours à récupération, il n'en est plus ainsi : par suite du chauffage préalable du gaz et de l'air, la chaleur totale



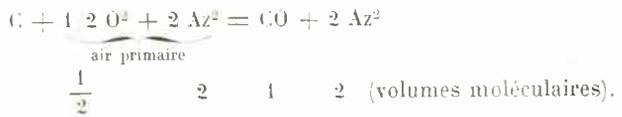
calcul de la chaleur apportée au laboratoire est plutôt une source de confusion et nous trouvons préférable de déterminer d'abord les pertes de chaleur irrécupérables P , et d'en déduire U par différence.

§ 4. — PREMIER GROUPE DE FOURS A GAZ. — GAZ A L'AIR. FOURS A RÉCUPÉRATION A OXYDE DE CARBONE OU A GAZ SIEMENS

a) RÉACTIONS DE COMBUSTION

Les réactions pour 12 grammes de carbone brûlé sont les suivantes :

Dans le gazogène on a :



avec dégagement de 29,4 cal.

Par suite de cette chaleur dégagée, si l'air primaire est froid la température du mélange $CO + 2Az^2$ est portée à 1325°, ainsi qu'il est facile de le calculer par la méthode graphique connue (fig. 25). Si l'air primaire est chauffé, il faut, à la chaleur de combustion, ajouter la chaleur sensible contenue dans cet air (10,7 cal. à 600°, 14,5 cal. à 800°, 18,6 cal. à 1000°), ce qui porte la température du gaz sortant du gazogène, respectivement à 1700°, 1850° et 2000°.

Dans le four, la réaction est :



dégageant 68,2 cal.

La chaleur totale dégagée est toujours 97,6.

La composition des fumées est la même que ci-dessus : $CO^2 + 4 Az^2$.

Premier cas.

RÉCUPÉRATION PAR L'AIR SECONDAIRE SEUL

Les fours usuels se rattachant à cette catégorie sont : les fours à cornues de la Compagnie parisienne du gaz, système Siemens ou système Lencauchez, lorsqu'on les fait fonctionner par tirage naturel et sans eau dans le cendrier; certains fours de verrerie à récupération parallèle, tels que les fours Radot, quelques grands fours à bassin



pour verres à vitres, système Gobbe à régénérateurs Siemens, etc. Malgré la généralisation du gaz mixte, ces fours sont donc encore assez répandus.

Nous donnons deux exemples de fours à simple récupération, à gaz oxyde de carbone (gaz à l'air).

Le premier (fig. 26 et 26 bis), dont les dessins nous ont été communiqués par la Compagnie parisienne du gaz, représente son type

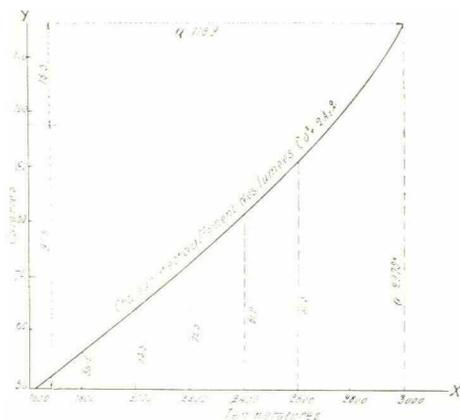


Fig. 27. — Graphique donnant la température de combustion du gaz Siemens dans le cas de simple récupération.

le plus perfectionné de four à cornues (système Siemens). Au point de vue pratique de la construction, ce four est intéressant par le groupement très heureux des divers organes, réduisant au minimum les pertes par rayonnement.

Au point de vue théorique, il offre l'intérêt de rentrer plus complètement dans nos hypothèses, puisque le combustible employé est le coke de gaz. La température de régime y est d'environ $1\ 000^{\circ}\text{C}$.

Le second (fig. 23, p. 162), que nous devons à M. Lencauchez, donne l'exemple du même mode de récupération dans le cas d'une température plus élevée (environ $1\ 400^{\circ}\text{C}$), et avec emploi d'un récupérateur à courants parallèles sans inversion, système Lencauchez. Ce récupérateur est, on le sait, constitué par des poteries creuses, autour

De nos jours la température dans les usines à gaz et notamment dans les nouveaux fours du Gaz de Paris est beaucoup plus poussée et peut atteindre $1\ 150$ à $1\ 200$. Le régime est d'ailleurs très constant et régulier en raison du défournement mécanique du coke et du chargement automatique de la houille.



desquelles circulent les fumées, et assez comparable à une chaudière multitubulaire.

Le calcul de P et du rendement est résumé dans le tableau ci-dessous :

Tableau du calcul de P dans les fours à gaz Siemens
à simple récupération à 1 000° et 1 500°

CHALEUR DÉGAGÉE : 97.6 CAL.		1 000°	1 500°
F	Calories emportées par les produits) CO ² . . .	12.4	21.1
	de combustion à 1 000° et 1 500°) 4 Az ² . . .	29.7	46.4
Total		42.1	67.5
R	Calories récupérées par l'air secon-) $\frac{1}{2}$ O ² . .	3.7	5.8
	daire porté de 0° à 1 000° ou 1 500°) 2 Az ² . .	14.8	23.2
Total		18.5	29.0
Différence F — R ou perte de chaleur à la cheminée.		23.6	38.5
Rapport à la chaleur disponible 96.7 ou perte p. 100 P.		24.3	39.5
Chaleur utilisée p. 100 ou rendement maximum U.		75.7	60.5

Comme dans les fours à chauffage direct, le rendement croit à mesure que la température s'abaisse, mais beaucoup moins rapidement que dans les fours à chauffage direct.

D'autre part, il n'y a plus, comme dans les fours à grille, une limite à l'obtention des hautes températures. Si l'on suppose l'air secondaire porté seulement à une température de 1 000°, le gaz étant lui-même à sa température théorique de 1 325°, on trouve par la méthode graphique un point de combustion voisin de 3 000° (fig. 27). 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 p. 100.

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 p. 100, 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 mixte. Nous retrouvons donc, *a priori*, par la théorie, un résultat que l'expérience des usines a déjà démontré.



Deuxième cas.

FOURS A 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 on connaît 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 nous permettront de juger cette question encore controversée et intéressante par suite du grand nombre d'aciéries possédant des gazogènes à siphon¹.

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°². 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 à 1500°, ce qui donne une perte de 33,7 cal. p. 100, correspondant à une amélioration de 5,8 p. 100 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 : 97,6 CAL. = Q.	1500°	OBSERVATION
F : Chaleur emportée par les fumées . . .	67,5	Le calcul à 1000° est impossible et donne les mêmes résultats que la simple récupération.
R : Calories récupérées	29,0	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="font-size: 0.8em; margin-right: 5px;">par l'air secondaire de 0° à 1500° . . .</div> </div>	5,8	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="font-size: 0.8em; margin-right: 5px;">par le gaz de 1325° à 1500°</div> </div>	34,8	
Total	32,7	
Différence F — R ou perte à la cheminée. .	33,7	
Rapport $\frac{F-R}{Q}$ ou perte p. 100.	66,3	
Chaleur utilisée p. 100 ou rendement U . .		

¹ Voir fig. 23, p. 163.

² En négligeant, suivant notre hypothèse, le refroidissement du gazogène.



On voit que, malgré l'amélioration de 5,8 p. 100, 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° (29,4 cal). Il s'ensuit qu'avec une bonne récupération, on peut, sans perte de chaleur, et en profitant de celle qui reste disponible, ré-

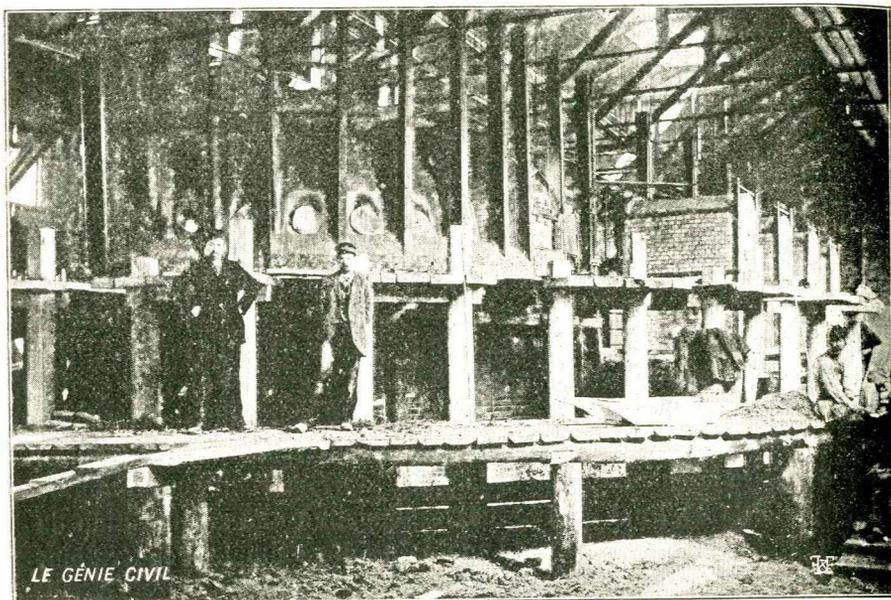


Fig. 28. — Grand four de verrerie à bassin.

chauffer 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 températures¹.

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

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



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 pouvons citer ici, à titre d'exemple, des fours à double récupération avec gaz à l'air, la vue d'un four de verrerie 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.

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 2 000°.

En supposant que le gazogène Ebelmien 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, Lencauchez, 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 fonctionnement 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 (voir p. 197).

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 : 97,6 CAL.	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. 100 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 1500°, il reste bien une perte de 10 p. 100, et surtout la question des gazogènes est un obstacle presque insurmontable à l'application de ce système, mais, à 1000°, l'utilisation de la chaleur peut être considérée comme parfaite, puisque les 6 p. 100 qui restent sont à peu 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 irréalisable¹.

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.

¹ Le cas de triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz est impossible 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.



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 les gazogènes Saïllers et Sépulture dont on verra la description dans la deuxième partie de cet ouvrage (p. 415 et 416), ne sont que des cubilots à vent soufflé, inspirés 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.

Si l'on tient compte du fait signalé par Ledebur et confirmé par la théorie de la gazéification 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 celles dont la solution intéresse le plus le progrès des fours.

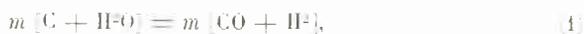
§ 5. — DEUXIÈME GROUPE DE FOURS A GAZ. GAZ A L'EAU, GAZ MIXTE

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 gazéifiée par l'eau :



avec absorption de

$$[58.2 - 29.4] m = 28.8 \text{ cal. } m.$$



Le reste du combustible est brûlé par l'air :

$$(1 - m) [C + 2 Az^2 + 1/2 O^2] = (1 - m) [CO + 2 Az^2], \quad (2)$$

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

Le mélange de ces deux gaz a la composition :

$$CO + mH^2 + (1 - m) 2 Az^2, \quad (3)$$

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

$$CO^2 + 2 Az^2 + m [H^2O + 2 Az^2] + (1 - m) 2 Az^2 \\ = CO^2 + 4 Az^2 + mH^2O. \quad (4)$$

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'opère mal.

La théorie des équilibres chimiques nous a d'ailleurs montré qu'en deçà de 600 , la rétrogradation de la gazéification prend de l'importance.

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° :

$$-28,8 m + 29,4 (1 - m) \geq C_0^{600} (m [CO + H^2] + (1 - m) [CO + 4 Az^2]).$$



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 29,4 cal. 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'eau¹ 48 p. 100 et 54 p. 100 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'eau².

Premier cas.

SIMPLE RÉCUPÉRATION PAR L'AIR SECONDAIRE

Ce cas est réalisé dans les fours de la Compagnie Parisienne du Gaz, les mêmes que nous avons déjà rencontrés avec le gaz à l'air et qui fonctionnent 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.

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 :

$$+ 29,4 - 58,2 + (1 - m) C_0^{4000} [1,2 O^2 + 2Az^2] = C_0^{600} [CO + mH^2 + (1 - m) 2Az^2]$$

$$29,4 + 18,2 - m 58,2 + 18,2 = 12,6 - m 4,2$$

$$m = \frac{36}{72,2} = 0,48.$$

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. Et nous avons signalé, à propos de l'étude des équilibres chimiques dans les gazogènes, l'intérêt que présenterait ce surchauffage préalable de la vapeur admise dans les gazogènes.



Nous donnons ici (fig. 29), à titre d'exemple de four à simple récupération à gaz mixte, un four à laiton de la Société des Métaux avec récupérateurs à courants parallèles en sens inverse. Les gazogènes de ce four donnent un gaz mixte contenant environ 12 p. 100 d'hydrogène. La température de régime y est inférieure à 1000°.

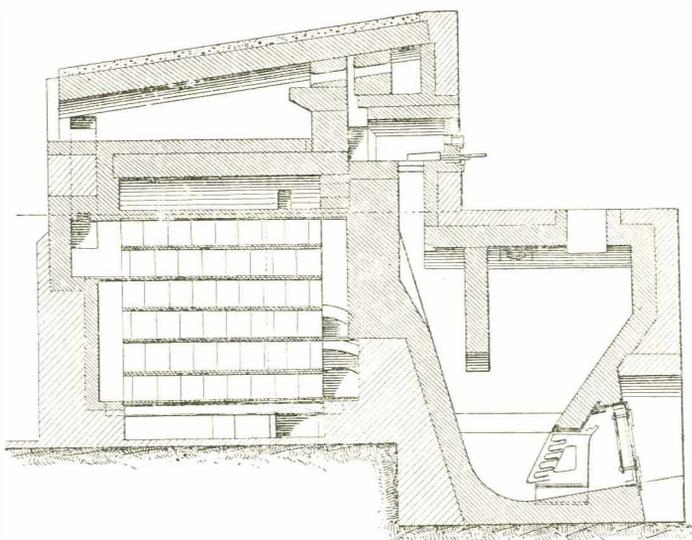
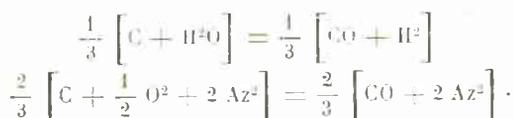
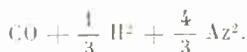


Fig. 29. — Four à cuivre, système Radot-Lencauchez.

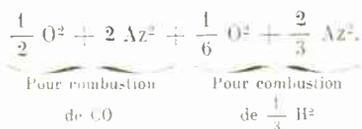
Calculons l'utilisation de la chaleur, en admettant, comme nous sommes en droit de le faire, une production de $\frac{1}{3}$ gaz à l'eau. Les réactions du gazogène sont :



La composition du gaz est :

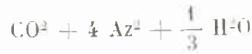


La quantité d'air secondaire nécessaire à sa composition est :



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 :



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'eau¹.

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

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

CHALEUR DISPONIBLE : 97,6 CAL.		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	6,4
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	18,3	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 p. 100 $\frac{F - R}{97,6} = P$	22	36	
Chaleur utilisée ou rendement U	78	64,4	

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 3,5 cal. ; à 1 000° 0,8 cal. seulement.

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



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 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 1000° 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.

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 Kærting 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, comme exemple de four à double récupération, à gaz mixte, le four de verrerie à bassin de 150 tonnes dont nous avons donné le bilan ; les gazogènes Siemens sont à cendrier noyé d'eau donnant un gaz tenant de 8 à 10 p. 100 d'hydrogène. La température de régime y est de 1450° (voir p. 145).

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 1000° ou 1500°. Nous avons ainsi immédiatement le tableau suivant :



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

CHALEUR TOTALE DISPONIBLE : 97,6 CAL.	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
— perdue par les fumées F — R.	14,9	15,5
— perdue p. 100 $\frac{F - R}{97,6} = P$	15,2	15,8
— 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 $84,8 - 75,7 = 9,1$ p. 100 ; à 1 500° elle atteint $84,3 - 66,3 = 18$ p. 100 et peut réaliser une diminution de près de $\frac{1}{3}$ 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° à 600°, et c'est ce double résultat qui peut faire gagner jusqu'à 25 p. 100 de combustible, sur les calories qui se perdraient à la cheminée.

Cette économie est corrélative d'une élévation intéressante de la température de combustion.



*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. 36) 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° ou 1 500°, la proportion de gaz à l'eau peut être portée à 48 p. 100 et 54 p. 100, 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.

Tableau du 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 : 97,6 CAL.	1 000°	1 500°
Calories emportées pour les fumées F	47,4	77,5
— récupérées par l'air total R	37,0	57,8
Chaleur perdue par les fumées F — R	10,4	19,7
Perte p. 100 $\frac{F - R}{97,6} = P$	10,6	20,2
Chaleur utilisée ou rendement U	89,4	79,8



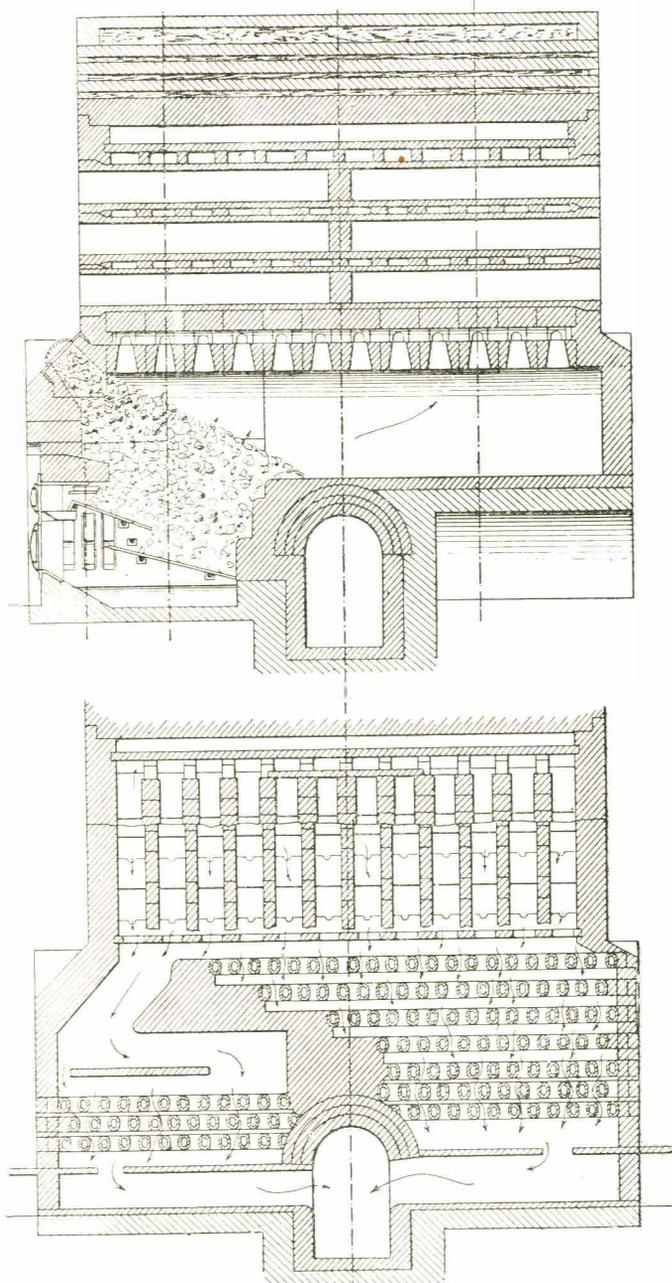


Fig. 30. — Four Klönne.

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.

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 total⁴.

Quatrième cas.

TRIPLE RÉCUPÉRATION PAR L'AIR PRIMAIRE ET LE GAZ, L'AIR SECONDAIRE

La triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz n'a pas été réalisée industriellement, à notre connaissance. Elle

⁴ 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 primaire qu'on ne doit considérer comme complète qu'à partir de 1 000° mesurée sous la grille ou dans le cendrier.



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 15,2 p. 100 à 1 000° et de 15,8 p. 100 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 superficiel, conclure à une récupération parfaite, à un rendement de 100 p. 100, tandis qu'il y a toujours une légère perte résultant de ce qu'au-dessous de 600° il ne reste plus en présence des fumées que l'air total, dont la chaleur d'échauffement est moindre.

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 suivant (p. 490) résume cette discussion.

Deux résultats remarquables se déduisent immédiatement de l'examen du tableau: le rendement élevé de ce 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 10 p. 100 du combustible brûlé.

Enfin, il est un cas particulier où la triple récupération présentera



un avantage plus grand encore que cette économie de $\frac{4}{10}$: 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.

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

CALORIES DISPONIBLES : 97,6 CAL.	FOUR A 1000°		FOUR A 1500°	
	48 p. 100 de gaz à l'eau 52 — — — à l'air.		54 p. 100 de gaz à l'eau 46 — — — à l'air.	
	Gaz : CO + 0,48 H ² + 1,04 Az ² Fumées : CO ² + 4 Az ² + 0,43 H ² O		Gaz : CO + 0,54 H ² + 0,92 Az ² Fumées : CO ² + 4 Az ² + 0,54 H ² O	
	RÉCUPÉRATION DE :		RÉCUPÉRATION DE :	
	1 000° à 600°	600° à 0°	1 500° à 600°	600° à 0°
Calories emportées par les fumées F	15,6	26,5	50,6	26,8
Calories pouvant être récupérées par l'air total	13,5	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	»	5,1	»	5,4
Perte p. 100 P	0	5,2	»	5,7
Chaleur utilisée U	94,8		94,3	

¹ La limite de récupération est dépassée de 3,3 cal. entre 1 000° et 600° : la récupération est parfaite.

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

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 p. 100 de matières volatiles, tandis que la houille nécessaire à la fusion n'est pas supérieure, dans certains fours, à 60 p. 100 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 p. 100 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.

Dans les fours à acier, la triple récupération aurait comme avantage une élévation appréciable de la température de combustion dont nous avons plusieurs fois signalé l'importance. Le problème est donc du plus haut intérêt.

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.

§ 6. — FOUR A RETOUR DE FUMÉES OU FOUR SIEMENS.

NOUVELLE DISPOSITION. — ALIMENTATION DES GAZOGÈNES PAR L'ACIDE CARBONIQUE DES FUMÉES

A. 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 four Siemens nouvelle disposition 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 1890 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.

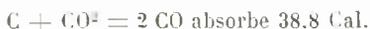
Nous avons donc deux cas à examiner : emploi des fumées, emploi d'acide carbonique pur.

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.

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 1 000° 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 :

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

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

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

La composition du gaz sera :

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

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

$$-26,1 m + 29,4 (1 - m) = (3 - m) 4,3$$

$$m = 0,33.$$



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 97.6 cal., l'économie maximum sera du tiers de la chaleur d'échaulement de l'acide carbonique de 1 à 1 000, c'est-à-dire $\frac{12,7}{3}$, ce qui représente une économie de carbone régénéré de 4.3 p. 100.

A cette économie viendraient évidemment s'ajouter celles résultant de la meilleure récupération dont le groupe du gaz à l'eau donnera une valeur très approchée, et la chaleur de vaporisation de l'eau qui disparaîtrait ; 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.

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 récupération 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 1 450°, *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 1 000° on pourra encore envoyer 44 p. 100 d'acide carbonique.

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

CHALEUR DISPONIBLE : $Q = 97,6 \text{ CAL.}$	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 récu- pérées par le chauffage du gaz	—	—	—	7,5 ¹	—	—	—	7,3 ²
Calories récu- pérées par de l'air secon- daire	26,5	57,8 ³	26,5	57,8	37,0	57,8 ³	37,0	57,8 ³
Calories récu- pérées par de l'air pri- maire	—	—	—	—	—	—	5,1 ⁴	7,3 ⁵
Total R	26,5	57,8	34	65,1	37,9	57,8	42,1	64,5
Différence F — R ou perte. $\frac{F - R}{Q} = P$	15,6	19,7	8,1	2,4	5,1	9,7	2,4	2,4
Perte p. 100	16	10	8,5	2,5	5,6	10	2,5	2,5
Chaleur utilisée ou rende- ment U	84	90	94,5	97,5	94,4	90	97,5	97,5

¹ La limite de récupération est ici dépassée, et le gaz pourrait absorber à 1 000° 15,12 Cal. et à 1 500° 44,4 Cal., si la récupération n'était limitée par l'équivalence des masses.

² Air total.

³ La limite de récupération est dépassée, et le gaz pourrait absorber à 1 000° 13,4 Cal., à 1 500° 44,4 Cal., si la récupération n'était limitée par l'équivalence des masses.

⁴ Air total.

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. Le tableau ci-contre 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.

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

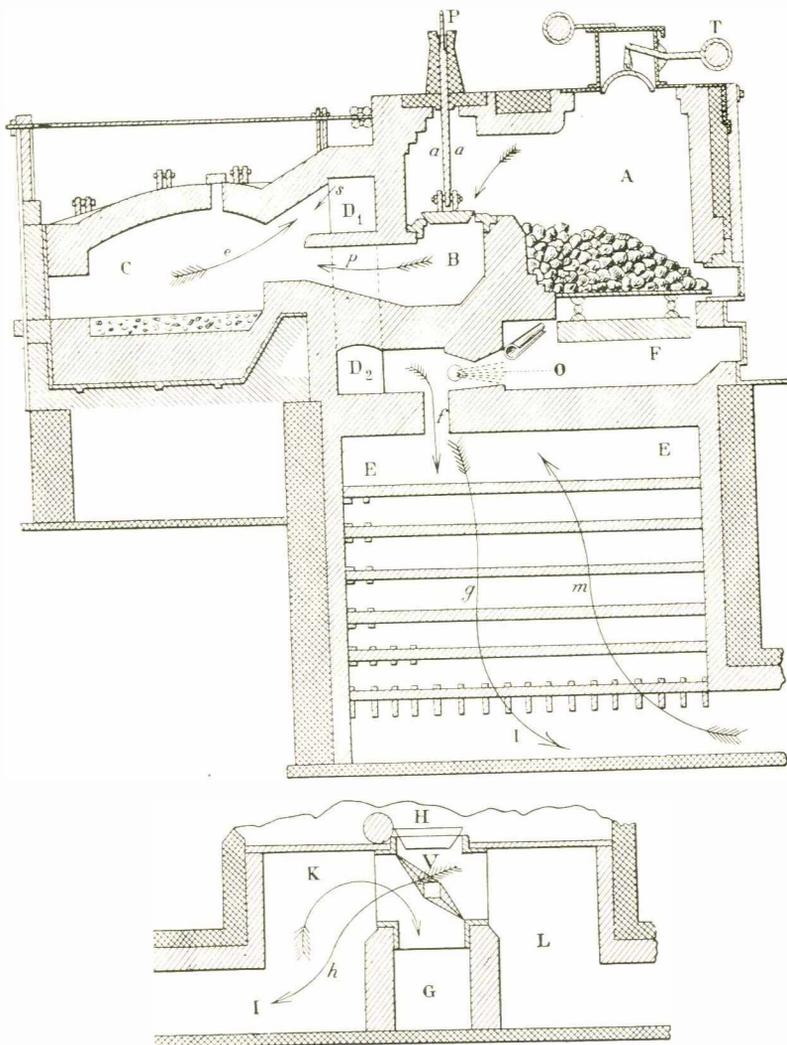


Fig. 31. — Four Siemens nouvelle disposition, coupe schématique.

- A. Gazogène à grille horizontale à cendrier fermé.
 B. Clapet de distribution, à inversion. Deux clapets semblables sont placés aux extrémités d'un fleau, de façon que l'un soit ouvert 'B', tandis que l'autre B est fermé.
 C. Laboratoire présentant le dispositif dit en fer à cheval, de Siemens, à flamme semi-circulaire.
 D₁, D₂. Carneau établissant la communication entre le laboratoire et le récupérateur E.
 E. Récupérateur à inversion conjugué au régénérateur F.
 F. Cendrier fermé alimenté soit par les fumées au moyen de l'injecteur O, soit par l'air chaud au moyen de l'injecteur C, soit encore à l'air froid par un injecteur spécial.
 G, G'. Carneaux de passage des fumées vers la chambre de récupération ou de l'air vers le four, la porte du cendrier étant fermée.

n'est pas surprenant, puisque les fumées chaudes agissent plus com-

plètement, 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 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 faible¹.

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 1000°. Le chauffage de l'air primaire assure un rendement maximum de 75,7 p. 100 avec gaz à l'air, de 78 avec gaz à l'eau et de 84 p. 100 avec les fumées. Le chauffage de l'air secondaire porte ces divers rendements à 94,8, 89,4 et 94. Le four Biedermann 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 p. 100 est très voisin de celui que donne le four à simple récupération avec gaz à l'eau. On en peut déduire que le nouveau four sera à 1000° un peu plus avantageux que tout autre système de four à simple récupération.

Mais il importait d'observer que, lorsqu'on chauffe l'air primaire, le rendement est le même (94 p. 100 maximum) avec du gaz à l'air

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



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.

A 1500°, au contraire, les rendements des fours à simple récupération (60,5 avec gaz à l'air, 64,1 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 p. 100) 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 une meilleure utilisation du combustible que la théorie conteste et que la pratique n'a pas suffisamment confirmé.

§ 7. — RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS, CLASSEMENT DES FOURS

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

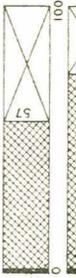
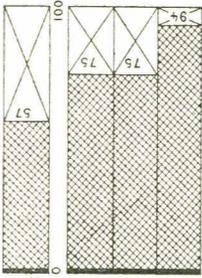
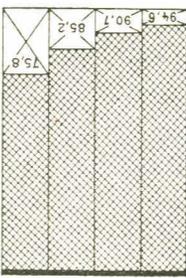
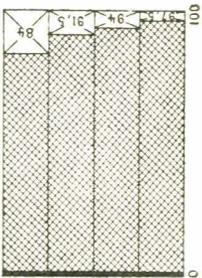
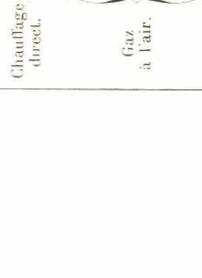
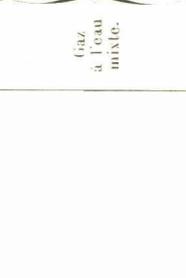
Ce tableau donne la valeur absolue du maximum d'utilisation de chaleur dans les fours, sans tenir compte de la possibilité ou de l'impossibilité de réalisation pratique de chaque système ; aussi ne doit-on pas en déduire immédiatement et sans examen un classement des fours d'après la valeur de U . La 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



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

1^{er} Maximum de chaleur utilisée U  2^e Perte minimum par les fumées 

CLASSIFICATION	1 000 DEGRÉS		1 500 DEGRÉS	
	DIAGRAMMES DES CHALEURS utilisées et perdues (U. et P.).	APPLICATIONS industrielles.	MODE DE RÉCUPÉRATION	APPLICATIONS industrielles.
Chauffage direct.		Fours à cuivre, Fours Biehleroux, Boellius, etc.	Pas de récupération.	Fours à puddler, fours de verrerie et céramique.
		Fours à cornues à gaz. Sans application possible. Fours à cornues divers (application partielle).	Simple récupération par l'air secondaire. Double récupération par gaz.	Fours de verrerie à bassin. Fours Martin-Siemens, etc., pour métallurgie et verrerie.
		Fours à cornues, à l'acier Siemens, Lencuchaev, etc. Fours Siemens.	Simple récupération par l'air secondaire. Double récupération par gaz.	Fours de verrerie à bassin. Four Siemens.
Gaz à l'eau mixte.		Four Klönne à cornues (application partielle).	Double récupération par air secondaire. Triple récupération par gaz.	Application partielle dans le four Biedermann et Harvey.
		Application partielle. (Four Biedermann et Harvey).	Simple récupération par l'air secondaire.	?
		Sans application.	Double récupération par gaz.	Application partielle.
Gaz régénéré des fumées.		Application partielle.	Double récupération par air secondaire. Triple récupération par gaz.	Sans application.
		Application partielle.	Simple récupération par l'air secondaire.	Application partielle.
		Sans application.	Double récupération par air secondaire. Triple récupération par gaz.	Sans application.



longuement détaillée dans ce qui précède, que nous résumerons brièvement nos conclusions antérieures :

1^o Aux températures de 1500° 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 mixte : son rendement de récupération est de 85 p. 100.

On pourrait gagner encore une quantité de chaleur importante (10 p. 100) en chauffant l'air primaire, puisque la limite d'utilisation dans les fours à triple récupération est de 95 p. 100, 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 p. 100, 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 1500° une utilisation vraiment très parfaite des calories et une solution du problème que l'on pourrait considérer comme définitive¹.

En seconde ligne, et avec une grande infériorité (66 p. 100), viennent les fours à double récupération avec gaz à l'air (four Siemens primitif) ; puis, avec un faible écart (64 p. 100), les fours à simple récupération avec gaz à l'eau ; enfin (60 p. 100) 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^o Fours à triple récupération, à gaz mixte ;
- 2^o Fours à gaz mixte, à double récupération pour l'eau et le gaz ;
- 3^o Fours à gaz à l'air, — — — —

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 p. 100 : on pourrait donc, dans cette industrie, escompter une économie de 10 à 14 p. 100 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.



- 3^o bis (*) Fours à double récupération par l'air primaire ou à retour de fumées ;
 Four Siemens nouvelle disposition.
 4^o Fours à simple récupération à gaz mixte ;
 5^o Fours à simple récupération à gaz à l'air ;
 6^o Fours à chauffage direct.

2^o 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 p. 100), et celui du four à double récupération avec gaz à l'eau (88 p. 100), 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 1 000° 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, 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 p. 100, 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. En supposant que l'on chauffe à 400° seulement l'air primaire, ce qui est actuellement possible, l'économie réalisable serait 6 p. 100 ; 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 1 000°, d'un intérêt industriel, serait le suivant :

- 1^o 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.

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 p. 100, 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 effet 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 p. 100 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.

§ 8. — 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 avons précédemment exposée 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 p. 100 n'a plus en pratique qu'un rendement de



31 p. 100. 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, intervenir 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 refroidissement¹.

La première hypothèse², *gazéification complète du carbone en oxyde de carbone*, est loin d'être réalisée : il y a presque toujours 3 p. 100 d'acide carbonique contre 20 à 22 p. 100 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

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 plus haut les hypothèses ayant servi de base à la théorie.



de température du gaz, accroissement tout à fait négligeable puisque le rayonnement total n'est pas supérieur à 10 p. 100, 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 p. 100 d'acide carbonique aux gazogènes fonctionnent pour 1/5 comme des fours à chauffage direct, et pour 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.

Une seconde hypothèse est relative à l'*invariabilité du régime* dans les gazogènes, chambres de récupérations et laboratoire : or, dans les fours continus, les chambres subissent des oscillations de 50° du début à la fin d'une inversion. Ces différences, qui ne portent que sur les chaleurs sensibles des gaz entrant dans le four, sont négligeables.

Le *refroidissement du gazogène* que nous avons négligé par une troisième hypothèse a une importance plus grande ; nous l'avons trouvé de 7 p. 100, et c'est un minimum, car la température de 800° est exceptionnelle dans le cas de gaz mixte. 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.

Il reste les deux hypothèses les plus importantes et le plus en contradiction avec la pratique : celle relative 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 p. 100 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 1/5 l'effet de la récupération, la chaleur récupérée est encore de 40 à 50 p. 100 ; 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 calculés 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 comme 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 dans les gazogènes. 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 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 de fours qui permettent seuls une critique raisonnée d'un système de chauffage¹.

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 sous réserve des interprétations que nous 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 gazo-gènes à haute température, qui seuls permettront, quel que soit d'ailleurs le mode de gazéification, d'obtenir avec un récupérateur plus simple des rendements supérieurs aux rendements actuels.

¹ Nous insistons d'autant plus sur la nécessité de ces bilans complets, avec analyses 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.



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.

Le problème de l'économie de combustible ou d'énergie calorifique dans les fours qui présente de nos jours d'autant plus d'intérêt qu'il commence à y avoir concurrence entre la solution thermique et la solution électrique est, on vient de le voir, basée sur une science précise, s'appuie sur une théorie mathématique que la pratique de fours confirme.

Nous ne saurions trop recommander la pratique de cette science.

Nous signalons enfin, ce fait remarquable que la théorie de la récupération nous conduit à la même conclusion que l'étude de hautes températures et que la théorie générale des équilibres chimiques : l'importance prépondérante de la bonne gazéification, l'intérêt que présentent les gaz mixtes et l'utilité d'enrichir le combustible gazeux en calories latentes par un emploi judicieux de l'eau ou de la vapeur d'eau, au besoin surchauffée, dans les gazogènes.

C'est ainsi que l'on obtiendra en même temps la température et l'économie. Et il reste beaucoup à faire dans ce sens.



CHAPITRE IV

HOUILLE BLANCHE. — FOURS ÉLECTRIQUES

FOUR ÉLECTRIQUE

La découverte de l'arc voltaïque par Davy avait déjà donné l'idée à quelques savants d'utiliser sa haute température à la réalisation de certaines expériences mais c'est seulement après la découverte des machines électriques susceptibles de débiter des courants intenses que les recherches se multiplièrent et aboutirent au succès.

Après les brevets de fourneaux électriques de Pichon en 1833, puis de Siemens en 1879, on voit éclore rapidement toute une floraison d'inventions, je ne citerai pour mémoire que celles de Clerc en 1880, de Cowles en 1885-86-87, Héroult en 1886, Minet en 1887, Crompton en 1888 et 93, Readmann en 1888, Kiliani en 1889, Wilson en 1890 et 91. En 1892, Moissan entreprend l'étude complète des réactions à haute température puis avec Bullier, de Laval, Girard et Street, le four électrique entre dans la phase industrielle pour revêtir enfin la forme moderne des appareils de Héroult, Girod, Stassano, Gin et Leleux, Keller, Kjellin, Roehling et Rodenhauser.

Le four électrique au sens large du mot est un appareil permettant d'utiliser d'une manière quelconque les effets thermiques et chimiques du courant électrique.

Le courant peut agir de deux façons différentes, soit en échauffant simplement la masse, soit en y produisant des réactions chimiques, mais il est souvent difficile de séparer ces deux actions car elles se mélangent intimement et concourent ensemble au résultat final. C'est le cas de la production de l'aluminium, du sodium ou du potassium où le bain, maintenu à l'état de fusion par le passage du courant, est en même temps décomposé par lui.

Comme source de calories le courant peut être utilisé sous forme d'arc voltaïque ou sous forme de résistance.

On peut donc considérer deux grandes catégories de fours élec-



triques : les fours à arc et les fours à résistance, mais cette classification est insuffisante car parmi les fours à arc il faut distinguer ceux où le courant traverse la masse et ceux où cette masse n'est échauffée que par le rayonnement de l'arc. De même parmi les fours à résistance il y a lieu de séparer ceux qui n'utilisent que le courant direct ou primaire en réunissant les électrodes par la masse à échauffer, et ceux qui font de cette masse le circuit secondaire d'un transformateur qu'ils échauffent par des courants d'induction.

La classification complète comportera donc des fours à arc direct et des fours à arc à rayonnement, puis des fours à résistance simple et des fours à induction.

Il y a lieu dans chaque cas d'examiner la nature du courant approprié : en général dans les fours à résistance à courant direct ou primaire et dans les fours à arc avec masse conductrice on évite le courant continu qui donne lieu à des actions électrolytiques nuisibles.

Dans les fours à résistance à courant secondaire, le courant alternatif est imposé par le principe même de l'opération.

Enfin dans les fours à arc à rayonnement, au contraire, le courant continu est celui qui convient le mieux.

Nous allons passer en revue les grandes industries qui utilisent le four électrique, en indiquant les types de four qu'elles emploient de préférence, et autant que possible les résultats obtenus, et essayer de tirer de ces résultats quelques conclusions pratiques.

INDUSTRIE ÉLECTROSIDÉRURGIQUE

La production directe du fer brut ou de l'acier par traitement du minerai au four électrique est un problème de la plus haute importance pour les pays qui tout en disposant de minerais riches et de forces hydrauliques considérables, sont obligés de payer cher le coke. Aussi de grands efforts sont-ils tentés pour arriver à le résoudre, en Scandinavie, en Italie et au Canada. Mais jusqu'à présent, les limites imposées à ce mode de traitement sont étroites.

M. le professeur Neumann, de l'École supérieure technique de Darmstadt, a publié récemment dans la revue *Stahl und Eisen* un tableau fort instructif à ce sujet. Il prend pour bases les productions industrielles obtenues au four électrique jusqu'à ce jour, en kilogramme, de fer brut par HP de vingt-quatre heures ou comme chiffre inverse, le nombre de kilowatts-heure nécessités pour la pro-



duction d'une tonne de fer brut et il indique, en fonction des différents prix de coke, le prix que devrait coûter le HP an électrique pour que le haut fourneau et le four électrique puissent se faire concurrence.

Voici ce tableau :

KILOGRAMMES de fer par HP 24 heures.	KILOWATTS-HEURE par tonne.	POUR UN PRIX DU COKE DE :			Prix que devrait coûter le HP an en marks.
		16 marks.	24 marks.	32 marks.	
6	2 950	20,50	30,70	41	
8	2 200	25,60	38,40	51,20	
10	1 750	32	48	64	
12	1 500	36	54	72	

On peut en conclure que, en dehors de certains cas particuliers, la concurrence du four électrique et du haut fourneau pour le traitement direct du minerai n'est guère possible, car les pays où le prix du HP an peut descendre au-dessous de 50 marks sont encore l'exception.

La question se pose plus favorablement pour la transformation du fer brut en acier avec ou sans adjonction de rognures ou de minerai. Ici on peut envisager sans invraisemblance le remplacement du four Martin ou du convertisseur par le four électrique, soit dans les pays où l'énergie électrique est bon marché, soit par l'utilisation du gaz des hauts fourneaux pour la production de cette énergie.

Enfin si l'on avance encore dans la suite des opérations et que l'on passe au raffinage des aciers déjà traités au four Martin ou au convertisseur, on est obligé de constater que le four électrique permet d'obtenir des résultats qui ne sauraient être obtenus en dehors de lui et que, par suite de la qualité des produits qu'il fournit, son emploi peut devenir économique même en ayant recours à la vapeur comme source de l'énergie électrique. C'est ce qui se produit, en particulier dans la fabrication des aciers de construction, des aciers à outil, du fer doux souple pour tréfilerie et tôlerie, des tôles sans soudures, des tôles d'alliage pour usages électriques, des fontes de choix, etc.

Il est intéressant de signaler à ce point de vue, le développement



qu'a pris dans ces dernières années la fabrication des rails de chemin de fer en acier électrique. C'est par milliers que l'on compte aujourd'hui le nombre de tonnes de rails fabriqués par ce procédé, en particulier en Allemagne où ces rails sont à l'essai depuis longtemps sur les chemins de fer de l'État en Prusse, en Bavière et aux pays annexés. Ils sont également adoptés sur les chemins de fer fédéraux suisses, et sur le métropolitain de Londres.

La supériorité du four électrique pour l'obtention de tous les produits spéciaux, réside en ce fait que, contrairement à ce qui se passe dans les autres fours métallurgiques, on peut y doser, au cours de la fabrication à une température élevée, réglable à volonté, et à l'abri de l'air, non seulement le carbone mais tous les éléments étrangers qui doivent faire partie du produit final.

Four de la société électrométallurgique française. — Cette société dont l'usine est à Froges a créé divers modèles de fours, les uns à résistance, les autres à arc et résistance combinés qui permettent d'obtenir de la fonte ou de l'acier.

Le premier four à résistance comporte un creuset monté sur roues et qui peut pénétrer dans une chambre en matière réfractaire.

Le creuset est en charbon et sert d'électrode. L'autre électrode, verticale et mobile, est accrochée à la voûte de la chambre et peut pénétrer dans le creuset.

On peut avec ce four et pendant une même opération obtenir à volonté de la fonte, du fer ou de l'acier ; la réduction, l'affinage et l'épuration se font successivement par addition de réactifs différents et réglage de la température.

Ce four a été perfectionné en 1901 : le creuset mobile a été supprimé et on a percé dans la paroi deux trous de coulée, l'un pour le laitier, l'autre pour le métal.

Plus récemment la même société a construit un four pour la production de la fonte destinée spécialement à la production de l'acier (voir fig. 32).

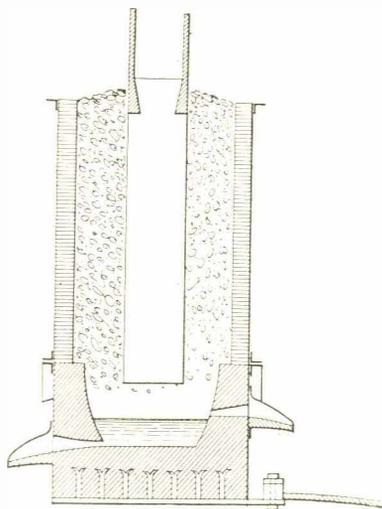


Fig. 32. — Four de Froges.



On n'y réduit par le charbon que la moitié du minerai environ, le reste étant réduit par les gaz de la réaction. On produit ainsi une fonte phosphoreuse ou siliceuse que l'on passe soit au Bessemer pour faire de l'acier commun, soit au four électrique, pour faire des aciers fins.

L'appareil se compose d'un creuset en graphite aggloméré au goudron, qui forme l'une des électrodes et qui est surmonté par une partie cylindrique amovible garnie de briques réfractaires et dans laquelle se déplace une électrode verticale.

Le four fonctionne à la fois par arc et par résistance. Au fond du creuset se trouve une plaque de fonte portant des pointes de fer destinées à établir un contact intime avec le graphite, c'est cette plaque de fonte qui est reliée aux conducteurs d'amenée du courant.

On charge le four avec un mélange en fragments et poussières, de minerai, de castine et de charbon. L'arc fond le minerai qui filtre à travers le charbon et comme celui-ci, qui est en fragments et par suite résistant, est échauffé par le passage du courant, il réduit le minerai fondu et sature le fer.

Quand l'appareil est amorcé, on le remplit jusqu'en haut avec le même mélange que ci-dessus, mais en morceaux plus volumineux. Les gaz provenant de la réduction et qui sont constitués presque uniquement d'oxyde de carbone à cause de l'absence d'air, passent à travers la charge et réduisent le minerai en brûlant à l'état d'acide carbonique.

Avec un creuset de 1,50 m. de diamètre intérieur et 2,60 m. de hauteur, on produit des coulées de 1500 kilogrammes et l'on a besoin d'une puissance de 1000 HP environ pour produire 10 à 12 tonnes par jour avec du minerai à 56 ou 60 p. 100 de fer. On produit donc environ 0,4 à 0,5 kg. de métal par HP heure.

Haut fourneau électrique Keller. — Cet appareil est destiné à permettre d'une part de traiter des masses importantes, et d'autre part de fonctionner d'une manière continue.

Pour obtenir ce résultat, M. Keller utilise plusieurs foyers qui entourent la masse à traiter. Le courant arrive et sort par des électrodes verticales afin que la sole puisse être constituée par des matériaux acides, neutres ou basiques suivant le traitement à produire.

Pour que la marche soit continue on met en parallèle plusieurs



systèmes d'électrodes qui peuvent se remplacer les uns par les autres sans arrêt.

Chaque électrode a son appareil de réglage qui permet de l'élever ou de l'abaisser à volonté, et par suite de déplacer l'un des arcs sans toucher aux autres.

Au-dessus de la chambre de fusion se trouve une colonne en maçonnerie réfractaire destinée à recevoir le minerai, le charbon et le fondant qui sont introduits par le haut.

Comme celui de Froges, ce four fonctionne à la fois comme four à arc et comme four à résistance, mais M. Keller continue le traitement par un affinage qui se fait dans un four à rayonnement (voir fig. 33).

Ici les électrodes ne sont pas en contact avec la masse, l'arc jaillit directement entre elles, et la partie supérieure du four est formée de voûtes de réverbération percées d'orifices par lesquels on introduit les réactifs ou bien on prélève les échantillons.

On règle la température en élevant ou en abaissant les électrodes pour les éloigner ou les rapprocher du bain fondu, et pour oxyder le métal, on ajoute des oxydes métalliques, en particulier de l'oxyde de fer plutôt que d'introduire de l'air qui augmenterait l'usure des électrodes et ne permettrait pas de doser aussi bien l'action oxydante.

La Compagnie électrotechnique Keller, Leleux et C^{ie} dispose, à son usine électrométallurgique de Livet, de hauts fourneaux électriques pouvant produire chacun 8 000 kilogrammes d'acier par jour de vingt-quatre heures, par réduction du minerai. Si au lieu de réduire du minerai, on opère la fusion de déchets de fer et d'acier, la production peut être portée à 25 000 kilogrammes.

Le courant employé est du courant alternatif monophasé. La tension des arcs dans le four à réduction est d'environ 25 à 30 volts et de 50 à 75 dans le four d'affinage.

Four Héroult. — Le four Héroult, représenté par la figure 34, n'est pas à proprement parler un four à arc direct. Les deux élec-

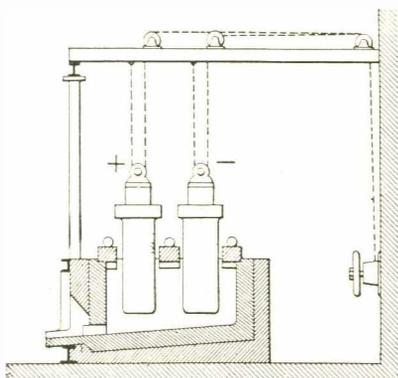


Fig. 33. — Four d'affinage Keller.



trodes sont en effet suspendues à la partie supérieure du four et descendent jusqu'à la couche du laitier.

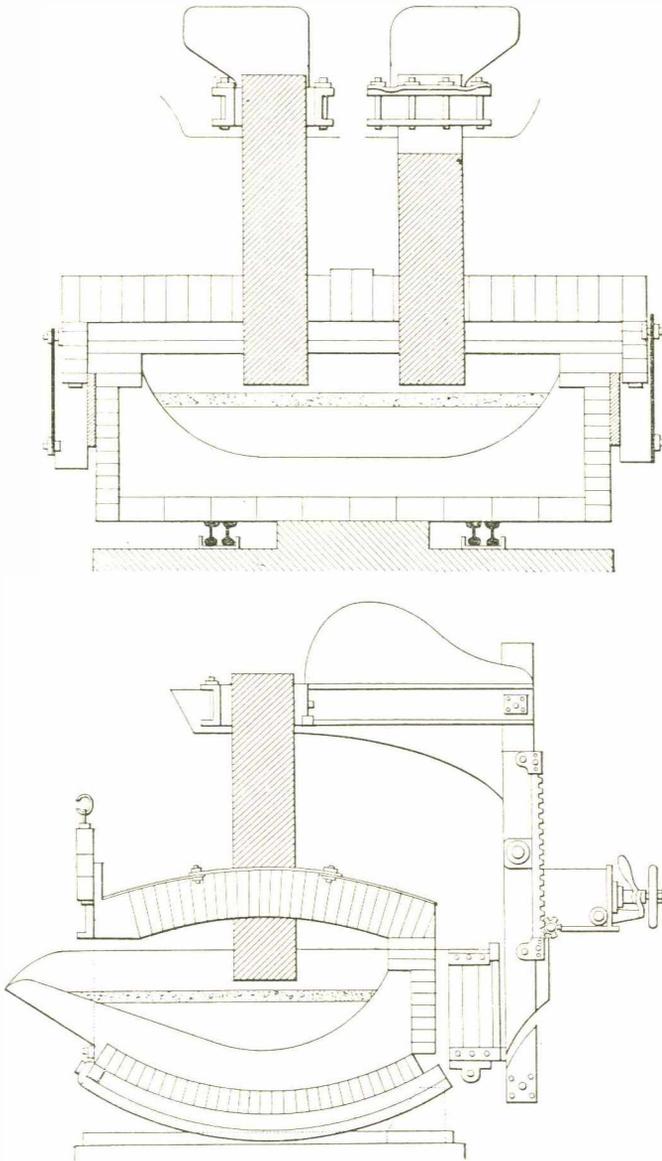


Fig. 34. — Four Héroult.

Le bain métallique qui se trouve sous la couche du laitier n'est pas placé directement sur le passage du courant. Celui-ci pénètre

par un premier arc dans le laitier, il le traverse en partie ainsi que le bain métallique et va rejoindre par un dernier arc l'électrode de sortie.

Il existe dans la couche du laitier, autour des deux arcs voltaïques, deux zones à température maxima qui échauffent par conductibilité tout le bain métallique jusqu'à ce que l'équilibre soit à peu près établi.

Il y a bien théoriquement deux causes à l'échauffement de la masse, d'une part celle que nous venons de signaler et d'autre part le passage du courant à travers le bain, mais la résistance de ce bain, étant donnée sa grande section transversale, est si faible que la quantité de chaleur ainsi produite est pratiquement négligeable devant l'autre. Tout au plus peut-on dire qu'au moment de la mise en marche, lorsque le four est rempli de matières solides et froides, le passage du courant à travers une masse qui est alors résistante contribue à la mettre en fusion.

Le four Héroult est formé d'une enveloppe en tôle ayant la forme d'une cuvette peu profonde et recouverte d'une garniture de briques réfractaires et d'une masse pilonnée de dolomite. Le fond arrondi porte deux rails recourbés et repose par des galets sur des fers à U formant chemin de roulement.

Le couvercle en voûte est formé d'un cadre en fonte entourant une maçonnerie en terre réfractaire et peut être enlevé.

Le four entier peut être basculé comme un creuset au moyen d'une crémaillère actionnée par une commande hydraulique ou électrique.

Les électrodes traversent le couvercle et sont réglées par des appareils automatiques qui les arrêtent à une distance de 45 millimètres à peu près du bain métallique. On peut également les manœuvrer à la main.

A l'usine de la Praz, un four Héroult pouvant donner en une seule coulée 3 000 kilogrammes de métal absorbe en moyenne 4 000 ampères sous 410 volts avec du courant alternatif monophasé à 33 périodes par seconde et le temps d'une coulée est d'environ sept heures, ce qui donne une production d'environ 0,7 kilogramme de métal par HP heure.

Avec un four pouvant contenir 500 kilogrammes on abaisse le nombre de périodes jusqu'à 25 par seconde.

Four Girod. — Le four inventé par M. Girod est le type du four à arc direct puisque les électrodes suspendues à la voûte du four sont



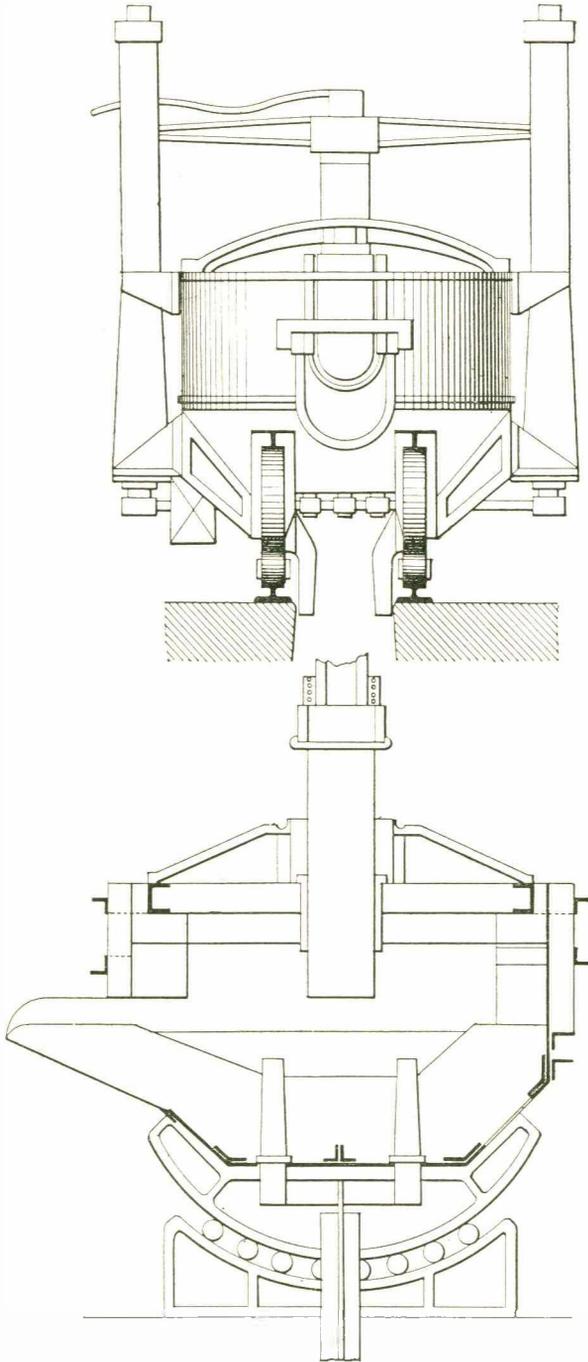


Fig. 35. — Four Girod.

toutes de même polarité tandis que les autres qui traversent la sole sont mises en contact avec le bain métallique (voir fig. 35).

Le corps du four est constitué par des tôles d'acier qui forment une cuvette circulaire ou rectangulaire surmontée par une voûte en pierres siliceuses. Les maçonneries réfractaires sont faites de magnésite ou de dolomite.

Lorsque le travail est terminé, on bascule le four pour faire écouler le métal.

Le fond de la cuvette est partagé symétriquement par des pièces de jonction en acier doux qui sont reliées à l'un des pôles de la source d'énergie. La partie supérieure de ces pièces qui est en contact avec le bain entre en fusion avec lui, aussi est-on obligé pour limiter l'échauffement d'entourer la partie inférieure d'une circulation d'eau.

Four Stassano. — Ce four rentre dans la catégorie des fours à arc à rayonnement (voir fig. 36 et 37). Il est destiné, d'abord à réduire le minerai, puis à fondre la masse sous l'action de l'arc électrique.

Il se compose de deux troncs de cône réunis par leur plus grande base, le tronc de cône supérieur étant beaucoup plus allongé que l'autre et pouvant être remplacé par un cylindre.

L'espace intérieur constitue la chambre de réduction et de fusion du minerai et le métal fondu se rassemble à la partie inférieure dans un creuset où sont ménagés des trous de coulée.

Les cylindres de charbon qui forment les électrodes pénètrent latéralement par des orifices à double paroi métallique munis d'une circulation d'eau.

Les électrodes sont soutenues par un système de leviers qui règlent leur écartement.

De la partie supérieure du four partent les conduites d'échappement des gaz qui aboutissent à une valve hydraulique destinée à empêcher les rentrées d'air.

On prépare généralement le mélange de minerai, charbon, et chaux ou silice, destiné à produire le métal que l'on veut obtenir, en briquettes avant de l'introduire dans le four. Pour cela on fait le dosage de ce mélange, on le pulvérise et on l'additionne de goudron dans la proportion de 5 à 10 p. 100, puis on comprime le tout à la presse hydraulique.



Afin de faciliter la diffusion de la chaleur et le mélange des ma-

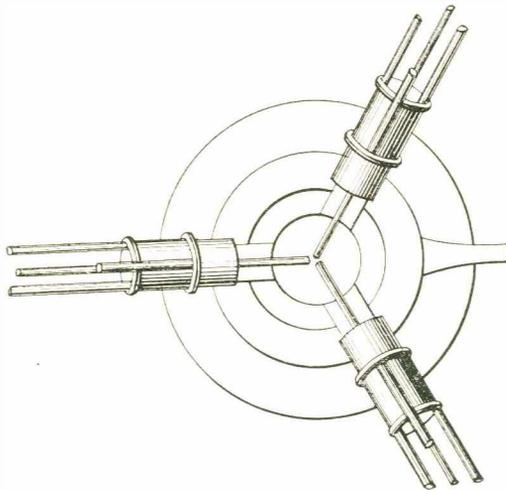
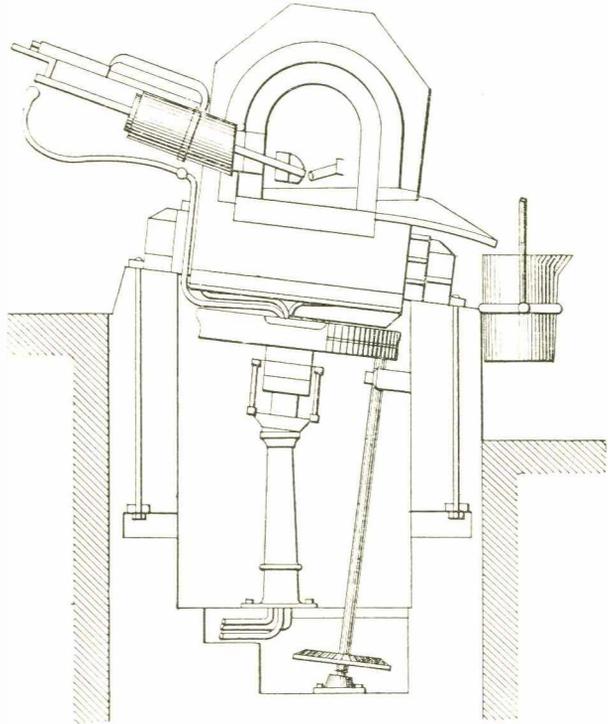


Fig. 36. — Four Stassano.

tières, l'ensemble du four peut être animé pendant son fonctionne-

ment d'un mouvement de rotation autour d'un axe incliné de 7° environ par rapport à la verticale. Le courant arrive aux électrodes par des colliers de contact.

On peut utiliser indifféremment soit du courant monophasé, soit du courant triphasé.

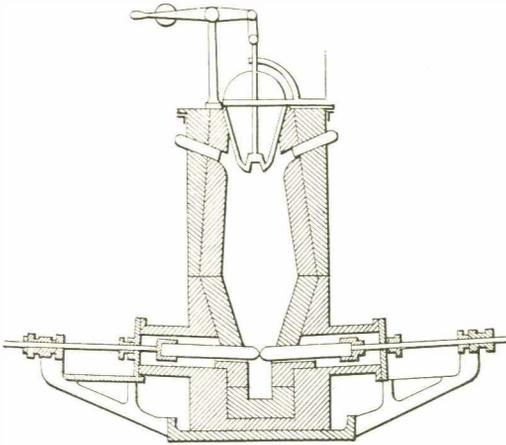


Fig. 37. — Four Stassano.

Four Gin. — En 1897, M. Gin eut l'idée de construire un four à chauffage direct par résistance. Pour obtenir une résistance suffisante du bain il donna à son four la forme d'un canal de grande longueur et de faible section, et à ses extrémités il plaça 2 blocs d'acier intérieurement refroidis qui constituaient les électrodes (voir fig. 38).

Le canal est étroit pour augmenter la résistance au passage du courant et provoquer l'échauffement de la masse, tandis que les électrodes sont au contraire à grande section pour éviter leur élévation de température.

L'appareil est constitué par un chariot mobile sur rails portant une sole en matériaux réfractaires dans laquelle est creusé le canal sinueux qui sert de creuset.

La garniture doit pouvoir supporter les plus hautes températures de bain métallique : les revêtements siliceux sont trop fusibles et la chaux ou la magnésie risquent de donner des scories ; les substances qui conviennent le mieux semblent être la bauxite ou la chromite de fer agglomérée artificiellement.

Ce four n'a guère reçu d'application, en raison des inconvénients



qu'il présente : le refroidissement des électrodes est difficile à obtenir à cause des courants intenses qui y passent et ces courants intenses produisent des effets d'induction assez considérables pour limiter la puissance utilisable. En outre la faible section du canal rend le travail difficile pour des masses importantes, et enfin le régime du four

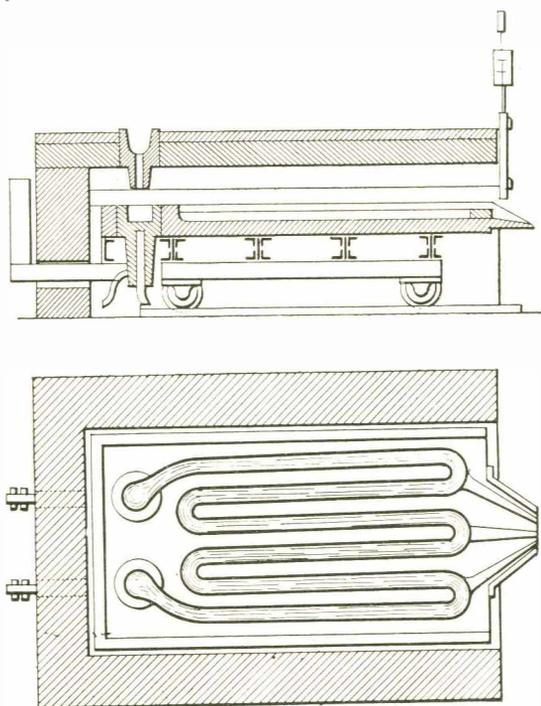


Fig. 38. — Four Gin à canal résistant.

n'est pas constant car l'attaque des parois du canal par les scories modifie la section et par suite la résistance du bain.

M. Gin a perfectionné son four en séparant les deux opérations d'échauffement de la masse et de travail du métal : il opère la réduction ou l'affinage dans des cuvettes qui sont réunies entre elles par des canaux étroits où se fait le chauffage des matières.

C'est un four à marche continue : pendant que les réactions s'opèrent dans une cuvette, la masse qui est dans le canal précédent s'échauffe pour venir à son tour remplir la cuvette lorsqu'on effectuera la coulée et ainsi de suite, de canal en cuvette, jusqu'à la prise de courant où on introduit de la fonte liquide en quantité égale à celle qui s'écoule.

Les prises de courant sont fort ingénieuses : elles se composent de blocs d'acier doux dans lesquels sont creusées des cuvettes où l'on verse la fonte en fusion et qui portent en outre, plus bas que le fond des cuvettes, des cavités périphériques où circule de l'eau froide.

Cette disposition limite d'une façon précise ce qu'on peut appeler la zone intermédiaire, où le métal solide des électrodes tend à se ramol-

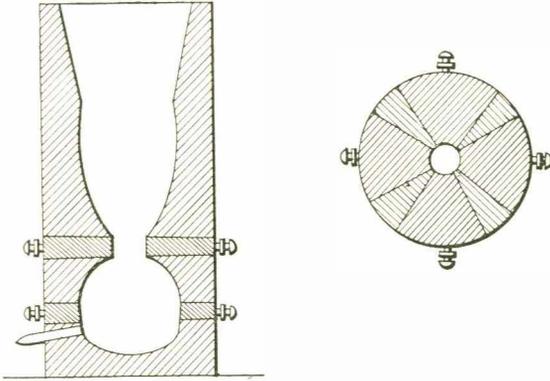


Fig. 39. — Four Conley.

rir au contact du métal en fusion et où celui-ci tend à se solidifier au contact du métal solide et refroidi.

Les canaux d'échauffement sont disposés dans les parois mêmes des cuvettes, afin que les calories perdues par conductibilité à travers les parois des canaux soient récupérées dans les chambres de réaction.

Four Conley. — Ce four qui a été créé en 1902 a surtout jusqu'à présent trouvé son application en Amérique. Comme le four Gin, c'est un four à chauffage direct par résistance, mais sa forme est toute différente (voir fig. 39).

Il se compose d'un tronc de cône renversé destiné à recevoir les matières premières et d'un creuset placé à la partie inférieure du tronc de cône et où tombe le métal réduit et fondu.

Le courant est amené par deux couronnes dont l'une est placée au sommet du tronc de cône, et l'autre dans la partie médiane du creuset et qui sont formées de plombagine et d'argile disposées en secteurs.



Voici deux prix de revient intéressants indiqués par « l'Electric Furnace Co » qui exploite les brevets Conley :

1° Four produisant 100 tonnes d'acier par jour en partant du minerai brut à 63 p. 100.

Dépenses journalières.	}	3 000 HP à 75 francs le cheval an	1 250 francs.
		30 tonnes de coke à 10 francs.	300 —
		200 — de minerai à 63 p. 100 à 17,50 la tonne.	3 500 —
		Réparations et entretien	250 —
		Main-d'œuvre	625 —
			<hr/> 3 925 francs.

Soit par tonnes d'acier 39,25 fr.

2° Four produisant seulement 24 tonnes par jour d'acier électrique en partant de fonte brute et riblons.

Dépenses journalières.	}	125 HP à 75 francs le HP an.	312,50 fr.
		12 tonnes de riblons à 140 francs la tonne.	1 680 francs.
		12 — de gueuses de fonte à 80 francs	960 —
		Réparations et entretien.	125 —
		Main-d'œuvre	325 —
			<hr/> 3 402,50 fr.

Soit par tonne d'acier 141 francs.

Si nous rapprochons ces prix de revient du tableau de M. Neumann que nous avons donné plus haut, nous constatons que le rendement de ce four est bien supérieur à ceux admis par M. Neumann puisqu'il ne consomme que 900 kilowatts-heures par tonne de métal produit tandis que le meilleur chiffre admis par le tableau est de 1 500.

Four Kjellin. — Nous arrivons aux fours à chauffage secondaire par résistance ou fours à induction.

Dès 1887 un brevet avait été pris pour un four de ce type, mais ce n'est qu'en 1889 que M. Kjellin en fit une application sérieuse à l'industrie de l'acier dans l'usine de M. Benedicks à Gysinge (Suède).

Le four Kjellin n'est autre chose qu'un transformateur statique, dont le circuit secondaire est constitué par la sole même de l'appareil ou plutôt par le bain métallique qui repose sur cette sole. Il se compose d'un bloc de matière réfractaire de forme annulaire dans lequel est ménagée une rainure servant de creuset de fusion (voir fig. 40).



Pendant les opérations on ferme complètement cette rainure par un couvercle en briques assemblées au moyen de fers plats. Le champ magnétique inducteur est produit dans un noyau rectangulaire qui embrasse la section du four. Ce noyau est formé d'empî-

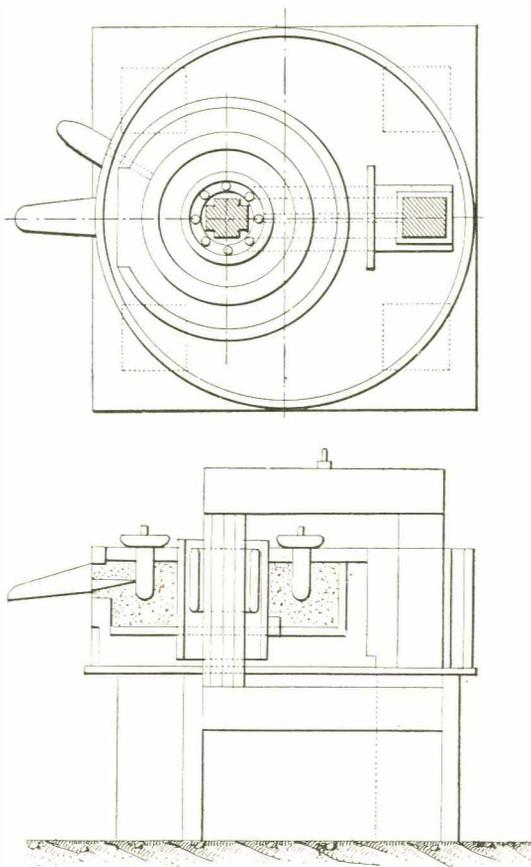


Fig. 40. — Four Kjellin.

lages de tôles de fer doux et il porte la bobine primaire à fil long et fin.

Lorsqu'on réunit les extrémités de cette bobine à une source à haute tension alternative, elle engendre dans le noyau métallique un champ magnétique très puissant qui induit à son tour dans le secondaire, c'est-à-dire dans le bain métallique des courants de très forte intensité.

Pour régler la température du four on agit uniquement sur le courant de la bobine primaire.

Les électrodes qui sont d'un entretien et d'un réglage si difficile sont ici supprimées.

Dès les premières coulées, en mars 1900 on vérifia que l'acier produit au four Kjellin était d'excellente qualité : d'une dureté et d'une densité remarquables, très homogène et très tenace et se déjetant moins facilement que l'acier ordinaire à la trempe. Il n'est du reste pas surprenant de lui trouver ces qualités qui sont celles de l'acier au creuset et qui sont dues à l'immobilité du bain et à l'absence de gaz inclus, puisque le four Kjellin de petite capacité n'est en réalité qu'un creuset circulaire chauffé électriquement.

Mais si la qualité était bonne, le prix de revient était très élevé.

Pour remédier à ce grave défaut économique on augmenta rapidement les dimensions du four. Le premier installé à l'usine de Gysinge ne pouvait recevoir que 80 kilogrammes de minerai et produisait 270 kilogrammes d'acier coulé par vingt-quatre heures, on porta sa contenance à 700 puis à 1 800 kilogrammes de minerai, et aujourd'hui on emploie couramment dans la fabrication des aciers de choix des fours d'une capacité de 4 000 kilogrammes.

Mais ici les difficultés commencent : en effet on observe que dans les fours Kjellin de grande dimension, il se produit des phénomènes mécaniques : le bain se place en travers et effectue une rotation perpendiculaire à l'axe de l'anneau et dirigée vers son centre.

On est alors obligé d'avoir des formes de garniture spéciales et de diminuer de plus en plus la fréquence du courant pour atténuer les effets de selfinduction. C'est ce qui a été réalisé récemment, dans des essais effectués aux forges de Poldi à Kladno.

Four Rochling-Rodenhauser. — Le four Kjellin ne peut guère servir que de four de fusion pour le métal, étant donnée sa disposition particulière, aussi a-t-on cherché à lui permettre de traiter aussi bien des masses brutes que du métal déjà purifié et en outre d'en traiter des quantités plus importantes, c'est le but du four Rochling-Rodenhauser.

Celui-ci est un four à induction combiné avec un four à chauffage direct par résistance.

L'appareil de la fig. 41 est alimenté par du courant alternatif monophasé. Il comporte deux noyaux à section rectangulaire et munis tous les deux de bobines primaires. Les deux canaux contenant le métal et qui sont chauffés par induction se réunissent au



centre pour former une surface de travail plus grande et où se produisent toutes les opérations métallurgiques.

En outre, les deux noyaux portent des enroulements secondaires à basse tension et forte intensité (constitués de quelques spires peu

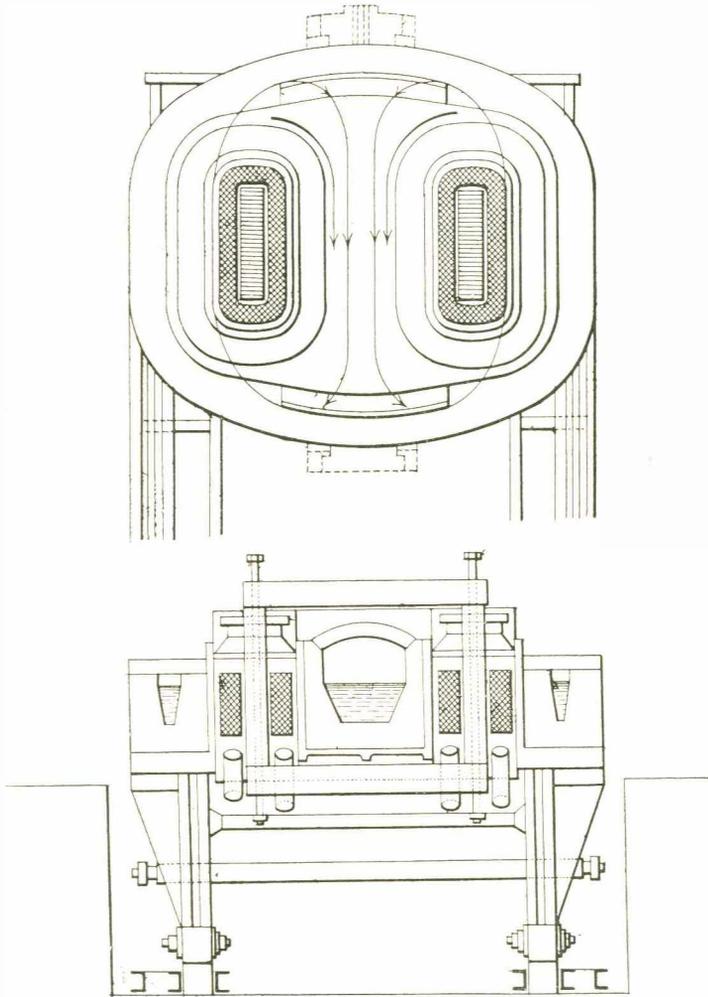


Fig. 41. — Four Rochling pour courants monophasés.

nombreuses) qui sont reliés à deux plaques de fonte noyées dans la garniture réfractaire du four. Ces plaques sont séparées par un bloc de matière spéciale qui n'étant pas conductrice à froid, le devient seulement au blanc incandescent, comme un corps de Nernst.

A la mise en marche, le chauffage ne se fait que par induction. Les plaques polaires, étant isolées par le bloc de matière spéciale, ne

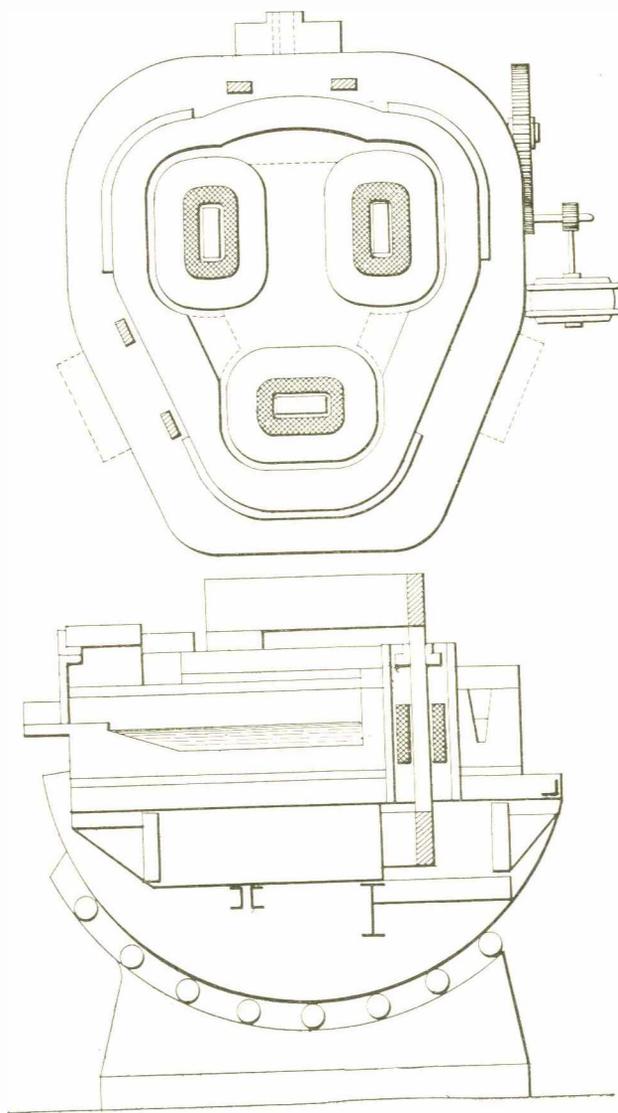


Fig. 42. — Four Rochling pour courants triphasés.

sont pas traversées par le courant, mais lorsque la température est suffisante, la garniture devient conductrice et le chauffage direct par résistance s'ajoute à celui par induction.

La sole du four est assez grande pour que l'on puisse y raffiner des masses importantes et en même temps la section des gouttières est assez étroite pour que les effets de la selfinduction ne soient pas à craindre même avec les fréquences normales de courant.

Par exemple, on peut alimenter aujourd'hui un four de 5 tonnes avec du courant à 50 périodes par seconde, et on utilise en Amérique à la *United States Steel Corporation* dans des fours de 15 tonnes du courant à 25 périodes par seconde.

Ces fours de 15 tonnes ont été spécialement étudiés pour recevoir toute la charge d'un convertisseur basique Thomas.

Le four Rochling-Rodenhauser s'accommode aussi bien du courant triphasé que du courant monophasé (voir fig. 42). Dans ce cas, sa forme est à peu près circulaire.

Il comporte trois noyaux et trois gouttières d'induction et la sole de travail présente à peu près la forme d'un fer à cheval.

Le courant triphasé présente même un avantage spécial sur le monophasé, c'est qu'il s'établit entre les trois noyaux un champ tournant analogue à celui des moteurs triphasés qui entraîne la masse métallique et qui, rendant plus intime le contact avec le laitier diminue sensiblement la durée de l'opération métallurgique.

Ce brassage qui se fait toutefois sans introduction d'air dans la masse est particulièrement important pour la fabrication des aciers spéciaux, où les métaux rares comme le chrome, le tungstène, le vanadium ne sont introduits qu'à la fin de la charge et doivent néanmoins se répartir très uniformément.

Il est aussi un facteur important de la rapidité de l'opération lorsqu'il s'agit de fondre des riblons, car il établit un contact beaucoup plus complet entre le bain fondu et les parties solides qui y sont introduites.

Tels sont les principaux systèmes de fours électriques qui sont entrés définitivement dans la pratique de l'industrie de l'acier.

Il y a toute une variété de modèles qui diffèrent les uns des autres par des détails, mais on peut considérer néanmoins qu'ils rentrent à peu près tous dans les grandes catégories envisagées.

Est-il possible à la suite de cet exposé succinct de conclure que tel ou tel four est préférable aux autres?

Il serait imprudent de le faire en thèse générale, pour deux raisons : d'abord parce que l'existence du four électrique est encore trop courte surtout s'il s'agit des derniers types décrits pour fournir un noyau d'observations capable de décider une opinion ; en second



lieu parce que suivant l'opération à réaliser et le genre d'énergie électrique disponible, un modèle peut convenir mieux qu'un autre qui lui serait préférable dans un emploi différent.

La seule chose qu'il soit permis de faire, c'est d'envisager théoriquement les qualités propres aux fours électriques et d'examiner le système qui semble le mieux réaliser ces qualités.

On peut ramener à trois les avantages spéciaux du four électrique dans la fabrication de l'acier :

1° Obtention de températures plus élevées que celles précédemment réalisées. De là la possibilité de maintenir à l'état fluide des laitiers basiques produisant un raffinage complet.

2° Réglage facile et précis de la température du bain, facteur important pour les coulées et pour la fabrication des aciers spéciaux.

De ces deux qualités résulte la possibilité de traiter des matériaux de mauvaise qualité, en particulier des fontes soufrées et phosphoreuses et d'en faire des aciers de choix.

3° Enfin travail à l'abri de l'air et des gaz, donnant un métal doux et bien homogène.

Cette dernière propriété, les différents types de fours électriques peuvent la posséder au même degré, elle ne dépend que de la disposition à donner aux appareils pour la commodité du travail. Mais pour les deux premières, température et réglage, des différences apparaissent.

Dans le four à arc direct, Héroult ou Girod, la zone de plus haute température est à la surface du laitier et l'équilibre de régime s'établit dans le bain métallique par conductibilité à travers le laitier, d'où une certaine perte, indépendamment des pertes par conductibilité et rayonnement à travers les parois qui peuvent être considérées comme à peu près semblables dans les différents fours bien construits.

En outre, la température de la masse métallique est variable suivant les couches et leur distance de la surface, mais ceci n'est pas absolument un inconvénient car la couche qui doit être la plus chaude pour la rapidité de l'opération est précisément la surface de contact entre le métal et le laitier.

Dans le four à rayonnement Stassano, la zone de plus haute température qui est celle de l'arc est séparée du laitier par une couche d'air d'où une perte supplémentaire.

Dans le four direct à résistance, Gin ou Conley, la déperdition est



moindre et la température plus uniforme, mais on est limité pour l'obtention des hautes températures par la conservation des électrodes. Dans le four à induction K jelin ou Rochling-Rodenhauser, on peut obtenir la température que l'on veut, car on peut charger à volonté le primaire du transformateur sans avoir à craindre la fusion des électrodes, et presque sans pertes, puisque la zone de haute température est dans la masse elle-même. En outre, dans toute la section transversale du bain, la température est la même.

Il est vrai qu'il intervient une question de rendement de l'appareil et qu'il faut tenir compte des pertes magnétiques du circuit fer, mais, avec les basses fréquences utilisées, ces pertes sont très inférieures à la dépense d'entretien et de réglage des électrodes.

Au point de vue du réglage, les fours à arc direct ou à rayonnement sont moins souples que ceux à résistance ou à induction, car les températures que l'on peut obtenir avec eux sont toujours voisines de celle de l'arc, et si l'on veut modifier la quantité de chaleur émise en modifiant l'intensité du courant qui passe, on a des soubresauts et des irrégularités qui nuisent au bon fonctionnement de l'appareil.

Avec les fours à induction au contraire, on peut obtenir toute l'échelle des températures et s'arrêter sur cette échelle au point que l'on désire, rien qu'en faisant varier au moyen d'un rhéostat l'intensité du courant primaire. En outre, au point de vue de la régularité de consommation d'énergie, les fours à arc direct sont inférieurs, car au moment de la charge du four il risque de se produire des courts-circuits qui ont leur répercussion sur la centrale, ce qui fait que dans les installations de ce genre, on est obligé d'avoir des génératrices spéciales pour les fours et de les munir de volants de compensation.

Seuls jusqu'à présent les fours Stassano et Rochling-Rodenhauser ont pu être reliés directement à un réseau général.

Voici d'ailleurs un certain nombre de courbes de charge de fours à arcs et de fours à induction avec masse fluide et avec masse solide qui permettent de faire immédiatement la comparaison des types au point de vue de la régularité (voir fig. 43, p. 230).

STATISTIQUE. — D'après une statistique donnée par le journal *l'Industrie électrique* dans son numéro de mars 1909, le nombre des fours électriques à acier installés à cette époque dans les pays de production européens était de 78 dont 19 du système Héroult, 14 du



système Kjellin, 11 du système Stassano, 10 du système Roehling et 10 du système Girod et autres.

Dans 39 installations, le poids de la charge était inférieur à

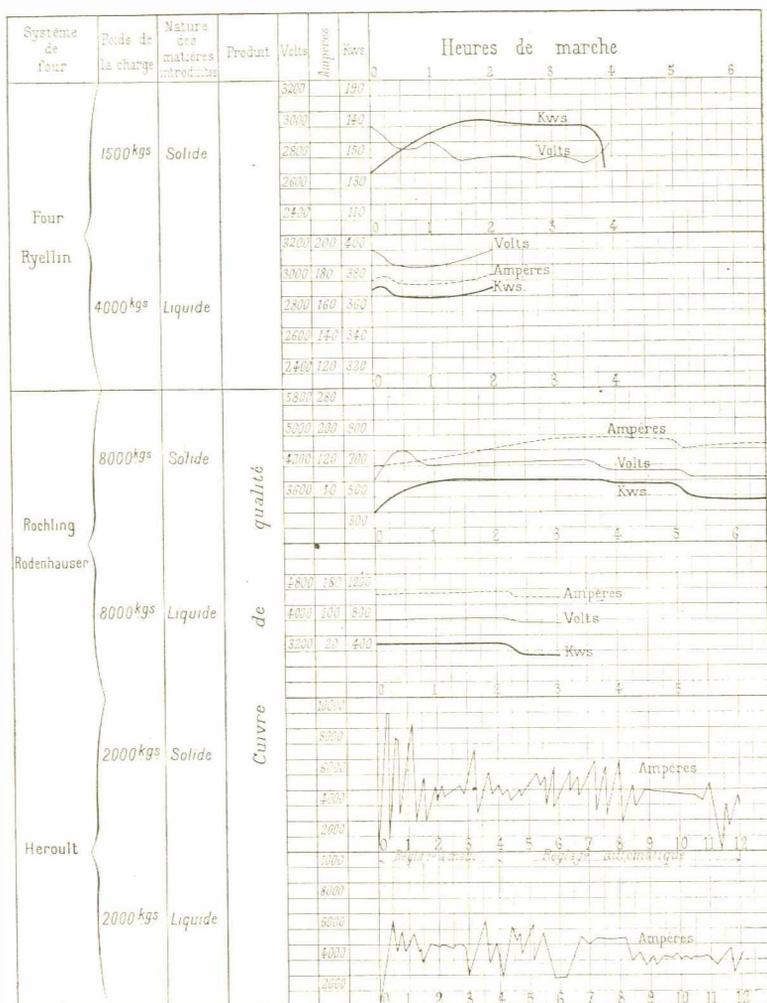


Fig. 43. — Courbes caractéristiques de quelques fours électriques.

2000 kilogrammes, dans 8 il atteignait 8 à 10 000 kilogrammes.

Sur les 78 fours existants, 21 étaient installés en Allemagne et au Luxembourg, 12 en Italie, 12 en France, 7 en Suède, 6 en Autriche, 6 en Suisse, etc...



§ 2. — INDUSTRIE DU CARBURE DE CALCIUM

C'est Moissan qui le premier obtint un carbure de calcium défini et cristallisé en soumettant à la température de l'arc électrique, un mélange d'oxyde de calcium et de charbon conformément à la formule



Dès que cette découverte fut connue, Bullier, prévoyant sa portée

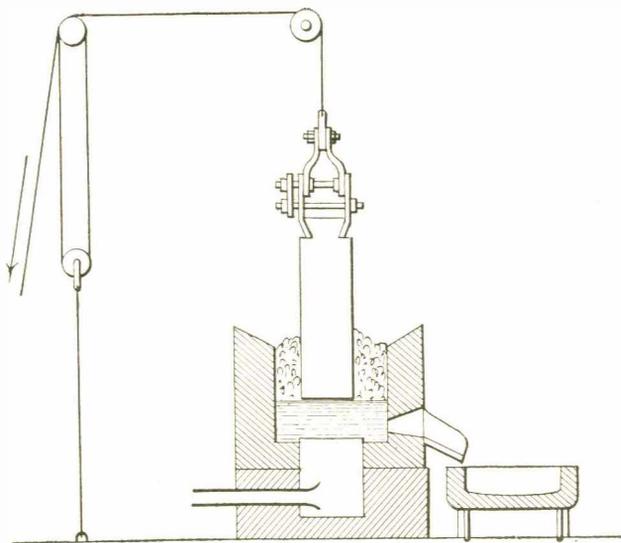


Fig. 44. — Four de la société des carbures métalliques.

industrielle, prit un brevet en 1894 et commença à fabriquer en grand le nouveau carbure.

D'une façon générale, les fours employés jusqu'à présent dans l'industrie du carbure de calcium rentrent dans la classe des fours à arc direct, soit que la sole du four constitue elle-même une des électrodes, soit que le courant soit amené par des électrodes verticales suspendues à la partie supérieure.

On peut les subdiviser en fours continus à écoulement, dans lesquels la charge est fondue et le produit retiré à l'état liquide pendant que s'effectue le nouveau chargement, et fours intermittents, où la charge est retirée à l'état solide après refroidissement. Dans ces derniers, on commence par charger le four avec une petite quantité



de matières, puis au fur et à mesure que le carbure fondu augmente, on ajoute progressivement de la matière brute en soulevant l'électrode supérieure jusqu'à ce que le four soit rempli de carbure.

Le four à écoulement donne un produit plus pur que le second, mais celui-ci semble entraîner une consommation moindre d'énergie et par suite avoir un rendement meilleur.

Four de la société des carbures métalliques (décrit dans le *Journal d'Électrochimie* d'avril 1902).

Ce four se compose d'un bâti en briques réfractaires (voir fig. 44) dont le fond est garni en son milieu d'une électrode fixe en charbon tassé et calciné. Dans le four plonge l'autre électrode qui se manœuvre au moyen d'un treuil.

Pour mettre le four en marche, on commence par amorcer l'arc en rapprochant les électrodes, puis on met une certaine quantité du mélange de matières premières. Le carbure liquide qui se forme vient se rassembler sur la sole et comme cette masse liquide est conductrice, l'arc s'établit entre le bain en fusion et l'électrode supérieure. On remplit alors peu à peu le four avec le mélange préparé en morceaux un peu gros pour que le dégagement d'oxyde de carbone puisse se faire aisément.

Quand le four est en marche normale, il y a formation d'un bain de carbure liquide contenu dans une sorte de creuset constitué par un magma de charbon et de chaux à l'état pâteux entouré de fragments formant croûte solide.

L'ouvrier chargé de la surveillance du four doit maintenir la tension aux bornes aussi constante que possible en élevant ou abaissant l'électrode mobile suivant les indications du voltmètre.

En fonctionnant, le four fait entendre un bourdonnement assez intense dû aux vibrations de l'électrode supérieure.

Lorsque le moment de la coulée est venu, l'ouvrier qui remplit le four dispose son mélange avec soin pour que les flammes se produisent le plus loin possible de l'extrémité chaude de l'électrode afin de diminuer l'usure de celle-ci. Il se forme au-dessus du carbure liquide une couche agglomérée qui maintient la charge pendant la coulée et au fur et à mesure que la surface du bain s'abaisse, on la suit en abaissant l'électrode mobile de manière à maintenir le voltage constant.

Four de la compagnie électrothermique Keller, Leleux et C^{ie}. —



bure formé, une heure. Après une heure et demie d'arrêt, on peut remettre le four en marche.

Grâce au grand nombre des fours, on peut obtenir néanmoins à l'usine de Flums un fonctionnement ininterrompu de 12 fours.

Fours Memmo de la société Piémontaise pour la fabrication du carbure de calcium (voir fig. 45). — Ce four, du type à arcs multiples, est alimenté par des courants triphasés.

Les 3 arcs sont disposés convergents de manière à donner une sphère d'échauffement bien uniforme. Ils jaillissent entre 3 charbons reliés aux bornes des alternateurs et une plaque conductrice qui forme le point neutre de l'étoile.

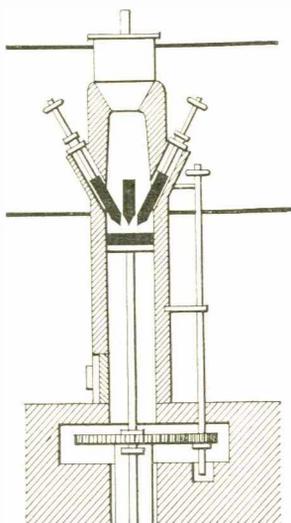


Fig. 45. — Four Memmo de la société Piémontaise de carbure de calcium.

Le réglage est plus facile que dans les fours à arc unique, car si l'un des arcs s'arrête, le four continue à fonctionner par les deux autres.

Le four breveté par M. Memmo est à fonctionnement continu : il se compose d'une colonne en briques réfractaires dans laquelle se déplace verticalement une sole en fonte recouverte de graphite qui sert de point neutre comme nous l'avons dit ci-dessus.

On charge le four par la partie supérieure, le mélange tombe entre les charbons, le carbure se forme et recouvre la sole. On descend celle-ci au moyen d'une vis sans fin qui lui sert d'axe de support jusqu'à la base de la colonne. Le four est alors rempli et peut marcher sans arrêt car le carbure qui est à la base est assez froid pour pouvoir être évacué pendant que le chargement continue. Les charbons sont manœuvrés chacun par une vis, mais une fois le four réglé, on ne doit les déplacer que pour compenser leur usure.

Le rendement du four peut être évalué à 4,7 kg de carbure par kilowatt-jour.

La dépense moyenne entraînée par l'usure des électrodes est de 25 à 30 francs par tonne de carbure produite.

Four Ducasse. — Le four Ducasse présente une disposition parti-



culièrement intéressante destinée à répartir la haute température de l'arc sur une zone étendue et symétrique à la base de l'appareil.

Le four est à arc tournant quoique alimenté par du courant alternatif monophasé : la sole du four est reliée à l'un des pôles de l'alternateur et par la voûte pénètrent 4 charbons reliés à l'autre pôle au moyen d'un conjoncteur tournant à la vitesse de 3 000 tours par minute. L'arc qui jaillit entre les pointes des charbons et la sole tourne ainsi à très grande vitesse et ne s'éteint jamais car le conjoncteur est disposé de telle sorte que ses touches empiétant les unes sur les autres, le courant ne quitte jamais un des charbons avant d'avoir atteint le suivant.

Cette disposition est du reste indispensable à la conservation du conjoncteur en raison des fortes intensités des courants qui y passent et que l'on ne saurait couper sans dommage.

CYANAMIDE CALCIQUE

À la production du carbure de calcium on a ajouté dans certaines usines une industrie annexe dont le rôle déjà important est appelé à le devenir encore davantage en raison des services qu'elle peut rendre à l'agriculture, c'est celle de la cyanamide calcique.

On sait que la cyanamide calcique appelée autrement chaux azotée ou chaux-azote est un produit artificiel renfermant carbone, azote et calcium et répondant à la formule



Le point de départ de sa fabrication se trouve dans les recherches de Moissan sur la possibilité de combiner l'azote élémentaire avec des métaux tels que le magnésium et le calcium.

En 1895, MM. Franck et Caro remarquèrent que les carbures alcalino-terreux absorbaient l'azote sous l'influence de la chaleur. De là le procédé qui consiste à soumettre le carbure de calcium, porté à haute température, à un courant d'azote qui donne un mélange de cyanamide calcique et de charbon suivant la formule



Il faut avoir soin de ne pas opérer à l'air car l'oxygène brûlerait le carbone et transformerait le calcium en chaux vive.

L'industrie de la cyanamide présente un intérêt spécial au point de vue de notre étude générale des sources de l'énergie, en ce sens que



c'est une des opérations chimiques exigeant une température élevée (700° à 800°) dans lesquelles l'énergie chimique intervient le plus efficacement comme source de chaleur.

A l'origine de l'industrie de la cyanamide calcique, la quantité de chaleur dégagée par la réaction exothermique $\text{CaC}_2 + 2\text{Az} = \text{CAz}_2\text{Ca} + \text{C}$, avait été jugée trop faible pour maintenir le carbure à une température suffisante pour la bonne absorption de l'azote, la réaction se faisant dans des fours à cornues analogues aux fours à gaz d'éclairage. Après quelque temps, on essaya le traitement dans une sorte de four électrique mais on constata que dès que la réaction était amorcée par le charbon électriquement chauffé au rouge, elle se continuait ensuite à travers la masse sans nouvel apport de calories; les fours à cyanamide sont donc des laboratoires chauffés uniquement par des calories d'origine chimique, sans sources de calories extérieures autres que la petite quantité d'électricité nécessaire pour amorcer l'opération.

Le procédé Siemens et Halske réunit en une seule opération la fabrication du carbure et celle de la cyanamide : on fixe l'azote sur un mélange de chaux et de charbon de bois chauffés au four électrique.

Enfin le docteur Édouard Polzeniusz a imaginé en 1906 d'additionner le carbure de calcium sur lequel doit réagir l'azote, de 10 p. 100 de son poids de chlorure de calcium, ce qui diminue, d'après l'inventeur, la température de fixation de l'azote et améliore le rendement.

La fabrication de la cyanamide d'après le procédé Franck et Caro a été réalisée pour la première fois par la Société italienne de Piano d'Orté qui peut fournir annuellement 4 000 tonnes de cyanamide, à son usine voisine de Pescara.

En France, la Société française de produits azotés possède une usine très importante de cyanamide à Notre-Dame de Briançon, en Savoie, installée au voisinage de l'usine des carbures métalliques qui produit le carbure de calcium par les procédés Bullier.

La préparation de l'azote se fait au moyen de l'appareil Linde. Il est intéressant de voir quelles sont les conditions approximatives que doit réaliser une usine de cyanamide pour que son produit puisse rivaliser comme prix avec les engrais azotés employés couramment en agriculture :

Admettons un prix de 150 francs pour la tonne de carbure de calcium susceptible de produire 300 litres d'acétylène par kilogramme.



Il faut par tonne de carbure environ 200 kilogrammes d'azote dont le prix de revient d'après M. Guye est de 0,10 fr. le kilogramme en moyenne.

Le prix de revient de la cyanamide par tonne de carbure pourra s'établir comme suit :

1 tonne de carbure à 80 p. 100.	150 francs.
200 kilogrammes d'azote	20 —
Entretien du matériel	20 —
Broyage et fabrication	25 —
Frais généraux.	10 —
Transport.	20 —
Amortissement et intérêt.	35 —
	280 francs.

Si la cyanamide produite était pure et correspondait à la formule $\text{C Az}^2 \text{Ca}$, la proportion d'azote inclus en poids serait de 35 p. 100 et le kilogramme d'azote reviendrait à 0,80, mais en pratique, la cyanamide commerciale ne contient guère plus de 60 p. 100 de cyanamide calcique pure, le reste étant formé de chaux, de charbon et d'impuretés provenant du carbure.

La tonne de cyanamide commerciale renferme donc environ 600 kilogrammes du corps répondant à la formule CAz^2Ca et le prix du kilogramme d'azote correspondant à un prix de revient de 280 francs pour la tonne de cyanamide ressort à 1,33 fr.

Ce prix peut lutter avec ceux correspondant aux autres produits employés en agriculture qui sont à peu près les suivants :

Le kilogramme d'azote.

Salpêtre du Chili à 23 francs les 100 kilogrammes. . .	1,45 fr.
Sulfate d'ammoniaque à 28 francs les 100 kilogrammes. .	1,40 —
Nitrate de chaux de Norvège à 21 fr. les 100 kilogrammes. .	1,60 —

D'après un article du 25 septembre 1909 de la revue *L'Industrie électrique*, la production européenne annuelle de cyanamide calcique par le procédé Franck et Caro s'élèverait au chiffre de 166 000 tonnes.

§ 3. — ÉLECTROMÉTALLURGIE DE L'ALUMINIUM

Aujourd'hui l'aluminium est presque exclusivement fabriqué au moyen du four électrique qui a permis d'abaisser son prix aux environs de 2,50 fr. le kilogramme, alors qu'il y a trente ans il était de 60 francs.



Le principe du procédé consiste à électrolyser un ou plusieurs sels d'aluminium après les avoir amenés à l'état de fusion par le passage du courant électrique. Les fours tout à fait spéciaux que nous allons rencontrer dans cette industrie pourront donc être classés dans les fours directs à résistance.

Le premier brevet concernant la fabrication des alliages d'alumi-

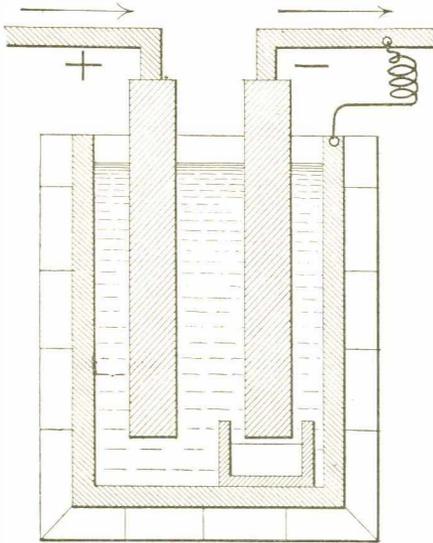


Fig. 46. — Four Minet à deux électrodes et à source de chaleur extérieure.

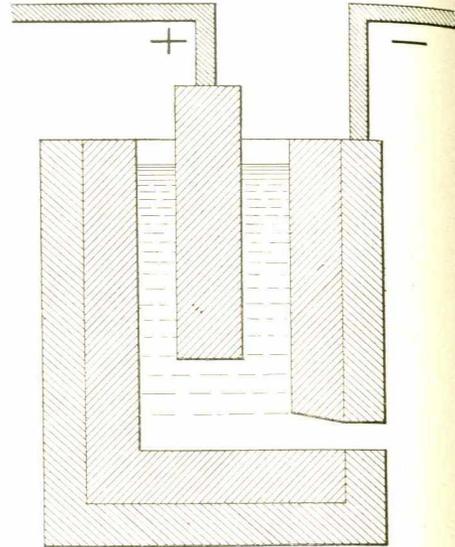


Fig. 47. — Four à une électrode et sans source de chaleur extérieure.

nium fut pris par les frères Cowles en 1884, puis Héroult en 1886 et Minet en 1887 produisirent l'aluminium en partant d'électrolytes différents. — Minet imagina plusieurs dispositifs de fours.

1^o Four à deux électrodes et à source de chaleur extérieure. — Ce four se compose d'une cuve en fonte de forme parallépipédique enveloppée dans une garniture en maçonnerie (voir fig. 46).

Le bain est maintenu à l'état liquide à la fois par le courant qui le traverse et par une source extérieure.

Les deux électrodes sont constituées par des baguettes de charbon aggloméré qui pendent dans le bain. Au-dessous de l'électrode négative est disposé un petit creuset en charbon qui reçoit l'aluminium au fur et à mesure qu'il se dépose.

Pour éviter l'attaque de la cuve de fonte par le bain on met cette



cuve en dérivation sur la cathode par l'intermédiaire d'une résistance ; il se dépose alors sur les parois de la cuve une mince couche d'aluminium qui la protège contre toute attaque. L'inconvénient de ce four réside dans le peu de durée de la cuve. Celle-ci est en effet attaquée peu à peu, malgré les précautions prises, par l'aluminium qui forme un alliage fusible de ferro-aluminium et par les gaz extérieurs destinés à la chauffer.

2° Four à une électrode et sans source de chaleur extérieure. —

L'appareil se compose encore d'une cuve en fonte mais sans enveloppe de maçonnerie et garnie entièrement d'une couche de charbon servant d'électrode négative (voir fig. 47).

Le métal se dépose sur cette couche de charbon mais peu à peu à la haute température du four, il arrive à la traverser et vient attaquer la cuve de fonte qu'il détériore, en outre l'aluminium obtenu contient fréquemment des traces de fer.

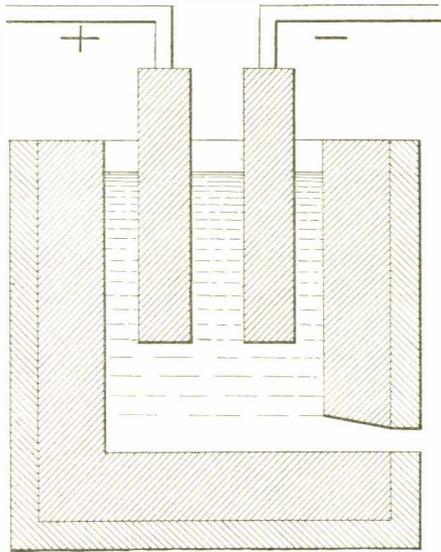


Fig. 48. — Four à deux électrodes et sans source de chaleur extérieure.

3° Four à deux électrodes et sans source de chaleur extérieure. —

Nous retrouvons encore la cuve en fonte mais garnie d'une très épaisse couche de charbon et le courant est amené par deux électrodes suspendues dans le bain (voir fig. 48).

La cuve présente en outre un trou de coulée par où l'on retire l'aluminium qui s'est réuni dans une cavité au centre de la garniture de charbon.

L'absence d'action électrolytique dans la couche de charbon et l'épaisseur de celle-ci qui évite l'échauffement de la cuve de fonte assurent une conservation bien meilleure du four.

Four Héroult. — Le four Héroult se compose d'un bloc de char-



bon servant de cathode et d'une épaisseur de 15 à 20 centimètres disposé dans une cuve en fonte isolée du sol. — Les anodes sont constituées par des baguettes de coke ou de charbon de bois aggloméré avec du goudron.

On charge l'appareil par le haut au moyen de deux ouvertures servant également à la sortie des gaz de la réaction et l'évacuation du métal se fait par un trou de coulée percé à la base.

Pour mettre en marche on place dans le four une certaine quantité d'alumine mêlée de cryolithe, puis on relève l'électrode peu à peu en ajoutant du mélange. Quand le bain est assez haut, on alimente seulement en alumine.

Pour éviter le refroidissement du bain, on le recouvre de poussières de charbon obtenues par broyage des débris d'électrodes.

C'est ce four qui est utilisé à l'usine de Froges.

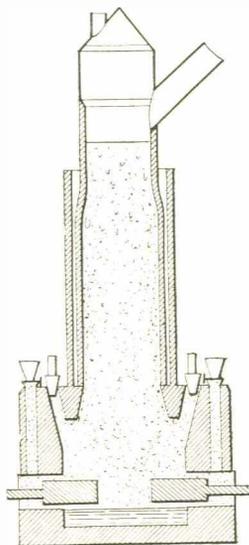


Fig. 49. — Four Taylor pour la fabrication du sulfure de carbone.

§ 4. — INDUSTRIE DU SULFURE DE CARBONE

Le principal centre de production du sulfure de carbone est la Sicile où l'on rencontre le soufre en abondance, mais le procédé de fabrication qui y est employé est long et dangereux et en outre il nécessite une main-d'œuvre qui grève considérablement son prix de revient.

Aussi a-t-on imaginé en Amérique d'utiliser le four électrique pour cette fabrication et depuis quelques années une usine de produits chimiques établie à Fenn Vann près de New-York emploie ce procédé avec succès.

Le four créé par M. R. Taylor est un four combiné à arc et à résistance (voir fig. 49). Il se compose d'une cheminée centrale cylindrique remplie de charbon de bois autour de laquelle est ménagé un espace circulaire où l'on introduit le soufre. A la base, on fait jaillir un arc entre quatre électrodes disposées en croix. On établit, tout autour des électrodes un lit de charbon ou de coke concassé dont le rôle est de shunter les électrodes par une résistance qui s'échauffe et augmente ainsi l'efficacité de l'arc. En outre, ce dis-

positif a l'avantage de rendre la température plus uniforme à la base du four et d'améliorer ainsi le rendement de l'appareil.

Sous l'influence de la chaleur, le soufre fond et vient couler sur le charbon chauffé au rouge avec lequel il se combine pour former le sulfure de carbone. Celui-ci se dégage en vapeurs à travers la colonne de charbon à laquelle il cède sa chaleur et distille.

Le four absorbe environ 2000 ampères sous 60 volts et produit une moyenne de 6000 kilogrammes de sulfure de carbone par vingt-quatre heures.



CHAPITRE V

QUELQUES APPLICATIONS DES THÉORIES DE LA COMBUSTION AUX PROBLÈMES ACTUELS DE L'INDUSTRIE

Dans les chapitres précédents, en exposant la théorie générale de la combustion et les lois abstraites de la thermo-chimie, nous nous sommes toujours efforcé de faire suivre l'exposé de chaque loi d'exemples concrets puisés à des industries que nous avons pratiquées.

Nous avons voulu montrer ainsi tout de suite l'intérêt pratique de cette science un peu nouvelle de l'énergie calorifique.

Mais, pour démontrer plus complètement l'utilité de la science appliquée aux questions de chauffage, il est intéressant de passer rapidement en revue les problèmes industriels actuels et d'indiquer les solutions *a priori* les plus satisfaisantes.

C'est ce que nous allons essayer de faire dans ce dernier chapitre, en examinant successivement la question des gazogènes, puis celle des fours à coke, des fours à acier, des grandes centrales électriques, et des chaudières à vapeur.

§ 1. — GAZOGÈNES

La question des gazogènes est traitée très complètement dans la seconde partie de ce volume ; le lecteur pourra y voir quels efforts ont été faits, quelles variétés d'appareils existent pour résoudre ce problème primordial dans les questions de chauffage : Transformer en un combustible gazeux, plus ou moins riche en chaleur latente, un combustible solide riche ou pauvre, sec ou humide, hydrocarboné (goudronneux) ou simplement carburé, dense ou léger, en un mot quelconque.

Mais, lorsqu'on veut faire l'analyse de toutes les découvertes que revendiquent les auteurs de ces innombrables gazogènes, on ne



peut s'empêcher de remarquer que le but est très loin d'être encore atteint.

Il est un peu déconcertant, par exemple, de constater que, tandis que les usines à gaz de ville fournissent (après une épuration très complète) un combustible parfaitement approprié aux moteurs à explosion en se servant de houilles grasses, tandis que d'autre part les gazogènes à gaz pauvre, en partant du coke, résidu de l'opération précédente, arrivent à fournir un gaz également approprié aux moteurs à explosion, il n'existe pas à l'heure actuelle de gazogènes permettant de réunir dans un même appareil les opérations de distillation et de gazéification du carbone, pas de gazogènes réellement pratiques donnant du gaz de moteur en partant du meilleur combustible et du plus commun, la houille grasse.

Et si nous passons de la force motrice au chauffage, il est peut-être aussi déconcertant de constater que, depuis que la question d'amélioration et d'enrichissement des combustibles gazeux pour les fours à acier est à l'étude, nous ne pourrions trouver de gazogènes donnant de beaucoup meilleurs résultats que ce qui se trouve indiqué dans le traité de métallurgie de Ledebur édité depuis vingt ans.

Les lois de la combustion et les équilibres chimiques peuvent-elles nous donner à cet égard d'utiles indications ? Nous croyons que oui.

Gazogènes pour moteurs.

Prenons d'abord le cas de la gazéification pour moteur et voyons s'il ne serait pas possible de s'affranchir de cette question des goudrons qui encrassent les moteurs et font écarter systématiquement les houilles grasses de toutes les usines à gaz de Force Motrice.

Notre expérience personnelle nous permet presque de l'affirmer et nous avons conduit des gazogènes Siemens du type le plus simple desquels le gaz sortait parfaitement clair, assez exempt de goudron pour alimenter, nous le croyons, des moteurs, après une épuration appropriée. Ces gazogènes étaient simplement conduits à une allure très chaude, avec une admission de vapeur sous le cendrier assez modérée pour que la surface supérieure de la couche de combustible reste toujours au rouge cerise : A cette température, de 700 à 800 degrés, il y a des dépôts de suie dans les collecteurs, mais on évite la formation de goudron.

Si de cette expérience pratique nous passons à une application des théories de la gazéification telles que nous les avons ébauchées,



nous deviendrons beaucoup plus affirmatif et ne craindrons pas de déclarer que la gazéification des houilles grasses est peut-être moins difficile qu'on ne l'a cru jusqu'ici. Il y a là, surtout, une question de température de régime, laquelle doit être choisie intermédiaire entre celle des fours à cornues à gaz et celle des fours à coke (où la production du goudron est utile à la constitution d'un bon coke métallurgique).

Comment réaliser dans un gazogène cette élévation de température de régime dans toute la masse du combustible ?

Il suffit pour cela d'apporter aux gazogènes une source de calories extérieures s'ajoutant à la chaleur dégagée par la combustion pour oxyde de carbone. Sans cet appoint, la combustion dans un gazogène est un phénomène parfaitement défini, réalisant une température qui est fonction du pouvoir calorifique, du rayonnement et de la chaleur de la décomposition de l'eau. Tous les dispositifs les plus ingénieux tels que la distillation renversée, la gazéification à l'eau, etc., sont impuissants à élever d'un seul degré la température de gazéification, à modifier en rien les conditions d'équilibres réversibles des gaz et hydrocarbures en présence.

La question des gazogènes n'est pas seulement une affaire de construction ou de bon agencement des appareils, c'est aussi une question chimique d'équilibre, et on pourra modifier l'équilibre tel qu'il se produit spontanément dans un gazogène avec un combustible donné, d'autant plus facilement que l'on disposera d'une source d'énergie extérieure, soit sous forme de chaleur (protection contre le refroidissement, chauffage extérieur), soit sous forme de pression, soit par l'appoint d'un nouvel élément d'équilibre, la vapeur d'eau surchauffée dont nous avons indiqué le rôle précieux et dont l'utilité est particulièrement grande pour la décomposition des goudrons.

Gazogènes de fours

Passons en second lieu à la question des gazogènes desservant des fours à acier ou des laboratoires à températures de régime très élevées.

Ici la question des goudrons, qui a longtemps gêné Siemens, dans les premiers fours à régénération, est de peu d'importance ; il n'est pas d'usine où l'on ne soit actuellement parvenu à régler le feu des gazogènes de façon à s'affranchir des ennuis du goudron.

Les efforts des métallurgistes tendent à un autre but : l'augmen-



tation de la richesse du gaz et l'accroissement corrélatif de la température de combustion de ce gaz. Nous verrons dans l'étude des fours à acier l'importance capitale de cette température de combustion trop souvent négligée.

— Quels sont les moyens d'enrichir un gaz de gazogène? Nous les avons précisés dans l'examen fait au chapitre I^{er} des lois du déplacement de l'équilibre.

On peut y arriver : 1° par une augmentation de pression comme on la pratique dans les gazogènes à fusion de cendres, etc.

2° Par une augmentation de température qui agit favorablement aussi bien sur l'équilibre $C + CO + CO_2$ que sur l'équilibre de ces gaz et combustibles en présence de la vapeur d'eau.

3° Par l'augmentation de la concentration de la vapeur d'eau.

Mais il est bien évident que pour que ces moyens soient efficaces, pour qu'ils rompent l'équilibre en faveur d'un meilleur gaz, il faut toujours que leurs effets se superposent à l'état d'équilibre normal d'un gazogène isolé ; il faut en un mot que l'augmentation de pression soit fournie par un compresseur puisant son énergie au dehors, que la vapeur d'eau provienne d'une chaudière distincte avec une surchauffe aussi forte que possible et ne soit pas uniquement fournie par des enveloppes refroidissantes de la cuve du gazogène ; enfin il faut que l'élévation de température, soit qu'elle provienne d'un chauffage préalable de l'air primaire, soit qu'on l'obtienne par tout autre moyen, soit due à une source de calories extérieures et non empruntée à l'énergie propre du gazogène et de son combustible.

Les idées qui précèdent, auxquelles les études théoriques de la gazéification et de l'équilibre des gaz n'ont pas été étrangères, pourront servir, nous l'espérons, à diriger les études actuelles et en particulier les essais de surchauffe de la vapeur d'alimentation des cendriers dont nous avons parlé, de même que les expériences de gazogènes à haute pression récemment reprises.

Elles peuvent en tout cas permettre d'apprécier plus sûrement les mérites relatifs des innombrables gazogènes actuellement en usage. Nous préférons ici ne pas faire de classement ni donner une opinion ferme sur les multiples appareils pratiqués en métallurgie, mais nous croyons que le bon gazogène est celui dans lequel le métallurgiste est maître de régler à volonté la température, la pression et l'admission de vapeur d'eau, nous pensons de plus que tels gazogènes qui présentent encore de grosses imperfections pourraient sou-



vent être améliorés par des modifications insignifiantes, qu'enfin le meilleur appareil est souvent le plus simple, celui qui se compose d'un cylindre de maçonnerie avec une grille horizontale, ou simplement le talus d'éboulement du combustible avec cendriers fermés.

La question des gazogènes n'est évidemment pas une question exclusivement chimique — le lecteur en jugera dans la seconde partie de ce livre consacrée aux gazogènes — mais la chimie y a un rôle important que l'on a peut-être trop négligé. Les inventeurs ont assez longtemps cherché l'amélioration du gaz dans des dispositifs plus ou moins ingénieux destinés à remédier aux difficultés de la distillation, du collage des houilles et du décrassage.

Beaucoup de ces appareils sont bons, et pour en tirer un meilleur résultat, nous pensons qu'il suffirait souvent de faire un peu plus de chimie à côté du gazogène et de se guider un peu plus par les lois et principes de la Thermo-chimie.

§ 2. — FOURS A COKE

La question des fours à coke est devenue un problème très actuel intéressant particulièrement les Sources de l'Énergie calorifique, depuis que les progrès dans la construction et dans la conduite de ces fours ont rendu disponible une importante quantité de gaz riche et éclairant, excédant même la consommation d'énergie des mines auprès desquelles ces fours sont placés.

Dans l'industrie moderne et plus encore dans l'industrie charbonnière de l'avenir, le four à coke n'est plus l'outil unique d'une industrie — fabrication du coke métallurgique ; — c'est un organe à fonctions multiples dans l'industrie à branches multiples qui se concentre autour des houillères.

La fabrication du coke, la production de gaz riche susceptible de servir de gaz de ville, la fabrication de tous les produits dérivés de la houille (goudrons, benzine, benzol, paraffine, etc.) enfin la production d'énergie dans de grandes Centrales alimentant les centres urbains voisins ou même assez éloignés des mines, constituent autant de branches de l'industrie houillère groupées autour du four à coke. Récemment même la question s'est posée — et a même été résolue dans quelques centres miniers allemands — de savoir si le four à coke produisant en excès un gaz riche ne devait pas être considéré comme le pourvoyeur naturel des aciéries, four-



nissant aux fours Martin un gaz presque aussi riche que le gaz naturel de Pensylvanie qui a fait la fortune de Pittsburg.

Enfin, la production d'énergie dans des grandes Centrales utilisant pour des moteurs à gaz l'excédent des fours à coke et le projet envisagé par plusieurs compagnies minières du Nord et du Pas-de-Calais, sans parler de l'Allemagne et de l'Italie, de devenir des grands producteurs de kilowatts et de vendre ainsi à distance leurs calories sous forme d'énergie électrique, a mis à l'ordre du jour plus que jamais la question d'emploi des déchets de houille tenant moins de 50 p. 100 de carbone. On sait que ces escaillages ne supportent aucun transport et même sont difficiles à utiliser sur place ; il y a ainsi sur les carreaux des mines, des stocks presque inépuisables de carbone ou de calories, dont l'exploitation est à faire, par une industrie nouvelle s'ajoutant à celles que nous avons énumérées.

Dans l'industrie moderne, toutes les branches de l'utilisation de la houille et de ses dérivés sont plus ou moins associées. A la mine, l'adjonction des grandes centrales électriques aux fours à coke est à l'étude. Dans les usines métallurgiques, l'association des fours à coke aux fours à acier est une question très actuelle sur laquelle nous aurons à revenir. Enfin, pour tout résumer, l'exploitant des houillères est conduit de plus en plus à tout embrasser, dans ses usines centrales : fabrication du coke métallurgique, production du gaz d'éclairage, vente à bas prix d'un gaz métallurgique pour chauffage des fours, distribution d'énergie électrique pour l'éclairage et le chauffage industriel, enfin récupération de tous les sous-produits, benzols, goudrons, brais, aniline, etc.

Les études expérimentales que nous avons faites sur les gazogènes, sur les chaudières et sur les fours, et plus encore peut-être la notion de température de combustion sur laquelle nous avons tant insisté, nous ont conduit à quelques observations sur la meilleure utilisation de l'énergie calorifique dans les centres houillers que nous présentons ici, à l'ingénieur des mines, au métallurgiste, à l'électricien, sans prétendre d'ailleurs poser en rien des conclusions. Ce sont de simples remarques.

Une usine centrale de houillère dont l'organe essentiel est et restera toujours le four à coke peut livrer de l'énergie calorifique sous des formes multiples savoir : 1° Le coke métallurgique, source de chaleur dans les hauts fourneaux ; 2° les débris de cette fabrication, escarbilles, poussières de coke, incuits, utilisables soit dans les chaudières, soit



dans les gazogènes ; 3° le gaz riche provenant de la distillation de la houille, utilisable soit pour l'éclairage, soit pour le chauffage, soit pour la force motrice ; 4° le gaz pauvre produit dans des gazogènes alimentés soit avec les déchets de coke, soit avec les escaillages ; 5° les escaillages pauvres actuellement inutilisés ; 6° enfin les goudrons et leurs dérivés, naphthaline et benzol.

Quelle est la meilleure utilisation de ces diverses sources d'énergie calorifique, c'est ce qu'il est utile d'indiquer.

Nous n'avons aucune indication à donner sur le coke ni sur les goudrons, brais et benzols qui sont les produits marchands ayant le maximum de leur valeur sous la forme même où le four à coke les produit.

Mais ce sont les sous-produits : poussières de coke, gaz riche, gaz pauvre et escaillages qu'il importe de canaliser de façon à obtenir le maximum de rendement.

Actuellement le gaz riche est employé en général d'abord à chauffer les fours à coke, puis à chauffer les chaudières actionnant les services de la mine, enfin à faire tourner les moteurs à explosion constituant les éléments d'une Centrale électrique. Est-ce la meilleure utilisation du gaz riche ? Nous ne le croyons pas.

Le gaz à 5 000 calories au mètre cube que fournissent les fours à coke, a, soit comme gaz d'éclairage, soit comme gaz de chauffage une valeur très supérieure à sa valeur en calories comparée à la valeur de la calorie-houille ; la température de régime des fours à coke est d'ailleurs suffisamment basse pour qu'il ne soit nullement nécessaire dans ces fours d'employer du gaz riche comme combustible : un gaz de gazogène à 1 200 calories serait tout à fait suffisant avec les fours actuels à régénération.

Pour le chauffage des chaudières, l'emploi du gaz riche est encore moins nécessaire : le gaz pauvre conviendrait parfaitement.

Enfin pour les moteurs à gaz, ces grandes machines de 1 200 à 2 000 kilowatts à quadruple effet qui se généralisent dans les Centrales, le gaz riche n'est pas du tout nécessaire, car on sait que la puissance effective d'un moteur à gaz n'est en rien proportionnelle à la richesse calorifique du gaz qui l'alimente et qu'au contraire la substitution de gaz à 1 200 calories à du gaz à 5 000 calories ne diminue guère que de 1/10 l'effet de chaque coup de piston¹.

¹ Il va sans dire que la proportion de gaz et d'air doit pour cela être modifiée et que la consommation de gaz pauvre est plus forte.



En résumé, le gaz riche abondamment produit dans les usines à coke est un peu gaspillé à des emplois auxquels il n'est pas spécialement adapté, tandis qu'il pourrait être vendu à prix marchand beaucoup plus élevé soit comme gaz de ville¹ soit comme gaz de chauffage métallurgique dont nous indiquerons le haut intérêt à propos des fours à acier; et il serait plus rationnel de chauffer les fours à coke eux-mêmes avec du gaz pauvre produit dans des gazogènes, les chaudières à vapeur soit avec le poussier de coke ou les escaillages ou même avec du gaz pauvre, enfin d'employer également du gaz de gazogène pour les grands moteurs à explosion. On réserverait ainsi pour la vente aux villes ou aux usines métallurgiques la totalité du gaz riche, chaque Usine de Houillère constituant une source de gaz hydrocarburé comparable dans ses emplois aux gaz naturels si précieux à la métallurgie américaine.

Le gaz pauvre de gazogène est actuellement peu usité dans les usines centrales des houillères, et nous croyons qu'il y aurait intérêt à en développer l'emploi. Suffisant pour les fours à coke, pour le chauffage des chaudières, pour les grands moteurs à explosion, le gaz pauvre devrait être de plus en plus employé, notamment si les essais que l'on tente de différents côtés pour utiliser les combustibles inférieurs dans des gazogènes réussissent.

A cet égard, cependant, nous préférons ne pas être trop affirmatif, car il n'est pas prouvé que le gazogène soit le meilleur appareil d'utilisation des déchets de houille, de ces escaillages dont l'emploi est tout à l'ordre du jour.

L'escaillage, c'est-à-dire le charbon schisteux ou le schiste carboné d'une teneur en carbone inférieure à ce que l'on considère utilisable même sur place, a vu s'abaisser peu à peu à la suite des progrès réalisés dans les foyers de chaudières et les grilles, cette teneur limite en carbone, en calories. Actuellement, c'est à 45 ou 50 p. 100 de cendres que commence ce sous-produit, tout charbon contenant plus de 50 p. 100 de carbone étant utilisable et utilisé pour les chaudières.

L'escaillage peut-il être brûlé en gazogène, ou doit-il servir au chauffage de chaudières? Convient-il à l'alimentation d'une Centrale électrique avec moteurs à explosions ou à l'alimentation d'une Centrale à vapeur à turbines?

¹ Cet emploi du gaz des fours à coke à l'alimentation des villes commence à se développer (voir la seconde partie, p. 367).



La question peut être généralisée et étendue aux combustibles inférieurs à faible pouvoir calorifique, tels que tourbe, gadoue, etc. qui avec le développement croissant de la force motrice entrent de plus en plus en ligne de compte dans les réserves d'énergie.

L'expérience que nous avons du problème spécial de la combustion des ordures ménagères de la ville de Paris, le plus pauvre et le plus irrégulier des combustibles que nous ayons jamais rencontré, nous permet d'émettre une opinion et de l'émettre avec d'autant plus de certitude qu'elle est plus éclectique.

Nous croyons que l'utilisation des combustibles inférieurs est plus facile avec la chaudière à vapeur qu'avec le gazogène et le moteur à explosion.

Nous croyons en particulier que l'escaillage est mal adapté au gazogène, parce que le décrassage dans un foyer où la couche de combustible est très épaisse sera toujours une opération difficile, d'autant plus difficile que la proportion de cendres est plus grande, et que la gazéification des escaillages rencontrera bien d'autres écueils.

Le meilleur appareil de combustion d'un charbon très pauvre serait peut-être un appareil à tablettes du type des calorifères Perret. Mais comme dans de tels fours l'excès d'air inévitable abaisse sensiblement la température de combustion, il conviendrait de relever cette température dans une chambre de combustion précédant la chaudière par un afflux de gaz riche ramenant à la combustion neutre le mélange gazeux entourant les tubes de chaudière.

Nous donnons la solution ci-dessus pour l'emploi des escaillages sous toutes réserves ; mais ce qu'il nous est permis d'affirmer après nos études de la combustion de la gadoue¹, c'est que l'emploi des chambres de combustion précédant une chaudière est très avantageux et que c'est en combinant une combustion oxydante avec une combustion franchement réductrice que nous avons pu obtenir des températures de 1400° et 1200° et un rendement des chaudières tout à fait satisfaisant avec un combustible inférieur.

En général pour tous les combustibles pauvres et en particulier pour l'escaillage il faut chercher le foyer oxydant ou réducteur qui paraît convenir le mieux au combustible inférieur que l'on veut utiliser, et parfaire la combustion neutre par un mélange gazeux inversement réducteur ou oxydant dans une chambre de

¹ Voir *Bulletin de la Société d'Encouragement à l'Industrie nationale*, numéro de novembre 1909.



combustion. C'est ainsi qu'on obtiendra le maximum d'effet utile. La combinaison des déchets et poussières de coke brûlés en gazogène avec l'escaillage employé dans un autre foyer permettrait peut-être d'atteindre le but.

En résumé, si les grandes usines à bouillière prennent l'extension que les efforts actuels permettent de prévoir à bref délai, la vérité économique semble être dans l'emploi du gaz riche exclusivement réservé aux villes et aux chauffages métallurgiques, la création de groupes de gazogènes produisant du gaz pauvre tant pour le chauffage des fours à coke que pour l'alimentation d'une partie des moteurs de la Centrale électrique, l'emploi des escaillages à l'alimentation de Centrales à vapeur et à turbines qui complèteraient l'installation.

Les idées générales qui précèdent, et que nous avons dès le début présentées sous toutes réserves, peuvent être complétées en ce qui concerne l'emploi rationnel du gaz riche par une étude précise des avantages du gaz riche à 5 000 calories tel qu'il sort des fours à coke comparé au gaz pauvre à 1 200 calories, dans les fours à acier.

Ici le problème métallurgique qui se pose est un peu différent et peut se formuler comme suit :

Dans un établissement métallurgique ayant à la fois des hauts fourneaux, des fours à coke et des fours à acier, produisant par conséquent du gaz pauvre par ses hauts fourneaux et du gaz riche par ses fours à coke, quelle est la meilleure utilisation de ces deux sources d'énergie calorifique ?

Ici la réponse n'est pas douteuse : le gaz pauvre doit logiquement être réservé à la force motrice, l'excédant s'il y en a servant à actionner des Centrales électriques comme cela se pratique en Westphalie ; le gaz riche doit tout entier être réservé à l'aciérie et aux fours à haute température : c'est ce que nous allons essayer de démontrer.

§ 3. — LA QUESTION ACTUELLE DES FOURS A ACIER¹ SUR LE CHAUFFAGE DES FOURS MARTIN-SIEMENS PAR LES GAZ DE FOURS A COKE

Lorsque l'on substitue, dans un chauffage à haute température comme celui des fours à acier, du gaz riche de distillation des fours

¹ L'étude que nous donnons ici nous a été demandée par M. P. MALLET, ingénieur des



à coke au gaz pauvre de gazogène Siemens, l'allure du four se trouve profondément modifiée, par suite de l'élévation de la température de combustion dans le laboratoire.

Par suite de cette élévation de la température de combustion — la température de régime restant toujours la même puisqu'elle est imposée par l'opération industrielle effectuée dans le laboratoire — les échanges de calories sont beaucoup plus rapides et l'opération peut être raccourcie.

Ce double résultat, élévation de la température de combustion et abrègement de la durée des fontes et coulées d'acier, a des conséquences économiques qu'il est possible de chiffrer.

Pour cela, il suffit de comparer la marche de deux fours, à la même température de régime (1 600°) dont les chambres de récupération assurent aux éléments de combustion, gaz et air, une même température d'échauffement préalable à la combustion (1 200°) : il suffit de faire le bilan de l'utilisation de la chaleur dans les deux cas.

1° Remarques sur la substitution du gaz riche au gaz pauvre dans les fours. — Avant de faire ces calculs, quelques remarques sont nécessaires et en faciliteront la critique :

1° La quantité de chaleur utilisée dans un laboratoire est la différence entre les calories apportées au laboratoire par le gaz et l'air de combustion, soit sous forme de chaleur sensible (pouvoir calorifique à 15°, soit sous forme de chaleur latente (chaleur d'échauffement à 1 200°) et les calories emportées du laboratoire sous forme de chaleur sensible à la température de régime (1 600°).

La chaleur sensible apportée par le gaz et l'air à 1 200°, qui donne l'effet exact de la récupération, atteint une valeur importante dans les fours Siemens à quatre chambres, variant de 1/2 à 1/3 de la quantité totale de calories entrant dans le laboratoire ; et comme l'effet de la récupération varie avec la composition du gaz, avec la proportion d'air primaire et secondaire, généralement avec la façon dont la combustion est conduite, il s'ensuit que l'apport de calories dans le laboratoire n'est absolument pas proportionnel au pouvoir calorifique du gaz brûlé dans un four.

arts et manufactures qui depuis longtemps s'est préoccupé de l'emploi du gaz de fours à coke dans les usines métallurgiques et qui nous a demandé d'en préciser par le calcul l'intérêt.

Nous remercions M. P. MALLET de nous avoir autorisé à publier ce travail fait pour le compte de la Société de Carbonisation.



D'autre part, le départ des calories sortant du laboratoire par unité de volume de fumées et se rendant à la cheminée est également variable, et nous verrons plus loin que les fumées du gaz de distillation emportent plus de chaleur que celles du gaz pauvre, ces différences résultant des chaleurs différentes d'échauffement des gaz CO^2 , Az, H^2O .

De ce qui précède résulte que la chaleur utilisée dans un laboratoire n'est pas fonction du seul pouvoir calorifique du gaz qui y est brûlé, c'est-à-dire que le pouvoir calorifique à 15° d'un gaz alimentant un four Siemens n'a aucune signification précise concernant sa valeur économique dans un four. Seul un bilan complet permet de fixer la *valeur d'emploi* d'un gaz.

2° Pour que deux bilans de combustion faits avec des gaz différents soient comparables et conduisent à des conclusions sûres, il faut que toutes les données du problème en dehors de la variable que l'on étudie soient identiques.

Nous admettrons donc que nos deux fours ont des laboratoires identiques, des chambres de récupération dont le volume total est le même, mêmes cheminées, et ne diffèrent que par le fait que l'un d'eux est pourvu de gazogènes, tandis que l'autre reçoit directement son gaz d'un gazomètre. Nous emploierons dans les deux cas le combustible froid, c'est-à-dire que dans le cas du gaz pauvre nous rapporterons les calories de notre bilan au kilogramme de houille employée dans le gazogène, et dans le cas du gaz riche, au mètre cube de gaz¹.

Les deux fours étant identiques au point de vue des conditions de circulation des gaz et de tirage, nous admettrons qu'ils sont traversés pendant l'unité de temps par un même volume de produits de combustion, c'est-à-dire que l'unité de volume de fumées s'échappant à la cheminée nous servira de commune mesure à laquelle la combustion sera rapportée.

Nous pourrions ainsi établir le coefficient d'équivalence du gaz riche et de la houille de gazogène dans le laboratoire dans l'unité de temps.

3° L'apport de calories dans le laboratoire pour un même volume de fumées sortant du four et le coefficient d'équivalence que nous venons de définir sont déjà des données précises beaucoup plus

¹ Le problème ainsi posé est celui qu'un métallurgiste situé loin d'une houillère aurait à résoudre, avant de savoir s'il a intérêt à amener à son usine une canalisation de gaz des fours à coke.



vraies que les pouvoirs calorifiques comparés des gaz riche et pauvre (lesquels n'ont, nous l'avons dit, aucune signification) mais ne suffisent pas à apprécier exactement l'avantage de la substitution du gaz riche au gaz pauvre dans un four.

L'augmentation de la température de combustion est une cause d'économie se superposant en faveur du gaz riche à celle du meilleur coefficient d'utilisation des calories.

Si l'on admet en effet qu'une opération métallurgique demande un nombre donné total de calories dépensées dans le laboratoire, l'emploi d'un gaz apportant directement ou par récupération plus de calories par unité de volume de fumée, c'est-à-dire par unité de temps, raccourcira la durée d'une opération en raison inverse du rapport des calories apportées : cet avantage se traduira par ce fait pratique que telle opération qui au gaz pauvre demande six heures, sera parfaite en quatre heures avec l'emploi du gaz riche¹.

Une telle amélioration de marche peut avoir des conséquences économiques appréciables sur le rendement de la main-d'œuvre, la productivité d'un atelier, l'amortissement d'une installation, etc...

Nous les signalons en passant, mais dans la présente étude, toute technique, nous ne nous occuperons que des calculs de calories et de rendements thermiques.

A ce point de vue seul, l'économie de combustible résultant de l'abrègement d'une opération est considérable.

Dans un laboratoire de four, en effet, la chaleur utilisée a deux emplois :

1° Fournir les calories nécessaires aux réactions chimiques des matières en œuvre ;

2° Parer au refroidissement et au rayonnement du laboratoire et des autres parties du four.

Or en métallurgie la première de ces consommations de calories est faible, elle se réduit à l'échauffement de la fonte, puisque les réactions chimiques ultérieures sont exothermiques, ainsi que le prouve l'opération Bessemer.

Il s'ensuit que la presque totalité des calories utilisées ne servent qu'à maintenir en température le four et à combattre son refroidissement par rayonnement.

¹ Cette remarque n'est pas rigoureusement exacte pour les fours à acier pendant la période d'affinage ou le *temps* intervient indépendamment de la température. Elle implique une accélération de l'affinage avec la température qui est probable, mais non prouvée.



3° L'abrégement de durée d'une opération entraîne donc, par la suppression de ce rayonnement pendant le temps gagné, une économie que nous chiffrerons mais qu'on peut d'ores et déjà compter comme presque égale au temps gagné, au point qu'une opération passant de 6 heures à 4 heures se fera avec une dépense de calories moindre de près de un tiers¹.

4° Nous avons admis, d'après des mesures faites par Le Chatelier, que la température de régime est 1 600° et la température des chambres 1 200° et nous ferons d'après ces chiffres des calculs rigoureux.

La seule objection qu'on puisse faire à ces calculs résulte de ce que la température de régime dans un four à acier n'est pas constante, mais croît régulièrement depuis le chargement jusqu'à la coulée.

Il nous suffira pour y répondre de prouver que la modification qui en résulterait dans les calculs si on les faisait en suivant différentiellement la loi de combustion avec températures variables de régime, loin de combattre notre thèse, viendrait au contraire confirmer les avantages du gaz riche par rapport au gaz pauvre.

Or il est aisé de comprendre que dans un four à récupération, la température de combustion croît avec la température de régime, d'autant plus rapidement que la récupération est plus parfaite.

Dans un four à gaz riche à double récupération, la récupération peut être *totale*, aucun élément des fumées n'échappe au rôle de récupérateur de la chaleur : les masses des gaz récupérant et récupérateur sont égales.

Ceci demande quelques explications.

Pour que la récupération complète, c'est-à-dire l'épuisement total des calories contenues dans les fumées soit possible, il faut que la masse calorifique des gaz qu'on chauffe soit égale à celle des fumées qui cèdent leur chaleur. Dans un four à simple récupération, la limite de la récupération à 1 600° est 65 p. 100 parce que la moitié des éléments de la combustion (l'air primaire) échappe à la récupération. Dans les fours à double récupération, le combustible, la houille chargée au gazogène échappe partiellement à la récupération, c'est pour cela que la limite d'utilisation des calories n'est encore que de 85 à 92 p. 100. *Il n'y a que le four à double récupération à gaz riche* qui chauffe tout, combustible et comburant, avant admission dans le laboratoire, et dans lequel les masses calorifiques des gaz chauffé et chauffant passant dans les chambres soient identiquement

¹ Voir note page 254.



égales : la limite théorique d'utilisation des calories γ est voisine de $400 \text{ p. } 100^1$.

Plus la récupération est parfaite, plus l'échauffement des chambres suivra de près l'élévation de température du laboratoire, plus rapidement aussi croîtra la température de combustion.

Donc avec un gaz riche il y aura une seconde cause d'accélération de l'échauffement ou plus exactement de mise en température du laboratoire, une seconde cause d'économie de temps et par suite de calories s'ajoutant à celle déjà citée.

Les chiffres que donneront nos calculs sont donc aussi des minima.

5° Nos calculs sont basés sur une dernière hypothèse, celle de l'atmosphère rigoureusement neutre.

Nous l'avons adoptée, parce que nous savons ce dosage exact de l'air possible dans un four bien conduit.

Mais s'il se rencontre quelque praticien contestant la possibilité d'une semblable marche que peu de fours réalisent en fait, nous ferons observer simplement que le dosage précis d'un gaz riche et froid sous pression de gazomètre est beaucoup plus facile que le réglage d'un gazogène et le maniement du clapet d'admission d'un gaz pauvre plus ou moins chaud et à pression de quelques millimètres d'eau.

Ici encore tout est à l'avantage du gaz riche ; le dosage en étant plus facile, la température de combustion, qui subit les influences du moindre excès d'air dans des proportions généralement insoupçonnées, sera obtenue sans la moindre difficulté et il y aura pratiquement un avantage au point de vue de l'économie de temps et de calories.

Nous négligeons encore cet avantage et faisons seulement état de ce que le calcul nous donnera. Ici encore c'est un minimum que nous indiquerons.

En résumé, toutes nos remarques et hypothèses établissent que les chiffres résultant de nos calculs ne donneront qu'un minimum des économies de calories, c'est-à-dire des avantages résultant de l'emploi du gaz riche dans les fours à acier.

2 Bilan d'un four à acier au gaz pauvre. — Nous prendrons comme composition de gaz pauvre un excellent gaz mixte obtenu dans un

¹ Cette récupération limite totale, qui implique le chauffage à 1200° de gaz hydrocarbures, suppose que l'on mêle autant que de besoin de la vapeur d'eau au gaz du four à coke, pour éviter les dépôts de suie.



gazogène Siemens à cendrier noyé avec une bonne houille du Pas-de-Calais à 8 210 calories.

1° *Composition de la houille*

C	H	Az	O	CENDRES	EAU HYG.
82,5	5	1,2	6	4,1	1,2 100.

2° *Composition normale de gaz obtenu au gazogène Siemens*

CO ²	CO	H ²	CH ⁴	Az ²
5	21	13	3	58 100.

Un tel gaz contient nécessairement d'après les lois d'équilibre une petite quantité d'eau, 2,5 p. 100 à ajouter à l'analyse ci-dessus en volumes.

3° *Fumées résultant de la combustion neutre du gaz ci-dessus*

CO ²	H ² O	Az ²	MOLECULES
29	21,5	150	200,5
14,4	10,7	74,9	100.

Au moyen de ces données, il est facile de calculer la température de combustion par la méthode graphique habituelle, en cherchant l'intersection de la courbe représentant la chaleur totale d'échauffement des fumées avec la droite $y = Q + L$ représentant la chaleur totale sensible et latente apportée dans le laboratoire. On trouve que la température développée dans le four à gaz pauvre est :

Température de combustion 2 350° (fig. 50).

Le calcul du bilan du four donne les résultats suivants :

La chaleur apportée par 100 volumes moléculaires de gaz, ou 2 232 litres, est de 4 823 calories.

La chaleur emportée par la quantité correspondante de fumées, soit 200,5 volumes moléculaires sortant à 1600° du laboratoire, est de 2 983 calories, ou 1 443 pour 100 molécules de fumées.

La chaleur consommée dans le laboratoire ou utilisée est donc :

$$4\,823 - 2\,983 = 1\,840 \text{ calories.}$$



En rapportant ce chiffre au volume unitaire (100 molécules) de fumées, on trouve une utilisation de :

$$\frac{1840}{200,3} = 915 \text{ calories.}$$

Reportons-nous à la composition centésimale des fumées, nous

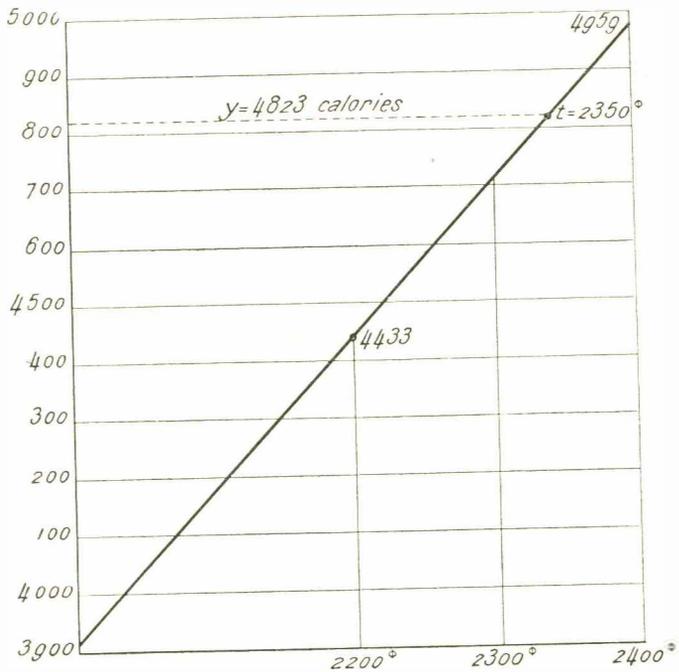


Fig. 50. — Température de combustion de gaz pauvre.

savons qu'elles contiennent 14,4 molécules d'acide carbonique correspondant elles-mêmes à :

$$14,4 \times 12 = 162,8 \text{ gr. de carbone.}$$

Or notre houille contient 825 grammes de carbone pur par kilogramme.

On en déduit par une règle de trois que les 915 calories correspondant à notre volume unitaire de fumées sont fournies par un poids de combustible égal à 196 grammes.

On en déduit encore que pour 1 kilogramme de houille consommée dans le gazogène il sera consommé :



$$\frac{915 \times 1000}{196} = 4668 \text{ calories dans le laboratoire, de sorte que le}$$

rendement sera : $\frac{4668}{8210} = 59 \text{ p. } 100^1$.

3° Bilan de la combustion d'un gaz riche². — Nous prenons comme composition de gaz riche un gaz obtenu par Mahler dans le traitement industriel par distillation d'une houille Commentry.

1° *La houille avait la composition suivante, en poids :*

C	H ²	O	Az	CENDRES	H ² O
75,2	5,2	8,2	0,9	7	3,25/100.

Le pouvoir calorifique observé était de 7423 calories.

2° *Le gaz obtenu par la distillation avait la composition suivante, en volumes :*

C ² H ⁴	CH ⁴	H ²	CO	CO ²	Az ²
5	33	50	9	2	1/100.

Son pouvoir calorifique calculé au mètre cube était 5712.

3° *Les fumées correspondant à un tel gaz dans le cas de combustion neutre ont la composition suivante :*

CO ²	H ² O	Az ²
54	126	442
8,6	20,3	71,1/100.

¹ Note concernant la gazéification en gazogène et la combustion incomplète du carbone. — Variante au calcul précédent.

Il est assez rare dans un gazogène Siemens que la gazéification totale du combustible soit obtenue : une partie du carbone échappe à la combustion sous forme d'escarbilles.

Dans le cas du gazogène auquel nous avons emprunté nos chiffres, il y avait 9,7 p. 100 de carbone échappant à la combustion, contre 72,8 réellement gazéifié.

Nous serons donc en droit de ne compter que 72,8 de carbone utile au lieu de 82,5 que nous avons admis, ce qui augmenterait de plus de 10 p. 100 la dépense de houille.

Nous n'avons pas voulu le faire pour rester toujours dans les chiffres minima, les moins favorables au gaz riche, et parce que la gazéification totale est possible dans des gazogènes à cendrier fermés, soufflés à la vapeur.

En tenant compte de cette perte à la gazéification, on trouverait 228 grammes comme poids de houille correspondant au volume unitaire de fumées ; on en déduirait comme nombre de calories consommées dans le laboratoire par kilogramme de houille :

$$\frac{915 \times 1000}{218} = 4013 \text{ calories ;}$$

ce qui porterait le rendement à :

$$\frac{4013}{8210} = 48,8,$$

sensiblement inférieur à ce que nous avons obtenu en comptant la gazéification totale.

² Le bilan de combustion du gaz riche a été calculé sans tenir compte de la décompo-

