



Émilio DAMOUR

LE

CHAUFFAGE INDUSTRIEL

ET LES

FOURS A GAZ

PARIS

BAUDRY & C^{IE} EDITEURS





LE
CHAUFFAGE INDUSTRIEL

ET LES

FOURS A GAZ

UTILISATION

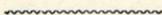
DE LA CHALEUR ET RÉCUPÉRATION

PAR

Émilio DAMOUR

INGÉNIEUR CIVIL DES MINES

CHEF DES TRAVAUX CHIMIQUES A L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES



PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

—
1898

Tous droits réservés

LE

CHAUFFAGE INDUSTRIEL

ET LES

FOURS A GAZ

PRÉFACE

Le problème du chauffage industriel est très complexe et souvent d'une solution plus difficile qu'une question purement scientifique, car, à côté du but à atteindre : température élevée, chauffage d'une enceinte de grandes dimensions et autres conditions d'ordre purement technique, se dresse la question d'économie, à laquelle toutes les solutions doivent se soumettre et qui vient souvent condamner les appareils les plus perfectionnés.

A ce problème peut correspondre la définition suivante : un foyer industriel est un appareil destiné à produire, avec économie, une température élevée, uniformément répartie, dans une enceinte de grandes dimensions s'appliquant à une industrie quelconque. Dans le cas général, donc quatre conditions à remplir : *économie, haute température, dimensions quelconques de l'enceinte, industrie quelconque.*

Parfois, le problème se complique : ainsi, on peut demander à un four de donner alternativement des températures basses et élevées (fours à réchauffer) ; de fournir à la fois des températures différentes en divers

points (fours à recuire le verre), ou en divers compartiments (four Hoffmann pour la cuisson des briques et grès).

Pour certaines applications, la question, au contraire, se simplifie : ainsi, lorsqu'on veut produire un phénomène à basse température, où une flamme très chaude serait inutile et même nuisible (chaudières à vapeur); ainsi encore, dans les fours où l'exiguïté de l'enceinte à échauffer est une nécessité (appareils où le travail se fait à bras, fours à pudler, à réchauffer les paquets, etc.);

Il arrive même, que la question d'économie de combustible, qui semble primordiale en industrie, disparaisse devant des intérêts économiques supérieurs tels que la commodité du travail des ouvriers ou des machines annexes.

Par ces quelques exemples, on juge immédiatement combien est délicat le rôle de l'Ingénieur, qui, non seulement doit pouvoir résoudre le problème général, mais encore modifier profondément cette solution, suivant les cas particuliers. Sa tâche est d'autant plus difficile que le choix porte sur un nombre considérable d'appareils très variés, fort ingénieux, dont parfois les avantages, plus apparents que réels, se manifestent sous une forme spécieuse; et qu'il est impossible de faire des comparaisons exigeant des observations et des essais multiples souvent incompatibles avec l'industrie.

Ayant constamment suivi le progrès de la question du chauffage industriel (1), d'abord dans le cours professé à l'École des Mines par M. Le Chatelier; puis, au moment de l'apparition du nouveau four Siemens, en tentant un premier essai de théorie générale de la récupération; faisant ensuite une étude expérimentale complète, un bilan d'un four Siemens (2); cherchant plus tard à préciser les meilleures méthodes de contrôle chimique et technique des fours (3); enfin, abor-

(1) *Les récents progrès du chauffage dans les grands foyers industriels* (Revue générale des Sciences, du 30 juin 1894).

(2) *Étude sur le nouveau four Siemens et sur l'utilisation de la chaleur dans les fours à régénération* (Annales des Mines, janvier 1893).

(3) *Rôle de la Chimie appliquée dans la conduite des fours* (Communication au deuxième Congrès international de chimie appliquée, juillet-août 1896).

dant récemment la question plus délicate du mécanisme d'échange de calories entre les gaz et les corps à chauffer ⁽¹⁾ ; il nous a paru utile de réunir et de coordonner cette série d'études de façon à présenter l'état actuel d'une question qui intéresse toutes les industries et qui a fait, depuis dix années, des progrès remarquables, surtout au point de vue de la technique des fours.

Tel est l'objet de la publication dont le présent volume consacré à l'utilisation de la chaleur dans les fours n'est que le début.

Les quatre problèmes principaux que comporte la question générale du chauffage des fours ont souvent été confondus. A la suite de la découverte de Siemens, la solution donnée par l'illustre ingénieur, fut si parfaite que, d'un seul coup, elle réalisa une économie du tiers aux deux tiers du combustible, des températures supérieures à celles que l'industrie ancienne pouvait atteindre, permit de chauffer des laboratoires de dimensions précédemment inconnues, enfin se prêta à des applications très variées telles que la fusion de l'acier et celle du verre, substances aussi dissemblables que possible au point de vue thermique.

De cette simultanéité des progrès par une solution unique est résultée une certaine confusion dans les idées ; des ingénieurs ou constructeurs en vinrent à penser que les différentes questions concernant les fours étaient étroitement liées ; la haute température et la récupération parurent être fonctions l'une de l'autre, le chauffage au gaz à récupération sembla convenir aux seuls grands fours et mal se plier aux petits appareils ; l'influence de la nature du corps à chauffer fut même perdue de vue.

Rien n'est moins exact et plus préjudiciable à une étude rationnelle des fours que cette confusion des idées, et pour s'en convaincre, il suffit par exemple de constater que l'on peut obtenir des températures très élevées sans récupération, sans économie, par un chauffage indépendant de l'air de combustion, comme cela s'est longtemps pratiqué dans les hauts fourneaux ; de même on arrive, en céramique à chauffer de très grands fours sans emploi de combustibles gazeux ; il

(1) *Les fours à bassin en verrerie (Bulletin de la Société d'Encouragement, mars 1896).*

se rencontre même des cas, aux basses températures, où l'économie ne doit pas être cherchée dans la récupération. Il est donc nécessaire, si l'on veut être tout à fait maître des solutions dans les innombrables cas de l'industrie, d'étudier l'un après l'autre les problèmes du chauffage, et de séparer des questions qui n'ont été réunies que dans la solution si heureuse que les fours à gaz à récupération leur ont donnée.

L'étude complète de l'art du chauffage comprend donc les chapitres suivants :

1^o Utilisation de la chaleur dans les fours, économie de combustible, récupération de la chaleur perdue ;

2^o Obtention des hautes températures. Influence du chauffage préalable des gaz (combustible et comburant). Rayonnement des fours ;

3^o Dimensions des fours. Grands fours à longue flamme, petits fours à flamme courte. Influence de la vitesse des gaz et de la forme des brûleurs ;

4^o Applications des fours à gaz aux diverses industries, métallurgie, céramique, verrerie. Influence de la nature du corps à chauffer sur la forme du four ;

5^o Enfin, la gazéification des combustibles exige une étude spéciale destinée à préciser les formes les plus favorables des gazogènes et les modes de gazéification, qui doivent varier suivant le but à atteindre, suivant que le gaz doit être employé chaud ou froid, avec ou sans récupération.

De toutes ces questions, la plus intéressante, aujourd'hui que l'obtention des hautes températures n'est plus une difficulté sérieuse pour l'industrie, est sans contredit l'utilisation de la chaleur ; l'économie est le but constant que poursuit l'industrie, c'est un problème qui est et sera toujours d'actualité ; c'est donc celui que nous aborderons en premier lieu.

Nous nous proposons donc d'étudier dans ce volume, les moyens d'améliorer l'utilisation de la chaleur dans les fours et de diminuer, par récupération, les pertes de chaleur dans les fumées.

Pour effectuer cette étude, nous supposerons d'abord que les fours fonctionnent suivant les lois physiques régissant les combustions et



les échanges de calories, chaque phénomène s'y accomplissant d'une façon complète; nous ferons abstraction des conditions pratiques et en particulier du temps, qui limitent la plupart de ces phénomènes. Nous ferons, en un mot, la *Théorie de la Récupération*, qui nous conduira à un classement des fours d'après leurs rendements maxima. Ce sera la *première partie* de ce volume (1).

Dans la *seconde partie*, nous introduirons dans la discussion les données expérimentales que les études industrielles des fours nous ont fournies; nous dresserons un bilan, modèle d'étude expérimentale de four; nous conclurons en donnant le classement réel des fours actuellement en usage.

Nous aurons ainsi traité complètement, au point de vue théorique comme au point de vue pratique, le premier de nos problèmes, l'utilisation de la chaleur et la récupération.

(1) Cette première partie a été publiée *in extenso* dans le *Génie Civil*, t. XXXI, 1897, nos 5, 8, 21, 26, 27; t. XXXII, 1897, nos 1, 2, 3.



PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE THÉORIQUE DE LA RÉCUPÉRATION

CHAPITRE PREMIER.

DONNÉES SCIENTIFIQUES NÉCESSAIRES A L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE COMBUSTION.

La base de toute étude thermique est la connaissance des chaleurs de combustion, due aux travaux de MM. Berthelot et Vieille qui ont employé pour ces mesures la bombe calorimétrique. Mais ces données étaient insuffisantes pour résoudre le problème que nous nous sommes proposé, avant la détermination des chaleurs spécifiques et des chaleurs d'échauffement par MM. Mallard et H. Le Chatelier (1).

Tous ces travaux sont récents, ce qui nous oblige à les résumer ici; on voit donc combien récente aussi est la possibilité de résoudre le problème théorique de la production et de l'utilisation industrielles de la chaleur.

§ 1. Chaleurs de combustion et pouvoirs calorifiques. — On appelle *chaleur de combustion à pression constante* ou simplement *chaleur de combustion* d'un corps simple ou d'un composé chimique défini, le

(1) Cette détermination a été faite accessoirement, par MM. Mallard et Le Chatelier, au cours des travaux remarquables bien connus de la Commission du grisou. Ceci explique, sans doute, comment cette notion si capitale en science et industrie, s'est répandue si lentement dans l'enseignement, au point que nous soyons obligé d'en faire ici un nouvel exposé.

nombre de calories ⁽¹⁾ dégagées par la combinaison avec l'oxygène d'un nombre de grammes de ce corps égal à son poids moléculaire ⁽²⁾.

Lorsque le corps est gazeux, on sait que tous les poids moléculaires correspondent, par définition, à un même volume : 22^{lit}32. Cette unité de volume, qu'a adoptée M. Berthelot dans ses études de thermochimie, est ce que nous appellerons *volum^e moléculaire*, et quelquefois, par abréviation, *molécule* d'un gaz.

Lorsqu'il s'agit d'un combustible, coke, houille, etc., dont on effectue la combustion à la température ordinaire, la chaleur de combustion est désignée plus spécialement sous le nom de *pouvoir calorifique*. Cette donnée expérimentale, que l'on détermine facilement par la bombe Malher, représente alors l'énergie calorifique disponible, la quantité de chaleur que l'on cherchera à utiliser le plus complètement possible.

Ces deux données, chaleurs de combustion et pouvoir calorifique à pression constante, sont bien celles qui jouent le rôle fondamental dans les questions théoriques et pratiques de chauffage industriel, puisque toutes les combustions s'y font sans compression, à une pression à peu près constante, très voisine de la pression atmosphérique.

Les chaleurs de combustion des corps simples et les chaleurs de combinaison de ces corps simples entre eux ont été déterminées par Berthelot et sont publiées dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*. Nous empruntons à l'édition de 1897 celles de ces données qui sont nécessaires à notre étude, pour les réunir en un tableau qui suffira à tous les problèmes de combustion dans les fours (voir p. 8) :

§ 2. Chaleurs d'échauffement et chaleurs spécifiques des gaz. — Lorsqu'un gaz, maintenu à pression constante, est porté d'une température initiale T_0 à une température supérieure T_1 , on appelle *chaleur d'échauffement* entre les températures T_0 et T_1 , le nombre de calories qu'il faut céder à ce gaz pour réaliser cette élévation de température.

(1) Ce sont les grandes calories que nous employons dans toute cette étude.

(2) Pour les corps simples, les poids moléculaires sont généralement le double des poids atomiques; pour les corps composés, les poids moléculaires sont égaux à la somme des poids atomiques des corps simples qui les constituent.

Tableau des chaleurs de combustion des corps simples ou composés se rencontrant dans les fours.

NOM du CORPS BRULÉ	FORMULE CORRESPONDANT au volume moléculaire	POIDS DE LA MOLECULE		RÉACTION de COMBUSTION	CALORIES DÉGAGÉES	OBSERVATIONS
		gr.	lit.			
Hydrogène	H ²	2	22,32	H ² + O = H ² O.	58,2	Eau vapeur.
Oxyde de carbone . .	CO	28	»	CO + O = CO ² .	69,0	Eau liquide.
Formène	CH ⁴	16	»	CH ⁴ + 4O = CO ² + 2H ² O	68,2	»
Acétylène	C ² H ²	26	»	C ² H ² + 5O = 2CO ² + H ² O	195,2	Eau vapeur. 3 volumes moléc.
Carbone amorphe. . .	C ²	24	—	C ² + 4O = 2CO ² .	213,5	Eau liquide.
—	C ³	24	—	C ³ + 4O = 2CO ² .	315,7	Eau liquide.
—	C ³	24	—	C ³ + 2O = 2CO.	2 × 97,6	2 volumes
					2 × 29,4	moléculaires

Dans ce tableau, nous avons exprimé les formules et réactions en notation atomique, mais pour éviter toute confusion, nous avons mis en regard des formules les poids en grammes correspondant aux grandes calories dégagées.

Les poids des corps soumis à la combustion correspondent tous au volume moléculaire ou à la molécule; après combustion, le volume du composé peut être différent : nous l'avons indiqué dans le tableau.

Lorsque le chiffre de combustion d'un corps composé ou celui d'une combustion incomplète n'est pas donné dans les tableaux de M. Berthelot (les différentes éditions de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* ne sont pas également complètes), on peut le calculer par les principes de la thermo-chimie. On sait, en effet, que, dans les phénomènes de combustion, lorsqu'on part d'un même état initial pour arriver à un même état final, la chaleur dégagée dans la réaction directe et totale est la somme des chaleurs dégagées dans les réactions intermédiaires qui y conduisent, quelles que soient ces réactions.

Ainsi la combustion du carbone peut se faire de deux façons différentes :

1° C + O² = CO² dégageant 97,6 calories ;

2° C + O = CO, puis CO + O = CO² dégageant 68,2 calories ;

la chaleur totale dégagée sera la même dans les deux cas :

d'où : 97,6 calories - 68,2 = 29,4 = chaleur de formation de CO.

Cherchons de même la chaleur de combustion du formène se transformant en acide carbonique et eau-vapeur :

C + H⁴ + 2O² = CO² + 2H²O, dégage. 97,6 cal. + 2 × 58,2 cal. = 214 cal. [1]

C + H⁴ = CH⁴ dégageant 18,8 calories,

CH⁴ + 2O² = CO² + 2H²O dégagera donc 214 - 18,8 = 195,2 calories. [2]



Inversement, la chaleur d'échauffement donne la mesure de la quantité de chaleur qu'un gaz cédera en se refroidissant de T_1 à T_0 .

Cette donnée est donc la base de tous les calculs d'échanges de calories dans les phénomènes de combustion et de chauffage.

La *chaleur spécifique* d'un gaz à une température quelconque, que nous n'avons pas besoin de définir, se déduit aisément de sa chaleur d'échauffement; c'est, en effet, la fonction dérivée de celle qui exprime la loi d'échauffement. Mais on ne peut pas, inversement, déduire des chaleurs spécifiques des différents gaz à une même température ou même de leurs chaleurs spécifiques moyennes entre 0 et 100°, les chaleurs d'échauffement de ces gaz à des températures supérieures à 100°. Toutes les chaleurs spécifiques sont, en effet, variables, et croissent, en général, avec la température; et si l'on ne connaît pas la loi d'accroissement, il est évidemment impossible de remonter de la dérivée à la fonction primitive, de la chaleur spécifique à la chaleur d'échauffement.

Il en résulte que les chaleurs spécifiques des gaz à pression constante entre 0 et 100°, telles qu'elles ont été mesurées par Regnault, ne sont pas suffisantes pour calculer les quantités de chaleur absorbées par l'échauffement d'un gaz ou cédées par son refroidissement, et que tous les calculs faits d'après ces anciennes données sont entachés d'une erreur plus ou moins grande, mais dont on ne pouvait autrefois apprécier l'importance (1); qu'en un mot les problèmes de combustion et d'échanges de chaleur ne peuvent pas être abordés avec cette seule donnée de la chaleur spécifique entre 0 et 100°.

Les formules des lois d'échauffement des gaz à pression constante ont été données par MM. Mallard et Le Chatelier en fonction de la température absolue, et la chaleur totale d'échauffement du 0 absolu (-273°) à une température $T = 273 + t$ peut s'exprimer par une formule parabolique à deux termes :

$$Q = a \frac{T}{1000} + b \frac{T^2}{1000^2}$$

(1) Un grand nombre de calculs de fours ont été faits, tant dans les ouvrages français que dans les ouvrages allemands, d'après ces données.

10 ÉTUDE THÉORIQUE DE LA RÉCUPÉRATION

dans laquelle a est une constante commune à tous les gaz, égale à 6,5, et b une constante variable avec les différents gaz, dont la valeur est :

Gaz parfaits (azote, hydrogène, oxygène, oxyde de carbone).	Eau.	Acide carbonique.	Formène.
0,6	2,9	3,7	6

D'après cela, les chaleurs d'échauffement du volume moléculaire 22^{lit} 32 de ces différents gaz, entre deux températures $t_0 = T_0 - 273$ et $t = T - 273$, s'exprimeront par les formules :

$$[1] \quad Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 0,6 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2} \quad (\text{gaz parfaits}).$$

$$[2] \quad Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 2,9 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2} \quad \text{H}^2\text{O}.$$

$$[3] \quad Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 3,7 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2} \quad \text{CO}^2.$$

$$[4] \quad Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 6 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2} \quad \text{CH}^4.$$

Ces formules permettent de calculer les chaleurs d'échauffement entre deux températures quelconques.

En prenant les dérivées de ces fonctions, on obtiendrait les chaleurs spécifiques à une température quelconque, par application de la formule :

$$\frac{dQ}{dT} = C_t = \frac{a}{1000} + \frac{2b}{1000^2} T.$$

Mais cette donnée est sans grand intérêt pour nos études.

Nous avons, au contraire, constamment à calculer des chaleurs d'échauffement, et pour faciliter ces calculs, il nous a paru utile de reproduire un tableau, de 200° en 200°, dans les limites de températures que présente l'industrie (voir p. 11) :

§ 3. **Températures de combustion.** — La connaissance des chaleurs de combustion et des chaleurs d'échauffement permet de résoudre une question fondamentale dans cette étude, celle des températures de combustion :

On appelle température de combustion, celle à laquelle s'élèvent les pro-

Tableau des chaleurs d'échauffement

de 0° (glace fondante) à t = T - 273, des volumes moléculaires (221,32) des gaz.

GAZ	0°	200°	400°	600°	800°	1.000°	1.200°	1.400°	1.600°	1.800°	2.000°	2.200°	2.400°	2.600°
Gaz parfaits ⁽¹⁾	0	1,39	2,82	4,31	5,82	7,43	9,05	10,73	12,46	14,21	16,03	17,91	19,84	21,81
H ² O (18 gr.)	0	1,73	3,69	5,87	8,23	10,98	13,87	17 »	20,35	23,86	27,76	31,82	36,40	40,62
CO ² (44 gr.)	0	1,85	3,99	6,44	9,07	12,42	15,55	19,18	23,10	27,21	31,84	36,65	41,76	47,16
CH ⁴ (16 gr.)	0	2,19	4,85	8,02	11,46	15,77	20,37	25,44	30,99	36,86	43,55	50,54	58,02	66,04

(1) On comprendra dans la formule des gaz parfaits : l'azote Az² = 14 grammes, l'oxygène O² = 16 grammes,
l'hydrogène H² = 2 grammes, l'oxyde de carbone CO = 28 grammes.

duits gazeux, après la combustion sous pression constante, en supposant le phénomène assez rapide pour que le rayonnement soit négligeable et pour que l'enceinte soit considérée comme athermane.

Ces conditions sont voisines de celles de la pratique : la condition de pression est établie dans les fours où règne la pression atmosphérique. Quant à la deuxième condition, d'instantanéité du phénomène de combustion ou d'athermanéité de l'enceinte, elle n'est pas rigoureusement remplie, d'où résulte que la température d'une flamme d'un four est inférieure à celle de la température de combustion; mais on conçoit que, toutes choses égales, celle-ci permette d'apprécier, au point de vue industriel, la valeur d'une flamme, ce que la connaissance séparée des pouvoirs calorifiques et des chaleurs d'échauffement est insuffisante à fournir. Jusqu'ici, beaucoup de calculs ont été faits pour se rendre compte de la valeur d'un four-gazogène, en se basant uniquement sur le pouvoir calorifique des gaz; cette donnée est toujours insuffisante.

Le calcul des températures exactes de combustion est une conséquence logique de la connaissance des chaleurs d'échauffement. Aussitôt après les travaux de la Commission du grison, M. H. Le Chatelier montra combien les anciennes évaluations théoriques de températures étaient peu exactes. Nous emprunterons à son cours de l'École des Mines, rédigé par ses élèves, un grand nombre d'exemples et de données numériques pour le calcul précis de ces températures de combustion.

ÉQUATION GÉNÉRALE DONNANT LA TEMPÉRATURE DE COMBUSTION. — Lorsqu'une combustion s'opère, la chaleur dégagée sous pression constante n'est employée qu'à élever la température du mélange gazeux final, et le phénomène étant athermane par hypothèse, il y a égalité entre la chaleur latente de combustion et la chaleur sensible contenue dans le mélange gazeux après cette combustion; d'où l'équation (1) :

$$\Sigma L = \Sigma a(T - T_0) + \Sigma b(T^2 - T_0^2),$$

(1) Ceci est une conséquence du principe de Joule qui, dans les cas étudiés où il n'y a pas à tenir compte du travail puisque toutes les réactions se font à pression constante, revient à dire que « la somme des quantités de chaleur dans un cycle fermé est nulle » :

$$L = \int_0^t c dt.$$

formule qui donne, par la résolution d'une équation, du second degré, la valeur de T en fonction de T_0 .

La résolution de cette équation peut être assez longue, lorsqu'on a affaire à un mélange complexe de gaz; il est alors beaucoup plus rapide, surtout lorsqu'on a sous les yeux le barème des chaleurs d'échauffement, de se servir d'une méthode graphique.

MÉTHODE GRAPHIQUE POUR LE CALCUL DES TEMPÉRATURES DE COMBUSTION.

— On cherchera l'intersection de la droite ΣL avec la courbe parabolique $\Sigma a(T - T_0) + \Sigma b(T^2 - T_0^2)$ (fig. 1). Cette courbe se tracera par points correspondants à des températures pour lesquelles les chaleurs d'échauffement sont immédiatement données par le barème, et la résolution sera immédiate.

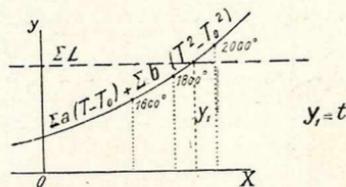


FIG. 1.

Cette méthode graphique nous a servi presque seule; nous ne saurions trop la recommander pour les calculs rapides, d'autant que, si elle est moins précise que la méthode mathématique, elle expose à moins d'erreurs (1).

TEMPÉRATURE DE COMBUSTION DE L'HYDROGÈNE DANS L'AIR FROID. — Prenons 2 grammes (22^{lit} 32) d'hydrogène : pour le brûler en formant H₂O, un demi-volume moléculaire (1/2 O₂), est nécessaire. Cet oxygène sera accompagné d'un volume à peu près quadruple d'azote, 2Az², c'est-à-dire deux volumes moléculaires (2). D'après le tableau des chaleurs d'échauffement, on a le nombre de calories nécessaires pour porter ces produits gazeux à différentes températures :

(1) Nous ferons tous les calculs en supposant que l'on brûle un volume moléculaire du corps brûlé : ce sera toujours notre unité; mais il est clair qu'en prenant un poids quelconque on aboutirait à la même température, car dans l'équation générale, la masse n'intervient pas. Pour les combustibles naturels, nous prendrons en général 1 kilogr.

(2) En volumes, l'air est composé de 20,8 d'oxygène et de 79,2 d'azote, soit, pour 4 d'oxygène, 3,8 ou environ 4 d'azote.

Nous admettrons, en général, le rapport 1 : 4 pour simplifier les calculs.



ÉTUDE THÉORIQUE DE LA RÉCUPÉRATION

Produits brûlés	1 800° C	2 000° C	2 200° C
	a	b	c
H ² O	23,86	27,76	31,82
2Az ²	28,42	32,10	35,82
TOTAUX	52,28	59,86	67,64

La chaleur dégagée par 2 grammes d'hydrogène donnant de la vapeur d'eau est 58 calories, qui représentent ΣL de l'équation générale. On voit immédiatement à la lecture du tableau précédent que la température inconnue est comprise entre 1 800° et 2 000°.

Et si l'on construit la courbe caractérisée par les trois points a, b, c (fig. 2), l'intersection de cette courbe avec la droite Q = 58,2, donnera graphiquement la température de combustion de l'hydrogène, soit 1 970°.

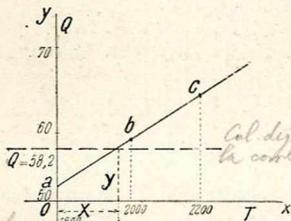


Fig. 2.

Le même calcul donne pour la combustion de l'oxyde de carbone à l'air froid, 2 100°, ce qui montre que, toutes choses égales, l'oxyde de carbone exempt d'azote donne une flamme plus chaude que l'hydrogène.

Le gaz à l'eau théorique, sans azote, (CO + H), évidemment intermédiaire entre les deux précédents, a une température de combustion de 2 030°.

TEMPÉRATURE DE COMBUSTION DU CARBONE. — Brûlé à l'air froid, sans excès d'air, le carbone donne 2 040° (1).

Si l'on suppose dans les fumées 5 % d'oxygène entraînant, comme tout oxygène emprunté à l'air, un volume quadruple d'azote, la température s'abaisse à 1 650°.

Ces deux résultats sont intéressants, car les points de combustion

(1) Voir le détail des calculs dans l'Annexe p. 104.

donnant évidemment un maximum de la température que l'on peut obtenir dans un four, ceux que nous venons d'indiquer représentent la limite que pouvaient atteindre les anciens fours à grille, à chauffage direct. Dans ces fours, on sait qu'il est à peu près impossible d'assurer la combustion sans excès d'air, et que cet excès est rarement inférieur à 5%. On voit donc, en se reportant à cette température de 1 650°, qui exclut tout rayonnement et toute perte extérieure, combien l'obtention des hautes températures était pratiquement irréalisable dans l'ancienne industrie.

Si l'on suppose dans les fumées 5 % d'oxyde de carbone en excès, la température se maintient plus élevée, à 1 930°. Une telle combustion n'est réalisable que dans les fours à combustibles gazeux, mais, dans ce cas, la température qu'elle peut donner, rapprochée de celle de 1 650° correspondant à la marche avec excès d'air, indique que si l'on veut obtenir une température élevée, il y a intérêt dans les fours à gaz à admettre un excès d'oxyde de carbone, bien que l'utilisation du combustible puisse être moins satisfaisante, la formation d'oxyde de carbone impliquant une consommation de charbon plus considérable (1).

CAS GÉNÉRAL. — *Gaz de gazogène industriel brûlant avec de l'air chaud.* — Soit, par exemple, le gaz dont la composition en volumes serait la suivante :

Acide carbonique	0,05 volume
Oxyde de carbone	0,20 —
Hydrogène	0,12 —
Formène	0,03 —
Eau	0,02 —
Azote	0,58 —
	<hr/>
	1,00 volume

(1) Si l'on se préoccupe à la fois du rendement et de la température, il y a une appréciation à faire dans chaque cas particulier ; mais, en général, on peut dire que, dans les appareils exigeant une température élevée, tels que les fours à acier, la marche avec excès d'oxyde de carbone est préférable. La marche avec excès d'air est, au contraire, indiquée dans les appareils à basse température, tels que les chaudières à vapeur, où il importe que la combustion soit bien complète.

Il est d'ailleurs évident que, dans l'un et l'autre cas, la combustion normale, sans excès dans un sens ou dans l'autre, sera toujours la plus avantageuse.

Supposons ce gaz chauffé à 1000° et brûlons-le avec de l'air chauffé à 1000°.

Calculons le volume d'air nécessaire pour brûler 1 volume de ce gaz. L'oxyde de carbone, 0^{vol} 20, exige 0^{vol} 10 d'oxygène, qui entraîne 0^{vol} 40 d'azote. L'hydrogène, 0^{vol} 12, exige 0^{vol} 06 d'oxygène et 0^{vol} 24 d'azote. Le formène, 0^{vol} 03, exige 0^{vol} 06 d'oxygène et 0^{vol} 24 d'azote. En tout, 1^{vol} 10. D'où l'on peut former le tableau des calories apportées par ces gaz à 1000° ou dégagées par leur combustion, c'est-à-dire ΣL :

Gaz à 1000°	Composition en volumes moléculaires		Calories produites par la combustion
	volumes	calories	calories
CO ²	0,05	0,6	»
CO	0,20		13,6
H ²	0,12	6,6	6,9
Az ²	0,58		
CH ⁴	0,03	0,5	5,6
H ² O	0,02	0,2	
	<u>1,00</u>		
Air calculé nécessaire à la combustion. .	1,10	8,1	
TOTAL		<u>16,0</u>	<u>26,1</u>

ΣL = 42,1 calories.

Les produits de combustion ont, en volume, une composition indiquée dans le tableau ci-dessous, qui en donne la chaleur d'échauffement à différentes températures :

Produits de combustion	Volumes	Chaleurs d'échauffement		
		à 2000°	à 2200°	à 2400°
		calories	calories	calories
CO ²	28	8,5	10,3	11,7
Az ²	144	23,1	25,8	28,6
H ² O	20	5,5	6,3	7,2
		<u>37,1</u>	<u>42,4</u>	<u>47,5</u>

On voit immédiatement, sans qu'il soit nécessaire de construire la courbe, que la température cherchée est voisine de 2200°.

Ce chiffre montre l'intérêt que présente le chauffage préalable de l'air et du gaz, au point de vue de l'obtention des hautes températures.

Il est inutile de multiplier davantage les exemples ; ceux que nous avons donnés suffisent à indiquer la marche des calculs dans un cas quelconque.

Si nous avons tant insisté sur cette question, c'est que cette notion, jusqu'ici négligée, de la température de combustion, est d'un grand intérêt dans l'appréciation de la valeur des combustibles et des systèmes de chauffage : elle donne évidemment une limite de la température qu'on peut espérer atteindre dans un four ; elle peut servir de base d'une des méthodes de calcul du rendement, c'est-à-dire des calories utilement employées dans les fours (1).

§ 4. **Dissociation.** — Il convient, pour lever une objection possible à l'exactitude de ces calculs des températures de combustion, et de toutes les théories qui suivent, de montrer que l'influence de la dissociation est absolument négligeable.

Jusque dans ces derniers temps, les chaleurs d'échauffement étaient connues jusqu'à 100° seulement ; par extrapolation illicite, on les appliquait, pour le calcul des températures de combustion, et naturellement on trouvait des nombres beaucoup trop élevés. Pour expliquer cette anomalie, quelques physiciens soutenaient que la dissociation joue un rôle important, et qu'en empêchant la combinaison complète des éléments, elle diminue le nombre de calories dégagées et ramène les températures calculées à des valeurs voisines de la réalité.

Il n'en est rien, car d'après les travaux de MM. Mallard et Le Chatelier, ce phénomène est peu sensible, même à 2 000°, ainsi qu'on peut le constater sur le tableau suivant (2) :

(1) Voir à la fin du volume une annexe donnant des exemples de température de combustion dans les cas industriels les plus fréquents.

(2) M. Berthelot a, le premier, eu le sentiment que la dissociation ne jouait qu'un rôle insignifiant dans les phénomènes de combustion, et il a contesté la valeur des coefficients probables de dissociation calculés d'après les températures de combustion et les chaleurs spécifiques des gaz entre 0 et 100°. Il a, le premier, affirmé, à l'appui de cette assertion, la loi d'accroissement des chaleurs spécifiques des gaz, que les travaux de MM. Mallard et Le Chatelier ont mis en évidence.

Dissociation de l'acide carbonique sous la pression atmosphérique.

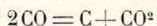
1 000°	0,006
1 500°	0,008
2 000°	0,04
2 500°	0,19

La dissociation de la vapeur d'eau, mal déterminée quantitativement, est plus faible encore.

Il est donc absolument licite, dans les calculs du paragraphe précédent, et dans la théorie des fours, de négliger ce phénomène (dont on pourrait d'ailleurs tenir compte) puisque les gaz provenant de la combustion se composent d'eau et d'acide carbonique, et que les températures industrielles sont inférieures à 2 000°.

Dissociation de l'oxyde de carbone. — Il n'en est pas de même de la dissociation de l'oxyde de carbone, qui présente des particularités très remarquables et peu connues.

La décomposition de ce gaz en carbone et acide carbonique, suivant la réaction :



est maximum et presque complète à 300°, mais elle redevient sensiblement nulle à 800°.

Ce phénomène joue un rôle important dans la marche des gazogènes : il explique comment il est impossible, surtout aux basses températures, d'obtenir de l'oxyde de carbone sans acide carbonique, ce qui est la règle dans les gaz pauvres industriels ; il rend compte des dépôts de suie dans les conduites et collecteurs de gazogènes ; il sera, dans notre étude générale des fours, la plus grande cause d'écart entre la théorie et la pratique.

CHAPITRE II

PROGRÈS DE LA QUESTION DU CHAUFFAGE DANS L'INDUSTRIE, DEPUIS L'ORIGINE DES FOURS A GAZ CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE FOURS A GAZ

Le nombre de systèmes de fours à gaz actuellement employés dans l'industrie est tellement considérable, qu'il est indispensable, avant d'essayer une théorie générale de la question qui nous occupe, d'en faire une classification. Nous en profiterons pour retracer à grands traits le progrès accompli depuis que l'emploi de combustibles gazeux, ou plus exactement la méthode de gazéification préalable des combustibles, a transformé le problème, ouvrant la porte à des perfectionnements que les foyers à feu direct ne comportaient pas.

§ 1. **Origine et développement rapide des fours à gaz.** — Les fours à gaz, sans lesquels l'industrie moderne n'existerait pas, sont cependant de création récente. C'est aux brevets de Frederick et William Siemens, dont le premier est de 1856, mais plus spécialement au célèbre brevet de 1861 qu'il faut historiquement faire remonter l'origine de ces fours.

Archéologiquement, sans doute, on peut trouver, dans l'industrie ancienne, des étapes vers le chauffage au gaz : les gazogènes existaient dans le pays de Galles, depuis qu'on y extrayait la houille, car les métallurgistes de cette région n'avaient trouvé d'autre moyen d'utiliser, pour le chauffage de fours à réverbères un peu longs, l'an-thracite qu'elle fournit en abondance, que celui de l'entasser sur une couche de 0^m 75 à 0^m 80, de façon à produire de l'oxyde de carbone, allongeant la flamme trop courte du charbon maigre. De même l'idée de chauffer préalablement l'air avant combustion, était réalisée dans les hauts fourneaux, dans les fours Ponsard et Bicheroux. L'inversion elle-même, cette idée fondamentale des régénérateurs Siemens, avait été essayée dans les premiers moteurs à air chaud.

Mais toutes ces idées éparses ne donnaient que des résultats insignifiants jusqu'au jour où Sir William Siemens, joignant à son génie d'Ingénieur une ténacité admirable, réussit, après vingt années d'études, à donner du problème des fours une solution si parfaite que trente années d'applications n'y ont presque rien ajouté, n'ont, en tout cas, apporté aucun principe nouveau.

Le four Siemens primitif est trop connu de nos lecteurs pour que nous ayons besoin de le décrire, ni de reproduire la figure classique par laquelle l'inventeur illustra son premier mémoire. Rappelons seulement que, destiné à la fusion de l'acier sur sole, il comportait un réverbère à voûte très surbaissée; que les chambres de récupération étaient au nombre de quatre permettant de chauffer une partie de l'air et le gaz; que la distribution alternée, l'*inversion*, s'y faisait par des valves; qu'enfin les gazogènes, situés en général à une certaine distance du four, étaient reliés à celui-ci par une conduite en tôle, en forme de siphon renversé (fig. 1), dont les deux branches verticales assuraient le tirage du gazogène.

Ce four se répandit d'abord en métallurgie; arrêté un instant dans son essor (entre 1867 et 1871), par la découverte de l'acier Bessemer, le progrès du four Siemens devint rapide à partir de cette dernière date. Il fut essayé vers 1867 pour la glacerie, et réussit à Saint-Gobain, mais ne gagna vraiment les industries du verre que quelques années plus tard (1876), lorsque les fours à bassin eurent donné de bons résultats.

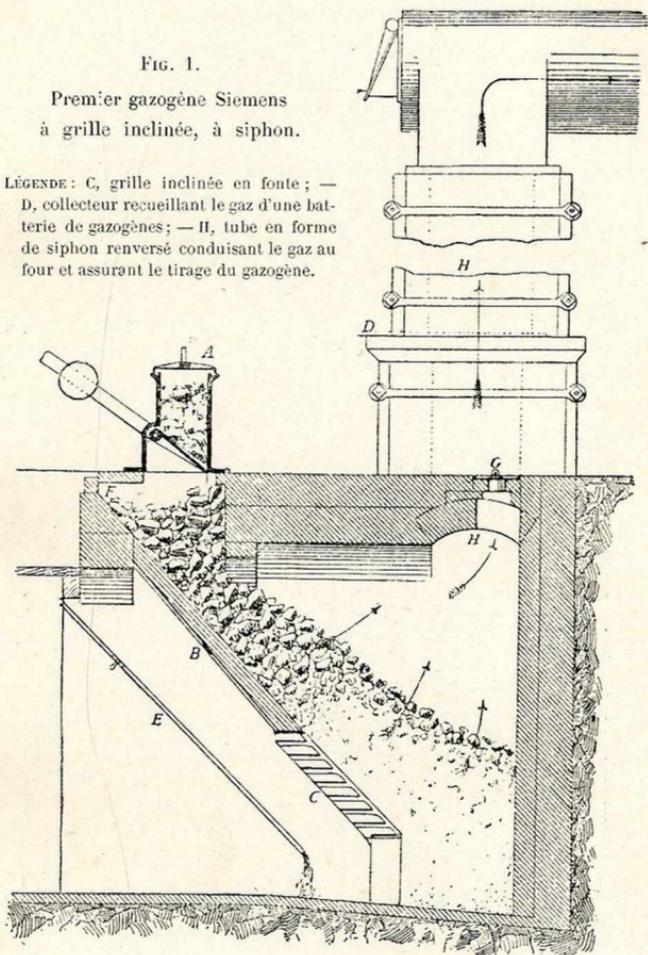
De nos jours, le four à gaz est employé en *métallurgie*, aussi bien dans celle des métaux autres que le fer, qu'en sidérurgie, en *verrière*, dans l'*industrie du gaz*, rarement en *céramique*. Des efforts sont faits pour en pousser l'application à toutes les industries exigeant des températures assez élevées et consommant beaucoup de charbon.

Ce rapide développement s'explique en partie par les avantages inhérents à l'emploi de combustibles gazeux: réglage facile de la combustion qui peut être parfaite sans excès d'air, possibilité d'avoir de longues flammes et partant de grands fours, emploi de combustibles de qualité inférieure.

Il tient aussi à la perfection du four Siemens et à cette idée de la

FIG. 1.
Premier gazogène Siemens
à grille inclinée, à siphon.

LÉGENDE : C, grille inclinée en fonte ; —
D, collecteur recueillant le gaz d'une bat-
terie de gazogènes ; — H, tube en forme
de siphon renversé conduisant le gaz au
four et assurant le tirage du gazogène.



régénération qui réalisait à la fois la haute température et l'économie.

Mais, lorsqu'on suit les transformations successives qui ont amélioré la solution première, et qu'on voit progresser les uns après les autres tous les organes de ce four primitif, il est aisé de constater que l'un des plus grands mérites des fours à gaz est d'avoir distingué les différentes fonctions que comporte l'opération de chauffage industriel et affecté à chacune d'elles un organe spécial d'autant plus facile à surveiller que la fonction qu'il doit accomplir est plus élémentaire. Cet avantage des fours à gaz a été souvent perdu de vue; en tout cas, on n'en tire pas, dans la pratique, tout le parti possible, en exerçant un contrôle et une surveillance méthodiques beaucoup plus faciles que dans les anciens appareils; nous croyons utile d'y insister.

Dans l'industrie primitive, et actuellement encore dans toutes les industries qui n'ont pas modifié leurs antiques méthodes de chauffage, tout était confondu. Les vieux fours à pots de verrerie dont on peut encore voir quelques spécimens, en sont un exemple frappant: ils se composent d'une enceinte à pots au-dessus du foyer à grille, sans cheminée, le tirage n'étant assuré, le plus souvent, que par la hauteur suivant laquelle on entassait un combustible de première qualité (1). Dans ces conditions, la conduite du feu était un véritable art et les maîtres de verrerie savent les difficultés qu'elle comportait; la valeur qu'avait pour eux un bon maître fondeur, auquel ils s'en remettaient le plus souvent d'une façon complète, était inestimable.

De nos jours, dans un four de verrerie à gaz ou dans un four à acier, la grille, le laboratoire, la cheminée et le nouvel organe destiné à la récupération de la chaleur, sont complètement distincts. Chacun peut être surveillé et, lorsque ce contrôle est exercé d'une façon méthodique, il est souvent facile, sans le secours d'un aussi habile ouvrier, d'éviter les accidents, de démêler la cause de ceux qui peuvent se produire. L'art du maître fondeur, parfois si difficile à rencontrer, a fait place à la science de l'ingénieur qu'il est toujours possible d'acquiescer.

(1) La cheminée qui surmonte ces fours de verrerie n'est qu'une hotte servant à l'évacuation des fumées, mais presque sans action sur le four.

La distinction des organes a encore eu l'avantage d'ouvrir largement la porte aux progrès. Tandis que, dans l'ancienne industrie, les formes de fours se transmettaient par tradition sans que, le plus souvent, on osât changer quoique ce fût à un appareil, de crainte d'un échec, de nos jours, les inventeurs se sont attachés à améliorer un à un tous les organes, et ont pu le faire presque sans risque. C'est ainsi que, peu à peu, sans nouvelle grande découverte, les fours à gaz se sont perfectionnés.

Ce sont ces améliorations que nous allons passer en revue, organe par organe. Leur énumération est la seule classification que nous puissions donner, en attendant qu'une théorie de la combustion nous ait permis de tracer la seule classification rationnelle, celle qui sera basée sur l'utilisation de la chaleur ou le rendement de chaque système.

§ 2. Description et rôle des organes essentiels des fours à gaz. — Actuellement, dans le cas le plus général, un four à gaz comporte les organes distincts suivants :

1° *Le foyer gazogène* dans lequel s'effectue la combustion incomplète du charbon donnant des gaz combustibles, au moyen d'une première admission d'air : *l'air primaire*.

Cet organe peut avoir son autonomie complète et posséder un appareil de tirage propre : siphon Siemens, injecteur ou autre dispositif; il peut, au contraire, être étroitement lié au four et dépendre de sa cheminée ;

2° *Les organes d'inversion*, clapet ou cloche, permettant de diriger d'un côté ou de l'autre les fumées ou les gaz de combustion. Ces organes n'existent pas toujours, par exemple dans les fours à récupération par courants parallèles en sens inverse.

Lorsqu'ils existent (dans les fours Siemens) ils servent de limite exacte entre les chambres de récupération et la cheminée d'une part, les chambres et le gazogène d'autre part. Cette exacte délimitation des chambres et du gazogène que nous donnons ici comme une définition, nous semble la plus rationnelle tant au point de vue théorique qu'à celui du contrôle pratique des fours.

Il ne faut pas, en effet, dans une étude de four, limiter le gazogène à l'enceinte même où se fait la gazéification, mais y comprendre, quelles que soient leurs longueurs, tous les tuyaux et carneaux, allant jusqu'à l'entrée des chambres de récupération. Organe de production du combustible gazeux, et devant le fournir non seulement riche en calories, mais aussi chaud que possible, le gazogène est, en quelque sorte, responsable jusqu'au moment où il le livre à l'organe de récupération.

C'est dans cette acception étendue, mais nettement définie que nous entendrons toujours le mot gazogène ;

3^o *Les organes de récupération de la chaleur ou régénérateurs*, grâce auxquels la chaleur entraînée par les produits de combustion est utilisée et ramenée, en quelque sorte, dans le laboratoire.

Ces chambres de récupération commencent à la valve de distribution où finit le gazogène et se terminent exactement à l'entrée dans le four, par les lunettes où la combustion commence ; elles comprennent donc tous les carneaux d'arrivée de l'air et du gaz ;

4^o *Le laboratoire ou four proprement dit*, où s'effectue l'opération industrielle et où s'achève la combustion par un nouvel afflux d'air, l'air *secondaire*.

Le four est limité par les lunettes d'admission et d'échappement, en deçà ou au delà desquelles sont les chambres de récupération ;

5^o *La cheminée*, ou les organes de tirage en faisant fonction, destinés à l'évacuation des fumées dans l'atmosphère, assurant, en outre, la circulation des divers courants gazeux, soit seulement depuis le laboratoire jusqu'à la base de la cheminée, en passant à travers les chambres, soit quelquefois depuis le gazogène.

Cet organe commence à la sortie des chambres de récupération, c'est-à-dire, ainsi que nous l'avons vu, à la valve d'inversion.

La cheminée est complétée, en tant qu'agent de tirage, par un certain nombre de registres commandant les différents carneaux d'échappement ou même d'admission. Ces organes de réglage, qui sont répartis dans tous les points du four, sont d'une extrême importance et, en général, un four sera d'autant plus réglable qu'il en possédera davan-

tage. Pour en bien montrer l'utilité, résumons les différents courants gazeux que comporte un four à gaz complet :

1° On admet sous le gazogène une certaine quantité d'air qu'il peut être utile de doser par un registre ou un injecteur : c'est l'air primaire;

2° En traversant le gazogène, cet air gazéifie le combustible en un mélange d'oxyde de carbone, d'acide carbonique inévitable, de gaz distillé de houille (formène) et d'hydrogène : c'est le gaz de gazogène;

3° A l'entrée du four, ce gaz rencontre un nouvel afflux d'air qu'il est indispensable de doser exactement : c'est l'air secondaire;

4° Les produits de combustion se partagent en deux courants, l'un dirigé vers la chambre de récupération à gaz, l'autre vers la chambre de récupération à air. Il importe beaucoup de pouvoir régler cette répartition qui commande seule la température de régime des chambres;

5° Enfin ces deux courants se réunissent à la base de la cheminée, pour être envoyés dans l'atmosphère, et il est utile de pouvoir régler, indépendamment de tout autre, le tirage de la cheminée qui agit seul sur la pression dans l'intérieur du four ou laboratoire.

On voit, par là, l'importance de la multiplicité des registres.

Les premiers fours Siemens n'en possédaient que deux ou trois; un four récent n'en présente pas moins de quatre: deux à l'admission, deux à l'échappement. C'est un premier progrès à signaler avant de décrire les améliorations des divers organes.

§ 3. **Modifications et perfectionnements apportés depuis l'origine aux différents organes des fours à gaz.** — 1° GAZOGÈNES. — La question des gazogènes est celle qui a été le plus étudiée depuis l'origine, non seulement par les grands constructeurs, mais par beaucoup d'inventeurs désireux d'apporter un élément de nouveauté dans les fours.

Sans insister sur la question de forme des appareils de gazéification, qui sera traitée plus tard, rappelons seulement que le gazogène à grille inclinée Siemens (fig. 1), a fait place presque partout à des gazogènes à grille horizontale tel que celui du nouveau four Siemens (fig. 2).

La grille inclinée avait l'avantage, en répartissant le charbon suivant un talus d'éboulement parallèle à la poitrine du gazogène, de faciliter son égale répartition en une couche épaisse, de boucher, à chaque chargement, les trous (brûlages) que la combustion avait pu produire et d'exiger de moins bons ouvriers gaziers; telle était, du moins, l'idée du constructeur.

La grille horizontale, sur laquelle on entasse une couche de combustible de 0^m 80 à 4^m 40 a besoin d'être fréquemment piquée au ringar et le gazier qui en est chargé doit étaler son charbon à chaque charge et boucher les trous à mesure qu'ils se produisent; mais elle a un rendement beaucoup plus élevé à égalité de volume du gazogène. Aussi se répand-elle tous les jours davantage.

Signalons encore les tentatives de gazogènes sans grilles, très intéressantes puisqu'elles permettraient de chauffer l'air primaire, ce dernier desideratum du problème des fours. Les aciéries de Saint-Chamond possèdent des gazogènes à poitrine ouverte sans grille, où le charbon se place suivant le talus d'éboulement, mais on ne semble pas les préférer aux gazogènes à grille. La plus heureuse tentative de gazogène sans grille est le gazogène Taylor à sole tournante, mais l'air et la vapeur d'eau qu'on y injecte ne peuvent être chauffés ou n'ont été jusqu'ici chauffés qu'à 400 degrés environ. Enfin, rappelons l'idée de gazogène à fusion de cendres d'Ebelmen, idée bien séduisante, mais qui n'a reçu que peu d'application.

C'est surtout en perfectionnant les méthodes de gazéification que les inventeurs ont cherché à obtenir un gaz plus riche que le gaz Siemens.

On sait que le gaz Siemens contient environ 5% d'acide carbonique. Cette proportion vraiment élevée, qui abaisse beaucoup le calorique latent, est due, en partie, à la dissociation de l'oxyde de carbone dont nous avons parlé, et paraît difficile à éviter; bien des inventeurs ont cependant tenté de la réduire.

En outre, le gaz Siemens produit par l'air, comporte un poids d'azote qui n'est que nuisible à toutes les réactions de combustion. Aussi a-t-on, depuis longtemps, songé à éliminer cet azote en gazéifiant le carbone par un gaz autre que l'air, la vapeur d'eau ou même l'acide car-

LÉGENDE : A, gazogène ; — *a, a*, collecteur recueillant le gaz produit par le gazogène ; — B, carneau ; — C, four où le gaz rencontre l'air chaud provenant du carneau $D_1 D_2$; — E, chambre de récupération où s'échauffe l'air froid admis en H quand la valve V se trouve inversée ; — *e, f, g*, marche des produits de combustion dans le carneau symétrique de $D_1 D_2$, dans le récupérateur E et dans les carneaux I et K qui les conduisent à la cheminée G ; — T, trémie de chargement ; — P, potence supportant un clapet qui permet de diriger le gaz du gazogène à droite ou à gauche.

Au sommet de chacune des deux chambres de récupération EE se trouve un injecteur Kœrting qui établit la communication entre les carneaux *f* et le cendrier F, et qui permet d'envoyer sous ce cendrier, soit de l'air chaud (chauffage de l'air primaire), soit des fumées (régénération de l'acide carbonique).

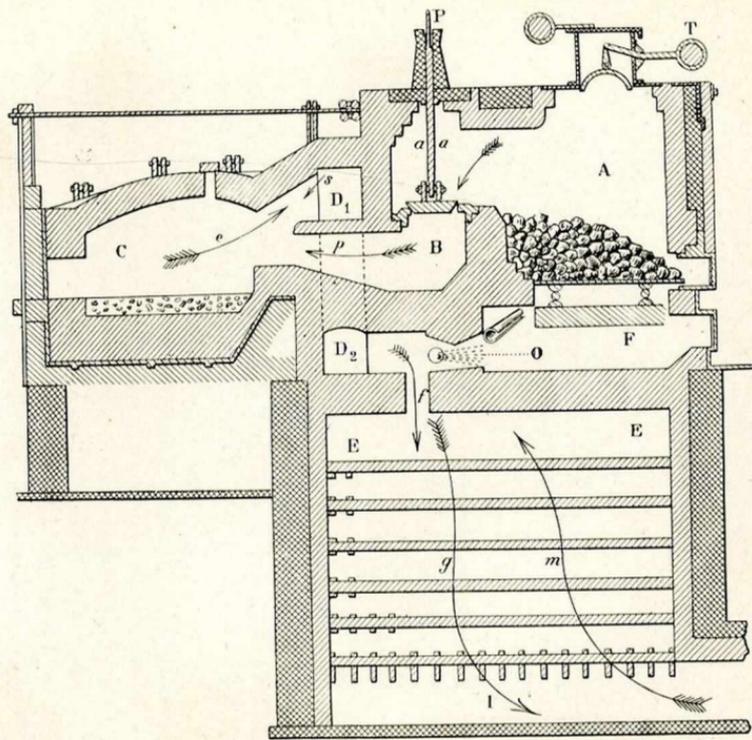
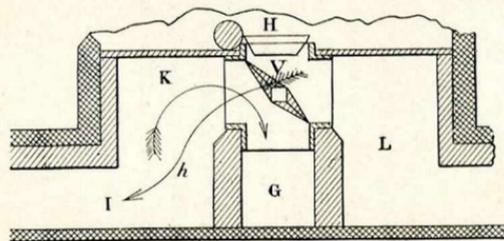
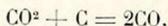


FIG. 2. — Four Siemens nouvelle disposition à régénération du carbone des fumées (système Biedermann et Harvey). — Croquis schématique.

bonique réagissant sur le carbone au rouge d'après les réactions connues :



2) Nous verrons, par la suite, que la production industrielle du gaz à l'eau pur dans des appareils simples n'est pas possible et que la régénération du carbone des fumées suivant l'idée de MM. Biedermann et Harvey est presque toujours inutile et souvent nuisible; mais des fours ont été construits et fonctionnent avec des gazogènes basés sur ces principes et nous devons les signaler.

3) D'ailleurs, si le gaz à l'eau n'est pas pratique, le gaz mixte, mélange de gaz Siemens et de gaz à l'eau, est très employé et a, dans certains systèmes de récupération, des avantages très réels.

On obtient le gaz mixte, soit en insufflant de la vapeur sous la grille du gazogène muni d'un cendrier fermé, soit simplement en noyant d'eau le cendrier. La chute des escarbilles et la réverbération du gazogène suffisent, dans ce cas, à provoquer une vaporisation abondante enrichissant le gaz jusqu'à une teneur de 12% d'hydrogène. Les gazogènes à gaz mixte de tous systèmes sont les plus employés de nos jours.

Un dernier progrès à signaler dans la construction des gazogènes est l'amélioration du tirage.

Lorsqu'on injecte la vapeur d'eau par un Koerting, cet appareil peut évidemment servir d'organe de tirage et le siphon Siemens peut disparaître. Mais on est arrivé à se passer de ce siphon, organe inutile qui refroidit le gaz et l'appauvrit, même dans les gazogènes à tirage naturel; il suffit de placer le gazogène en contre-bas du four, de façon que la grille soit à une hauteur au-dessous des lunettes, telle que la colonne de gaz chaud montante forme cheminée. La suppression du siphon ainsi obtenue a été un progrès sensible dans les fours de verrerie où, par suite de la constante ouverture des portes, la cheminée est sans aucune action sur les gazogènes.

Par suite des divers progrès que nous venons de signaler, nous aurons dans notre théorie générale à examiner et discuter trois cas: le gaz Siemens, le gaz à l'eau, le gaz d'acide carbonique.

2° ORGANES DE RÉCUPÉRATION. — La récupération de la chaleur est la question qui a le moins progressé depuis l'origine.

Deux systèmes sont toujours en présence : la régénération Siemens avec inversion dans laquelle on accumule la chaleur restant dans les fumées en les faisant passer à travers les empilages réfractaires qui la restitueront au gaz et à l'air froid circulant en sens inverse après l'inversion ; la récupération sans inversion par transmission de la chaleur à travers la paroi d'une conduite en terre réfractaire où l'air froid circule en sens inverse de fumées qui l'enveloppent en passant dans une conduite parallèle.

Ce dernier système de récupération a tenté beaucoup d'industriels que les difficultés et dangers de l'inversion effrayaient, mais il est de moins en moins appliqué et il n'est pas avantageux, dans le cas de fours à température élevée, en raison de la faible conductibilité des parois réfractaires ; il pourra le devenir cependant le jour où l'application des fours à gaz à des opérations industrielles à basse température (1 000°), comporterait des chambres de récupération ne dépassant pas 700° et, permettrait l'emploi de tuyaux de fonte, comme dans les vieux appareils à chauffer le vent.

De nos jours, le régénérateur Siemens est presque seul usité. Il n'a pas subi de modification de principe depuis l'origine, mais les applications multipliées qu'il a reçues en ont fait modifier les dimensions suivant les besoins : c'est ainsi que, fréquemment, la chambre à gaz est réduite de moitié ; il arrive même qu'on la supprime complètement, comme dans les fours de la Compagnie Parisienne du Gaz.

Enfin, on s'est préoccupé de protéger les générateurs contre le refroidissement en les accolant et leur donnant une forme plus voisine de la forme cubique (nouveau four Siemens, fig. 2).

Au point de vue spécial de l'étude théorique qui nous occupe, la méthode de récupération importe moins, d'ailleurs, que la façon dont on l'applique et, à cet égard, on peut le faire de quatre manières correspondant aux combinaisons que comportent les trois courants gazeux se rendant au four, précédemment définis.

Nous aurons donc à examiner :

// Simple récupération par l'air secondaire seul ;

- 2) Double récupération par l'air secondaire et le gaz;
- 3) Double récupération par l'air secondaire et primaire (air total);
- 4) Triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz.

3° FOUR PROPREMENT DIT OU LABORATOIRE. — La forme des fours à réverbère chauffés au gaz a subi deux importantes modifications, l'une portant sur la hauteur de la voûte qui, dans les nouveaux *fours à radiation*, atteint jusqu'à 2^m 50 au-dessus de la sole, l'autre sur la disposition des brûleurs dans le four *en fer à cheval*.

a) La *radiation* préconisée par Frederick Siemens a donné d'excellents résultats dans les fours de verrerie où la température est beaucoup moindre que celle des fours à acier et où il importe de tenir la flamme loin de la surface du verre fondu; mais l'inventeur a eu le tort de vouloir faire de sa découverte une théorie générale s'appliquant indistinctement à tous les fours, sans tenir compte de la nature de la substance à chauffer: les fours à voûte élevée n'ont donné que de médiocres résultats en métallurgie où l'on revient aux anciennes formes (1).

b) La forme *en fer à cheval* est celle que figure le dessin du nouveau four Siemens (fig. 2). La flamme, au lieu de traverser le four de part en part suivant sa largeur, y entre par le fond parallèlement à son plan de symétrie, puis se retourne pour s'échapper par une lunette située à côté de la lunette d'admission. Le four est ainsi dégagé sur trois de ses côtés ce qui, dans certains cas, est un sérieux avantage.

Ce système a été appliqué avec succès dans certains fours de verrerie; on peut se demander cependant s'il n'est pas d'une conduite plus difficile, exposant au refroidissement les parties extrêmes du four. Il se répandra sans doute si le nouveau four Siemens tient les promesses de ses auteurs, car il se prête très bien à son application, mais, dans le cas général des fours Siemens à double récupération, nous croyons préférable de s'en tenir au dispositif des lunettes opposées.

Telles sont les principales transformations qu'ont subies le four Siemens et la question du chauffage au gaz depuis son origine.

(1) Nous reviendrons sur cette question que nous avons étudiée et présentée à la Société d'Encouragement (Bulletin de mars 1896).

Au point de vue de la théorie générale, qui fera l'objet du prochain chapitre, nous retiendrons de cet exposé que les fours à gaz comportent quatre modes de récupération, et que ces quatre modes peuvent s'appliquer à trois sortes de combustibles : oxyde de carbone, gaz à l'eau, oxyde de carbone régénéré, ou plutôt gaz Siemens, gaz mixte, gaz de fumées. Il y aura donc douze cas à examiner, qui tous, nous le verrons, ont été partiellement appliqués à l'industrie.

Si nous nous plaçons à un point de vue purement descriptif, nous ne pouvons mieux faire pour résumer le progrès franchi depuis trente ans, ou du moins, les modifications apportées au premier four Siemens, que de signaler comme type le nouveau four Siemens (fig. 2) qui les réunit presque toutes.

Nous n'avons pas la pensée de dire que ce four soit actuellement le meilleur four à gaz : encore moins voulons-nous défendre la prétendue régénération du carbone dont la théorie nous donnera l'exacte valeur. Nous ne présentons ici, jusqu'à plus ample discussion, le four inventé par MM. Biedermann et Harvey (1) que comme un four à gaz mixte, à gazogène soufflé par injection de vapeur, à récupération double portant sur l'air primaire et l'air secondaire (air total si la grille le permettait), mais avec une seule paire de chambres de récupération, sans siphon, avec gazogènes accolés au four, à laboratoire en fer à cheval. Il est facile de voir, à cette énumération, que ce nouveau four réunit bien les perfectionnements que nous avons signalés et qui, appliqués individuellement, ont donné de bons résultats. C'est en un mot, le terme extrême actuel le plus complet, bien que pas toujours le plus parfait, d'une progression dont le four Siemens primitif est le point de départ, et dont les innombrables fours industriels occupent les échelons.

(1) Nous désignerons par la suite sous le nom de *Four Siemens nouvelle disposition*, nom sous lequel il est actuellement présenté par Frederick Siemens, ce nouveau four, plus connu en France sous le nom de four Biedermann et Harvey.



CHAPITRE III

OBJET DE LA THÉORIE DE LA RÉCUPÉRATION.

ÉQUATION FONDAMENTALE D'UTILISATION DE LA CHALEUR.

DONNÉES, HYPOTHÈSES. PRINCIPES GÉNÉRAUX.

§ 1. Exposé du problème. — Influence de la température sur l'utilisation de la chaleur dans un four. — L'étude du progrès accompli dans le chauffage industriel, qui faisait l'objet du chapitre précédent, nous a conduit à une classification à double entrée comportant onze systèmes de fours à gaz possibles : fours à *simple*, *double* ou *triple* récupération (les seconds se partageant eux-mêmes en deux catégories), avec emploi de *gaz à l'air*, de *gaz à l'eau*, ou de *gaz d'acide carbonique régénéré*.

Il convient encore d'ajouter les *foyers à chauffage direct*, ces anciens fours à combustible solide, qui, s'ils tendent à disparaître dans les industries à températures élevées, sont très usités pour les opérations à température moyenne, et presque seuls employés, dans la petite industrie, et pour les basses températures (chaudières à vapeur) : c'est un douzième cas à examiner.

Si complexe que puisse paraître cette classification s'appliquant à des appareils qui, sauf les foyers à chauffage direct, sont indistinctement appelés *fours à gaz* et sont même presque tous des *fours Siemens*. elle n'est cependant que l'expression presque exacte de la réalité industrielle qui nous montrera au moins dix cas différents se rattachant à nos catégories.

C'est ce qui justifie la nécessité d'une théorie générale : Le but de cette théorie, et le problème que nous voulons résoudre, est d'établir la valeur relative de ces douze fours.

La multiplicité des solutions essayées et restées en usage, pour résoudre un problème unique en apparence, est en partie imputable à la

difficulté actuelle d'apprécier ces valeurs relatives des divers systèmes : elle tient encore à la dépense élevée de construction des fours à récupération qui, jointe aux difficultés de leur mise en train, fait toujours hésiter à substituer à de vieux fours à gaz en bonne marche, un four perfectionné, plus économique, et permet ainsi aux premiers de subsister à côté des nouveaux. Elle s'explique surtout par un motif plus rationnel : la complexité d'un problème qui comporte des solutions différentes, suivant la nature des opérations à effectuer, leur durée, leur température, les conditions de tirage, la nature du combustible, le prix de revient, etc.

La plupart de ces données variables exigent une appréciation de chaque cas particulier, qui constitue tout l'art de l'Ingénieur, appréciation pour laquelle la théorie que nous présentons pourra servir de guide, mais qu'elle ne prétend pas dicter immédiatement. Nous ne pouvons donc les examiner toutes ici (1). Mais il en est une plus importante que toutes les autres, et inséparable d'une théorie de la récupération : c'est la température de régime du four.

La *température de régime* d'un four est celle qui convient le mieux à l'opération qu'on se propose d'y effectuer.

Dans une théorie générale, cette température est arbitraire car un même système peut être usité dans des industries différentes, et on peut même conduire un four à des températures différentes : c'est donc une donnée à choisir.

Pratiquement la température de régime est imposée par les conditions de bonne marche; elle doit rester invariable dans un four continu, et si elle est sujette à variations dans le cas de travail discontinu (fours à puddler), elle doit être réglée uniquement en vue de l'opération à effectuer; c'est, dans tous les cas, une donnée, et la première à déterminer dans une étude expérimentale de four.

La température de régime a, sur l'utilisation de la chaleur, une influence considérable.

(1) Toutefois, pour donner plus d'intérêt à une théorie un peu longue, mais rendue nécessaire par la multiplicité des cas industriels, nous ne manquerons pas, lorsque la discussion nous y conduira, de tirer des résultats de nos calculs les conclusions pratiques qui s'en déduisent, et d'élucider ainsi un grand nombre de cas particuliers usuels.

Il est évident, en effet, que les fumées s'échappant d'un four à 1 500°, par exemple, emportent du laboratoire, pour un même poids de combustible brûlé, plus de calories que celles qui sortent à 300° d'un foyer de chaudière à vapeur. La récupération, appliquée dans l'un et l'autre cas, retrouve sans doute ces calories, c'est son rôle essentiel; mais elle ne les utilise jamais qu'en partie, laissant s'échapper à la cheminée une autre partie, dont la valeur absolue, pour un poids donné de combustible, sera d'autant plus grande que le chiffre de ces calories sera plus considérable, c'est-à-dire que la température du four sera plus élevée. Il s'ensuit donc que la chaleur perdue et, par différence, la chaleur utilisée d'un four sont fonctions de la température, et que l'étude de la récupération ne peut en être séparée. Il est même évident, en dehors de tout calcul, que la loi de variation du rendement est, toutes choses égales et pour un four donné, fonction continue de la température, en sorte qu'il serait possible, pour chacun des douze systèmes, de tracer des courbes d'utilisation de la chaleur dont la comparaison permettrait de juger de la valeur relative de chacun d'eux à toute température.

Il nous a paru préférable, pour éviter de compliquer la discussion, d'étudier le problème à deux températures fixes, choisies parmi les plus usitées de l'industrie, soit : 1 000°, température voisine de celle des fours à coke, que l'on peut considérer comme celle des industries à feu moyen, et 1 560°, température inférieure à celle des fours à acier, mais supérieure à celles des fours de verrerie et de cuisson de la porcelaine dure, et qui peut compter comme le grand feu d'industrie.

Grâce à l'écart entre ces deux points choisis pour le calcul, il sera toujours facile d'interpoler ou d'extrapoler, de façon à se rendre compte de l'effet de la récupération et du rendement, à des températures autres.

Ainsi limitée, l'étude théorique que nous nous proposons d'exposer a un triple but :

1° Étudier l'utilisation de la chaleur ou le rendement, dans les douze systèmes de fours existants, de façon à en dresser le classement, aux températures de 1 000° et 1 500° ;

2° Montrer l'influence de la température sur le rendement, par la comparaison des tableaux de classement aux deux températures arbitrairement choisies ;

3° Indiquer la méthode de calcul qui permet, pour une température donnée quelconque, de dresser le tableau des rendements comparés des fours et de discerner, dans chaque cas particulier, celui qui convient le mieux au but qu'on se propose.

§ 2. Définition des expressions : *chaleur utilisée*, *chaleur perdue*, *rendement*. Équation de l'utilisation de la chaleur. — Quelques remarques sont encore nécessaires pour préciser exactement le sens des mots *rendement*, *chaleur utilisée*, *chaleur perdue*, et justifier ces définitions, de même que nous avons été obligé de définir les divers organes des fours et de justifier les limites précises que nous leur assignions.

Nous entendons par *chaleur utilisée* dans un four, toute celle qui est consommée dans le laboratoire de ce four, soit qu'elle serve à la réaction industrielle à effectuer, soit qu'elle se consume en rayonnement extérieur souvent nécessaire à la conservation des maçonneries, ou même qu'elle soit complètement inutilisée, perdue par conductibilité ou toute autre cause. Ainsi définie, la chaleur utilisée est exactement la différence de la chaleur totale (sensible ou latente apportée au laboratoire par le gaz et l'air, à la chaleur totale emportée par les fumées.

Nous entendons par *chaleur perdue* toute celle qui se dépense en dehors du laboratoire, soit dégagée avec les fumées dans l'atmosphère, soit perdue par le rayonnement de tous les organes autres que le laboratoire (gazogènes, chambres de récupération), ou consommée dans la vaporisation de l'eau du cendrier, employée au tirage, etc.

Dans ces conditions, il est évident que la somme de la chaleur perdue et de la chaleur utilisée représente la chaleur totale absorbée par le four, c'est-à-dire celle qui se dégage du combustible, ou son pouvoir calorifique.

Nos définitions se résument donc par l'équation :

$$Q = P + U.$$

Q, pouvoir calorifique du combustible ;

U, chaleur utilisée, c'est-à-dire consommée dans le laboratoire ;

P, chaleur perdue, c'est-à-dire emportée à la cheminée ou perdue dans les organes autres que le laboratoire.

Nous entendons enfin par le mot *rendement de récupération*, ou, par abréviation, *rendement*, le rapport $\frac{U}{Q}$ de la chaleur dépensée dans le laboratoire au pouvoir calorifique du combustible brûlé.

Ces définitions donnent aux mots *chaleur perdue* et *chaleur utilisée* un sens plus étendu qu'on ne le leur donne habituellement, car le plus souvent, on ne s'occupe que de la perte de chaleur par les fumées, et on entend par chaleur utilisée celle qui est nécessaire à la réaction chimique où à l'opération physique à effectuer : fusion du verre, réchauffage d'un lingot. Elles se justifient par le but même de notre étude qui est la *récupération*. La récupération ayant pour but de recueillir toute la chaleur non utilisée dans le laboratoire, les organes de récupération sont responsables de cette chaleur qui leur est entièrement cédée, et doivent la restituer aussi complètement que possible ; s'ils n'y réussissent qu'imparfaitement, peu importe que les pertes soient imputables au dégagement des fumées dans l'atmosphère ou au rayonnement des chambres, des carneaux des gazogènes même ; ces organes sont tous des agents de récupération (1). La perte totale seule intéresse le rendement du four.

Quant à la chaleur réellement utilisée, entendue dans le sens restreint qui n'est pas le nôtre, répondant à ce que Ledebur appelle l'*effet utile* d'un four, elle n'est pas, dans une théorie de chauffage, d'un intérêt aussi grand qu'il peut sembler au premier abord. Dans la plupart des cas, en effet, les masses à échauffer : cornues, creusets, parois, ont une chaleur d'échauffement très supérieure à celles d'échauffement et de réaction des corps en œuvre ; souvent la chaleur de réaction est une fraction très faible de la chaleur consommée dans le la-

(1) Cette remarque a un intérêt pratique : il arrive souvent, en effet, qu'on juge de la perfection d'un système de récupération par la température à la cheminée. Cette donnée n'a aucune signification, car les fumées peuvent avoir perdu une grande quantité de chaleur par rayonnement ou mélange d'air froid, sans aucun profit.

laboratoire; il arrive même que telle opération qui ne peut s'effectuer qu'à haute température, et exige un four, dégage des calories, de sorte que la chaleur réellement utilisée est identiquement nulle, si parfait que soit le four. Le calcul du rendement absolu ou de l'*effet utile*, dans ces conditions, serait sans intérêt.

D'ailleurs, la récupération que nous étudions ici ne se préoccupe pas de la façon dont les calories sont dépensées et réparties dans le laboratoire; elle n'a d'action que sur les calories qui s'en échappent et qu'elle doit y ramener. L'utilisation des calories dans le laboratoire est une question différente, qui sera traitée séparément.

Pour justifier mieux encore nos définitions, remarquons que, dans l'étude du rendement comparé des différents systèmes de fours, nous avons le droit de supposer que dans tous les cas le laboratoire est invariable; comme la température est elle-même invariable puisque c'est une température de régime qui ne dépend que de l'opération à effectuer, le rapport entre la *chaleur utilisée* et l'*effet utile* est invariable et la connaissance de l'une de ces grandeurs permet d'apprécier l'autre.

Le calcul du rendement de récupération $\frac{U}{Q}$ donnera donc la mesure de la valeur relative des fours, au point de vue de l'utilisation de la chaleur et de leur effet utile.

Toutes les définitions précédentes s'appliquent évidemment aux études empiriques des fours comme aux calculs théoriques. Dans le cas des recherches expérimentales, la notion de la chaleur utilisée a une grande importance, car elle peut être évaluée par des mesures de température et des analyses de gaz, tandis qu'en général la chaleur employée à l'opération industrielle et l'effet utile ne peuvent que se calculer à l'aide des chaleurs spécifiques ou de réaction des corps en présence.

§ 3. Principes fondamentaux dominant l'étude de l'utilisation de la chaleur dans les fours. — L'étude de l'utilisation de la chaleur dans les fours est soumise à quelques principes fondamentaux, axiomes tellement évidents qu'il serait superflu de les rappeler si quelques-unes

de leurs conséquences les plus immédiates n'avaient été souvent méconnues ou oubliés. Ce n'est, d'ailleurs, qu'en ne perdant jamais de vue ces vérités évidentes, comparables aux principes de la thermo-dynamique, qu'on évitera les erreurs de calculs ou de raisonnements si faciles dans les questions d'échanges de chaleur sensible et latente et de récupération, où la chaleur disponible se transforme plusieurs fois.

Nous ne craignons donc pas de les exposer, sous une forme peut-être un peu trop doctrinale, étant donnée leur évidence absolue :

A. — PRINCIPES RELATIFS A LA COMBUSTION ET A LA CHALEUR TOTALE DISPONIBLE. — 1° *Dans un four à gaz, la source de chaleur est le combustible brûlé sur la grille.* — Toutes les réactions de combustion, quelques modifications qu'y apportent la récupération pour retenir les calories, ou l'emploi de vapeur d'eau et d'acide carbonique pour enrichir le gaz, se réduisent toujours à une résultante unique : un dégagement de chaleur égal à ce que produit le combustible se combinant avec de l'oxygène froid emprunté à l'air atmosphérique (1).

Cette chaleur de combustion, qu'il est facile de connaître par les tableaux des pouvoirs calorifiques des corps simples, ou expérimentalement pour les houilles, est donc le terme de comparaison invariable auquel il faut rapporter tous les échanges, toutes les chaleurs perdues, récupérées ou utilisées dans un four;

2° *Les gaz brûlés ou oxydés (acide carbonique ou vapeur d'eau) ne peuvent jamais fournir de calories.* — Si, par un artifice quelconque, on les décompose en un point du four, de façon à obtenir de l'hydrogène (ou de l'oxyde de carbone) et de l'oxygène, cette réaction absorbe de la chaleur et refroidit les gaz et le four en ce point; la combinaison ultérieure de cet hydrogène (ou oxyde de carbone) n'a pour effet que de restituer exactement en un autre point une quantité de

(1) Ceci s'entend, évidemment, d'un appareil isolé, autonome. Si la vapeur d'eau d'un gazogène est volatilisée par une chaudière indépendante, ou si l'air de combustion est chauffé par un appareil spécial, il y aura de ce fait un nouvel apport de calories. Par contre, si l'eau est employée liquide dans un gazogène et qu'on la renvoie dans l'atmosphère à l'état de vapeur, il y a, de ce fait, dépense de calories pour la volatilisation, à retrancher de la chaleur disponible.

chaleur égale, sans que la chaleur totale dégagée par le combustible, et disponible, soit en rien modifiée. Il n'y a, dans ce cas, que transport de chaleur d'un point à un autre, sans aucun gain de calories;

3^e *Le seul gaz servant à la combustion dans les fours est l'air atmosphérique.* — Si l'eau ou l'acide carbonique employés dans un four se décomposent en un point de ce four et mettent en liberté de l'oxygène, ils se reconstituent en un autre point sans céder aucun atome d'oxygène au charbon, sans concourir à la combustion même partielle.

La quantité totale d'air nécessaire à la combustion et s'échappant par la cheminée sous forme d'eau et d'acide carbonique mêlé d'azote, est toujours la même pour un poids donné de charbon brûlé.

Deux conséquences de ces principes ont été méconnues dans les raisonnements de quelques inventeurs. La première est que le rapport, dans les fumées, de l'azote à l'acide carbonique est toujours le même pour un combustible donné, quel que soit le mode de gazéification, gaz à l'eau, gaz Siemens ou gaz d'acide carbonique régénéré. Or, on a souvent cru diminuer la proportion d'azote circulant dans un four à gaz, par l'emploi de gaz à l'eau, qui contient moins d'azote que le gaz à l'air; ce raisonnement est inexact (1).

La seconde est que la masse de fumées envoyées à la cheminée ne peut, par aucun moyen, être diminuée, pour un poids donné de combustible brûlé. Dans le nouveau four Siemens, en envoyant sous le gazogène une partie des fumées, on peut avoir l'illusion de soustraire effectivement à la cheminée ces produits brûlés et les calories qu'ils emportent: ce raisonnement, qui a pu tromper sur la valeur du nouveau four Siemens, est également inexact (2).

(1) Le gaz à l'eau théorique ($\text{CO} + \text{H}^2$) ne contient pas, il est vrai, d'azote comme le gaz Siemens $\text{CO} + 2\text{Az}^2$, mais la combustion de ces deux gaz donne, d'un côté: $\text{CO}^2 + 4\text{Az}^2 + \text{H}^2\text{O}$; de l'autre: $\text{CO}^2 + 4\text{Az}^2$, et les fumées ont, dans l'un et l'autre cas, même rapport d'azote à l'acide carbonique. La quantité d'azote traversant le laboratoire est la même dans les deux cas.

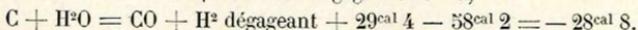
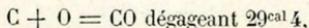
(2) Nous croyons utile de réfuter cette erreur sur le système de MM. Biedermann et Harvey, en expliquant la circulation dans le four à retour de fumées.

A la sortie du laboratoire, les gaz brûlés se partagent effectivement en deux: supposons ces deux parts égales, ce qui est le cas le plus favorable au système,

B. — RÔLE DE LA VAPEUR D'EAU DANS LES FOURS A GAZ; AUTRES AUXILIAIRES DE LA COMBUSTION. — Puisque l'emploi de la vapeur d'eau dans les fours ne modifie ni la chaleur totale disponible, ni la quantité d'air nécessaire à la combustion ni, par conséquent, la proportion d'azote circulant dans le four, le rôle de cet auxiliaire, dont l'utilité est incontestable et sanctionnée par une pratique générale, demande à être précisé.

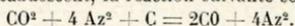
Beaucoup moins simple que celui d'enrichir le gaz en calorifique latent, qu'on lui attribue d'ordinaire, le rôle de la vapeur d'eau est étroitement lié à la récupération.

Dans un gazogène à l'eau les réactions qui fournissent le gaz sont les suivantes :



La première dégage de la chaleur et tend à porter le gazogène à une température d'environ 1 300°; la seconde absorbe de la chaleur et tendrait à éteindre le gazogène si on ne réglait l'admission de vapeur de façon que l'abaissement soit limité à 600° température inférieure de la combustion pour oxyde de carbone.

et permet la gazéification complète du combustible par les fumées sans emploi d'air primaire; une masse de fumées exprimée par la formule $CO^2 + 4Az^2$ se rend à la cheminée, tandis qu'une masse égale se rend au gazogène. Au contact du charbon incandescent, la réaction suivante se produit :



Pour brûler ce gaz qui, remarquons-le, n'est ni plus ni moins chargé d'azote que le gaz Siemens ordinaire ($CO + 2Az^2$), une masse d'air ($O^2 + 4Az^2$) sera nécessaire. Après combustion, la composition et la masse de fumées pour une molécule de charbon seront exprimées par la formule



soit exactement le double de ce qui est envoyé soit à la cheminée soit au gazogène, et le double de ce qui est nécessaire à la combustion du carbone à l'air.

La masse de fumées traversant le laboratoire d'un four à retour de fumées est donc double de ce qu'elle est dans un four ordinaire, et l'on peut figurer le schéma de la circulation des gaz comme composé de deux courants, l'un se comportant comme dans un four Siemens ordinaire pour aller du gazogène à la cheminée, l'autre parcourant indéfiniment un circuit fermé du laboratoire au gazogène et du gazogène au laboratoire, sans modification du bilan calorifique, lorsque le régime est établi, et sans avantage bien évident.

1) Le premier effet de la vapeur d'eau est donc *l'abaissement de la température du gaz* sortant du gazogène.

2) A cet abaissement de la chaleur sensible correspond un accroissement de la chaleur latente ou, si l'on veut, un *enrichissement du gaz en calories*, second effet de l'emploi de l'eau.

Ces résultats ont l'un et l'autre leur importance, mais les avantages qui en découlent sont très variables suivant les cas :

Lorsque le gaz est employé dans le laboratoire à sa sortie du gazogène, l'enrichissement en calorique latent est purement fictif car, dans le laboratoire, la chaleur sensible et la chaleur latente sont équivalentes. Au contraire, lorsque le gaz n'est présenté à la combustion qu'après avoir subi une altération de température, soit refroidissement dans les fours employant le gaz pauvre froid, soit réchauffement dans le cas de récupération par le gaz, l'enrichissement devient très utile. Dans les fours à double récupération, les deux effets se complètent ou plutôt se confondent : l'abaissement de température permet à la récupération de s'exercer plus parfaitement par l'intermédiaire du gaz enrichi, et, grâce à un meilleur emploi des chaleurs perdues, la vapeur d'eau réalise un réel gain de calories et peut améliorer le rendement.

3) Un dernier effet de l'eau, plus sensible encore, est la *modification* qu'elle apporte *aux proportions d'air primaire et d'air secondaire*.

On sait que, dans un four, la combustion s'opère en deux temps, partie dans le gazogène avec de l'air primaire mêlé de vapeur d'eau, partie dans le four avec l'air secondaire, mais que la quantité d'air total nécessaire est invariable; si donc on diminue l'air primaire, on augmente d'autant l'air secondaire. Or, dans la plupart des fours, l'air primaire échappe complètement à la récupération (la question de conservation de la grille dans l'air chaud n'étant pas encore résolue), tandis que l'air secondaire y participe toujours. Diminuer l'air primaire pour augmenter l'air secondaire, réalise donc toujours un gain sur les chaleurs perdues, et dans certain cas, améliorera beaucoup le rendement.

La vapeur d'eau, en raison de ces trois effets, agit donc uniquement dans les fours à gaz comme *auxiliaire de la récupération*. Sans

doute, dans certains cas, elle aura une action sur la température du four, mais de la même façon que la récupération contribue elle-même à élever le point de combustion. Son rôle comme enrichissant le gaz en chaleur latente, n'est appréciable que dans le cas d'emploi du gaz froid, qui ne rentre pas dans notre étude (1).

D'autres gaz que la vapeur d'eau peuvent servir d'auxiliaires de la gazéification. Ainsi, l'acide carbonique se comporte exactement comme la vapeur d'eau : sa décomposition ($C + CO_2 = CO + CO$) donnant $+ 29^{\text{cal}} 4 - 68^{\text{cal}} 2 = - 38^{\text{cal}} 8$, et absorbant de la chaleur, abaisse la température du gaz ; son emploi diminue l'air primaire et augmente l'air secondaire.

Si on l'emprunte aux fumées, comme l'ont proposé M. Gobbe et MM. Biedermann et Harvey, nous avons vu qu'il a l'inconvénient de doubler la circulation des gaz dans le laboratoire du four. Si on l'empruntait à une autre source, comme l'ont proposé quelques auteurs, il se comporterait exactement comme la vapeur d'eau, avec la seule différence que ce gaz n'aurait pas, comme l'eau, une chaleur latente de vaporisation diminuant son effet utile : il serait théoriquement plus avantageux, pourvu que sa production, à l'état gazeux, soit obtenue sans frais.

Il faut encore ranger parmi les auxiliaires de la récupération, dans un four à charbon, les huiles lourdes, goudrons, brais, et même les hydrocarbures contenus dans les houilles, et y trouver, en partie, l'explication des qualités spéciales de certains charbons pour gazogènes.

Jetées dans le gazogène, ces substances se volatilisent sous l'action de la chaleur sensible du gazogène et s'échauffent à ses dépens ; elles refroidissent donc le gaz et le préparent à une bonne récupération. Leur gazéification ne demande d'ailleurs aucun air primaire, en sorte que tout l'air nécessaire à leur combustion est secondaire.

On peut tirer de ces remarques la raison d'être de l'addition de brai pratiquée dans certaines usines à acier, pour accroître, en même temps que le rendement et par une meilleure récupération, la tem-

(1) L'emploi du gaz de gazogène ou gaz pauvre pour les moteurs à explosion est le cas où l'enrichissement est le plus utile : aussi les gazogènes Buire-Lencauchez à injection de vapeur y sont-ils très usités. Ce cas est étranger à notre étude.

pérature du four. On y voit encore l'avantage pouvant résulter, dans les fours Siemens, de l'emploi d'hydrocarbures et, en particulier, du gaz naturel, comme à Pittsburg; ce n'est que dans ce cas que la récupération peut théoriquement être complète et la température peut, par là, y être très facilement élevée.

C. — PRINCIPES RELATIFS A LA RÉCUPÉRATION. — L'utilisation de la chaleur emportée par les fumées sortant du four à une température élevée nécessite l'intermédiaire de corps solides, afin d'éviter le mélange des gaz qui doivent réagir les uns sur les autres.

Ces corps solides sont, tantôt des cloisons réfractaires ou métalliques se laissant traverser par les calories des produits brûlés qui échauffent les gaz plus froids (air ou gaz), tantôt des masses de briques qui emmagasinent, pendant un temps, de la chaleur, pour la restituer ensuite après l'inversion. Dans l'un et l'autre cas, ce ne sont que des intermédiaires favorisant l'action réciproque des gaz, en sorte que, dans une étude théorique, on peut considérer que les masses gazeuses interviennent seules, l'une perdant des calories, l'autre les gagnant.

Dans ces conditions, deux lois évidentes président à cet échange; elles dérivent l'une et l'autre du fait qu'il ne peut y avoir cession de chaleur que d'un corps ou gaz chaud à un corps ou gaz plus froid que lui :

1° 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'air extérieur 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;

2° Pour que l'échange de chaleur soit parfait entre deux masses gazeuses, de façon que, après récupération méthodique, la tempéra-

ture 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 température 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 total de l'air 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.

§ 4. — Hypothèses servant de base à la théorie mathématique de la combustion dans les fours à gaz à récupération. — Choix de la méthode de calcul du rendement. — Quelques hypothèses sont nécessaires pour éliminer certaines variables de notre équation d'utilisation de la chaleur, et permettra d'aborder la théorie de la récupération.

1° Nous admettons, 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* (1), indique bien des compositions de gaz où la teneur en acide carbonique est inférieure à 1 %, 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 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 solide 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 ;

(1) Voir le *Génie Civil*, t. XXIX, n° 4, p. 59.

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 1500°, par exemple, s'il y a double récupération, l'air et le gaz entrent dans le four à 1500° ; s'il y a simple récupération, l'air entre à 1500°, 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 1500° du laboratoire, et entrent dans les récupérateurs à cette même température.

Remarquons que toutes les 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'imposons 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.

MÉTHODE DE CALCUL DU RENDEMENT DES FOURS. — Si nous nous reportons maintenant à l'équation fondamentale des fours :

$$Q = P + U,$$

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

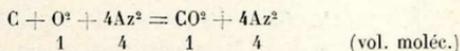
De ces deux méthodes, nous avons choisi celle du calcul direct de P, pensant que la connaissance de la chaleur inévitablement perdue, est le point essentiel dans une étude de la récupération. D'ailleurs, ce calcul de P permet aisément de déterminer la température des gaz sortant des chambres et de rendre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

Le calcul direct de U a aussi son intérêt; mais il s'applique plutôt à l'étude des phénomènes spéciaux du laboratoire, et comme il nécessite le calcul de la température de combustion dans un four, c'est à propos de l'obtention des températures élevées dans les fours que nous aurons à y revenir.

CHAPITRE IV

FOURS A CHAUFFAGE DIRECT SANS GAZOGÈNES. CHAUDIÈRES A VAPEUR.

§ 1. Caractères des fours à chauffage direct et principales applications industrielles. — La combustion dans les fours à chauffage direct ou à grille simple se fait en un temps; le charbon est transformé immédiatement en acide carbonique par l'air, et les réactions de combustion se réduisent à une seule :



dégageant $97^{\text{cal}}6$ pour une molécule (12 grammes) de charbon brûlé.

Il n'y a pas, dans ce cas, à se préoccuper de la vapeur d'eau : on rencontre bien des générateurs à grille fermée dans lesquels le tirage est activé par un injecteur de vapeur; quelquefois aussi, dans les fours à température élevée, les fondeurs ont l'habitude de mouiller le charbon ou de jeter de l'eau sur la grille, prétendant ainsi mieux conduire leur feu; mais, quelle que soit la raison d'être de cette pratique, l'eau n'est pas décomposée dans un four à chauffage direct et n'intervient pas dans la combustion.

Le corps à chauffer est placé directement sous la flamme de la houille, et souvent en contact avec elle, de façon à en utiliser le mieux possible la chaleur; puis les produits de combustion se rendent à la cheminée, emportant toutes les calories disponibles en deçà de la température de régime du four.

Pour que la combustion se fasse bien, il faut toujours un excès d'air, et comme l'air est généralement admis librement sous la grille, réglable seulement par la façon dont est conduit le feu, l'excès d'air est parfois considérable.

Malgré cela, il est rare que le combustible soit entièrement brûlé;

les fumées noires, à peu près inévitables indiquent qu'une abondante poussière de charbon est soustraite à la combustion.

Ces différentes conditions de marche : perte par les fumées, 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 moufles, 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 Bichéroux en métallurgie, les fours Boëtius et leurs dérivés en verrerie et cristallerie, ne sont encore que des fours à grille sans récupération, 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 réverbère 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 se fait à une température de régime inférieure à celle de la cuisson pour émail.

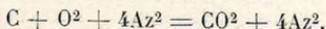
Grâce à ces artifices, le rendement peut être amélioré et devenir parfois très satisfaisant.

Il résulte de cette remarque que la température de régime du laboratoire principal n'a, au point de vue de l'utilisation de la chaleur, aucune signification; les deux données qui, dans les fours à grille, permettent de juger de la valeur d'un appareil, sont la température à la cheminée (1) et la composition des fumées, au moyen desquelles on peut évaluer la chaleur perdue et, par différence, la chaleur utilisée.

Nous nous proposons, dans l'étude des fours à grille qui va suivre, de calculer les pertes de chaleur à toutes températures, et pour des compositions de fumées variant dans les limites que présente l'industrie, le combustible étant supposé du carbone ou du coke.

Cet examen, un peu étranger sans doute à l'étude de la récupération, nous donnera, pour tous les cas de chauffage industriel, une exacte mesure du maximum d'efficacité de cette récupération par les gaz et une première indication sur les résultats que peuvent obtenir les fours à gaz.

§ 2. Calcul de la chaleur perdue par les fumées P à toutes températures, dans le cas théorique de combustion sans excès d'air. — Considérons un poids de coke de 12 grammes donnant, par sa combustion, un volume moléculaire d'acide carbonique et dégageant 97^{cal} 6. L'oxygène de l'air nécessaire à sa combustion, égal aussi à une molécule, est accompagné d'un volume d'azote $\frac{79,2}{20,8}$ que, pour simplifier les calculs, nous supposons toujours quadruple du volume d'oxygène. La réaction de combustion est, nous l'avons vu :



Les fumées se composeront donc de 4 volumes moléculaires d'azote et 1 volume moléculaire d'acide carbonique, et la chaleur emportée à la cheminée se calculera aisément à une température quelconque, d'après les chaleurs d'échauffement et les formules de Mallard et Le Chatelier.

(1) Rappelons ici que la cheminée d'un four commence, dans les fours sans récupération, à la sortie du laboratoire; c'est là que doit être mesurée la température.

Ces calculs sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau du calcul de P dans les fours à chauffage direct à 300°, 1 000°, 1 500°.				
Réaction : $C + O_2 + 4 AZ^2 = CO_2 + 4 AZ^2$.				
Composition des fumées : $CO_2 + 4 AZ^2$.				
Chaleur dégagée : $97^{ca} 6 : Q$	300°	1 000°	1 500°	
Chaleur emportée par les fumées F	par 1 v. m. CO_2 . .	3,1	12,4	21,1
	par 4 v. m. AZ_2 . .	8,4	29,7	46,4
	TOTAL	11,5	42,1	67,5
Rapport à la chaleur disponible $97,6 : P$.	11,8	43 »	69,5	
Différence à 100 ou chaleur utilisée : U.	88.2	56.8	30.5	

Il est facile de compléter les indications de ce tableau par les valeurs extrêmes de P.

A 0°, l'utilisation de la chaleur est évidemment complète; le rendement est de 100 %. Remarquons que ce cas est à peu près celui du chauffage domestique lorsque l'appareil est construit de façon à n'envoyer les fumées à la cheminée qu'à très basse température, comme dans les poêles à combustion lente.

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 2 040°.

A l'aide des cinq points ainsi calculés, nous pouvons tracer la courbe de la perte de chaleur P en fonction de la température. L'équation de cette courbe parabolique (fig. 1), qui se déduit immédiatement des chaleurs d'échauffement, est la suivante :

$$Q \cdot P = 5 \times 6,5 \frac{T - T_0}{1\,000} + [4 \times 0,6 + 3,7] \frac{T^2 - T_0^2}{(1\,000)^2}$$

L'examen de cette courbe donne d'utiles indications sur la récupération :

Au sommet de la courbe, nous retrouvons, à 2 040°, la limite d'emploi des fours à chauffage 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 récupération ou par tout autre dispositif tel que celui des fours Bicheroux.

Et si nous rappelons qu'un excès d'air correspondant à 5 % d'oxygène, soit environ un quart d'air contre trois quarts de produits brûlés, est difficilement évitable dans ces fours à grille, et que cet excès d'air abaisse à 1 650° la température de combustion ; si, d'autre part, nous tenons compte du fait facile à constater sur la courbe précédente qu'il

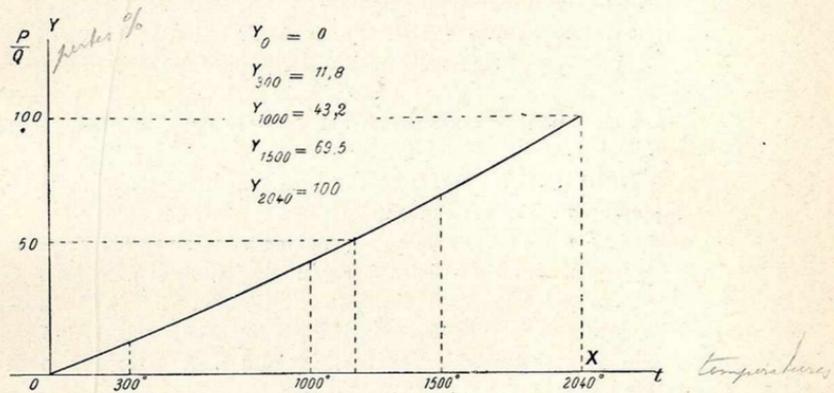


FIG. 1. — Courbe des pertes de chaleur dans les fours à chauffage direct.

faut pour une utilisation de chaleur de 10 % un écart d'environ 150° entre la température de régime et la température de combustion, la conclusion qui s'impose est que 1 500° est le maximum industriellement réalisable dans les fours à grille à air froid ; et encore le rendement y sera-t-il très défectueux.

Les seuls appareils encore en usage dans ces conditions sont les bas foyers et les feux de forge à vent forcé dans lesquels, l'opération se faisant au contact même du combustible, le rayonnement est réduit au minimum et où l'excès de charbon permet toujours d'avoir, dans une certaine zone, la combustion sans excès d'air, correspondant à la température de 2 040°.

Cette température de 1 500° explique comment la récupération s'est

immédiatement imposée dans la métallurgie du fer ; on peut même dire que, sans elle, la fusion de l'acier sur sole n'existerait pas, puisque la température de régime y atteint et dépasse 1 600°.

En verrerie, au contraire, la température de régime est au plus de 1 450°, souvent moindre : les fours à grille sont possibles ; il en existe encore d'assez nombreux exemples. Mais il est bon de constater par la théorie que lorsque les constructeurs de fours à gaz annonçaient à cette industrie une économie de 60 % sur le combustible, cette promesse n'était pas excessive puisque le maximum d'utilisation de la chaleur dans un four fonctionnant à 1 450° dans des conditions parfaites est de 30 %.

Lorsque la température s'abaisse à 1 200° le rendement s'améliore et s'élève à 50 %.

A 1 000° il atteint 60 % 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 Bicheroux, gobeletteries et cristalleries avec les fours Boëtius, industrie céramique avec les moules, 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 ou tentées dans ce domaine des industries à 1 000° : 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 résultat. Dans ce cas (à 500° et au-dessous), la chaudière à vapeur est, en effet, le meilleur agent d'utilisation de chaleur ou de récupération, ainsi que nous l'allons voir.

§ 3. Cas de fours suivis de chaudières à vapeur. Calcul de la chaleur perdue P dans un four à puddler. — Dans la discussion sur les fours à chauffage direct, nous avons laissé de côté les fours à puddler et à réchauffer, bien qu'ils soient très nombreux, et que le chauffage direct y soit, et pour longtemps encore sans doute, la règle à peu près exclusive (1).

C'est qu'en effet, la nécessité d'avoir dans les forges 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 haute pression ni par conséquent à 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 commandée par le puddlage; le foyer de la chaudière constitué pour 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.

Nous donnons ici, à titre d'exemple, le dessin (fig. 2) d'un four à puddler, datant d'une dizaine d'années, avec refroidissement de la sole par courant d'eau, conforme d'ailleurs au modèle courant de ces appareils; il est suivi d'une chaudière horizontale (non figurée sur le dessin) qui donne une vaporisation de 4 kilogr. à 4^h 40 d'eau par kilogramme de charbon brûlé sous la grille. Les fumées à la base de la cheminée sont à 200 ou 250°. Nous n'avons pu avoir d'analyse des fumées et admettons, par analogie avec d'au-

(1) Les fours à puddler à gaz sont peu répandus en métallurgie; seul le four Siemens nouvelle disposition y gagne un peu de terrain grâce à son coût peu élevé, mais il est encore assez discuté et peu répandu; nous connaissons même une mine où il a été abandonnés pour revenir aux vieux fours.

tres fours à grille, que la combustion s'y fait avec excès de 5 % d'oxygène, soit environ $\frac{1}{4}$ d'air contre $\frac{3}{4}$ de produits brûlés, dans les fumées.

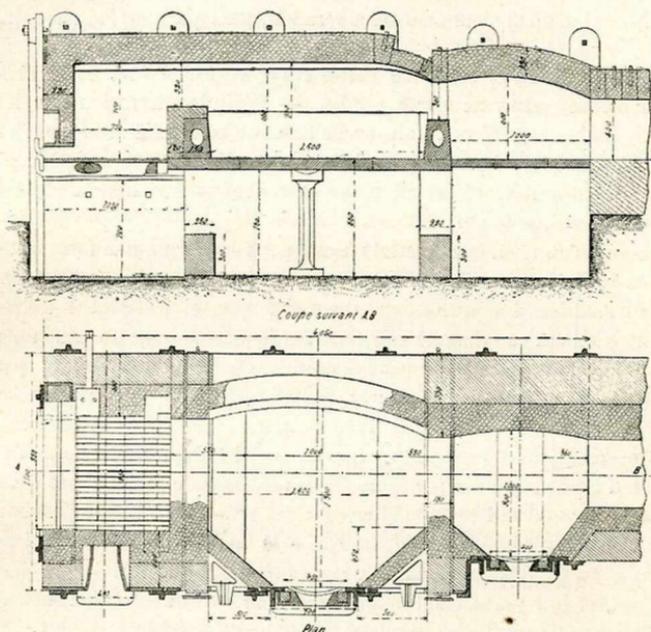
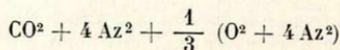


FIG. 2. — Four à puddler des forges d'Eurville.

Admettons dans les fumées 5 % d'oxygène, ce qui correspond à la composition :



et supposons que ces fumées s'échappent à 200°, il est aisé de calculer, en se reportant au tableau des chaleurs d'échauffement, que la perte de chaleur est seulement de 9^{cal} 8 pour un dégagement total de 97^{cal} 6

disponibles. C'est un rendement de 90 %₀, supérieur à ceux de la plupart des systèmes de récupération.

Il n'y a donc pas lieu, dans les forges, de substituer aux fours à puddler actuels des fours à gaz à récupération (1).

§ 4. Chaudières à vapeur. — Calcul de la chaleur P dans le cas de combustion avec grand excès d'air. — Le cas le plus intéressant à étudier est celui des chaudières multitubulaires, et spécialement de celles qui sont destinées aux constructions navales. C'est, en effet, le cas où la bonne utilisation de la chaleur a le plus de prix, c'est aussi celui où le problème est le plus difficile en raison des conditions multiples à remplir (faible volume, rapidité de mise en pression, etc.). Enfin, c'est celui qui a été le plus étudié et contrôlé, et où nous avons pu facilement trouver les données expérimentales servant de bases aux calculs.

Nous donnons, à titre d'exemple, les dessins (fig. 3 et 4), de deux types de chaudières marines : le générateur Belleville et le générateur Niclausse.

L'une et l'autre sont des chaudières multitubulaires, mais la circulation s'y fait suivant des principes différents :

Dans le générateur Belleville (fig. 3), les tubes se commandent les uns les autres, et sont montés *en série*; la chaudière est un véritable serpent ;

Dans la chaudière Niclausse (fig. 4), les tubes sont, au contraire, placés *en dérivation* sur des collecteurs verticaux, et la circulation de l'eau s'y établit d'après un régime variable suivant que ces tubes sont plus ou moins exposés au feu.

Telle est la différence essentielle entre les deux systèmes.

Dans l'une et l'autre chaudières et, en général, dans tous les générateurs à vaporisation intensive, la difficulté à vaincre consiste à obtenir une bonne utilisation de la chaleur, et partant, une basse température dans la boîte à fumée lorsqu'on active la combustion pour pousser la production de vapeur. C'est pour atteindre ce but que M. Belleville a récemment ajouté à sa chaudière un nouvel organe, l'*économiseur*, destiné à récupérer une partie de la chaleur perdue en réchauffant l'eau d'alimentation, et améliorant beaucoup le rendement.

Les chaudières Niclausse ne possèdent pas d'économiseurs, mais, en raison du mode de circulation, en dérivation, il arrive que le régime s'établit dans les tubes les plus éloignés de la grille, de telle façon que l'eau n'y atteigne

(1) Cette opinion a été déjà souvent émise et M. Lencauchez a, depuis longtemps, affirmé que le meilleur récupérateur est une chaudière à vapeur ; il était cependant intéressant de la contrôler par des chiffres.

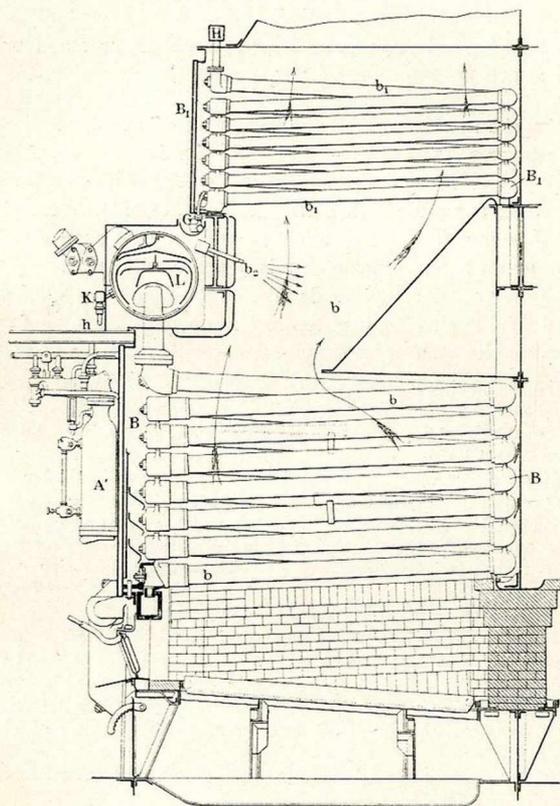


FIG. 3. — Coupe latérale de la chaudière Belleville avec économiseur.

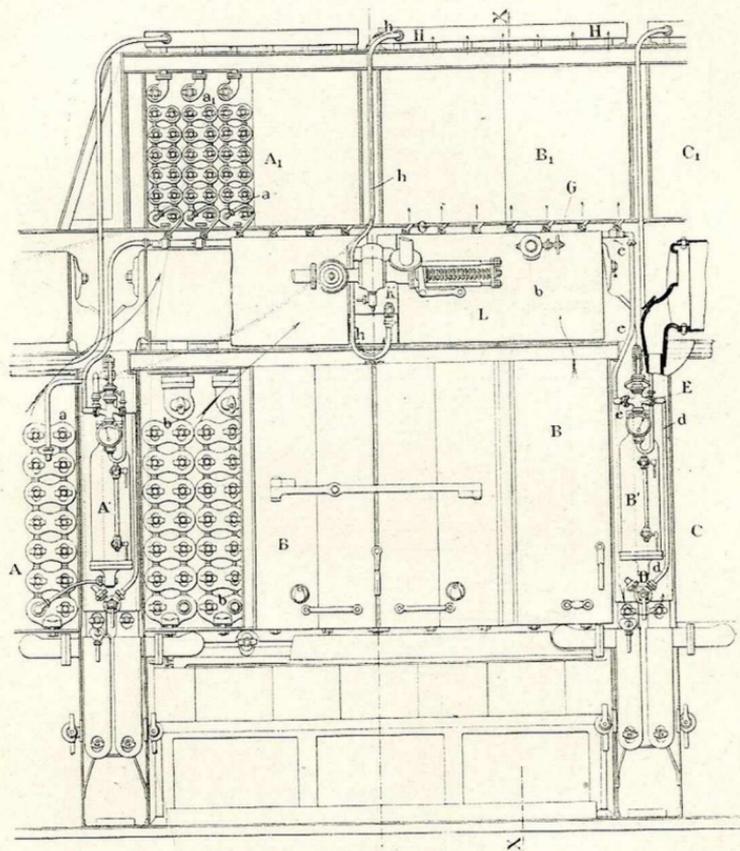


FIG. 3. — Élévation et coupe transversale de la chaudière Belleville avec économiseur.

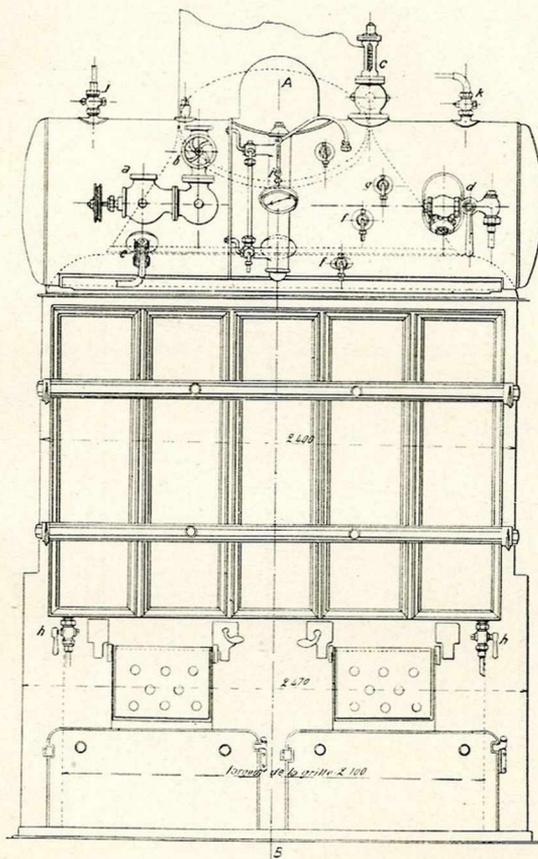


FIG. 4. — Élévation de la chaudière multitubulaire,
système Niçausse.

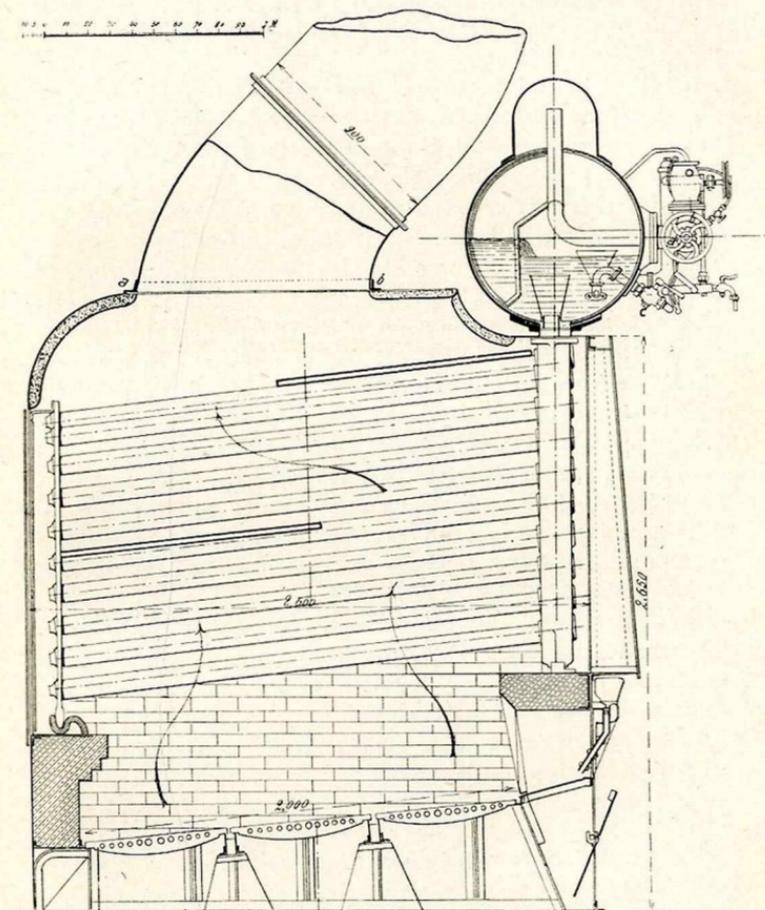


FIG. 4. — Coupe latérale de la chaudière multitubulaire, système Nielauss.

62 ÉTUDE THÉORIQUE DE LA RÉCUPÉRATION

même pas la température de volatilisation correspondant au timbre de la chaudière; ces derniers tubes fonctionnent donc comme de véritables réchauffeurs d'eau d'alimentation.

Les chaudières tubulaires se distinguent des fours par le fait qu'il n'y a pas, dans le laboratoire, de température de régime; la température varie régulièrement de la grille à la boîte à fumée: on ne peut donc, même pour une étude théorique, prendre comme température de régime celle qui correspond au timbre de la chaudière, puisque les tubes extrêmes de la chaudière Niclaussé et l'économiseur Belleville sont à une température moindre. Les seuls éléments permettant de calculer les pertes de chaleur sont donc des données expérimentales: ce sont, la température des fumées, et leur composition chimique (1).

Voici les données qui nous ont été fournies par MM. Niclaussé, d'après plusieurs séries d'essais effectués sur leur type de chaudière pour torpilleurs:

La température de la boîte à fumée, très variable selon l'activité de la combustion, s'abaisse à 140° pour une vaporisation de 20 kilogr. par mètre carré de surface de chauffe et une consommation de 100 kilogr. de charbon par mètre carré de grille-heure; elle atteint au contraire de 370° à 400° pour une vaporisation de 55 kilogr. et une consommation de 400 kilogr. de charbon.

Les chaudières Belleville à économiseurs accusent une température à la boîte à fumée variant de 175° pour une consommation de 70 kilogr. de charbon par mètre carré de surface de grille, à 375° pour une consommation de 170 kilogr. de charbon.

La composition des gaz, d'après une moyenne de trois essais sur des chaudières Niclaussé, est la suivante:

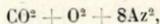
CO ²	O	CO	Az
8,2	10	0,8	81

Elle correspond, on le voit, à un grand excès d'air, puisque l'oxygène entraînant un volume quadruple d'azote, 10 d'oxygène correspondent à 50 d'air, en négligeant la vapeur d'eau qui n'a pas été dosée.

(1) Il conviendrait de faire entrer en ligne de compte dans la composition des fumées: d'une part, le poids de charbon échappant à la combustion soit sous forme de poussière, soit sous forme de suie; d'autre part, la vapeur d'eau dans le cas de combustibles hydrogènes. Nous n'avons pu nous procurer à ce sujet aucune donnée expérimentale.

En résumé, nous pouvons, pour évaluer l'utilisation de la chaleur dans les chaudières, faire le calcul de P dans des limites de température comprises entre 100° et 500° et en supposant dans les fumées volumes égaux d'air et de produits de combustion.

La composition des fumées étant, dans ces hypothèses :



il suffit de se reporter au tableau des chaleurs d'échauffement pour avoir les pertes par unité de charbon brûlé dégageant 97^{cal}6 :

	200°	400°	600°
CO ²	1,8	4,8	6,4
O ² + 8Az ²	12,6	25,4	38,8
PERTE TOTALE	14,4	29,4	42,2
PERTE %	14,4	30,1	46,3

et la courbe d'utilisation de la chaleur (fig. 5).

On voit, par ces chiffres, que le rendement est loin d'être satisfaisant

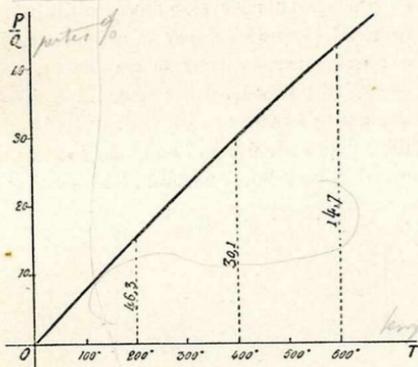


FIG. 5. — Courbe d'utilisation de la chaleur dans les chaudières multitubulaires.

dès que la marche est un peu forcée : pour une température de 500° à la boîte à fumée, qui peut quelquefois être atteinte, l'utilisation de la chaleur n'est que de 65 %, le reste s'échappant à la cheminée. Il est donc permis de conclure que les chaudières ont encore des progrès à faire. Or les méthodes de récupération par les gaz sont, on le sait, peu efficaces jusqu'à 500° : la récupération par chauffage de l'eau d'alimentation a une limite, et il semble que cette idée a déjà donné les résultats qu'on en peut

dès que la marche est un peu forcée : pour une température de 500° à la boîte à fumée, qui peut quelquefois être atteinte, l'utilisation de la chaleur n'est que de 65 %, le reste s'échappant à la cheminée. Il est donc permis de conclure que les chaudières ont encore des progrès à faire. Or les méthodes de récupération par les gaz sont, on le sait, peu efficaces jusqu'à 500° : la récupération par chauffage de l'eau d'alimentation a une limite, et il semble que cette idée a déjà donné les résultats qu'on en peut

attendre. C'est donc du côté de la combustion sans excès d'air que semble être le remède; mais la solution de ce problème n'est pas aussi facile qu'elle peut paraître de prime abord.

Il est d'abord évident que si, dans des chaudières aussi étudiées que les générateurs multitubulaires, on se tient à ce régime de combustion avec grand excès d'air, c'est qu'il correspond au meilleur rendement des appareils actuels. L'emploi de combustibles gazeux qui, dans les fours à gaz à haute température permet facilement d'obtenir une combustion rigoureusement neutre, ne serait sans doute pas efficace dans les chaudières, car la combustion, d'autant plus lente que la température est plus basse, y serait certainement incomplète: il y aurait extinction de la flamme et dépôt de suie. Une flamme très chaude, comme celle qui résulterait d'une combustion sans excès d'air, pourrait brûler la chaudière. Bien d'autres obstacles peuvent s'opposer à la réalisation de ce progrès.

Il serait donc téméraire et hors de notre compétence d'indiquer les moyens les plus efficaces de perfectionner les chaudières multitubulaires; mais il était utile de montrer que c'est par la conduite de la combustion qu'on peut le plus gagner. La combustion neutre, sans excès d'air, pourrait non seulement procurer une économie de 40 à 45 %, quand les fumées s'échappent à 500°, elle pourrait surtout avoir l'avantage de réduire beaucoup la fâcheuse influence de la marche forcée sur le rendement, ce qui, dans beaucoup de cas, est d'un grand intérêt.

CHAPITRE V

PREMIER GROUPE DE FOURS A GAZ. — GAZ A L'AIR.

FOURS A RÉCUPÉRATION A OXYDE DE CARBONE OU A GAZ SIEMENS.

§ 1. Réactions de combustion. — Les réactions pour 12 grammes de carbone brûlé sont les suivantes :

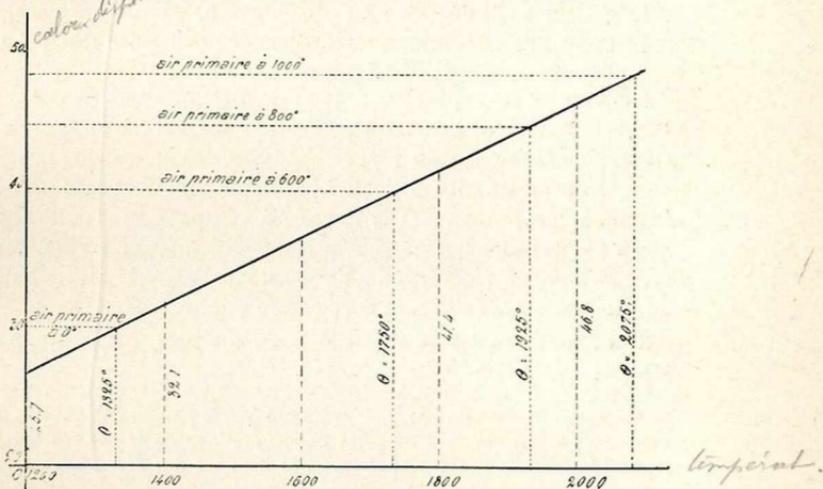
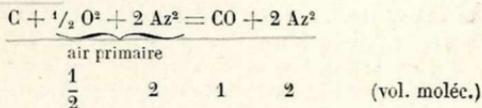


Fig. 1. — Courbe des températures du gaz à la sortie du gazogène.

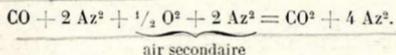
Dans le gazogène on a :



avec dégagement de 29^{cal}4.

Par suite de cette chaleur dégagée, si l'air primaire est froid la température du mélange $\text{CO} + 2\text{Az}^2$ est portée à $1\ 325^\circ$, ainsi qu'il est facile de le calculer par la méthode graphique connue (fig. 4). Si l'air primaire est chauffé, il faut, à la chaleur de combustion, ajouter la chaleur sensible contenue dans cet air ($10^{\text{cal}} 7$ à 600° , $14^{\text{cal}} 5$ à 800° , $18^{\text{cal}} 6$ à $1\ 000^\circ$), ce qui porte la température du gaz sortant du gazogène, respectivement à $1\ 700^\circ$, $1\ 830^\circ$ et $2\ 000^\circ$.

Dans le four, la réaction est :



dégageant $68^{\text{cal}} 2$.

La chaleur totale dégagée est toujours $97^{\text{cal}} 6$.

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

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

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

Le premier (fig. 3), dont les dessins nous ont été communiqués par la Compagnie Parisienne du Gaz, représente son type 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 $1\ 600^\circ$.

Le second (fig. 2), que nous devons à M. Lencauchez, donne l'exemple du même mode de récupération dans le cas d'une température plus élevée (environ $1\ 400^\circ$), 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 desquelles circulent les fumées, et assez comparable à une chaudière multitubulaire.

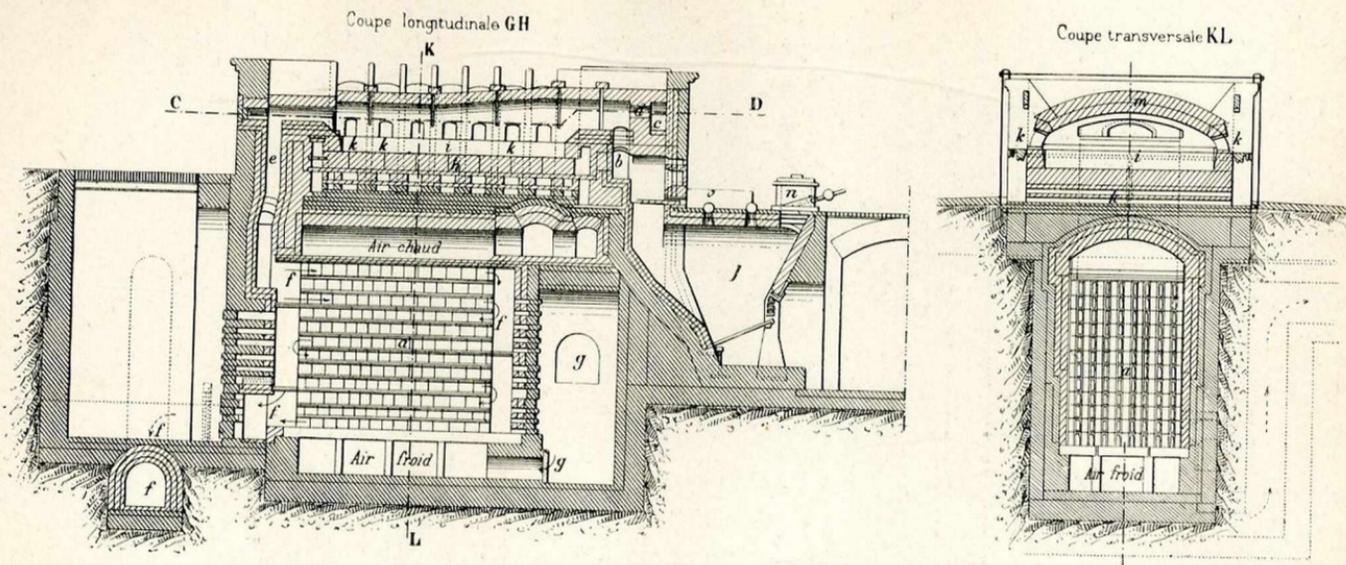
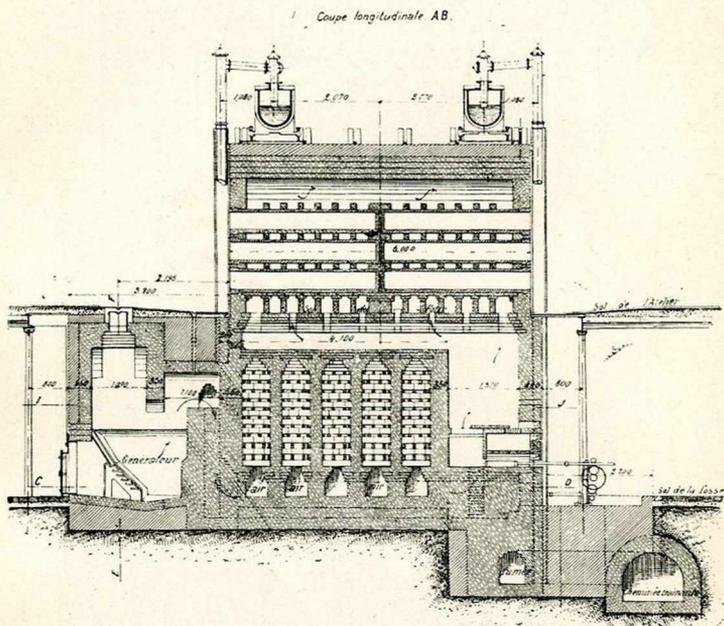


FIG. 2. — Four de verrerie à bassin, à gaz à l'air, à récupérateur système Lencauchez.



Pian Coupe CD.

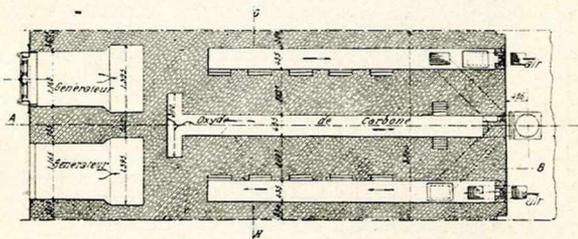


FIG. 3. — Four à cornues de la Compagnie Parisienne du Gaz système Siemens.

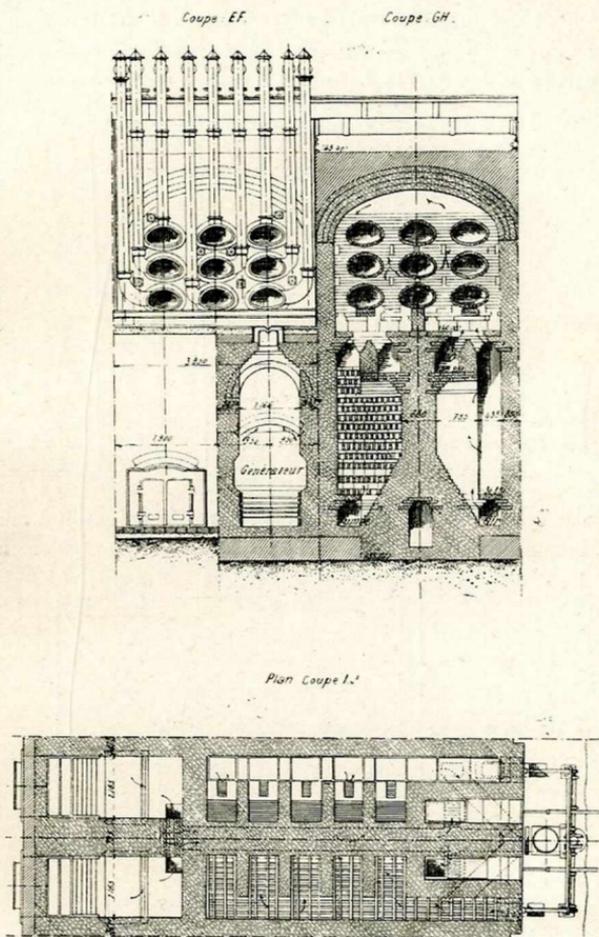


FIG. 3. — Four à cornues de la Compagnie Parisienne du Gaz,
système Siemens.

70 ÉTUDE THÉORIQUE DE LA RÉCUPÉRATION

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 ^{cal} 6.		1 000°	1 500°	
F	Calories emportées par les produits de combustion à 1 000° et 1 500°.	CO ²	12,4	21,1
		4AZ ²	29,7	46,4
	TOTAL	42,1	67,5	
R	Calories récupérées par l'air secondaire porté de 0° à 1 000° ou 1 500°.	$\frac{1}{2}$ O ²	3,7	5,8
		2AZ 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		24,3	39,5	
Chaleur utilisée % ou rendement maximum U		75,7	60,5	

Comme dans les fours à chauffage direct, le rendement croît 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

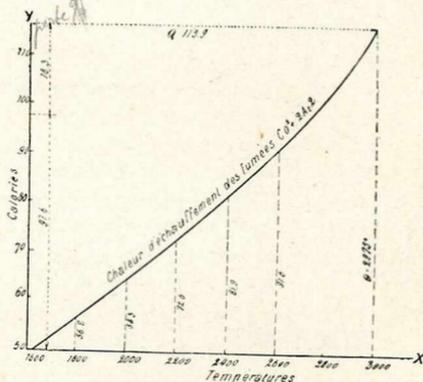


FIG. 4. — Détermination graphique de température de combustion (simple récupération).