

ENCYCLOPÉDIE DE SCIENCE CHIMIQUE APPLIQUÉE
PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE C. CHABRIÉ

EMILIO DAMOUR JEAN CARNOT,
ETIENNE RENGADE

LES SOURCES
DE
L'ÉNERGIE CALORIFIQUE

ENCYCLOPÉDIE
DE
SCIENCE CHIMIQUE
APPLIQUÉE AUX ARTS INDUSTRIELS

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE

M. C. CIABRIÉ

Professeur à la Sorbonne,
Directeur de l'Enseignement de la Chimie appliquée,
Professeur à l'École des Hautes Etudes commerciales.

AVEC LA COLLABORATION DE

MM. AMAGAT (E.-H.), membre de l'Institut; BAUME (G.), privat-docent à l'Université de Genève
BINET DU JASSONNEIX (A.), docteur ès sciences, préparateur à la Sorbonne
BOUCHERON (H.), professeur honoraire à l'École Centrale des arts et manufactures
CARNOT (J.), ingénieur civil des mines
CARRÉ (P.), docteur ès sciences, professeur à l'École des Hautes Etudes commerciales
CHARABOT (Eug.), docteur ès sciences, inspecteur de l'Enseignement technique
CHESNEAU (G.), inspecteur général des Mines, professeur à l'École nationale des Mines
DAMOUR (Emilio), ingénieur civil des mines, lauréat de l'Institut
DÉCOMBE (L.), sous-dir. du Laboratoire d'enseignement de la Physique à la Sorbonne
DONY-HÉNAULT (O.), professeur à l'École des Mines et Faculté polytechnique de Mons
ÉTIENNE (G.), ingén. au corps des Mines, professeur à l'École nationale des Mines
FERNBACH (A.), professeur à l'Institut Pasteur, maître de conférences à la Sorbonne
GALL (H.), ingénieur, administrateur délégué de la Société d'Electro-Chimie
GOYE (Ph.-A.), professeur à l'Université de Genève
HARRIOT (M.), direct. des essais à la Monnaie de Paris, membre de l'Académie de Médecine
LE CHATELIER (H.), membre de l'Institut, prof. à la Sorbonne, inspect. génér. des Mines
PORTEVIN (A.), ingénieur des Arts et Manufactures, chef de service
aux usines de Dion-Bouton
RENGADE (E.), docteur ès sciences, chef des travaux de Chimie à la Sorbonne
SABATIER (P.), doyen de la Faculté des Sciences de Toulouse, correspondant de l'Institut
SEYEWETZ (A.), sous-directeur de l'École de Chimie industrielle de Lyon
SISLEY (P.), ingénieur, professeur à la Société d'Enseignement professionnel du Rhône
VENNIN (L.), ingénieur des poudres et salpêtres.

M. E. RENGADE, Secrétaire de la rédaction.

TOME PREMIER — LES SOURCES DE L'ÉNERGIE CALORIFIQUE

PARIS ET LIÈGE
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, CH. BÉRANGER, ÉDITEUR
PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES
LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1912

ENCYCLOPÉDIE DE SCIENCE CHIMIQUE APPLIQUÉE

LES SOURCES
DE
L'ÉNERGIE CALORIFIQUE

PAR MM.

EMILIO DAMOUR, JEAN CARNOT
ÉTIENNE RENGADE

PREMIÈRE PARTIE :

LA COMBUSTION ET LA GAZÉIFICATION

PAR EMILIO DAMOUR

LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

PAR JEAN CARNOT

DEUXIÈME PARTIE :

LES COMBUSTIBLES

PAR ÉTIENNE RENGADE

PARIS ET LIÈGE

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, CH. BÉRANGER, ÉDITEUR

PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES,

LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1912

Tous droits réservés.

ERRATA

- Page 45, *ligne 4* en remontant, *au lieu de* : Vant'Hof, *lire* : Van't Hoff.
Page 45, *ligne 3* en remontant, *au lieu de* : Nermst, *lire* : Nernst.
Page 49, *ligne 13* en remontant, *au lieu de* : est résumé, *lire* : sont résumés.
Page 64, *ligne 17*, *au lieu de* : de signes contraires, *lire* : de signe contraire.
Page 70, *ligne 4*, *au lieu de* : constante, *lire* : constantes.
Page 70, *ligne 15*, *au lieu de* : lui faire subir, *lire* : lui faire subir.
Page 88, *légende de la fig. 9*, *au lieu de* : destructeur, *lire* : destructeur.
Page 90, *légende de la fig. 10*, *au lieu de* : dans un four, *lire* : dans un four.
Page 112, *légende de la fig. 17*, *au lieu de* : électrocutrice, *lire* : électromotrice.
Page 131, *ligne 13* en remontant, *au lieu de* : constitué de l'oxyde de fer, *lire* : constitué par de l'oxyde de fer.
Page 139, *dernière ligne* (note), *au lieu de* : analyse sur l'eudiomètre, *lire* : analyse par l'eudiomètre.
Page 155, *ligne 9*, *au lieu de* : combinant, *lire* : comburant.
Page 198, *ligne 12* en remontant, *au lieu de* : confirmé, *lire* : confirmée.
Page 209, *ligne 2* et 3 en remontant, *au lieu de* : en kilogramme, fer brut, *lire* : en kilogrammes de fer brut.
Page 252, *ligne 16* en remontant, *au lieu de* : laboraloire, *lire* : laboratoire.
Page 259, *ligne 9* (note) en remontant, *au lieu de* : gazogènes à cendrier fermés, *lire* : gazogènes à cendriers fermés.
Page 259, *ligne 14* (note) en remontant, *au lieu de* : nous serons, *lire* : nous serions.
Page 262, *ligne 16*, *au lieu de* : par le laboratoire, *lire* : pour le laboratoire.
Page 281, *ligne 5* en remontant, *au lieu de* : étendue, *lire* : étendre.
Page 284, *ligne 7* en remontant, *au lieu de* : les diverses substances, *lire* : de diverses substances.
Page 284, *ligne 10* en remontant, *au lieu de* : ces valeurs, *lire* : les valeurs.
Page 306, *ligne 19* en remontant, *au lieu de* : se sont produits, *lire* : se sont produites.
Page 322, *ligne 12* en remontant, *au lieu de* : matière volatile, *lire* : matières volatiles.
Page 328, *ligne 5* en remontant, *au lieu de* : $\text{CO} = \text{CO}^2 + \text{C}$, *lire* : $2 \text{CO} = \text{CO}^2 + \text{C}$.
Page 359, *ligne 12*, *au lieu de* : inférieures, *lire* : intérieures.
Page 359, *ligne 8* en remontant, *au lieu de* : on pilonne le coke, *lire* : on pilonne la houille.
Page 360, *dernière ligne* (note), *au lieu de* : 1608, *lire* : 1908.
Page 365, *lignes 14* et 15 en remontant, *au lieu de* : on réalise une circulation méthodique des gaz de l'eau, *lire* : on y réalise une circulation méthodique des gaz et de l'eau.
Page 374, *ligne 13*, *au lieu de* : CH^n-2 , *lire* : C^nH^n-2 .
Page 392, *ligne 5*, après : voici à ce sujet les procédés, *ajouter* : voir le tableau p. 391.
Page 394, *ligne 1*, *au lieu de* : des dégagements importants des gaz, *lire* : de gaz.
Page 413, *ligne 8*, *au lieu de* : Harey, *lire* : Harvey.
Page 414, *ligne 6* en remontant, *au lieu de* : possible, *lire* : fusible.
Page 445, *ligne 13*, *au lieu de* : hauteur de la courbe, *lire* : hauteur de la couche.
Page 449, *ligne 16* en remontant, *au lieu de* : la quantité suffisante, *lire* : en quantité suffisante.
Page 463, *ligne 6*, *au lieu de* : de l'alcool, *lire* : de l'air.
Page 498, *note*, *au lieu de* : Sa soudure autogène, *lire* : Soudure autogène.
-

IDÉES DIRECTRICES

Le plan de l'Encyclopédie de Science chimique appliquée aux arts industriels et le nom de l'ouvrage résultent d'une évolution qui s'est produite dans l'Enseignement supérieur technique de la Chimie sous l'impulsion d'un savant éminent dont j'exposerai plus loin les idées. L'utilité de cet ouvrage m'a paru démontrée par la nature des conseils qui m'ont été demandés souvent par un certain nombre d'anciens élèves éloignés des centres d'enseignement supérieur et occupant dans l'industrie des situations exigeant de leur part l'application journalière de connaissances scientifiques élevées.

Au lieu d'expliquer tout de suite le caractère spécial de l'Encyclopédie et la méthode qui a été suivie dans le choix des matières qui la constituent, je préfère exposer au lecteur quelles ont été les influences qui ont développé en moi certaines idées directrices et qui m'ont conduit à entreprendre, avec l'aide de très distingués collaborateurs, une publication d'un caractère si particulier.

Lorsque Charles Friedel demanda et obtint la fondation à l'Université de Paris des laboratoires d'enseignement pratique de la chimie, il voulut que les jeunes gens qui se destinaient à faire leur carrière comme chimistes eussent une forte instruction au point de vue expérimental. Il visait un double but : préparer aux recherches originales ceux qui voudraient être des savants ou des inventeurs ; donner une technique rigoureuse et

complète aux futurs chimistes employés dans les diverses branches de l'industrie. Pour ceux-ci surtout il voulut organiser des manipulations embrassant, autant que possible, toutes les parties de la chimie.

Quand il fit créer un cours de chimie appliquée à la Faculté des Sciences, par l'Université de Paris, il avait le désir que les élèves des laboratoires d'enseignement eussent une idée des opérations effectuées dans l'industrie chimique et sans doute des problèmes dont cette industrie cherche toujours la solution.

Je puis être très affirmatif sur les désirs de cet illustre maître en ce qui concerne l'organisation des laboratoires d'enseignement car il eut le temps d'en suivre le développement pendant près de trois années. Il en approuva le programme rédigé d'après ses indications et qui fut mis en œuvre sous ses yeux.

En ce qui concerne le cours de chimie appliquée dont il ne fit que demander la création avant sa mort, je ne puis savoir aussi exactement comment il désirait le voir orienté.

Aujourd'hui que je me souviens des entretiens que j'eus avec Friedel, puis avec Moissan ; maintenant que quinze promotions d'élèves se sont succédé dans nos laboratoires et ont suivi nos leçons, il me paraît intéressant de discuter les opinions les plus remarquables des savants et des industriels contemporains qui ont écrit sur l'enseignement supérieur technique.

On sait qu'on a été jusqu'à nier que l'Université dût s'en occuper¹. Beaucoup d'hommes compétents voulaient surtout qu'on fit des établissements pour classer les jeunes gens selon leurs aptitudes beaucoup plus que pour les instruire, afin de débarrasser l'industrie des sujets mal doués pour y réussir. Cette idée ingénieuse ne saurait être appliquée dans les pays où le goût de la liberté est beaucoup plus développé que l'esprit de discipline. La création d'écoles supérieures pour former des

¹ Voir Le Chatelier : *Le but et les méthodes de l'enseignement technique supérieur* (*Technique Moderne*, III, n° 5, 1911).

chimistes destinés à l'industrie a été réclamée avec éloquence en France depuis 1878, date du rapport de M. Ch. Lauth sur la classe des produits chimiques à l'Exposition universelle de Paris.

En 1897, ce savant industriel développait de nouveau sa pensée ¹ en disant : « Les laboratoires de Paris ne sont pas des laboratoires d'enseignement... Ils sont excellents pour ceux qui savent et insuffisants pour ceux qui veulent apprendre. »

Sans doute sa critique visait surtout les laboratoires de la Sorbonne et du Collège de France, car à ce moment, des écoles techniques avaient été fondées à Paris, à Lyon, à Nancy et à Lille.

L'Institut de chimie appliquée venait à peine de naître.

M. Lauth ajoutait : « Espérons que la direction donnée à ces établissements sera telle... que la connaissance des applications industrielles n'y soit pas reléguée au dernier plan... »

Cette pensée le hantait, car il insistait sur la nécessité pour les maîtres de s'intéresser aux choses de l'industrie, d'en connaître les besoins, de rechercher et d'apprécier la société des manufacturiers, d'être tenu par eux au courant de leurs besoins. Il citait un passage d'un discours de Berthelot au 2^e Congrès international de chimie appliquée tenu à Paris en 1896 dans lequel ce maître disait : « En chimie, comme dans toutes les études vraiment profitables aux hommes, la théorie et la pratique se rattachent l'une à l'autre par des liens indissolubles. »

Pendant qu'en France s'élevaient de toutes parts des écoles ou des instituts de chimie, Sir Henry White en Angleterre, Th. Peters et Krupp en Allemagne, Solvay à Bruxelles, Carnegie en Amérique, contribuaient par leur autorité et plusieurs d'entre eux par leurs donations à des fondations dont le but se rattachait à la grande question de l'enseignement technique.

On le voit, l'immense majorité des hommes compétents ne

¹ *Science pure et science appliquée*, par Ch. Lauth. *Revue scientifique*, n° 9, janvier 1897.

mettent plus en doute l'utilité des études scientifiques dirigées en vue des applications.

Alors se pose la question suivante : « Que doit être cet enseignement ? »

Je ne parlerai ici que de l'enseignement supérieur, de celui qui peut être donné dans les Universités.

La réponse à cette question a été faite avec beaucoup de précision et en maintes occasions par M. H. Le Chatelier. Je citerai donc les termes mêmes dans lesquels elle a été exprimée par lui dans une conférence récente¹ :

« L'enseignement professionnel sera nécessairement remplacé, à plus ou moins brève échéance, dans les écoles techniques, par un enseignement scientifique d'une nature spéciale que j'appelle la science industrielle. » Et plus loin M. Le Chatelier en donne la définition suivante : « Elle ne s'attarde pas à la description détaillée des multiples procédés de fabrication, ni à la description des appareils employés ; elle se contente d'en donner un résumé sommaire, en quelque sorte schématique, suffisant cependant pour faire comprendre la nature des phénomènes... Elle concentre ses efforts sur le rapprochement scientifique des phénomènes distincts mis en œuvre par la force même des choses dans une opération industrielle donnée ; elle rappelle simplement les connaissances acquises dans les études scientifiques proprement dites en se contentant de les compléter par une série de renseignements numériques.... La science pure est essentiellement abstraite de sa nature ; la science industrielle est au contraire synthétique, elle reprend chacune des sciences abstraites pour les grouper autour de chaque fait réel, en accordant à chacune d'elles une place proportionnée à sa part dans le résultat final. »

A cette conception à la fois élevée et pratique de la science industrielle, j'ajouterai seulement que, devant les étudiants

¹ Conférence de *La technique moderne* faite par M. H. Le Chatelier, en mai 1911 sous la présidence de M. Appell, doyen de la Faculté des Sciences de Paris.

d'une Université, il y a un intérêt véritable à traiter certaines questions de l'histoire des principales industries, de celles qui sont bien connues et dont les transformations successives pendant un temps assez long montrent, d'une manière saisissante, comment on doit chercher à développer une industrie pour qu'elle profite des découvertes de la science pure.

D'ailleurs, l'idée qu'un chef d'industrie doit surtout posséder une forte instruction générale plutôt que des connaissances trop spécialisées a été récemment reprise par le Président de la « Society of chemical Industry ». M. Walter Reid s'exprimait ainsi¹ : « La rapidité du développement des produits et des méthodes nouvelles de la chimie industrielle est telle qu'il est devenu très difficile de suivre toutes les applications de la science avec notre industrie, et la tendance de notre époque est vers la spécialisation... mais la subdivision a ses désavantages et les directeurs d'usines doivent avoir une instruction très étendue, même sur les sciences autres que la chimie..... il faut avoir des connaissances de science générale et spécialement des méthodes conduisant aux applications. »

Il ne serait pas sans intérêt d'exposer ici les opinions qui ont été émises sur la manière de développer l'initiative des futurs industriels, de parler, comme l'a fait aussi M. Le Chatelier², de l'importance des qualités du caractère chez ceux qui auront à commander, à obéir et à se diriger eux-mêmes à travers toutes les difficultés de la vie industrielle.

La meilleure manière d'agir sur les jeunes esprits a toujours été de leur montrer de bons exemples. Il faut donc leur donner des maîtres capables d'exciter chez eux des sentiments de justice, une volonté tenace et le goût du travail.

Les opinions des hommes éminents que j'ai citées, l'expérience de l'enseignement et aussi la fréquentation des indus-

¹ Reprinted from the journal of the Society of chemical Industry. July 31, 1911. Proceedings of the annual meeting. Sheffield 1911.

² Discours prononcé à la cérémonie de distribution des diplômes aux élèves de l'Institut de chimie appliquée de Paris. Juillet 1909.

triels peuvent suffire pour indiquer à un professeur de chimie appliquée la meilleure manière d'être utile à ses élèves pendant leur séjour à l'Université.

Mais est-ce là tout son devoir ?

Son action ne doit-elle pas suivre ses anciens élèves après leur sortie de l'École et peut-être jusque dans les usines où ils travaillent lorsqu'ils mettent à profit leur savoir rapidement acquis dans les instituts de chimie ?

La pensée qui est venue à beaucoup de personnes a été de compléter l'instruction scientifique des ingénieurs chimistes par des stages bien choisis dans de grandes fabriques. La question a été reprise et amplement discutée au Congrès international de l'Enseignement technique supérieur tenu à Bruxelles¹ en septembre 1910.

Sans nier aucunement les avantages des stages passagers dans les usines, je crains qu'ils ne soient pas un guide suffisant pour les futurs ingénieurs. On ne peut, en effet, les multiplier pour un même chimiste qui sera donc exposé, après avoir fait un stage dans un établissement métallurgique je suppose, à faire sa carrière dans une fabrique de parfums. Cette circonstance se présentera souvent.

Il m'a semblé que la meilleure manière d'être utile à nos anciens élèves serait de réunir dans une même collection tous les principes de science pure pouvant leur être utile dans les diverses branches de l'industrie chimique.

Pour que cette encyclopédie de *Science chimique appliquée aux Arts industriels* fût vraiment un guide précieux pour tous ceux qui sont déjà bien au courant de leur industrie spéciale, il fallait que chaque chapitre fût rédigé par un savant dont la compétence fût absolue et unanimement reconnue. Aussi, après avoir eu l'idée d'une semblable publication, il fallut provoquer les bonnes volontés des hommes choisis parmi les plus quali-

¹ Voir le compte rendu sommaire de ce Congrès dans la *Revue de l'enseignement technique*, n° 1, octobre 1910, p. 46.

fiés par leurs travaux, par leurs fonctions et par leur talent pour une œuvre aussi considérable.

Les noms seuls des collaborateurs de cette encyclopédie, dont plusieurs sont célèbres, sont la meilleure garantie de l'accueil qu'elle recevra dans le public auquel elle est destinée. Je tiens à leur témoigner ici ma vive gratitude pour leur concours dont j'apprécie toute la haute valeur.

La division de l'ouvrage en douze volumes permettra aux ingénieurs spécialisés de n'acquérir que les parties de l'encyclopédie qui leur seront utiles.

Enfin, les matières traitées dans chaque volume ne sont pas, le plus souvent, relatives à une industrie déterminée mais à des principes généraux de science ayant de grandes analogies.

Le lecteur ne trouvera donc que peu de descriptions, mais des méthodes, des idées générales, des explications, des procédés de mesure ou de calcul.

Ainsi comprises et divisées, les notions de science chimique seront répandues dans les usines au grand bénéfice des savants qui les auront exposées et des industriels qui les appliqueront et sauront en apprécier les bienfaits.

C. CHABRIÉ.

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

LA COMBUSTION ET LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

PAR EMILIO DAMOUR ET JEAN CARNOT

PRÉFACE xxvi

CHAPITRE PRÉLIMINAIRE

LES SOURCES DE L'ÉNERGIE CALORIFIQUE : EXPOSÉ, DÉFINITIONS 1

Définition du chauffage industriel. 5

CHAPITRE PREMIER

DONNÉES SCIENTIFIQUES EXPÉRIMENTALES OU THÉORIQUES NÉCESSAIRES A L'ÉTUDE
DU CHAUFFAGE INDUSTRIEL A L'AIDE DES DIVERSES SOURCES D'ÉNERGIE 9

**A. Étude des différentes sources d'énergie, leurs valeurs thermiques,
leurs équivalences. Choix des unités** 9

§ 1. **Energie calorifique dégagée par les combustions. Chaleurs de combustion** 10

Chaleurs de combustion et pouvoirs calorifiques 10

Combustion dans l'air atmosphérique 13

Combustion en présence de la vapeur d'eau, rôle de la vapeur d'eau
dans les fours 14

Combustion des composés hydrogénés, hydrocarbures, alcools. 15

Chaleur de combustion ou pouvoir calorifique des combustibles industriels. 16

1° Correction pour combustion à pression constante. 20

2° Correction correspondant à la non-condensation de l'eau dans les
combustions industrielles 21

3° Conséquences dans l'étude des combustibles industriels. 22

Chaleur de combustion d'un pétrole de Bakou 23

Exemple de détermination et de calcul 23

Tableau des pouvoirs calorifiques des combustibles usuels. 272

§ 2. **Energie thermique mise en œuvre dans les fours. Chaleurs d'échauffement
et chaleurs spécifiques des gaz** 24

Tableau des chaleurs d'échauffement	25
§ 3. Energie chimique	28
<i>a)</i> Chaleur dégagée par les réactions chimiques	28
1° Energie chimique suffisante pour chauffer le laboratoire.	28
2° Energie chimique positive, insuffisante pour maintenir le laboratoire en température.	29
3° Energie chimique nulle	30
4° Energie chimique négative	30
<i>b)</i> Détermination de l'énergie chimique spéciale	34
<i>c)</i> Autres manifestations diverses de l'énergie chimique.	32
Production secondaire d'électricité	32
§ 4. Energie mécanique et énergie cinétique	34
§ 5. Energie électrique	35
<i>a)</i> Rôle et effet utile de l'électricité dans les transformations d'énergie	35
<i>b)</i> Unités électriques. Loi de Joule.	39
Rendement calorifique d'un four électrique.	41
§ 6. Energie élastique	42
B. Quelques notions de thermodynamique	45
Dissociation. Equilibres chimiques. Énoncé des lois générales de l'énergétique	
Réversibilité et irréversibilité.	46
§ 1. Dissociation	47
<i>a)</i> Dissociation de l'acide carbonique	49
<i>b)</i> Dissociation de la vapeur d'eau	50
<i>c)</i> Dissociation de l'oxyde de carbone.	51
§ 2. Equilibres chimiques des gaz et des combustibles. Application de ces lois à l'étude des gazogènes	54
Condensation des gaz.	55
<i>a)</i> Equilibre du gaz Siemens	56
<i>b)</i> Equilibre du gaz mixte $\text{CO} + \text{CO}^2 + \text{H}^2$	57
<i>c)</i> Equilibre du gaz à l'eau; action de l'eau sur le charbon.	59
§ 3. Principes généraux de la thermodynamique	62
<i>a)</i> Conservation de l'énergie. Principe de l'état initial et de l'état final.	62
<i>b)</i> Lois des équilibres chimiques	64
1° Loi du déplacement de l'équilibre	64
2° Loi d'isoéquilibre.	69
3° Loi de l'action de masse	71
Formule générale d'équilibre des gaz	72

CHAPITRE II

DE L'OBTENTION DES HAUTES TEMPÉRATURES

A. Étude des températures développées dans les fours : températures de régime et températures de combustion	74
§ 1. Des différents moyens d'obtenir les hautes températures	74
§ 2. Températures de combustion, calcul de ces températures	77
<i>a)</i> Méthode graphique de calcul des températures de combustion. Calcul des principaux cas industriels de combustion	77
1° Combustion de l'hydrogène, du carbone et de l'oxyde de carbone dans l'air froid.	78
2° Exemple de calcul de température de combustion dans le cas le plus général	80

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

xv

b) Influence du dosage exact de l'air sur la température de combustion. Abaissement de cette température par un excès d'air	81
Combustion du carbone dans l'air froid en diverses proportions	82
c) Exemples industriels de calculs de la température de combustion	85
1° Combustion du pétrole dans un foyer de chaudière	85
2° Température de combustion dans les fours destructeurs d'ordures ménagères	86
3. Température de régime	89
a) Classement des fours par régimes	91
1° Température constante dans un laboratoire unique et invariable .	
2° Plusieurs températures constantes dans plusieurs laboratoires se commandant les uns les autres	92
3° Température variable décroissant insensiblement depuis le foyer jusqu'à la cheminée, avec régime continu	92
4° Combinaison du laboratoire à température constante avec second laboratoire à température variable	92
5° Fours à régime variable avec le temps à température uniforme dans le laboratoire.	92
6° Fours à régime variable avec le temps à températures non uni- formes d'un point à l'autre du laboratoire	93
b) Quelques données expérimentales de températures de régime	93
§ 4. Moyens pratiques de déterminer les températures de régime et de combustion	94
a) Pouvoirs calorifiques	95
b) Analyse complète du combustible	97
c) Analyse des gaz et fumées	98
1° Dosage des fumées	98
Composition des fumées d'un combustible hydrogéné	99
Méthode de dosage des fumées, appareils enregistreurs	101
2° Analyse des gaz par les burettes	101
Description et usage de la burette Bunte.	104
Analyse complète des gaz.	106
Analyse eudiométrique des gaz hydrogénés et hydrocarburés.	107
3° Mesure des températures élevées	110
La pyrométrie dans l'étude des fours	110
La pyrométrie comme moyen de contrôle.	113
§ 5. Calcul de l'utilisation de la chaleur ou du rendement dans un four, au moyen des températures de régime et de combustion	114
B. Étude des fours par les températures	119
§ 1. Étude générale des fours à chauffage direct	119
a) Calcul de la chaleur utilisée dans le cas théorique de combustion sans excès d'air.	121
b) Calcul de la chaleur utilisée dans le cas de combustion avec des excès d'air croissants.	122
§ 2. Étude des fours à chauffage direct à plusieurs laboratoires et plusieurs régimes.	126
C. De l'obtention des très hautes températures.	128
§ 1. Aluminothermie	129
§ 2. Températures obtenues par le four électrique.	132
Soudure autogène	132

CHAPITRE III

DE L'ÉCONOMIE DANS LES FOURS

135

A. Étude expérimentale économique de la combustion dans les fours, bilans de combustion	141
§ 1. Programme des bilans d'utilisation de chaleur dans les fours. Bilan simple. Bilan en partie double	142
§ 2. Données expérimentales concernant un four Siemens à double récupération et bilan.	143
1° Composition du combustible, analyse organique et pouvoir calorifique, escarbilles	143
2° Analyses de gaz	145
3° Mesures des températures	146
4° Calcul du bilan des fours Siemens à gaz mixte	148
§ 3. Données expérimentales de bilan simple d'une chaudière à pétrole . .	151
§ 4. Remarques sur les bilans et les études expérimentales des fours. Des différentes méthodes d'économies dans les fours.	153
a) Rayonnement et conductibilité	153
Détermination de la perte par rayonnement dans le laboratoire d'un four	157
b) Chaleur emportée par les matériaux sortant du laboratoire	157
c) Chaleur emportée par les fumées.	159
Récupérateurs	160
B. Théorie générale de la récupération.	163
§ 1. Lois générales présidant à la récupération par les fumées de fours . .	163
§ 2. Hypothèses servant de base à la théorie mathématique de la combustion dans les fours à gaz à récupération	166
§ 3. Méthode de calcul du rendement dans les fours	169
§ 4. Premier groupe de fours à gaz :	
Gaz à l'air. Four à récupération, à oxyde de carbone ou à gaz Siemens.	172
a) Réactions de combustion.	172
b) Premier cas : récupération par l'air secondaire seul	172
c) Deuxième cas : double récupération par l'air secondaire et le gaz . . .	175
d) Troisième cas : double récupération par l'air primaire et l'air secondaire.	177
§ 5. Deuxième groupe de fours à gaz :	
Gaz à l'eau. Gaz mixte	179
a) Réactions de combustion	179
b) Premier cas : simple récupération par l'air secondaire	181
c) Double récupération par l'air secondaire et le gaz.	184
d) Troisième cas : double récupération par l'air primaire et l'air secondaire; chauffage de l'air total.	186
e) Quatrième cas : triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz.	188
§ 6. Four à retour de fumées, ou four Siemens nouvelle disposition. Alimentation des gazogènes par l'acide carbonique des fumées	191
a) Réactions de combustion : caractères généraux.	191
b) Premier cas : alimentation des gazogènes par de l'acide carbonique exempt d'azote et chaud	193
c) Alimentation des gazogènes par les fumées. Nouveau four Siemens . .	194

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

xvii

§ 7. Résumé et conclusions. Classement des fours	198
§ 8. Discussion de la théorie de la récupération d'après les données expérimentales concernant les fours. Conclusions générales. Classement.	202

CHAPITRE IV

FOUR ÉLECTRIQUE

208

I. Industrie électrosidéurgique	209
Four de la Société électrométallurgique française	211
Haut-fourneau électrique Keller	212
Four Héroult	213
— Girod	215
— Stassano	217
— Gin	219
— Conley	221
— Kjellin	222
— Rochling Rodenhauser	224
Statistique	229
II. Industrie du carbure de calcium	231
Four de la Société des carbures métalliques	232
— de la compagnie électrothermique Keller, Leleux et C ^{ie}	232
— de l'usine de Flumes	233
— Memmo de la Société piémontaise pour la fabrication du carbure de calcium	234
— Ducasse	234
Cyanamide calcique	235
III. Électrométallurgie de l'aluminium	237
Four à 2 électrodes et à source de chaleur extérieure	238
— à 1 électrode et sans source de chaleur extérieure	239
— à 2 électrodes et sans source de chaleur extérieure	239
— Héroult	239
IV. Industrie du sulfure de carbone	240

CHAPITRE V

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

§ 1. La question des gazogènes	242
Gazogènes pour moteurs	243
Gazogènes pour fours	244
§ 2. La question des fours à coke	246
Quelques remarques sur l'industrie houillère	248
§ 3. La question des fours à acier	251
Substitution du gaz riche des fours à coke au gaz pauvre dans les fours à acier	252
§ 4. La question des chaudières à vapeur	264
Influence de la température de combustion sur le rendement d'une chaudière	264
Influence de la combustion neutre sur la température de combustion	264

§ 5. La question des grandes centrales électriques.	268
Les moteurs à explosion et les turbines.	270

DEUXIÈME PARTIE

LES COMBUSTIBLES

INTRODUCTION	277
Définition et classification des combustibles	279
Origine de la puissance des combustibles	281

CHAPITRE PREMIER

LES COMBUSTIBLES SOLIDES

A. Les combustibles solides naturels	283
a) <i>Les combustibles actuels</i>	283
§ 1. Le bois	283
Classification des bois	283
Composition du bois	283
Emploi des déchets de bois	284
Dessiccation	287
b) <i>Les combustibles transformés ou fossiles</i>	288
Formation des combustibles fossiles	288
§ 1. La tourbe	291
Composition	293
Pouvoir calorifique	293
Exploitation	294
Pouvoir nitrifiant	297
§ 2. Les lignites	297
Classification	297
Principaux gisements	299
Briquettes de lignite	300
§ 3. La houille	302
Caractères physiques	302
Propriétés chimiques	303
Constitution	305
Pouvoir agglomérant	307
Oxydabilité	307
Distillation pyrogénée	309
Classification des houilles	310
Utilisation des déchets de houille. Séchage	315
Fabrication des agglomérés	318
B. Les combustibles solides artificiels	322
§ 1. Le charbon de bois	322
Propriétés	324
Préparation. Carbonisation en meules	326
Carbonisation en fours	331
Carbonisation en vases clos	333
Agglomération	337

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

xix

§ 2. La carbonisation de la tourbe	338
§ 3. Le coke	340
Caractères physiques	341
Propriétés chimiques	342
Préparation du coke ; préparation préliminaire du charbon	343
Carbonisation dans les fours	344
a) Carbonisation avec admission d'air	344
Fours de boulangers	344
b) Carbonisation sans admission d'air	345
Four Appolt	346
Fours horizontaux	347
Four Coppée	348
Four Smet	349
Fours à récupération	350
Four Seibel	351
Four Smet-Solvay	352
Four Collin	353
Fours Otto	354
Fours Koppers	355
Fours de la Rheinische-Chamotte und Dinas-Werke	356
Fours à compression	358
Compression préalable	359
Compression pendant le chargement	359
Compression durant la distillation	360
Procédé Schwarz	360
Four Lürmann	360
Four Sheldon	361
Manœuvre des fours à coke. Chargement	362
Déchargement	363
Récupération des sous-produits	363
Marche de la récupération	364
Sulfatation directe	366
La coalite	368

CHAPITRE II

LES COMBUSTIBLES LIQUIDES

A. Les combustibles liquides naturels	370
§ 1. Les pétroles	370
Composition	370
Origine des pétroles	373
Hypothèses de la formation exclusivement minérale	373
Hypothèses de la formation organique	374
Importance du pouvoir rotatoire	375
Traitement des pétroles bruts	376
Décomposition pyrogénée	377
Raffinage	379
Propriétés des pétroles	380
Utilisation des pétroles	382
B. Les combustibles liquides artificiels	384
§ 1. Les huiles de schistes	384
§ 2. Le benzol	386
§ 3. L'alcool	391

CHAPITRE III

LES COMBUSTIBLES GAZEUX

A. Le gaz naturel	394
B. Les gaz de distillation	396
§ 1. Le gaz d'éclairage	397
Distillation	397
Modifications apportées aux appareils de distillation. Nouveaux fours à cornues	398
Fours à chambres	399
Épuration du gaz. Nouveaux appareils d'épuration.	401
Extracteurs	403
Épuration chimique	404
Composition	405
§ 2. Le gaz d'huile	405
§ 3. Le gaz Riché	406
C. Les gaz de générateurs	408
§ 1. Gazogènes pour gaz à l'air	410
Gazogènes Siemens	411
Gazogènes à cuve, à air soufflé	413
Gazogènes à vent soufflé, sans grille	414
Gazogène Saillers	414
Gazogène Sépulture	415
Gazogènes à joint hydraulique	417
Gazogène Dowson. — Gazogène Twaite	418
§ 2. Gazogènes pour gaz à l'eau	419
Gazogène Guénot	420
Gazogène Strong	422
Gazogène Dellwick-Fleicher	423
Usages du gaz à l'eau	425
§ 3. Gazogènes à gaz mixte	426
Gazogènes soufflés	428
Gazogène Wilson	428
— Taylor	429
— Pierson	430
— Letombe	433
— Lencauchez	433
Gazogènes par aspiration	434
— Dowson	434
— Pierson	435
— Winterthur	436
Gazogènes spéciaux pour combustibles bitumineux	437
Gazogène autoréducteur à double combustion de Riché	441
— Twaite	442
— Pintsch	443
— Loomis Pettibone	444
— Letombe à combustion partielle préalable	445
— Kœrting	447
— Letombe	447
— de la Whestinghouse Machine Company	448
Gazogènes pour combustibles très cendreux	448
Gazogène Kerpely	449

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

xxi

Gazogène Letombe	451
Gazogènes à récupération d'ammoniaque	452
Gazogène Mond.	452
Epuration des gaz de gazogènes	455
— — de hauts fourneaux	457
D. L'air carburé	460
E. Les gaz pour chalumeaux	464
§ 1. L'hydrogène	464
§ 2. L'acétylène	466

CHAPITRE IV

LES FOYERS

§ 1. Foyers pour combustibles solides	470
Foyer ordinaire à grille plane	470
Grille à étages	473
Grille inclinée	473
Foyers à alimentation continue	474
Foyer Fulton	474
Foyers pour combustibles menus	475
Foyers soufflés	476
Foyers à injection d'air	476
Foyers à injection de vapeur	476
Grille Poillon	477
Foyer Meldrum	477
Foyer Küdlicz	477
Foyers sans grille pour poussières de charbon	478
Appareil Schwarzkopf	479
Chargeur Welles	481
Foyers pour combustibles solides autres que la houille	483
Foyers à bois	483
— à tourbe	483
— pour sciure de bois et déchets de scierie	483
— pour bagasse	484
— à tannée. Foyer Godillot	484
§ 2. Foyers pour combustibles liquides	485
Foyer Nobel	485
Four Kroupskey	485
Appareil Sainte-Claire-Deville	485
Appareils à pulvérisation	486
Appareil Vétillard-Sherding	486
Appareil Urqhardt	487
Brûleur Holden	488
Brûleurs d'Allest	488
Brûleur Guyot	489
Brûleur Karapetof	490
Brûleur Körtling	491
Appareil Kermodé	491
Brûleur « Automatic »	492
§ 3. Les brûleurs à gaz	493
Les chalumeaux	497
Chalumeaux à couper	500

TABLE DES PÉRIODIQUES CITÉS DANS LE VOLUME

<i>Ann. Chim. Phys.</i>	<i>Annales de Chimie et de Physique</i> , Paris.
<i>Ann. Min.</i>	<i>Annales des Mines</i> , Paris.
<i>Arch. Pharm.</i>	<i>Archiv der Pharmacie</i> , Halle.
<i>Ber.</i>	<i>Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft</i> , Berlin.
<i>Bull. Ind. Min.</i>	<i>Bulletin de la Société de l'Industrie minière</i> , Saint-Étienne.
<i>Bull. Soc. Chim.</i>	<i>Bulletin de la Société chimique de France</i> , Paris.
<i>Bull. Soc. Ing. Civ.</i>	<i>Bulletin de la Société des Ingénieurs Civils</i> , Paris.
<i>Chem. Ind.</i>	<i>Die chemische Industrie</i> , Berlin.
<i>Chem. Soc.</i>	<i>Journal of the chemical Society</i> , Londres.
<i>Chem. Zeit.</i>	<i>Chemiker Zeitung</i> , Cothen.
<i>Eng. Mag.</i>	<i>The Engineering Magazine</i> , New-York.
<i>Eng. Rev.</i>	<i>Engineering Review</i> , Londres.
<i>Le Gaz.</i>	<i>Le Gaz</i> , Paris.
<i>Gén. Civ.</i>	<i>Le Génie civil</i> , Paris.
<i>Glück.</i>	<i>Glückauf (Berg und Hüttenmännische Zeitschrift)</i> , Essen.
<i>Iron Age.</i>	<i>The Iron Age</i> , New-York.
<i>Ir. Coal Tr. Rev.</i>	<i>The Iron and Coal Trades Review</i> , Londres.
<i>Journ. Gasb.</i>	<i>Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung</i> , Munich.
<i>Monit. Sc.</i>	<i>Le Moniteur scientifique</i> , Paris.
<i>Rev. G^la Chim.</i>	<i>Revue générale de Chimie pure et appliquée</i> , Paris.
<i>Rev. Métal.</i>	<i>Revue de Métallurgie</i> , Paris.
<i>Rev. Univ.</i>	<i>Revue Universelle des Mines et de la Métallurgie</i> , Liège-Paris.
<i>St. und Eis.</i>	<i>Stahl und Eisen</i> , Düsseldorf.
<i>Zeit. Deut. Ing.</i>	<i>Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure</i> , Berlin.
<i>Zeit. wiss. Phot.</i>	<i>Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photo-physik und Photochemie</i> , Leipzig.

PREMIÈRE PARTIE

LA COMBUSTION ET LA GAZÉIFICATION

PAR ÉMILIO DAMOUR

ET

LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

PAR JEAN CARNOT

PRÉFACE

En l'année 1898, à la suite d'une étude expérimentale et théorique du four Siemens publiée dans les *Annales des Mines*, j'ai été conduit à écrire un petit volume : *Le Chauffage industriel et les Fours à gaz*, dont le principal but était de faire connaître aux ingénieurs et industriels quelques données et lois scientifiques récentes et à peine sorties du domaine des laboratoires, dont le second but était de présenter une théorie générale de l'utilisation de la chaleur et de la récupération dans les fours permettant de trancher des questions techniques alors controversées, enfin dont le dernier objectif était de prouver, par une monographie complète avec bilan d'un four à gaz, quels services la chimie et la science peuvent rendre à l'industrie dans le domaine du chauffage.

Depuis douze années que le livre a paru, de nouveaux travaux de laboratoire se sont produits, notamment sur les équilibres des réactions de combustion réversibles intéressant les gazogènes. Il est devenu possible de compléter ainsi la théorie de la combustion par l'étude scientifique de la gazéification des combustibles.

Les progrès généraux des fours à gaz ont été peu importants et l'étude de la récupération avec son classement des fours conserve toute son actualité.

Par contre, le chauffage électrique a fait des progrès tels qu'il vient concurrencer le chauffage à la houille, même dans la grande industrie ; dans certains cas les deux solutions ther-

mique et électrique entrent en balance et il est difficile de les séparer.

Il était donc nécessaire d'élargir le cadre du chauffage industriel, et, dans un ouvrage traitant des « Sources de l'énergie calorifique », de faire rentrer l'utilisation de l'énergie électrique dont le rôle déjà si important est appelé à le devenir davantage par la suite, et en général toutes les formes d'Énergie.

Dans ce but j'ai recherché la collaboration d'un ingénieur bien au fait des applications modernes de l'électricité.

La communauté d'école ou l'unité d'enseignement des auteurs, et surtout l'étroite collaboration qu'ils se sont prêtée, me fait espérer que la fusion nécessaire à une étude d'ensemble de tous ces modes de chauffage a été atteinte, et que l'industriel y trouvera sans effort les indications qui lui permettront de prendre une décision et de choisir un four, quelle que soit l'industrie dans laquelle il se trouve spécialisé, et quelle que soit la source de calories dont il puisse avantageusement se servir.

ÉMILIO DAMOUR.

CHAPITRE PRÉLIMINAIRE

LES SOURCES DE L'ÉNERGIE CALORIFIQUE.

EXPOSÉ. — DIVISION

Le problème dont nous nous proposons de poursuivre l'étude, sous ce titre très général, LES SOURCES DE L'ÉNERGIE CALORIFIQUE, est l'utilisation méthodique pour le chauffage industriel de toutes les sources d'énergie que la nature ou l'industrie mettent à notre disposition sous une forme pratiquement utilisable.

La seule source à laquelle il ait été longtemps puisé, pour obtenir les calories nécessaires à la plupart des opérations industrielles, est l'énergie ou chaleur latente contenue dans les combustibles, d'abord les combustibles végétaux, puis, depuis deux siècles, la houille.

Mais l'énergie utilisable accumulée à la surface de la terre ou recueillie par elle par l'échauffement solaire s'offre sous les formes multiples de la *puissance motrice* : travail, force vive, électricité, réactions chimiques ; elle est fournie par les chutes d'eau, par le vent, par les courants électriques, par les piles électriques, et peut sous toutes ces formes être transformée en chaleur. On peut même dire, en général, que l'énergie thermique, la calorie, est la dernière étape vers laquelle tendent le plus naturellement les diverses formes d'énergie.

Aussi, depuis une vingtaine d'années, un nouveau mode de chauffage est-il entré dans la pratique, prenant chaque jour plus d'importance : le chauffage électrique. L'énergie mécanique, abondamment fournie par la houille blanche, transformée en calories par l'électricité, est devenue la pourvoyeuse de toute une industrie nouvelle créée au voisinage des chutes d'eau.

D'autre part, certaines énergies chimiques ont été mises en œuvre, pour venir en aide, dans les opérations qui exigent une température élevée, à la chaleur précédemment fournie par les combustibles et parfois la remplacer complètement : le traitement de la fonte en cornues Bessemer, le grillage des minerais dans les fours Perret, et

plus récemment la fabrication de la cyanamide, sont des exemples d'utilisation d'énergie chimique pour obtenir des calories non empruntées à des combustibles.

Il n'est pas jusqu'à l'énergie cinétique, jusqu'à l'énergie élastique emmagasinées dans l'air soufflé sous pression dans les gazogènes et hauts fourneaux, qui n'interviennent plus ou moins dans les problèmes de chauffage.

Aussi bien ne devons-nous, *a priori*, écarter de notre étude aucune des espèces d'énergie, sauf à donner à chacune d'elles la place que l'état actuel de l'industrie comporte :

D'ailleurs, il arrive et arrivera de plus en plus avec le progrès industriel, que deux ou plusieurs sources d'énergie se combinent et s'ajoutent pour atteindre un résultat calorifique donné : c'est ainsi que, dans le Bessemer, l'énergie thermique fournie au convertisseur par la fonte en fusion s'ajoute à l'énergie chimique dégagée par l'oxydation du phosphore ou du silicium, à la combustion du carbone de la fonte et à l'énergie cinétique ou élastique apportée par la soufflerie ; dans la fixation de l'azote sur le carbure de calcium, l'énergie fournie sous forme de calories par un conducteur électrique porté au rouge s'ajoute à la chaleur de formation de la cyanamide ; dans l'électrochimie, il y a constamment addition et combinaison d'électricité, de combustion et d'énergie chimique. De là la nécessité, pour bien raisonner de ces opérations industrielles, de connaître l'importance relative de ces différents facteurs du résultat final, d'en chiffrer les équivalences et de pouvoir ramener à une même unité, en général la calorie, toutes les énergies disponibles, pour les additionner, les soustraire et établir les rapports et *les rendements*, critérium de la valeur d'un procédé industriel.

La loi fondamentale qui régit invariablement toutes les manifestations de l'énergie est le principe de la conservation de l'énergie qui n'est autre chose que l'affirmation de l'impossibilité de créer de l'énergie, de la puissance motrice.

Cette loi, résultat d'une expérience jamais contredite, et le principe de l'équivalence des différentes formes de l'énergie qui en est la réciproque, bases de la thermodynamique, ont pour conséquence pratique, en se plaçant au point de vue du problème industriel qui nous intéresse, de préciser le rôle de l'ingénieur et de le ramener à celui de metteur en œuvre d'une richesse qu'il n'a pas créée, qu'il

ne peut jamais créer et qu'il doit dépenser avec la plus grande économie.

Pour arriver à cette économie, le premier soin de l'ingénieur doit être de faire son inventaire, c'est-à-dire d'évaluer avec la même unité, *la calorie, l'énergie* mise à sa disposition.

Cet inventaire n'est pas toujours facile, et pour ne prendre que le cas le plus simple, celui des fours ordinaires chauffés par combustible, on verra que le pouvoir calorifique tel qu'il est fourni par l'obus calorimétrique, donne un chiffre de calories correspondant à une combustion à volume constant accompagnée d'une condensation de l'eau produite, c'est-à-dire à des conditions différentes de celles des combustions dans les fours, — d'où la nécessité d'une double correction dans l'inventaire initial de la chaleur disponible.

Lorsque plusieurs sources d'énergie sont en jeu, par exemple dans le convertisseur Bessemer, l'évaluation de l'énergie totale disponible est plus difficile encore, car l'énergie chimique est fonction de la température et la chaleur de réaction à une température donnée ne peut se déterminer que si l'on connaît les chaleurs spécifiques ou d'échauffement des composants et des composés, des *phases* de la réaction.

Mais quelque difficile que soit cet inventaire initial, on ne devra jamais s'y rebuter, et la plus grande rigueur doit présider aux mesures, parce que cette énergie totale mise en œuvre est la seule base fixe, le terme de comparaison auquel tout doit être rapporté, chaleur utilisée et chaleur perdue; c'est le point de départ de cette comptabilité des calories que l'ingénieur doit bien connaître.

La loi d'équivalence des énergies comporte quelques restrictions, en ce sens qu'il n'est pas toujours possible de transformer la totalité d'une énergie donnée en une puissance motrice d'espèce déterminée. C'est ainsi que dans la pile, l'énergie chimique ne donne pas en général un courant électrique exprimé en joules équivalent aux calories que la thermochimie indique; en général dans les combinaisons chimiques et même dans les combustions, il est impossible de transformer en travail la totalité des calories; dans le cas même de la combustion du carbone, un calcul de H. Le Chatelier a démontré

¹ Cette rigueur scrupuleuse dans l'évaluation de l'énergie disponible est d'autant plus nécessaire que fréquemment dans le bilan d'une opération industrielle, la mesure de l'un des éléments du bilan manque ou est impossible : tantôt c'est la perte par rayonnement d'un four qui est inconnue, tantôt c'est le dosage de l'eau dans les fumées ou les gaz qui manque. On calculera cet élément par différence; mais cela n'est possible sans trop d'erreur que si l'énergie totale est parfaitement connue.

que le déchet inévitable de cette transformation, chaleur, travail, atteignait 7 p. 100. Cette chaleur non transformable, pratiquement, en puissance motrice, — chaleur compensée — intervient même dans les lois générales de la chimie pour modifier et corriger le principe du *travail maximum* de Berthelot.

Mais lorsque le dernier terme de la transformation est un dégagement de la chaleur, une production de calories, l'équivalence peut toujours être complète; toute énergie peut se transformer en calories, soit directement par une seule machine, soit indirectement en faisant usage de deux machines successives : la seule difficulté consiste à avoir ces calories sous une forme, ou à un potentiel, qui en permette l'utilisation, ou à trouver des moyens de récupération qui empêchent qu'elles ne se perdent.

Dans ces conditions, le problème que nous comptons traiter dans ce volume peut s'énoncer comme suit : *des moyens les plus avantageux de transformer l'énergie sous toutes ses formes, chimique, thermique, électrique, mécanique, etc., fournies isolément ou combinées, dans un laboratoire de four, en calories, utilisables pour une opération industrielle donnée.*

La première partie de cet énoncé assignant à notre problème un but unique, *la production de calories à l'aide de toutes les formes de l'énergie*, semblerait à première vue nous dicter le plan de notre ouvrage, et il pourrait paraître logique de prendre l'une après l'autre les six formes de l'énergie en étudiant les méthodes industrielles de transformation de chacune d'elles en chaleur sensible. C'est aussi la marche que nous suivrons dans l'exposé que nous ferons, au premier chapitre, de toutes les données scientifiques indispensables à l'étude du chauffage.

Mais, la production même de la chaleur, n'est qu'une partie, souvent la plus facile, de la solution : son utilisation, son adaptation à une industrie donnée, l'assouplissement de l'énergie thermique aux divers cas et potentiels auxquels elle doit être employée présentent un intérêt et des difficultés beaucoup plus grandes; c'est donc la seconde partie du problème qui occupera la grande partie de notre étude des sources de l'énergie calorifique, abordant l'une après l'autre les difficultés pratiques, les aspects industriels du problème.

Il importe, pour diriger cette étude et en fixer le plan, de définir exactement le chauffage industriel.

DÉFINITION DU CHAUFFAGE INDUSTRIEL

Le chauffage industriel a pour but de *réaliser une température plus ou moins élevée, avec économie, dans une enceinte de dimensions quelconques, en faisant usage d'un combustible donné, pour effectuer une opération ou réaction chimique quelconque.*

Haute température, économie, combustibles divers, dimensions quelconques du four ou laboratoire, opération industrielle quelconque; tels sont les cinq variables du problème, les objectifs que présente l'industrie dans son infinie variété et que l'ingénieur doit tous envisager s'il veut comprendre les fours, les bien conduire, remédier à leurs défauts, enfin apporter à chaque cas particulier la solution rationnelle. Chacun de ces aspects de la question correspond à autant de groupes de connaissances avec lesquelles l'ingénieur doit être également familiarisé, mais qu'il doit soigneusement distinguer s'il ne veut tomber dans la confusion ou même tomber dans les erreurs qui ont si souvent nui au progrès des fours.

Lorsque vers le milieu du siècle dernier, l'illustre Frédéric Siemens, le génial promoteur du chauffage au gaz à régénération, fit son premier four à acier sur sole, la solution qu'il donna fut si parfaite, que d'un seul coup elle réalisa une économie de plus de moitié du combustible et 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, en employant des combustibles autrefois inutilisés en métallurgie comme l'antracite et la sciure de bois. La solution était complète, et en relisant les publications de F. Siemens, on ne peut se défendre d'une admiration mêlée d'étonnement en voyant avec quelle ampleur l'inventeur a résolu tous les progrès dans une solution unique et embrassé toute la question en une fois, avant même que les connaissances scientifiques permettant d'en raisonner fussent connues.

Depuis cette découverte du four à acier Siemens, il semble que le progrès du chauffage se soit traîné plus lentement et même qu'une certaine confusion dans les idées ait été la conséquence de la réunion de tous les éléments du problème dans une solution unique. Les ingénieurs ou constructeurs de fours en vinrent à penser que les

différentes questions étaient liées, que certains éléments du problème, température et récupération, grandes dimensions et chauffage au gaz, étaient nécessairement fonctions l'un de l'autre; l'influence de la nature du corps à chauffer a souvent même été perdue de vue, à la suite du succès de Siemens en verrerie.

Rien n'est plus loin de la vérité et plus dangereux que cette confusion des idées; il suffit, pour s'en convaincre, de constater que l'on peut obtenir des températures très élevées sans récupération, par un chauffage indépendant de l'air de combustion, comme cela s'est longtemps pratiqué dans les hauts fourneaux, ou par l'emploi d'oxygène comme dans la soudure autogène; de même on arrive en céramique à chauffer de très grands fours sans combustibles gazeux; il se rencontre même des cas, aux basses températures, où l'économie ne doit pas être cherchée dans la récupération et où le chauffage au gaz peut être onéreux.

Il est donc très nécessaire, si l'on veut trouver la meilleure solution du problème de chauffage, de distinguer les cinq variables du problème et de sérier les questions en donnant à chacune son importance relative dans chaque cas et signalant en tête de chaque étude la difficulté principale, température, économie, emploi d'un combustible inférieur, etc.

L'étude des températures développées dans les fours a pour base scientifique la connaissance des chaleurs de combustion et des chaleurs d'échauffement due aux travaux de Berthelot, Mallard et Le Chatelier et pour moyen de contrôle la pyrométrie.

L'obtention des hautes températures a pour principal moyen d'action le chauffage préalable de l'air de combustion, ou l'emploi de l'oxygène sans azote comme comburant, comme cela se pratique dans l'aluminothermie, ou encore l'utilisation de l'énergie dans le four électrique.

L'économie dans les fours a pour moyen d'action l'utilisation des chaleurs perdues, surtout celles emportées par les fumées et comme base scientifique la théorie générale de la récupération.

L'emploi de combustibles de toute nature oblige quiconque veut faire du chauffage avec les sources d'énergie dont il dispose à pratiquer les mesures des pouvoirs calorifiques et toute la chimie des combustibles: son principal moyen d'action est le gazogène dont la conduite raisonnée est liée à la connaissance des lois générales des équilibres des gaz de combustion.

Enfin, la variété des opérations industrielles présente des cas tel-

lement divers, que nous serons obligé de limiter notre examen à quelques cas en application de nos lois scientifiques, en choisissant des industries se différenciant notamment par la température du régime.

Ces différents points de vue, ces divisions si nettes du problème seront aussi les divisions de notre ouvrage.

Notre premier chapitre sera l'exposé des principes fondamentaux de l'énergétique et de la thermodynamique, c'est-à-dire des lois physiques et chimiques qui interviennent dans les combustions et échanges de calories : nous suivrons dans cet exposé l'ordre logique des six formes d'énergie qui seront examinées successivement. Ensuite nous y examinerons les conséquences des lois d'équilibre chimique sur la combustion et notamment les lois générales de la gazéification : ce sera l'exposé des lois fondamentales régissant les gazogènes.

Le second chapitre traitera des températures, températures de régime et températures de combustion et des moyens de les mesurer.

Le troisième chapitre étudiera l'économie dans les fours et donnera la théorie générale de la récupération des chaleurs perdues.

Nous aborderons dans un chapitre spécial l'utilisation de l'énergie électrique, le four électrique qui réalise à la fois la haute température et théoriquement l'économie par suite de la concentration des calories dans un laboratoire de dimensions réduites au minimum.

Enfin nous terminerons par quelques applications pratiques de notre théorie à des problèmes industriels actuels.

CHAPITRE PREMIER

DONNÉES SCIENTIFIQUES EXPÉRIMENTALES OU THÉORIQUES NÉCESSAIRES A L'ÉTUDE DU CHAUFFAGE INDUSTRIEL A L'AIDE DES DIVERSES SOURCES D'ÉNERGIE

A. — ÉTUDE DES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE, LEURS VALEURS THERMIQUES, LEURS ÉQUIVALENCES. CHOIX DES UNITÉS

L'unité fondamentale, quelle que soit la source d'énergie à laquelle nous puisions, sera pour nous la *calorie*.

La calorie (grande calorie) est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'un kilogramme d'eau à 15°.

La température de 15° est celle à laquelle ont été mesurées expérimentalement la plupart des chaleurs de combustion et des données de la thermo-chimie; c'est celle à laquelle on opère généralement dans le calorimètre; et comme la chaleur spécifique de l'eau n'est pas rigoureusement la même à toute température, même entre 0 et 100°, c'est aussi la température qu'il convient d'adopter pour la définition de la calorie.

Il est intéressant, étant donné que la principale source de calories est le carbone, au moyen duquel une partie de la chaleur solaire s'est accumulée depuis des siècles sous forme de houille à la surface de la terre, de rapprocher la calorie de la chaleur latente du carbone et par suite du poids de carbone correspondant à la calorie.

¹ Bien que, dans le cours de cet ouvrage, la calorie ainsi définie soit l'unité à laquelle nous rapporterons tous les calculs, nous croyons devoir indiquer la correspondance de notre unité fondamentale avec le système d'unités C. G. S., c'est-à-dire son rapport avec l'erg, unité métrique du travail.

La calorie correspondant à 425 kilogrammètres, d'après la loi d'équivalence mécanique de la chaleur, et le kilogrammètre étant égal à $98,1 \times 10^6$ ergs, on en déduit la relation :

$$\begin{aligned} 1 \text{ calorie} &= 425 \times 98,1 \times 10^6 \text{ ergs} \\ &= 415,925 \times 10^6 \text{ ergs.} \end{aligned}$$

On sait que l'unité de carbone, la molécule (12 grammes), dégage en brûlant dans l'oxygène 97,6 calories : la calorie correspond donc à $\frac{12}{97,6} = 0,124$: on en déduit que la calorie est la quantité de chaleur dégagée par 0,124 gr. de carbone amorphe brûlant à l'air à pression constante ; on en déduit encore que pour porter un litre d'eau à l'ébullition (100°) sans la vaporiser, il faut théoriquement 12,4 gr. de carbone, soit un peu plus d'une molécule.

Notre unité thermique étant définie, examinons ses rapports ou coefficients de réduction avec les autres unités et les lois fondamentales qui président à la transformation en calories des différentes sortes d'énergie.

§ 1. — ÉNERGIE CALORIFIQUE DÉGAGÉE PAR LES COMBUSTIONS CHALEURS DE COMBUSTION

L'énergie calorifique dégagée par l'oxydation des combustibles, n'est qu'une des manifestations de l'énergie chimique : nous lui consacrons un chapitre spécial immédiatement suivi de l'étude de l'énergie thermique ou chaleur sensible, parce que, dans les fours utilisant les combustibles, ces deux chaleurs, sensible et latente, sont si étroitement liées, si interchangeableables, souvent par des équilibres réversibles, qu'il serait impossible de les disjoindre ; nous ne laisserons dans la classe d'énergie chimique que les combinaisons autres que l'oxydation des combustibles et les réactions de voie humide dans les piles ou accumulateurs.

Ainsi entendue, l'étude de l'utilisation industrielle de l'énergie calorifique qui n'est autre que l'étude de tous les foyers, fours ou appareils de chauffage alimentés par des combustibles, carburés ou hydrogénés, dont l'oxydation dégage de la chaleur est basée sur deux groupes de connaissances : les *chaleurs de combustion* dues aux travaux de Berthelot et Vieille qui ont employé pour ces mesures la bombe calorimétrique et les *chaleurs d'échauffement* dues à Mallard et Le Chatelier qui les ont déterminées accessoirement au cours de leurs travaux sur les explosifs, à la Commission du grisou.

CHALEURS DE COMBUSTION ET POUVOIRS CALORIFIQUES

On appelle *chaleur de combustion* à pression constante d'un corps simple ou d'un composé chimique défini *le nombre de calories dégagées par la combinaison avec l'oxygène d'un nombre de grammes de*

ce corps égal à son poids moléculaire, le corps combustible et l'oxygène étant pris à la température initiale de 15°.

Lorsque le corps est gazeux, ou peut prendre l'état gazeux, le poids moléculaire est égal au poids de ce corps qui à l'état de gaz occupe le même volume que deux grammes d'hydrogène à 0° et 76 centimètres, soit 22,32 litres.

L'emploi du poids moléculaire, du volume moléculaire, de la chaleur de combustion moléculaire, de la *molécule*, en un mot, comme unité de poids, de volume et de pouvoir calorifique que nous avons adoptée dans toutes les études de chauffage et de combustion est de beaucoup plus commode que l'usage de toutes autres unités, même les unités métriques, kilogramme et mètre cube, et nous ne saurions trop recommander de se familiariser avec ces unités qui sont celles de la thermo-dynamique.

Sans invoquer l'autorité de Berthelot qui, dans ses travaux de thermo-chimie expérimentale, a toujours rapporté les résultats de ses expériences à l'unité de volume moléculaire, 22,32 l. ou l'autorité de Le Chatelier qui, dans son cours à l'École des Mines¹ a conservé dans l'étude pratique du chauffage l'unité moléculaire, nous ferons remarquer : 1° que dans les phénomènes de combustion une unité de volume est préférable à une unité de poids, parce que les produits de combustion sont toujours des mélanges de gaz, dont les compositions sont données en volumes par l'analyse chimique ; 2° que les formules chimiques de combustion exprimées en volumes sont toujours plus simples numériquement, en raison de la loi de Gay-Lussac, que les mêmes formules traduites en poids ; 3° qu'enfin la molécule (22,32 l.), choisie de préférence à tout autre volume unitaire, permet de traduire immédiatement les volumes relatifs des corps gazeux en présence, en poids absolus, au moyen des poids moléculaires. — Ces poids moléculaires : ($H^2 = 2$, $C = 12$, $CO = 28$, etc.) permettent d'ailleurs de rapporter les combustions à un même volume d'air, de trouver immédiatement ce qu'on pourrait appeler les *équivalents combustibles* des corps à brûler.

L'unité moléculaire étant acceptée, lorsque des mélanges gazeux sont définis par une analyse centésimale en volumes il suffit de supposer que le volume de gaz analysé est 2232 litres pour que les chiffres de l'analyse expriment des molécules. Quand au contraire la composition d'un mélange est donnée en grammes il suffira de

¹ C'est à ce cours que nous avons emprunté la plus grande partie des données scientifiques qui suivent.

diviser par les poids moléculaires des éléments pour avoir la composition en molécules. Le carbone étant généralement exprimé en volume dans les gaz et en poids dans les combustibles servira de commune mesure, de terme de comparaison, en fin de calcul, entre les volumes et les poids et permettra d'établir les bilans avec le minimum de calculs.

Les chaleurs de combustion les plus usuelles sont réunies dans le tableau ci-dessous :

Tableau des chaleurs de combustion des principaux corps simples ou composés définis se rencontrant dans les combustions².

NOM du corps brûlé.	FORMULE moléculaire.	POIDS de la molécule.	RÉACTION de combustion ¹ .	CALORIES dégagées à pression constante.
		22,32 l. grammes.		
Hydrogène.	H ²	2	H ² + O = H ² O	58,2
Carbone	C	12	C + O = CO	29,4
—	»	12	C + O ² = CO ²	97,6
Oxyde de carbone.	CO	28	CO + O = CO ²	68,2
Méthane (formène).	CH ⁴	16	CH ⁴ + 4 O = CO ² + 2H ² O	195,2
Acétylène	C ² H ²	26	C ² H ² + 5 O = 2 CO ² + H ² O	304,9
Ethylène	C ² H ⁴	28	C ² H ⁴ + 6 O = 2 CO ² + 2 H ² O	319,6
Soufre	S	32	S + O ² = SO ²	69,2
—	S	32	S + O ³ = SO ³	91,8

Les chaleurs de combustion dont nous avons indiqué ci-dessus les valeurs numériques sont à pression constante, et supposent, pour le cas des composés hydrogénés, que l'eau reste à l'état de vapeur. Ce sont exactement les conditions de la pratique industrielle : toutes les combustions se font à la pression atmosphérique ou à une pression tellement voisine que la dépense d'énergie élastique qui peut en résulter est insignifiante : de même la vapeur d'eau est toujours emportée par les fumées sans se condenser dans les fours³. Ce sont donc les chiffres qui donnent la valeur absolue de

¹ L'eau est supposée exister à l'état de vapeur.

² Les données expérimentales de thermochimie se trouvent dans le *Traité de Mécanique chimique* de BERTHELOT, dans certaines éditions de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, dans le *Memento du Chimiste* de HALLER et Ch. GIRARD, etc.

³ Sauf dans les appareils à triple effet.

l'énergie calorifique disponible en partant de l'air et du combustible froids à 15°.

Mais il convient de remarquer que ce ne sont pas les chiffres donnés directement par la bombe calorimétrique, dans laquelle la combustion se fait à volume constant et où l'eau est condensée sur les parois de la bombe après la combustion.

Nos chiffres sont le résultat d'une double correction l'une positive, pour passer de la combustion à volume constant à la combustion à pression constante, l'autre négative, pour tenir compte de la vaporisation de l'eau qui absorbe une assez grande quantité de chaleur dans le cas des combustibles très hydrocarbonés.

Nous reviendrons sur ces corrections à propos de la détermination des pouvoirs calorifiques usuels. Nous avons préféré donner ici en dehors de toute discussion les valeurs usuelles et absolues des chaleurs de combustion.

Combustion dans l'air atmosphérique. — Une seule des conditions de la pratique n'a pas encore été prise en considération : c'est l'influence de l'air et de son azote, sur les phénomènes de combustion.

Il est très rare que l'on se serve d'oxygène pur pour les combustions ; ce n'est que depuis que la production de l'air liquide s'est généralisée, que ce comburant, devenu un sous-produit de la fabrication de l'azote, a pris place dans le chauffage avec la soudure autogène et les diverses applications du chalumeau oxy-acétylénique.

Dans la majorité des cas et dans l'universalité des fours, le seul comburant est l'air atmosphérique, ce qui se traduit par ce fait que l'oxygène servant ou ayant servi à la combustion est toujours associé à un volume constant d'azote.

Inversement, dans tout mélange gazeux constitué par des produits de combustion complète ou incomplète, la quantité d'oxygène ayant servi ou devant servir à la combustion pourra se déduire de la quantité d'azote ; que cet oxygène soit libre ou combiné au carbone.

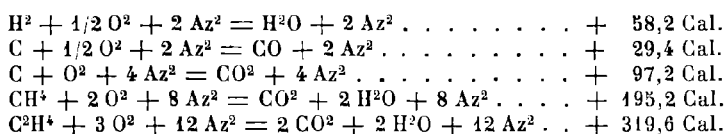
On sait que la composition en volume de l'air est 20,80 et 79,2 Az, soit environ 4 volumes d'azote pour un volume d'oxygène. Dans la pratique des calculs de combustion, nous admettrons que le rapport est effectivement $1/3$ et $4/3$: cette simplification facilite beaucoup les calculs de combustion et de bilans de fours.

Elle est d'ailleurs d'autant plus légitime, dans la pratique, que

l'air atmosphérique toujours humide contient presque **exactement** 20 p. 100 O et 80 p. 100 Az + H²O (gaz inertes pour la combustion).

Dans cette hypothèse, les formules théoriques de combustion deviennent :

Tableau des formules de combustion dans l'air atmosphérique du carbone, de l'hydrogène et de leurs composés usuels.



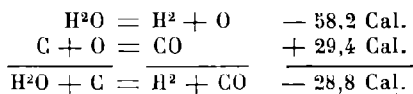
Les réactions sont à pression constante, l'eau restant à l'état de vapeur.

Dans toutes ces formules, le rapport de l'azote à l'oxygène dans les produits de combustion est 4 : 1.

Il n'y a d'exception à cette règle que lorsque la combustion se fait en présence de vapeur d'eau et en deux temps, comme dans les fours à gaz mixte.

Combustion en présence de la vapeur d'eau. Rôle de la vapeur d'eau dans les fours. — La vapeur d'eau se rencontre fréquemment dans les fours où son rôle peut être extrêmement utile par suite de sa décomposition en présence du carbone qui donne un mélange de deux gaz combustibles H + CO.

La chaleur de décomposition de l'eau en présence du charbon est négative :



On voit par ce chiffre que le premier effet de la vapeur d'eau est un abaissement de la température du gaz sortant du gazogène. A cet abaissement correspond un accroissement de chaleur latente ou enrichissement du gaz en calories qui se retrouveront un peu plus loin dans le laboratoire du four.

Le rôle de la vapeur d'eau que nous étudierons en détail dans les fours à gaz mixtes apparaît déjà clairement et peut se définir comme suit.

L'eau n'étant pas un combustible, n'apporte dans un four aucune quantité de chaleur, elle en absorbe même un peu, par sa chaleur latente de vaporisation et par sa chaleur d'échauffement jusqu'à la température des fumées, qui viennent toujours grever le bilan d'un four.

Lorsque l'eau n'est pas décomposée dans un four, par exemple dans la combustion sur grille d'un combustible très humide, son rôle est toujours inutile et négatif; elle ralentit la combustion et diminue le rendement⁴.

Lorsqu'elle est décomposée par le charbon, par exemple si on la force à traverser la couche de combustible incandescent, elle se transforme en gaz combustibles, en absorbant des calories qui peuvent se retrouver presque intégralement, un peu plus loin dans le four. *L'eau est un agent de déplacement et de transport de chaleur.*

A cet égard, elle rend de grands services permettant d'accumuler la chaleur dans le laboratoire, au point où elle est le plus nécessaire.

Chaleurs de combustion des produits hydrocarbonés, hydrocarbures, alcools, etc. — En dehors des composés dont nous avons donné la nomenclature, on peut rencontrer en industrie des composés de l'hydrogène et du carbone, de toute nature, par exemple dans les goudrons et huiles de pétrole. Il est utile de pouvoir déterminer la chaleur de combustion de ces hydrocarbures, c'est-à-dire l'énergie calorifique disponible.

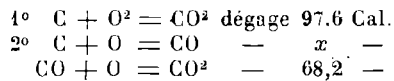
On peut déterminer, par le calcul, le pouvoir calorifique lorsque l'on connaît la chaleur de formation de l'hydrocarbure ($C^n + H^m = x$ calories) que les tableaux de thermochimie dus à Berthelot donnent pour la plupart des combinaisons chimiques connues. On se base pour cela sur le principe de thermochimie connu sous le nom de *Principe de l'état initial et de l'état final*, qui s'énonce comme suit :

⁴ La pratique si fréquemment usitée par les chauffeurs de chaudières ou les tiseurs de fours consistant à arroser le charbon avant de le charger sur la grille peut se justifier par des considérations secondaires; elle empêchera par exemple la volatilisation des poussières qui encrassent les tubes de chaudière ou enfument un four de verrerie; elle s'opposera encore à une trop brusque volatilisation des hydrocarbures qui donnerait un trop violent et inutile coup de feu ou qui par suite d'insuffisance d'air provoquée par cette subite production de gaz produirait un dépôt de suie ou de goudrons; elle permettra au chauffeur négligent d'espacer ses charges. Dans la plupart des cas, l'arrosage préalable du combustible est inutile, cause une perte de calories, augmente en fin de compte la consommation de charbon, sans profit.

« La quantité de chaleur absorbée ou dégagée par un système, pour passer d'un état à un autre, ne dépend que de l'état initial et de l'état final ; elle est la même quelles que soient la nature et la suite des états intermédiaires. »

Le principe de l'état initial et de l'état final a permis de calculer la chaleur de formation de CO qu'il est impossible d'obtenir seul dans la bombe calorimétrique : donnons ce calcul comme exemple.

On sait que la combustion du carbone peut se faire de deux façons différentes :

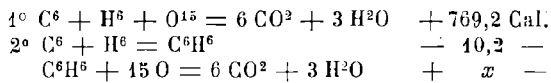


Comme la chaleur dégagée est la même dans les deux cas, on peut de ces deux chiffres déduire la chaleur de formation de CO :

$$x = 97,6 - 68,2 = 29,4 \text{ Cal.}$$

Cherchons par la même méthode le pouvoir calorifique de la vapeur de benzine C^6H^6 .

La combinaison du carbone de l'hydrogène et de l'oxygène peut se faire de deux façons différentes :



D'où l'équation

$$\begin{array}{l} 769,2 = - 10,2 + x. \\ x = 779,4. \end{array}$$

Ce chiffre diffère de quelques unités de celui que donnent les tables de thermochimie parce que la chaleur de combustion que nous cherchons est toujours à pression constante tandis que les tables donnent les chiffres de la bombe calorimétrique, c'est-à-dire à volume constant.

Chaleur de combustion ou pouvoir calorifique des combustibles industriels. — Les combustibles industriels se présentent sous forme gazeuse, liquide ou solide. Dans le premier cas, le pouvoir calorifique est donné généralement avec une exactitude complète par la seule analyse du gaz : les gaz de gazogène ne contiennent guère que du CO, de l'H et du C_2H_2 , et la proportion de carbures de la série éthylénique y est si faible que l'on peut avec exactitude assimiler tous ces carbures à l'éthylène. Le pouvoir calorifique est alors la somme

des pouvoirs calorifiques des éléments combustibles, et le pouvoir calorifique au mètre cube est le quotient de ce chiffre par 2232.

Dans le cas des combustibles liquides, il arrive encore que l'analyse chimique permette de fixer le pouvoir calorifique : le titre d'une benzine, le degré d'un alcool et l'analyse d'un pétrole permettent, au moyen des chaleurs de combustion des composés chimiques donnés par les tableaux de thermochimie, de calculer la chaleur totale disponible dans un combustible. Encore faut-il tenir compte du fait que les tables donnent souvent la chaleur de combustion à volume constant et non à pression constante et qu'il n'y est pas toujours indiqué si l'eau est condensée ou non. Aussi est-il en général préférable de recourir à la bombe calorimétrique pour déterminer exactement le pouvoir calorifique.

En ce qui concerne les combustibles solides, il existe quelques lois empiriques (loi de Dulong, loi de Goutal, loi de Mahler) permettant de calculer le pouvoir calorifique en fonction de l'analyse chimique, ou simplement en prenant pour point de départ l'analyse immédiate, cendres, carbone fixe, matières volatiles. Les premières présentent au point de vue de leur application industrielle un inconvénient, celui d'exiger le dosage du carbone, de l'hydrogène et de l'azote, c'est-à-dire l'analyse organique complète, qui n'est pas sans difficulté. Les secondes, beaucoup plus commodes, s'appuient sur les données faciles à obtenir, le carbone fixe et les matières volatiles, résultant des essais ordinaires effectués sur tous les combustibles.

Nous ne rappelons donc que pour mémoire la formule de Dulong

$$P = 80,8 C + 344,6 \left(H - \frac{O}{8} \right)$$

dans laquelle C s'applique au carbone total, H et O représentent les teneurs pour 100 du charbon en hydrogène et oxygène.

La formule de Goutal additionne le pouvoir calorifique du carbone fixe (8 200 calories) avec le pouvoir calorifique des matières volatiles, lequel a été reconnu variable suivant la nature des houilles. Goutal, par un très grand nombre d'expériences sur les houilles effectuées à la bombe Mahler, a pu déterminer la loi de variation du pouvoir calorifique des matières volatiles. Dans ces conditions, la formule empirique de Goutal est :

$$P = 82 C + a V,$$

dans laquelle C représente la teneur pour 100 en carbone fixe, V la

teneur pour 100 en matières volatiles, a le pouvoir calorifique variable fonction de la teneur V' en matières volatiles du combustible supposé pur, c'est-à-dire sans cendres et $V' = \frac{100 V}{C + V}$.

Les valeurs de a ont été déterminées pour des combustibles tenant jusqu'à 40 p. 100 de matières volatiles, et sont figurées sur la courbe ci-jointe (fig. 1).

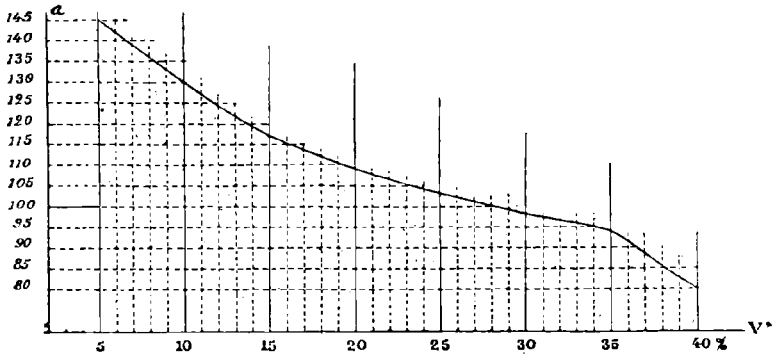


Fig. 1. — Graphique donnant en fonction des matières volatiles, la valeur du coefficient a dans la formule de Goutal.

De cette courbe on déduit le barème suivant :

Matières volatiles p. 100.	5	10	15	20	25	30	35	40
a	145	130	117	109	103	98	94	80

Et ces valeurs de a réparties dans la formule donnent un tableau du pouvoir calorifique des houilles en fonction de leurs matières volatiles :

Matières volatiles.	40	35	30	25	20	15	10	5
Pouvoirs calorifiques.	8 515	8 680	8 725	8 740	8 725	8 680	8 620	8 120

d'où l'on déduit la courbe ci-dessous (fig. 2) :

Cette formule et ces courbes sont très intéressantes, toutes les fois que l'on ne dispose que de moyens rudimentaires pour étudier une houille : il suffit en effet pour connaître avec une approximation de 1 à 2 p. 100 la valeur d'un combustible de faire les essais suivants : Le dosage de l'humidité se fait sur le charbon en poudre desséché à l'étuve à 115° pendant une heure. Les cendres s'obtiennent au moufle par une combustion lente et graduelle. Quant aux matières volatiles, on les apprécie en chauffant brusquement sur un brûleur Bunsen, 5 grammes de charbon dans un creuset fermé de 30 centimètres cubes.

Ces lois et formules peuvent incontestablement rendre des services, mais en en faisant usage, on n'obtiendra jamais que des valeurs approchées, et ce que nous voulons avoir comme base de toute étude de chauffage, c'est un chiffre de calories, une mesure de l'énergie exacts à quelques unités près.

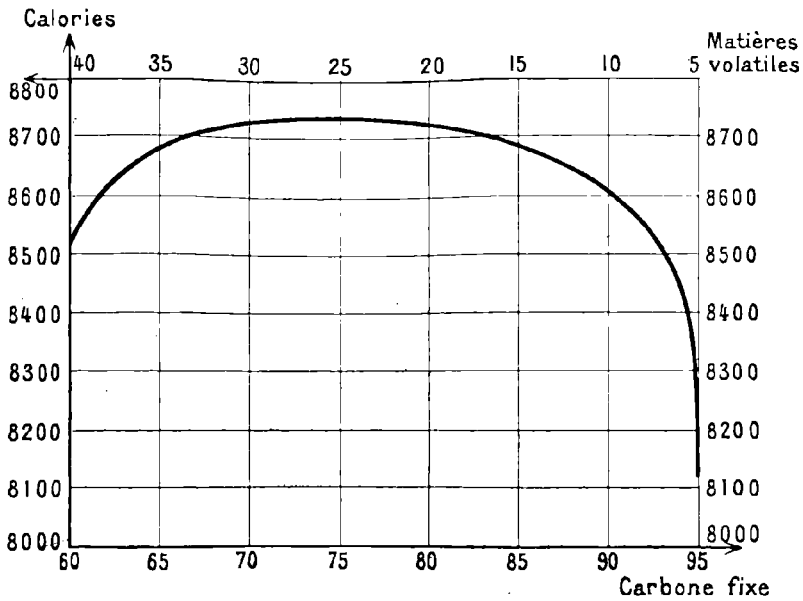


Fig. 2. — Courbe empirique de Goutal donnant les pouvoirs calorifiques en fonction de V (matières volatiles).

Cette détermination précise rendue possible par Berthelot à l'aide de la bombe calorimétrique, a été rendue pratique et industrielle par les travaux de Mahler. Nous n'avons pas à relater ici ces travaux, ni la méthode si minutieusement décrite par son auteur dans la *Contribution à l'étude des combustibles*¹.

Mais nous pensons que tout ingénieur s'occupant de combustions et de chauffage doit connaître le maniement de l'obus calorimétrique, ou se mettre en relations avec un des nombreux laboratoires qui fournissent couramment les mesures de pouvoirs calorifiques avec une approximation de 1/2 à 1/4 p. 100, souvent même du millième.

¹ Publiée dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement*, le travail de MAHLER a été réédité chez Baudry et C^{ie} (Ch. Béranger), puis reproduit dans tous les ouvrages traitant de la combustion et des combustibles. On le trouvera très complètement décrit dans le *Traité de chimie* de Ad. CARNOT. Voir également le tome II de la présente Encyclopédie, p. 276.

La détermination du pouvoir calorifique à l'aide de l'obus Mahler donne, après toutes corrections d'analyse expliquées dans la « Contribution à l'étude des combustibles » un nombre de calories représentant la chaleur dégagée par une combustion à volume constant, et en condensant l'eau : c'est moins et plus que l'énergie calorifique réellement utilisée dans un four. Il est donc nécessaire de faire une double correction.

Ces corrections se font par deux formules très simples dérivées du principe de la Conservation de l'Énergie que nous avons déjà énoncé. Nous empruntons au Cours de H. Le Chatelier ces deux formules dont la démonstration nous entraînerait au delà de notre programme de science appliquée.

1° *Correction pour combustion à pression constante.* — Le principe de la Conservation de l'Énergie permet de calculer la chaleur de combustion à pression constante au moyen de la chaleur de combustion à volume constant déterminée par l'obus calorimétrique, en conduisant à la formule¹ :

$$L = Q + 0,54 n$$

dans laquelle Q représente le nombre de calories mesurées et calculées par l'expérience calorimétrique, c'est-à-dire à volume constant, L représente le pouvoir calorifique cherché, à pression constante et n le nombre de volumes moléculaires dont le mélange a diminué, l'eau étant supposée rester à l'état liquide.

Voici quelques exemples des résultats de ce calcul pour les combustibles de notre tableau.

CORPS BRULÉS en molécules.	CONTRACTION	CHALEURS DE COMBUSTION	
		A volume constant.	A pression constante.
H ²	1,5 vol. mol.	68,15	68,96
CO	0,5 —	67,93	68,20
CH ⁴	2 —	212,40	213,48
C ² H ²	1,5 —	308,25	309,06

On voit par ces exemples que la différence entre les deux chaleurs de combustion est très faible. Elle est nulle pour le carbone brûlant pour acide carbonique, puisque dans ce cas, il n'y a pas

¹ *Introduction à l'étude de la Metallurgie*, pages 57 et suivantes (Dunod et Pinat).

de contraction ; elle est la plus forte pour l'hydrogène, sans dépasser 1 p. 100.

Lorsqu'on a affaire à des combustibles naturels, il n'y a pas à tenir compte de cette correction pour les combustibles carbonisés, charbon de bois ou coke ; il n'y a même pas lieu de s'en préoccuper pour la houille qui est relativement peu hydrogénée. Quant aux combustibles liquides et aux gaz riches en hydrocarbures comme le gaz d'éclairage ou les gaz de fours à coke, on peut compter que le pouvoir calorifique industriel, à pression constante, est supérieur de 0,3 à 0,5 p. 100 à la chaleur de combustion mesurée au calorimètre.

2° *Correction résultant de la non-condensation de l'eau dans les combustions industrielles.* — La correction résultant de ce que l'eau reste à l'état de vapeur dans les fumées de four, tandis qu'elle est condensée dans le calorimètre, est beaucoup plus importante. On peut en faire le calcul par une application du principe de l'état initial et de l'état final, ou d'un corollaire de ce principe qu'il est inutile de démontrer ici dont l'énoncé est le suivant :

Les chaleurs de combustion des composés hydrogénés varient, suivant que l'eau reste à l'état liquide ou à l'état gazeux, d'une quantité de chaleur égale au produit du nombre de molécules d'eau résultant de la combustion, par la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température correspondant à la mesure au calorimètre du pouvoir calorifique.

La chaleur de vaporisation de l'eau rapportée au kilogramme, à une température t , est d'après la formule de Regnault :

$$L_t = 606,5 - 0,695 t.$$

A 15°, température normale des mesures calorimétriques

$$L_{15} = 606,5 - 0,695 \times 15$$

et si l'on rapporte la formule à la molécule, on trouve

$$l_{15}^{\text{moléculaire}} = 10,73 \text{ Cal.}$$

d'où l'on déduit que le pouvoir calorifique d'un combustible, déterminé par la bombe Mahler devra être diminué d'autant de fois 10,73 c. qu'il y a de molécules d'eau produites.

Faisons le calcul dans les cas des composés les plus usuels : hydrogène, méthane, acétylène.

GAZ soumis à l'expérience calorimétrique.	NOMBRE de molécules d'eau.	POUVOIR calorifique mesuré.	CORRECTION	POUVOIR calorifique vrai. Eau vapeur.
H ²	1	68,96	— 10,73	= 58,23
CH ⁴	2	213,48	— 21,46	= 192,00
C ² H ²	1	309,06	— 10,73	= 299,33

On voit par ces trois exemples, et surtout par l'hydrogène, que la correction due à la non-condensation dans la bombe Mahler est d'une importance telle, 3 à 12 p. 100, qu'il est impossible de la négliger dans les combustions.

3° *Conséquences dans l'étude des combustibles industriels.* — De ce qui précède résulte qu'il est impossible d'évaluer la valeur en énergie calorifique d'un combustible, sans connaître son pouvoir calorifique déterminé à la bombe Mahler, d'une part, et sa composition centésimale élémentaire qui seule permet de déterminer la contraction ou la dilatation à pression constante, et de compter les molécules d'eau condensée.

Nous n'avons pas à décrire ici la méthode d'analyse organique que le lecteur trouvera minutieusement décrite dans la « Contribution à l'étude des combustibles » de Mahler ou dans le « traité d'Analyse chimique » de Ad. Carnot, sous la forme même où elle a été étudiée, améliorée et est encore pratiquée à l'École des Mines¹. Mais nous indiquerons les cas où l'on peut pratiquement se passer de cette analyse organique sur la grille à combustion, laquelle est difficile et demande un outillage que l'ingénieur n'a pas toujours et un apprentissage chimique qu'il n'est pas tenu d'avoir fait.

Pratiquement l'analyse complète donnant C, H, O, et Az n'est pas nécessaire, parce que la première correction a une valeur que nous avons trouvée insignifiante, il suffirait de connaître la teneur en hydrogène.

Examinons les divers cas de l'industrie.

S'il s'agit d'un combustible exclusivement carboné, les deux cor-

¹ Voir également le tome II de la présente Encyclopédie, *Principes théoriques d'Analyse Minérale*, par G. CHESNEAU, p. 269.

rections disparaissent ; le pouvoir calorifique mesuré à la bombe suffit, avec le dosage du carbone.

Si l'on a affaire à des houilles, la double correction due à l'hydrogène est nécessaire ; mais lorsqu'on connaît la nature de la houille, ce qui est le cas général, après une simple vérification des matières volatiles donnant la certitude que le combustible n'a pas changé, on connaîtra la teneur en hydrogène avec assez d'approximation pour faire les corrections sans recourir à l'analyse organique. Il suffit pour s'en convaincre de consulter le tableau des analyses de houilles de Mahler.

Quand enfin on se servira d'un combustible liquide, toujours très hydrogéné, les deux caractéristiques du combustible, pouvoir calorifique et analyse, sont nécessaires. Mais il suffira en général de les faire une fois pour toutes, ou à des intervalles très espacés, en raison de la constance de qualité des sortes de pétrole raffiné.

Dans tous les cas, quel que soit le combustible, quelle que soit l'opération industrielle à laquelle on le destine, le carbone doit être dosé exactement, parce qu'il sert de commune mesure entre les gaz ou fumées d'un four et le combustible qui l'a engendré. Nous avons déjà signalé l'intérêt de cette mesure exacte ; nous y reviendrons encore en indiquant une méthode pratique et rapide permettant de faire ce dosage à la suite de l'essai calorimétrique et au moyen même de la bombe Mahler.

Les notions précédentes sur lesquelles nous avons insisté parce qu'elles ne sont pas encore courantes dans la technique du chauffage industriel seront rendues très claires par l'étude de la chaleur de combustion, c'est-à-dire de l'énergie calorifique d'un pétrole de Bakou pris comme exemple.

Chaleur de combustion d'un pétrole de Bakou. Exemple de détermination et de calcul. — Ce pétrole que nous retrouverons dans un chauffage de chaudière marine alimentée au pétrole donne à la bombe Mahler le chiffre observé directement, et calculé suivant les formules de Mahler, de 40.805 calories.

L'analyse organique donne la composition :

$$C = 87 \text{ p. } 100 \qquad H^2 = 13 \text{ p. } 100$$

Brûlons 1000 grammes de ce combustible liquide ; ce poids exprimé en molécules correspond à :

$$C = \frac{870}{12} = 72,5 \text{ moléc.} \qquad H^2 = \frac{130}{2} = 65 \text{ moléc.}$$

Faisons la correction relative à la pression constante :

$$L = Q + 0,54 n$$

$$x_1 = 10.805 + 0,54 \times 65 = 10.840 \text{ Cal.}$$

Faisons la correction relative à la non-condensation de l'eau :

$$x_2 = 10.840 - \frac{65 \times 10.73}{697,4} = 10.143$$

La valeur de l'énergie calorifique disponible industriellement est donc seulement 10.143 au lieu de 10.805 trouvée au calorimètre. La première correction (40 calories) est insignifiante ; la seconde atteint 6,5 p. 100 du pouvoir observé à la bombe¹.

§ 2. — ÉNERGIE THERMIQUE MISE EN ŒUVRE DANS LES FOURS

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.

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 des gaz. 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 évidem-

¹ La valeur de la double correction des pouvoirs calorifiques est, on le voit, assez importante pour que nous pensions nécessaire de faire le calcul pour tous les combustibles usuels dont le pouvoir calorifique a été déterminé avec précision par P. MAHLER.

Nous donnons donc en fin de notre ouvrage (p. 272) un *tableau de la composition et du pouvoir calorifique* vrai des combustibles solides, liquides ou gazeux qui n'est que la rectification du tableau de MAHLER par application des nouvelles formules de LE CHATELIER.

ment 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; 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 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 :

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

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 22,32 l. de ces différents gaz, entre deux températures $t_0 = T_0 - 273$ et $t = T - 273$, s'exprimeront par les formules :

Tableau des chaleurs d'Échauffement à toute température
des gaz usuels.

- | | | |
|-----|---|--------------------|
| (1) | $Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 0,6 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$ | (gaz parfaits). |
| (2) | $Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 2,9 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$ | (H ² O) |
| (3) | $Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 3,7 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$ | (CO ²) |
| (4) | $Q = 6,5 \frac{T - T_0}{1000} + 6 \frac{T^2 - T_0^2}{1000^2}$ | (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 :

$$\frac{dQ}{dT} = C_T = \frac{a}{1\ 000} + \frac{2b}{1\ 000^2} T.$$

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 d'en faire le calcul de 200° en 200°, dans les limites de température que présente l'industrie.

Dans les fours où les échanges de température se font presque toujours par l'intermédiaire de gaz, les données qui précèdent permettent de calculer l'énergie thermique disponible.

Le principe fondamental qui préside à l'échange de calories entre deux corps de potentiels différents, c'est-à-dire dont les températures diffèrent, c'est que les calories ne peuvent, à moins d'intervention d'une puissance motrice autre que l'énergie calorifique, passer d'un corps plus chaud à un corps plus froid. La température du corps froid, qui, dans un four, est la température de régime correspondant à l'opération industrielle que l'on effectue est donc la limite inférieure au delà de laquelle tout échange de calories devient impossible dans les fours.

Il s'ensuit que l'énergie thermique disponible dans le laboratoire d'un four est égale à la chaleur d'échauffement des gaz qui le traversent entre la température du laboratoire et la température à laquelle les gaz sont portés par la combustion, entre la température de régime et la température de combustion.

Les chaleurs d'échauffement donnent donc la mesure de l'énergie thermique utilisable, pour une opération industrielle caractérisée par sa température en faisant usage d'un combustible donné.

On voit par ces remarques l'importance capitale de la notion des chaleurs d'échauffement des gaz, importance telle que l'on peut dire que l'étude raisonnée des fours et de la combustion était impossible, antérieurement aux travaux de Mallard et Le Chatelier, malgré l'admirable précision des travaux de Regnault. Comme les chaleurs d'échauffement sont d'un usage constant dans la technique du chauffage, notamment pour le calcul des températures et des rendements

Tableau des chaleurs d'échauffement

 de 0° (glace fondante) à $t = T - 273$. des volumes moléculaires (22,32 l.) des gaz.

Gaz	0°	200°	400°	600°	800°	1000°	1200°	1400°	1600°	1800°	2000°	2200°	2400°	2600°
Gaz parfaits ¹	0	1,39	2,82	4,31	5,82	7,43	9,05	10,73	12,46	14,21	16,05	17,91	19,84	21,81
H ₂ O (18 grammes)	0	1,73	3,69	5,87	8,23	10,98	13,87	17	20,35	23,86	27,76	31,82	36,10	40,62
CO ² (44 —)	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
CII ² (16 —)	0	2,19	4,85	8,02	11,46	15,77	20,37	25,44	30,99	35,86	43,55	50,54	58,02	66,04

¹ On comprendra dans la formule des gaz parfaits : l'azote Az¹ = 28 grammes, l'oxygène O¹ = 32 grammes, l'hydrogène H¹ = 2 grammes, l'oxyde de carbone CO = 28 grammes.

des fours, nous avons résumé dans un tableau qui dispense le plus souvent de recourir aux formules, les chaleurs d'échauffement de 0° à 2600°, pour tous les gaz usuels des fours.

§ 3. — ÉNERGIE CHIMIQUE

a) CHALEUR DÉGAGÉE PAR LES RÉACTIONS CHIMIQUES

En dehors des chaleurs de combustion qui, nous le rappelons, sont une manifestation de l'énergie chimique, les opérations industrielles offrent des exemples innombrables de transformation d'énergie chimique en chaleur, c'est-à-dire d'échauffement des matières réagissant dans les fours par suite de combinaisons chimiques.

Il faudrait pour tenir compte de toutes les sources accidentelles et secondaires de chaleur auxquelles l'industrie a recours donner tous les tableaux de thermochimie, déterminés par Berthelot¹, pour lesquels nous renvoyons le lecteur aux ouvrages spéciaux.

Nous nous contenterons ici de classer les opérations industrielles et les fours qui permettent de les réaliser, d'après l'importance que l'énergie chimique spéciale s'ajoutant à l'énergie de combustion peut y avoir.

Quatre cas principaux peuvent se rencontrer :

1^{er} CAS. — *L'énergie chimique spéciale est assez grande et la température à laquelle la réaction s'opère est assez basse pour que la chaleur dégagée suffise à propager la réaction, à parer au rayonnement et au refroidissement.*

Tel est le cas du grillage du minerai sulfuré, de la combinaison de l'azote avec le carbure de calcium pour faire la cyanamide, de la fabrication de l'acier en cornues Bessemer.

Ce cas est industriellement le plus avantageux, puisqu'il permet d'économiser le combustible, aussi doit-il être l'objectif de l'ingénieur, toutes les fois que les chaleurs de réaction sont assez grandes pour fournir un sérieux appoint à la combustion. Il peut arriver, les exemples en sont nombreux, qu'une opération jugée impossible sans un four, c'est-à-dire sans le concours de chaleur empruntée à un combustible, le devienne par un perfectionnement apporté au laboratoire. Tel est le cas du four de grillage Perret qui a supprimé complètement l'emploi du charbon dans le grillage de la pyrite, opéra-

¹ Les données principales de la thermochimie sont résumées dans le *Memento du chimiste* (HALLER et CH. GIRARD) et surtout dans la *Mécanique chimique* de BERTHELOT.

tion qui naguère se faisait souvent dans des réverbères chauffés à grands frais de charbon. Tel est encore le cas de la cyanamide qui à l'origine, s'est fabriquée dans des fours à cornue (types fours à gaz) et qui maintenant se produit par autoréaction dans des laboratoires spéciaux supprimant la perte par rayonnement.

Les avantages économiques de l'auto-réaction sont tels qu'ils ont conduit dans les cas où la chaleur dégagée était voisine de ce que la propagation de la réaction pouvait exiger, à mélanger le corps en opération avec une substance auxiliaire capable de dégager au sein de la masse une grande quantité de chaleur : tel est le cas de la fabrication de l'acier en cornues Bessemer, où l'addition d'un ferromanganèse ou d'un ferro-silicium augmente énormément la chaleur dégagée par le passage de l'air au sein de la masse en fusion : tel est encore le cas de l'aluminothermie dans laquelle on mélange aux matières à traiter de la poudre d'aluminium, dont la combinaison avec l'oxygène dégage une telle quantité de chaleur, que des températures plus élevées que dans les fours métallurgiques sont atteintes, grâce à la combustion de l'aluminium.

Ce qui caractérise ce premier cas, au point de vue industriel, c'est qu'il n'y a pas à proprement parler de *four*, puisqu'on ne brûle pas de combustible, il n'y a qu'un *laboratoire* où la réaction et l'élévation de température qui en est la condition se font simultanément.

2^e CAS. — *L'opération industrielle que l'on veut effectuer dégage de la chaleur, mais cette énergie calorifique est insuffisante pour maintenir la température de régime nécessaire à la réaction.*

Ce cas est le plus général ; dans presque toutes les opérations industrielles, qu'il s'agisse d'industrie chimique, de métallurgie, de verrerie, il y a à un moment donné réaction chimique et dégagement de chaleur ; mais le plus souvent cette énergie spéciale ne suffit pas à échauffer la matière à la *température de régime* nécessaire, et surtout à compenser les pertes par rayonnement du laboratoire, qui sont énormes.

L'affinage de l'acier au four Martin est l'exemple le plus caractéristique et le plus important de ce cas. Il est nécessaire d'avoir une source de chaleur auxiliaire, tant à cause de la lenteur des réactions que de la forme de l'appareil ; néanmoins, la chaleur dégagée dans le four est loin d'être négligeable puisque des réactions de même nature suffisent à échauffer les cornues Bessemer.

Fréquemment, l'énergie chimique spéciale dégagée dans le labora-

toire paraît négligeable par rapport aux calories dépensées dans la combustion du charbon pour maintenir le four en température. Tel est par exemple le cas de la verrerie, four à bassin ou four à creusets, ou encore le cas du four à puddler.

Dans aucun cas, selon nous, cette chaleur spéciale ne doit être négligée ; elle doit entrer dans le bilan général au même titre et souvent avec plus de raison que les corrections au pouvoir calorifique précédemment étudiées ; elle a quelquefois beaucoup plus d'importance : les exemples que nous avons cités d'industries rentrant dans la première catégorie après qu'on les ait jugées longtemps tributaires de fours suffisent à le démontrer.

Au point de vue industriel, notre second cas est caractérisé par la nécessité d'avoir un four, c'est-à-dire un appareil où une source de chaleur étrangère, électricité ou combustible, sera versée dans le laboratoire.

On devra, dans l'étude du laboratoire au point de vue calorifique, distinguer la chaleur apportée par le jeu du four et la chaleur produite intérieurement, et il sera toujours utile de les rapprocher.

3^e CAS. — *L'énergie chimique spéciale est nulle.*

Ce cas très fréquent en industrie et dans lequel rentrent les fours de simple fusion, les fours à réchauffer, les chaudières, est évidemment étranger à notre présent paragraphe. Il est très intéressant à signaler pour notre étude d'ensemble du chauffage, car il représente le cas théorique du chauffage par les combustibles usuels dans lequel le problème est caractérisé uniquement par la température à atteindre (température de régime) et par la quantité de chaleur à fournir au laboratoire dans l'unité de temps. C'est encore le cas qui permet de déterminer exactement le *rendement de combustion* : nous lui consacrerons la plus grande partie de notre chapitre III où il sera parlé de l'économie dans les fours.

4^e CAS. — *L'énergie chimique spéciale est négative, c'est-à-dire que l'opération que l'on veut effectuer à une température de régime plus ou moins élevée absorbe de la chaleur.*

Dans ce cas, comme dans le précédent, toutes les calories seront empruntées au seul combustible, mais il faudra, toutes choses égales, un apport de calories plus grand par unité de temps, et l'on devra en tenir compte dans la conduite et mieux encore dans la construction du four.

Dans ce cas, qui est très fréquent et le devient de plus en plus avec le four électrique, il y aura au point de vue industriel deux rendements à considérer, d'abord et comme dans le cas précédent, le *rendement de combustion* qui n'est autre chose que le rapport de la chaleur réellement versée dans le laboratoire à la chaleur totale contenue dans le combustible, puis le *rendement absolu* qui sera le rapport de l'énergie chimique à fournir à la chaleur totale apportée, soit sous forme de calories provenant d'une combustion, soit sous forme de kilowatts transformés en chaleur dans le four électrique.

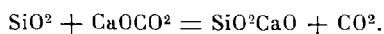
Cette distinction entre le rendement de combustion et le rendement absolu ne présentait qu'un intérêt restreint quand tout le chauffage se faisait par les combustibles, parce que le rendement de combustion était le criterium de la valeur absolue du rendement : mais depuis que la solution électrique fait concurrence à l'ancien chauffage, c'est le rendement absolu qui seul permettra de juger de l'économie d'un four, de comparer l'utilisation des calories et celle des kilowatts pour atteindre un même résultat, dans une industrie donnée.

En tout état de cause et dans les quatre cas que présente l'industrie, l'énergie chimique spéciale devra toujours être connue et exprimée en calories, et lorsqu'elle n'est pas immédiatement fournie par les tables de la thermochimie, il est utile de savoir la déterminer.

b) DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE CHIMIQUE SPÉCIALE

Lorsqu'on a affaire à une industrie utilisant une réaction non comprise dans les cas de Berthelot, on détermine l'énergie chimique spéciale, soit directement si la réaction s'effectue à la température ordinaire, soit indirectement par addition d'un corps de pouvoir calorifique connu.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de l'industrie du verre et que l'on se propose de faire entrer en compte la réaction du sable siliceux sur le carbonate de chaux entrant dans la composition du lit de fusion :



On brûlera dans la bombe Mahler 1 gramme de charbon de bois purifié enveloppé dans un papier de poids connu : on trouvera, par exemple, une déviation du thermomètre de 3°01. On recommencera la même expérience en ajoutant au charbon et mêlant intimement

1,5 gr. de silice et 2,5 gr. de carbonate de chaux : la déviation thermométrique ne sera que de 2°81. Il y a donc une différence de 20/100 de degrés qui correspondent en tenant compte de la valeur réduite en eau du calorimètre, à une absorption de chaleur, rapportée à la molécule, de — 26,8 cal.¹

La fusion du verre calcaire donne donc une énergie chimique négative et l'opération des fours de verrerie rentre dans le quatrième cas de notre classification.

Lorsque la chaleur positive ou négative de réaction, c'est-à-dire l'énergie chimique spéciale, est ainsi connue, soit par les tables de thermochimie, soit par une expérience directe, à 15°, il faudra encore tenir compte du fait que l'énergie chimique varie avec la température, tout en restant soumise à la loi de l'état initial et de l'état final, de sorte qu'il serait nécessaire, dans certains cas, de connaître les chaleurs spécifiques ou d'échauffement du corps en expérience et celles des composés résultant de la réaction. Mais les différences résultant de cette correction, dans un bilan d'ensemble, sont faibles et ceci nous entraînerait au delà de ce que la pratique industrielle même la plus rigoureuse comporte, toutes les fois du moins que l'échauffement des matières en œuvre jusqu'à la température de réaction et la réaction elle-même s'opèrent dans le même four, en partant de ces matières froides.

c) AUTRES MANIFESTATIONS DE L'ÉNERGIE CHIMIQUE

Production secondaire d'électricité. — L'énergie chimique, dans les opérations industrielles, ne se détruit pas toujours sous forme de calories. Dans beaucoup de cas, la transformation immédiate chimique est sous forme d'électricité, notamment dans les réactions de voie humide : c'est ce qui se passe dans les piles².

Dans ce cas, l'énergie chimique donne en général naissance à une double manifestation d'énergie dérivée : un courant électrique et un léger dégagement de chaleur au sein du liquide de la pile presque toujours perdu.

Il ne serait pas théoriquement impossible d'utiliser comme source de calories l'énergie électrique, *les coulombs* produits par une pile, mais les exemples industriels de piles servant à un chauffage sont tellement rares qu'il n'est pas utile d'en pousser plus loin l'étude et

¹ LE CHATELIER. *Introduction à l'étude de la Métallurgie*, p. 53.

² La théorie des piles est trop connue et ne touche pas d'assez près à la grande industrie pour que nous l'abordions ici.

en particulier de préciser la relation entre le coulomb et la calorie.

La calorie, unité fondamentale de la thermochimie, restera notre unité d'énergie chimique.

Un exemple intéressant, au point de vue du rendement calorifique des fours, de transformation d'énergie chimique en énergie électrique, est celui du four électrique traitant des matières conductrices de l'électricité.

Toutes les fois que l'on traite dans un four où la température n'est pas également répartie, des corps conducteurs de l'électricité, il se produit dans la masse des courants induits qui favorisent son élévation de température. Ces courants induits peuvent avoir des origines différentes, tantôt ils seront produits par la différence de température existant en différents points de la matière inégalement chauffée : c'est la pile thermo-électrique ; tantôt ils seront dus à la réaction chimique qui est en train de se réaliser, c'est la pile électro-chimique. Dans le premier cas, ils ne sont qu'un agent de propagation de la chaleur, puisque produits par des calories ils se retransforment en calories dans la masse. Dans le second cas, ils sont bien une phase intermédiaire de l'évolution de l'énergie chimique, se transformant d'abord en énergie électrique pour devenir ensuite de l'énergie calorifique.

Généralement ces deux sources sont intimement mêlées. Mais quels que soient le rôle et la forme du courant induit produit par la réaction chimique, l'énergie chimique ainsi dégagée dans le four et exprimée en calories ou en kilowatts, viendra en déduction de l'énergie extérieure apportée au four électrique et aura une influence sur la consommation des kilowatts et par conséquent sur le prix de revient de l'opération.

Rappelons ici, à propos de ces productions secondaires d'électricité dans les fours et notamment dans les fours électriques, qui entraînent des échanges équivalents d'électricité, de calories et d'énergie chimique, que les relations numériques suivantes existent entre ces diverses formes d'énergie.

Si l'on prend comme unité industrielle électrique le kilowatt-heure qui vaut 270 000 kilogrammètres, cette unité équivaut en calories ou en énergie chimique à $\frac{270\,000}{423,5} = 637$ calories, c'est à peu près le nombre de calories contenues dans 80 à 100 grammes d'une houille industrielle.

§ 4. — ÉNERGIE MÉCANIQUE ET ÉNERGIE CINÉTIQUE

L'énergie mécanique représentée principalement par les chutes d'eau, et l'énergie cinétique dont les manifestations les plus utilisables sont la force vive des cours d'eau et la force motrice du vent sont très rarement transformées directement en calories et peuvent à peine être classées dans les sources immédiates d'énergie calorifique. La célèbre expérience de Joule qui a permis de déterminer l'équivalent calorifique du travail mécanique et l'équivalent mécanique de la chaleur, ce chiffre 423,5 que nous avons plusieurs fois rencontré, n'a pas reçu d'applications dans l'industrie.

En général, la première étape d'utilisation d'une de ces énergies mécanique ou cinétique est la production d'électricité, et celle-ci par une seconde machine est transformée soit en calories, soit en kilowatts dans une machine motrice.

Cependant, comme l'énergie mécanique naturelle synthétisée sous le nom de houille blanche, et l'énergie calorifique représentée par la houille se concurrencient de plus en plus tant dans le champ de la force motrice, que dans celui du chauffage, il est utile de rapprocher ces deux modes principaux de la puissance motrice et de donner à cette comparaison une forme plus concrète.

L'unité d'énergie mécanique est le kilogrammètre; c'est le travail nécessaire pour élever un kilogramme à 1 mètre, au niveau de la mer.

L'unité calorifique, la calorie, est d'après Joule égale à 423,5 kilogrammètres.

Supposons que nous brûlions 1 gramme de carbone amorphe à l'air, nous produirons $\frac{97,6}{12}$ cal. qui sont équivalentes à $\frac{97,6 \times 423,5}{12} = 3,444 \text{ kgm}$. Donc, un four brûlant 1 gramme de charbon à la seconde ou 3,600 kg. à l'heure devrait être, si le rendement était parfait de part et d'autre, égal à un four électrique absorbant une chute d'eau de 1 mètre débitant 3,444 m³ à la seconde.

Inversement, on voit qu'une chute d'eau de 1 mètre cube par seconde et de 1 mètre de hauteur équivaut à une source de chaleur représentée par $\frac{1}{3,444} = 0,29$ gr. de carbone brûlé par seconde, en supposant le rendement des machines parfait.

Poursuivons la comparaison en prenant une unité dynamique plus importante, le *kilowatt-an* adopté généralement pour estimer la

valeur d'une chute⁴. Établissons l'équivalence théorique en calories et en carbone.

$$102 \times 360 \times 24 \times 3\,600 = 3\,172\,608\,000 \text{ kilogrammètres.}$$

En divisant ce chiffre par le nombre précédemment trouvé 3,444 qui correspond au gramme de carbone on trouve $3\,172\,608 : 3,44 = 921$ kilogrammes.

Le kilowatt-an serait donc équivalent à l'énergie contenue dans 921 kilogrammes (moins d'une tonne) de carbone, s'il y avait échange parfait entre ces deux formes d'énergie.

Inversement, une tonne de carbone ou d'une bonne houille devrait produire $\frac{1}{921} = 1,085$ kilowatt-an.

Malheureusement cette équivalence parfaite est loin d'être réalisée industriellement. Sans parler de la limite absolue qui empêche la transformation complète d'énergie chimique ou calorifique en travail dont Clausius a montré l'existence, en introduisant en thermodynamique la notion de *chaleur compensée* (qui ne peut être transformée en travail), il faut encore tenir compte du rendement des machines qui abaisse énormément les coefficients d'équivalence. Nous le verrons en étudiant l'énergie électrique, principal agent de ces transformations.

§ 5. — ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

a) RÔLE ET EFFET UTILES

DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES TRANSFORMATIONS D'ÉNERGIE

L'énergie électrique, dont le rôle est devenu si prépondérant dans l'industrie depuis quelques années, est avant tout un excellent agent de transformation des différentes sortes d'énergies les unes dans les autres.

Elle ne produit rien par elle-même, mais elle est l'intermédiaire souvent indispensable qui permet la meilleure utilisation des forces naturelles dont nous disposons :

Transformation de l'énergie mécanique en énergie mécanique ou plus simplement transport de la puissance motrice de son lieu de production à son lieu d'utilisation.

⁴ Lorsqu'on installe une centrale électrique en utilisant une chute d'eau, on la caractérise par le prix de revient du kilowatt-an : ce prix varie dans les grandes installations de 50 francs (exceptionnel) à 200 et même 300 francs. Il est encore supérieur dans les petites forces.

Transformation de l'énergie mécanique en énergie calorifique dans un four ou dans un appareil d'éclairage.

Enfin, transformation de l'énergie mécanique en énergie chimique ou inversement dans l'électrolyseur ou dans la pile; telles sont les principales voies d'utilisation de l'énergie électrique.

Toutes ces transformations si commodes pour la simplicité et le bon marché des machines et des fours qui servent à les réaliser ne se font pas sans des pertes, on pourrait dire plus exactement des fuites d'énergie, dont il est bon de montrer l'importance énorme par un exemple concret emprunté à l'industrie même et en nous plaçant dans l'hypothèse de l'emploi d'appareils les plus perfectionnés.

Pour cela nous parcourrons un cycle complet, partant de l'énergie calorifique fournie par un combustible sous forme de chaleur latente pour arriver à une autre forme d'énergie calorifique, chaleur sensible que nous utiliserons dans un four électrique, après avoir passé par l'énergie mécanique et cinétique réalisée par une machine à vapeur et par l'énergie électrique produite par un alternateur ou une dynamo.

Brûlons, en une heure, 1 kilogramme de carbone correspondant à $\frac{97\,600}{12} = 8\,133$ calories, dans une très bonne chaudière, par exemple une chaudière à tubes d'eau. Nous obtiendrons un poids de vapeur d'environ 10 kilogrammes. Employons cette vapeur à actionner une turbine ayant un des meilleurs rendements que l'on ait réalisé avec les moteurs à grande puissance, nous produirons, à raison de 6 kilogrammes de vapeur dépensée par kilowatt et par heure, une puissance exprimée en kilogrammètres de

$$\frac{10 \times 102 \times 3\,600}{6} = 612\,000 \text{ kilogrammètres.}$$

Supposons que les 612 000 kilogrammètres ainsi produits soient transformés en électricité par un appareil électrique parfait, puis transportés à une faible distance par une ligne électrique ne dépassant pas quelques centaines de mètres; ils subiront du fait de cette ligne une perte d'environ 5 p. 100 qui réduira leur nombre à 581 000.

A l'extrémité de cette ligne plaçons un four électrique auquel nous supposerons encore un rendement parfait, cet appareil d'après la loi de Joule ne restituera au maximum que $\frac{581\,000}{423,5} = 1\,380$ calories.

Le rendement global sera donc $\frac{1\ 380}{81\ 33} = 16,9$ p. 100 et si le four électrique n'a qu'un rendement de 80 p. 100, le rendement global descendra à 13 ou 12 p. 100.

Le cycle des quatre transformations successives a donc absorbé 84 p. 100 de l'énergie totale disponible; c'est une opération déplorable au point de vue industriel, et pourtant elle est devenue une opération commerciale du plus grand intérêt, puisque c'est elle qui est suivie dans toutes les grandes centrales électriques et qui assure l'éclairage public de toutes les grandes agglomérations urbaines.

Ces calculs et les quelques remarques que nous ont suggérées l'examen de l'énergie mécanique ou cinétique ont pour but de montrer combien les équivalences d'énergie sont loin d'être réalisées industriellement, combien on aura en général avantage à utiliser l'énergie calorifique sous forme de calories et l'énergie mécanique sous forme de travail.

Le principe du chauffage électrique avec centrales à vapeur paraît être un contresens économique; le processus de l'opération suffit à le démontrer car il est le suivant : partir d'une substance riche en calories, le combustible, faire passer une partie de ces calories dans un fluide élastique, la vapeur, utiliser ce fluide à actionner une machine qui entraîne elle-même une dynamo et avec cette dynamo reproduire finalement des calories par l'échauffement d'un conducteur, en perdant dans ces opérations successives 83 à 88 p. 100 de la puissance dont on disposait, tel est le bilan du four électrique greffé sur une centrale.

Aussi, dans le cas général, est-ce à l'énergie des chutes d'eau que l'on est obligé d'avoir recours, parce que ces chutes présentent des réserves d'énergie souvent inutilisables et c'est à ce fait qu'il faut attribuer le développement intense de l'industrie dans les régions montagneuses, Suisse, Italie, Dauphiné, Suède, États-Unis.

Une seconde source d'énergie électrique à bon marché capable de lutter peut-être, dans l'avenir, avec les chutes d'eau de puissance moyenne est constituée par les centrales électriques créées autour des mines de houille. De grands efforts sont actuellement tentés dans ce sens, dans le Nord et le Pas-de-Calais et les grandes Compagnies Minières se préoccupent de fournir largement d'énergie les villes voisines, Lille et Arras, en utilisant les déchets de charbon ou les sous-produits de l'industrie houillère — de la même façon que les concessionnaires de houille blanche du Dauphiné ou des Alpes songent à atteindre Lyon avec leur réseau électrique.

En l'état présent des grandes exploitations houillères, les usines à coke commencent à avoir un large excédent de gaz utilisable soit comme source de force motrice, soit comme gaz éclairant, soit mieux comme gaz industriel pour les fours métallurgiques : l'utilisation du gaz de fours à coke en métallurgie est tout à fait à l'ordre du jour. Mais il reste encore bien des économies à réaliser, bien des réserves d'énergie à mettre en œuvre soit dans les résidus de coke et poussières de fours, soit dans les escaillages contenant 40 p. 100 de carbone et au-dessous actuellement inutilisables en gazogènes, soit encore dans les calories inutilisées des moteurs à gaz qu'il serait possible de récupérer.

Quand ces améliorations, qui sont toutes ou presque toutes à l'étude, seront réalisées, quand les puissances motrice ou calorifique extraites de la houille auront leurs emplois les plus rationnels (gaz riche pour le chauffage industriel, gaz pauvre pour la force motrice) quand les sous-produits auront leur utilisation maxima, il n'est pas douteux que le kilowatt de telles centrales atteindra des prix qui permettront son emploi avantageux pour le chauffage. La houille deviendra une source d'énergie calorifique utilisable à distance, au même titre que la houille blanche, avec toutes les facilités de transport que comporte l'énergie électrique.

Rarement pourra-t-on utiliser comme troisième source électrique d'énergie calorifique en obtenant des conditions économiques avantageuses, l'énergie créée dans les centrales urbaines ; disponible en excès aux heures où l'éclairage est arrêté.

Ces remarques et calculs étaient nécessaires pour établir la localisation des applications du chauffage électrique et mettre en garde contre des essais qui seraient condamnés à l'avance dans des centres urbains où le prix du kilowatt ne saurait suivre que la marche ascendante du prix du combustible ; mais au point de vue technique qui nous occupe, peu importe l'origine du courant, et nous n'avons à étudier que la transformation simple de l'énergie électrique en calories.

Pour cela, il est utile de rappeler quelques définitions des unités électriques et la loi fondamentale de cette transformation électricité-chaaleur ou loi de Joule.

b) UNITÉS ÉLECTRIQUES. LOI DE JOULE

Nous adopterons ici les unités électriques en usage dans l'industrie, à l'exclusion des unités c. g. s. qui sont peu entrées dans la pratique.

Quantité d'électricité. — L'unité de quantité d'électricité est le *coulomb*; c'est la quantité d'électricité nécessaire pour libérer de sa solution un poids de 0,00118 gr. d'argent et le déposer à l'état métallique.

Intensité de courant. — L'unité d'intensité est l'*ampère* : c'est l'intensité qui fait passer en un point *un coulomb* par seconde : elle est définie par la formule $Q = IT$.

Résistance. — L'unité de résistance est l'*ohm* : c'est la résistance offerte par une colonne de mercure de 1 mm² de section et de 106,3 cm. de longueur à la température de 0°.

Force électromotrice. — L'unité de force électromotrice est le *volt* : c'est la force électromotrice qui fait passer un courant de *un ampère* dans un conducteur dont la résistance est de *un ohm* : $E = RI$.

Travail. — L'unité de travail est le *joule* : c'est le travail produit par une force électromotrice de *un volt* qui fait passer une quantité d'électricité de *un coulomb*. $W = EIT$.

Puissance. — L'unité de puissance est le *watt* : c'est la puissance correspondant au travail de *un joule par seconde*.

La loi sur laquelle est basé le phénomène de l'échauffement des conducteurs est la *loi de Joule* qui peut s'exprimer ainsi :

La chaleur dégagée par un courant passant à travers un corps est proportionnelle à la résistance de ce dernier, au carré de l'intensité du courant et au temps pendant lequel passe le courant.

Si l'on désigne par :

W la quantité d'énergie dégagée par seconde exprimée en Joules,

R la résistance totale du corps exprimée en ohms,

E la différence de potentiel entre l'entrée et la sortie du courant exprimée en volts,

I l'intensité du courant exprimée en ampères, la loi de Joule s'écrit :

$$W = RI^2 = EI.$$

La résistance d'un conducteur au passage du courant dépend de la nature et de la forme de ce conducteur.

L'expérience a prouvé que dans un fil cylindrique, la résistance est proportionnelle à la longueur, inversement proportionnelle à la section et proportionnelle à un facteur ρ dépendant de la nature du corps et qu'on appelle la *résistivité* ou *résistance spécifique*.

La résistance d'un corps s'exprime généralement en *ohms-centimètres* ; c'est la résistance que présente un centimètre cube de ce corps entre deux de ses faces parallèles.

Si l'on désigne par L la longueur en mètres d'un fil cylindrique conducteur, par S sa section, sa résistance sera représentée par :

$$R = \frac{100 \rho L}{S} \text{ en ohms.}$$

La quantité de chaleur développée dans ce conducteur par le passage d'un courant d'intensité I en ampères, exprimée en joules par seconde sera :

$$W = \frac{100 \rho L}{S} \times I^2$$

Or, un joule vaut 0,00024 cal. ; l'énergie thermique produite dans le conducteur, exprimée en calories-kilogrammes, sera donc représentée par la relation :

$$W = \frac{0,024 \rho L}{S} \times I^2.$$

D'autre part, la déperdition de chaleur par rayonnement et conductibilité est fonction de la température du corps.

Appelons $f(T)$ cette fonction, on pourra écrire lorsque le régime, d'équilibre sera établi :

$$W = f(T).$$

C'est cette équation qui donnera la température maxima à laquelle le conducteur pourra être porté.

Pour la résoudre, il faudrait connaître exactement les conditions de la déperdition de chaleur, ce qui est assez délicat.

Mais lorsqu'il s'agit d'un corps de faible poids P le problème se simplifie, car l'élévation de température se produit très rapidement, l'on peut négliger les pertes par rayonnement et conductibilité pendant les premières secondes, toute la chaleur apportée par le courant étant alors employée à élever la température du corps.

Si l'on appelle alors :

P le poids du corps en kilogrammes,

C sa chaleur spécifique entre zéro et T degrés,

t sa température initiale,

n le nombre de secondes de passage du courant,

On a :

$$W = P c (T - t) n.$$

Cette relation permet de déterminer T au bout d'un certain nombre n de secondes pourvu que ce nombre ne soit pas trop élevé.

Dans le cas du four électrique, la fonction $f(T)$ est beaucoup plus complexe et elle le sera d'autant plus que les dimensions du laboratoire seront plus vastes, car si, dans les petits fours analogues à celui de Moissan, on peut admettre qu'il s'établit dans la cavité intérieure une température de régime uniforme, il n'en est plus de même dans les fours de grande dimension où les pertes de chaleur seront essentiellement variables d'un point à un autre.

En outre, dans certains types de fours, la résistance du conducteur n'est, elle-même, que très imparfaitement connue et elle varie d'un moment à l'autre puisque c'est la masse à demi fondue de la matière à traiter qui sert au passage du courant.

Pratiquement, on ne cherche pas à déterminer la fonction $f(T)$; on procède expérimentalement de la façon suivante : on s'efforce de diminuer dans toute la mesure du possible les pertes par rayonnement et conductibilité en entourant le laboratoire de matériaux mauvais conducteurs (par exemple, la chaux vive ou la magnésie ou les carbonates de ces deux substances) puis on établit un contact intime entre la masse à traiter et le conducteur qui l'échauffe, ou entre les électrodes et la masse si c'est cette masse elle-même qui conduit le courant, et enfin on augmente progressivement l'intensité du courant jusqu'à produire la température nécessaire à l'opération.

On établit alors le rendement du four en fonction des poids de matière en totalisant pour une chauffe les lectures du wattmètre enregistreur placé à l'entrée du four et en divisant ce total par le poids de la matière traitée.

Rendement calorifique d'un four électrique.

Il est intéressant de voir par un calcul rapide, analogue à celui que nous avons fait plus haut pour une installation à vapeur, à quel rendement calorifique peut atteindre l'établissement d'un four électrique alimenté par une centrale hydroélectrique.

Prenons par exemple un four à carbure de calcium : en vertu de la formule $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$ il faut pour produire une tonne de carbure de calcium avoir un mélange composé de 1 tonne de CaO et de 650 kilogrammes de charbon pur.

La chaleur à fournir comprend deux parties :

a) Celle qui est nécessaire à élever le mélange jusqu'à la température de réaction.

b) Celle qui est nécessaire à la réaction.

L'ensemble de ces deux chaleurs correspond environ à 4 300 000 calories.

Or, un four à carbure bien installé consomme environ 5 000 kilowatts-heure par tonne de carbure produite. Ces 5 000 kilowatts-heure correspondent à $850 \times 5\,000 = 4\,250\,000$ calories.

Le rendement du four est d'environ 35/100 :

Il faudra donc pour produire une tonne de carbure, disposer à l'entrée du four de 5 000 kilowatts-heure électriques.

Admettons que nous ayons, entre la centrale hydroélectrique et le four, une ligne électrique qui dissipe environ 3 p. 100 de la puissance qu'elle transmet, nous devons disposer aux bornes des dynamos de 5 150 kilowatts-heure.

Et si les dynamos ont un rendement de 92 p. 100 et les turbines hydrauliques un rendement de 72 p. 100, la puissance à emprunter à la chute d'eau sera de :

$$\frac{5\,150}{0,92 \times 0,72} = 7\,750 \text{ kilowatts.}$$

Soit donc $850 \times 7\,750 = 6\,600\,000$ calories en chiffres ronds et le rendement global de l'installation ressort à $\frac{4\,250\,000}{6\,600\,000} = 23/100$ environ.

§ 6. — ENERGIE ÉLASTIQUE

L'énergie élastique n'intervient qu'exceptionnellement dans les fours comme source d'énergie calorifique, cependant, comme nous nous sommes imposé la règle de ne rien négliger dans l'évaluation totale de l'énergie qui est à la base de la science du chauffage, il convient de remarquer que dans certains appareils soufflés à forte pression comme le Bessemer et le haut fourneau, l'air est introduit dans le four après avoir emmagasiné par sa compression une

énergie élastique équivalente à un nombre de calories qui sont déversées dans le four par l'effet de la détente du gaz.

Dans les fours même, l'emploi des gazogènes soufflés à des pressions souvent élevées, comme dans les gazogènes à cuves, correspond à un léger appoint de calories. Il est donc nécessaire de le calculer ou du moins de démontrer que cet appoint est négligeable. Le résultat du calcul est que, pour une pression de 2 atmosphères, la variation de l'énergie élastique par mètre cube de vent soufflé est de 7160 kilogrammètres correspondant à 17 calories.

Dans un four le kilogramme de charbon dégageant environ 8000 calories exige pour sa combustion un volume d'air de 8 à 10 m³; la pression de la soufflerie est rarement supérieure à 100 centimètres d'eau, c'est-à-dire 1/100 d'atmosphère : la correction au chiffre d'énergie disponible n'atteint pas 1/1000 dans le cas général : nous n'aurons pas à en tenir compte.

Cependant comme la tendance actuelle est d'accentuer la pression dans les gazogènes au point d'avoir des charges exprimées en centimètres de mercure (gazogène Morgan, gazogène Sepulchre); comme d'autre part les gazogènes à forte pression sont sans grille, ce qui permet d'y insufler de l'air préalablement chauffé à des températures élevées, c'est-à-dire dilaté, la valeur de l'apport de calories pourra, dans l'avenir, atteindre un chiffre qui ne serait plus négligeable auprès de l'énergie totale disponible, et cet apport de calories dans un gazogène est d'autant plus intéressant qu'il tend à accroître la richesse du gaz en calories latentes. Nous indiquons donc ici la formule permettant de calculer la valeur de l'énergie élastique, d'après le *Traité de Métallurgie* de Babu.

Soient p , V , p_0 , V_0 les volumes et pressions de l'air chauffé à une température t .

$$pV = p_0V_0$$

$$V_0 = 1 \text{ mètre cube} \quad p_0 = 10\,330 \text{ kilogrammes.}$$

La variation d'énergie élastique de l'air due à la compression $p - p_0$ est représentée par l'équation :

$$U = \int_{p_0}^p p \, dV.$$

Mais on sait que

$$p = \frac{p_0 V_0}{V} = \frac{10\,330}{V}$$

ou

$$U = 10\,330 \int_{V_0}^{V} \frac{dV}{V} = 10\,330 L_n \frac{V}{V_0}$$

$$U = 10\,330 L_n \frac{p_0}{p}.$$

L'augmentation de l'énergie élastique du vent soufflé comprimé à la pression p est proportionnelle au logarithme des quotients $\frac{V}{V_0}$ ou $\frac{p}{p_0}$.

B. — QUELQUES NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE.
DISSOCIATION. — ÉQUILIBRES CHIMIQUES. — ÉNONCÉ
DES LOIS GÉNÉRALES DE L'ÉNERGÉTIQUE

Dans tout ce qui précède nous n'avons indiqué que des données numériques, ou des formules algébriques précises, des chiffres en un mot, permettant de calculer les échanges d'énergie, les quantités de chaleur dégagées par les réactions, en supposant que ces réactions soient complètes. Ces données numériques sont le plus souvent suffisantes, et dans notre précédent ouvrage, nous avons pu faire une théorie générale de la combustion¹ dans les fours industriels sur ces mêmes bases, sans faire appel aux lois de la thermodynamique autrement que pour indiquer l'origine de certaines formules dérivant soit du principe de la conservation de l'énergie soit du principe de l'état initial et de l'état final.

En fait, la connaissance de la mécanique chimique n'est pas nécessaire à la solution pratique de la plupart des problèmes de chauffage et l'un des buts de notre ouvrage a été de dégager la science appliquée de l'énergie calorifique des sciences mathématiques et de la thermodynamique.

Cependant, il est des cas de chauffage industriel où les réactions ne sont pas complètes, soit qu'elles soient limitées par la dissociation dans les fours à très haute température, soit qu'elles s'accomplissent sous un régime d'équilibre chimique comme dans les gazogènes. Dans ces cas, les lois de la thermodynamique interviennent, et leur connaissance peut être un guide très sûr pour les progrès du chauffage. L'étude de ces réactions incomplètes, notamment de celles qui peuvent se passer dans les gazogènes, a été poussée très loin depuis quelques années, tant par l'étude des lois mathématiques des Équilibres chimiques de Le Chatelier et Vant'Hof que par les travaux expérimentaux de Boudouard, Nermst, Warenberg, etc., au point qu'il soit devenu possible de faire la théorie de

¹ *Le chauffage industriel et les fours à gaz*, par E. DAMOUR, Paris 1898.

ces combustions incomplètes, comme nous avons pu faire précédemment celle des combustions complètes dans les fours.

De là la nécessité de consacrer une courte étude à la thermodynamique, d'en rappeler les lois fondamentales en indiquant les conséquences pratiques qu'elles ont sur les questions de chauffage.

Réversibilité et irréversibilité. — La première notion de mécanique chimique avec laquelle il est utile de se familiariser est celle de la *réversibilité* ou de l'*irréversibilité* des phénomènes. Cette notion, qui s'applique à toutes les manifestations de l'énergie, se définit le plus aisément par des exemples, l'irréversibilité étant par exemple caractérisée, en énergie mécanique, par la chute d'un corps à l'air libre, la réversibilité par l'abaissement d'un corps placé sur un plateau de balance. En énergie électrique, l'utilisation d'un courant donné, dans un four, par l'arc électrique, est un phénomène irréversible, tandis que l'utilisation du même courant à une électrolyse celle du sulfate de zinc par exemple, est réversible, tellement réversible qu'il arrive de voir tout l'agencement chaudière, moteur, dynamo et cuve de réaction marcher en sens inverse, la cuve formant pile, la dynamo entraînant le moteur à vapeur en marche arrière, lorsque l'équilibre entre l'énergie chimique et l'énergie électrique est interverti. En énergie thermique la combustion du charbon à l'air et la plus grande partie des combustions dans les fours sont des phénomènes irréversibles ; la combustion incomplète dans un gazogène est partiellement réversible, ainsi que nous le verrons.

Les réactions réversibles sont du domaine du calcul infinitésimal et s'expriment par des lois différentielles qui ne sont pas toujours intégrables. Les réactions irréversibles sont du domaine de l'algèbre ou de l'arithmétique.

Dans les manifestations de l'énergie thermique, et notamment dans les problèmes industriels de chauffage, ce sont presque toujours les réactions irréversibles qui entrent en jeu. Cela se comprend si l'on pense que la destruction de la puissance motrice sous forme de calories par le rayonnement terrestre est le dernier terme vers lequel tendent naturellement les transformations de l'énergie. Cela se conçoit mieux encore si l'on songe que le chauffage ne peut commodément s'effectuer, n'est efficace, que si la différence de potentiel thermique est grande entre le système chauffant et le système à chauffer, si l'écart entre la température de régime et la source de chaleur thermique ou électrique est suffisante. En général même,

plus cet écart est considérable, plus le chauffage est rapide, meilleur est le rendement.

Il se présente cependant des cas où cette différence de potentiel se trouve forcément réduite. Le premier est celui où la température de régime est assez élevée pour que la source de chaleur n'excède que de peu le potentiel des milieux à chauffer : c'est le cas d'un laboratoire travaillant à 2000° et alimenté par un combustible dont la température de combustion est limitée, comme nous l'avons vu. Le second cas est celui où la combustion partielle est réglée de façon que la température du foyer soit basse, c'est le cas des gazogènes. Dans l'un et l'autre cas on se rapprochera plus ou moins des conditions de la réversibilité à savoir l'équilibre entre le système chauffant et le milieu ambiant.

Dans le premier cas la dissociation intervient, dans le second les lois des équilibres chimiques entrent en jeu. Nous les étudierons successivement sous une forme aussi concrète et pratique que possible.

§ 1. — DISSOCIATION

La loi de dissociation découverte par Sainte-Claire Deville d'abord sur le carbonate de chaux, puis sur les gaz CO, ²CO, H₂O, a été énoncée sous la forme suivante : « Lorsqu'on soumet un composé chimique « défini à l'action d'une température croissante, il y a en général « décomposition partielle de ce corps limitée exactement à chaque « température et à chaque pression. » »

$$D = f(T, P).$$

Cette loi qui a été le point de départ de toutes les études sur les équilibres chimiques a été longtemps une simple loi qualitative parce que l'état des sciences chimiques et physiques, l'ignorance où l'on était des températures exactes et la connaissance imparfaite des lois de thermochimie rendaient impossible la détermination de la formule

$$D = f(T, P).$$

Cette insuffisance dans la connaissance exacte de la rétrogradation des réactions chimiques et notamment des réactions de combustion a souvent conduit à des erreurs de déduction, qui n'ont pas encore complètement disparu de la technique du chauffage et il n'est pas inutile de souligner ici le fait que l'effet de la dissociation n'est pas toujours celui qu'on a tendance à lui attribuer.

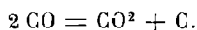
Aux températures les plus élevées que l'on réalise dans les fours chauffés par combustibles carbo-hydrogénés lesquelles atteignent rarement le régime de 2 000°, la décomposition de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau sont faibles.

S'il s'agit de four à chauffage direct dont nous verrons que la température de combustion ne peut dépasser 2 040° et dont le régime n'atteint que rarement 1 800°, les coefficients de dissociation n'atteignent pas 1 p. 100 ce qui est tout à fait négligeable.

Si l'on a affaire à des fours à gaz à récupération où la température de combustion serait illimitée, s'il n'y avait dissociation, on remarquera que le laboratoire est suivi de chambres de récupération à température plus basse où la chaleur perdue par dissociation peut se récupérer, et comme la combustion de l'oxyde de carbone n'est pas sujette à rétrogradation aux hautes températures, il n'y a pas de ce fait limitation de la température du laboratoire ; il peut même ne pas y avoir pertes de calories puisque le jeu de la récupération ramène la chaleur perdue dans le laboratoire.

On a donc bien souvent attaché une trop grande importance à l'effet de la dissociation et cela tient à ce que les premiers calculs de température de combustion dans les fours, basés sur les chiffres inexacts des chaleurs spécifiques des gaz de combustion, aussi bien que les mesures expérimentales de ces températures effectuées avec des pyromètres défectueux, faisaient croire au développement de températures très supérieures à la réalité. C'est ainsi que l'on a longtemps cru à des chaleurs de 2 500 à 3 000°, dans les fours à acier, de 2 000° dans les fours de verrerie. A ces températures la dissociation eût été une limite réelle à la combustion et à l'échauffement du laboratoire. Aux températures réelles de 1 800° et 1 400° actuellement constatées, l'effet de la dissociation est presque négligeable.

Par contre, il est un second effet des lois de dissociation que l'on avait longtemps négligé et ignoré parce que les expériences de Sainte-Claire Deville avaient à cet égard été incomplètes, c'est celui qui agit sur l'oxyde de carbone, d'après la formule



Cette décomposition de l'oxyde de carbone, qui relève des lois d'équilibres chimiques, qui s'effectue à basse température, au-dessous de 800°, a un contre-coup évident sur la marche des fours à gaz ; elle est la cause de ces dépôts importants de suie dans les collecteurs de fours à gaz, dans les foyers et tubes de chaudières, et

appauvrit en chaleur latente les gaz de gazogènes. Elle cause, dans les fours en général, une perte de calories, d'abord par le dépôt de carbone qui, sous forme de suie, n'est pas utilisé, puis par la transformation d'une partie de la chaleur latente de l'oxyde de carbone en chaleur sensible dans l'acide carbonique, laquelle se trouve perdue toutes les fois que le gaz est employé froid ou qu'il y a simple récupération.

Ces considérations montrent l'intérêt qu'il y a à bien connaître les lois de dissociation des trois gaz qui sont assujettis à cette rétrogradation de la combustion. Nous empruntons aux travaux de Le Chatelier les lois numériques et courbes de dissociation de CO_2 , CO , H_2O sans entrer dans le détail des calculs thermodynamiques et des expériences qui ont permis de les établir.

a. — DISSOCIATION DE L'ACIDE CARBONIQUE

La loi de dissociation de l'acide carbonique a été établie par Le Chatelier par application de la loi des équilibres chimiques en s'appuyant sur les expériences de Sainte-Claire Deville, puis de Mallard et Le Chatelier et en dernier lieu sur celles de Nernst et Warenberg pour déterminer la constante de la formule

$$(1) \quad 500 L \frac{dT}{T^2} + 0,5 \log. \text{ nép. } P - \log. \text{ nép. } \frac{(1-x)(2+x)^{\frac{1}{2}}}{x^{\frac{3}{2}}} = \text{const.}$$

Les résultats des calculs à différentes pressions et températures est résumé dans le tableau ci-dessous.

Dans l'industrie, la pression habituelle est la pression atmosphérique, mais comme l'acide carbonique est toujours dilué dans un volume quadruple d'azote et souvent dans d'autres gaz tels que la vapeur d'eau et l'oxyde de carbone, la tension propre de l'acide carbonique est beaucoup moindre et se tiendra entre 0,1 et 1 atmosphère. C'est donc une valeur intermédiaire entre la deuxième et la troisième colonne de notre tableau qui donnera la mesure de la dissociation dans les combustions.

* Dans cette formule L représente la chaleur de formation de l'acide carbonique, P la pression, l la chaleur de formation de l'oxyde de carbone, T la température absolue, x la proportion d'acide carbonique dissocié (coefficient de dissociation). Voir LE CHATELIER, *Introduction à l'étude de la métallurgie*, p. 73 et suivantes.

TABLEAU DE DISSOCIATION DE L'ACIDE CARBONIQUE AUX PRESSIONS
ET TEMPÉRATURES USUELLES EN INDUSTRIE

TEMPÉRATURES	0,001 ATM.	0,01 ATM.	1 ATM.	10 ATM.
1 000°	0,007	0,0023	0,0006	0,0003
1 500°	0,07	0,017	0,008	0,004
2 000°	0,4	0,08	0,04	0,03
2 500°	0,94	0,60	0,19	0,09

Ce tableau se traduit, aux pressions les plus intéressantes dans la pratique des fours, par la courbe ci-dessous :

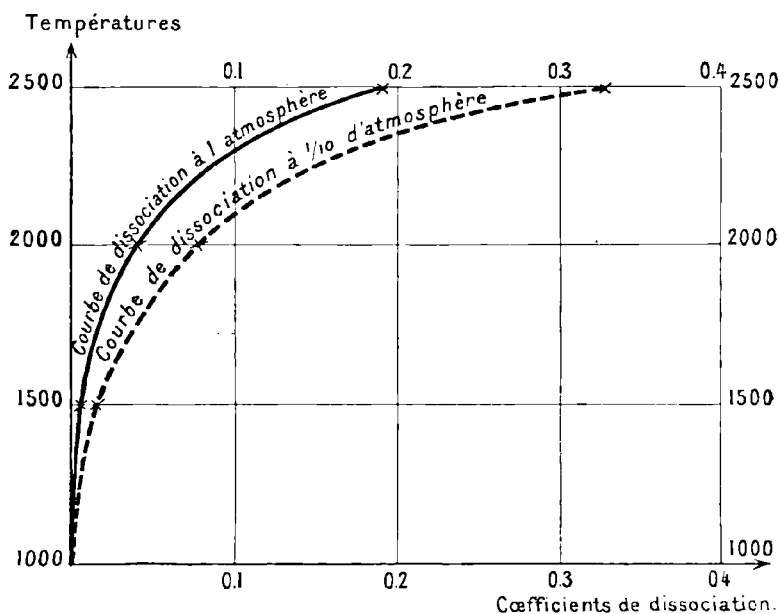


Fig. 3. — Courbe de dissociation de l'acide carbonique.

b. — DISSOCIATION DE LA VAPEUR D'EAU

Nous empruntons encore au cours de Le Chatelier les chiffres de dissociation de la vapeur d'eau, qui se rencontre dans les fumées de fours, à une teneur, c'est-à-dire à une concentration toujours moins forte que l'acide carbonique.

Il résulte de l'application de la formule de Vant'Hoff dans laquelle la constante a été déterminée par Le Chatelier en s'appuyant sur le phénomène de décomposition de l'eau par la pile, que le coefficient de dissociation de l'eau est assez voisin de celui de l'acide carbonique dans les mêmes conditions. Comme la condensation est généralement moindre, on en peut déduire que cette rétrogradation de la combustion a moins d'importance encore que la précédente.

Voici d'ailleurs, d'après Nernst et Warenberg, le tableau des coefficients à la pression atmosphérique.

Tableau de dissociation de la vapeur d'eau.

Températures.	Coefficient de dissociation.
1 027	0,000027
1 124	0,000078
1 207	0,000189
1 227	0,000197
1 288	0,00034
1 882	0,0118

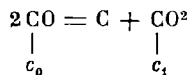
Il résulte donc de l'examen de ces tableau et courbe que les dissociations de CO^2 et H^2O sont le plus souvent négligeables.

C. — DISSOCIATION DE L'OXYDE DE CARBONE

La loi de dissociation de l'oxyde de carbone, établie d'après la même formule générale des équilibres chimiques, est régie par l'équation suivante :

$$\frac{19\,500}{T} - \log. \text{ nép. } \frac{c_1}{c_0^2} = \text{const.}$$

dans laquelle c_0 représente la portion de carbone qui est à l'état de CO et c_1 la portion qui passe à l'état d'acide carbonique, c'est-à-dire la moitié du carbone de l'oxyde de carbone dissocié, d'après la formule



Le calcul, dans le cas de l'oxyde de carbone pur, sans mélange d'azote, conduit aux résultats suivants à la pression atmosphérique.

TABLEAU DE LA DISSOCIATION DE L'OXYDE DE CARBONE

	CO	CO ²
400°	0,01	0,99
500°	0,05	0,95
600°	0,23	0,77
700°	0,57	0,43
800°	0,87	0,13
900°	0,92	0,08
1 000°	0,99	0,01

Cette dissociation présente de remarquables particularités en ce sens qu'elle s'accomplit suivant une courbe limitée entre les températures de 400 et 1 000°, présentant un point d'inflexion vers 725°.

Températures.

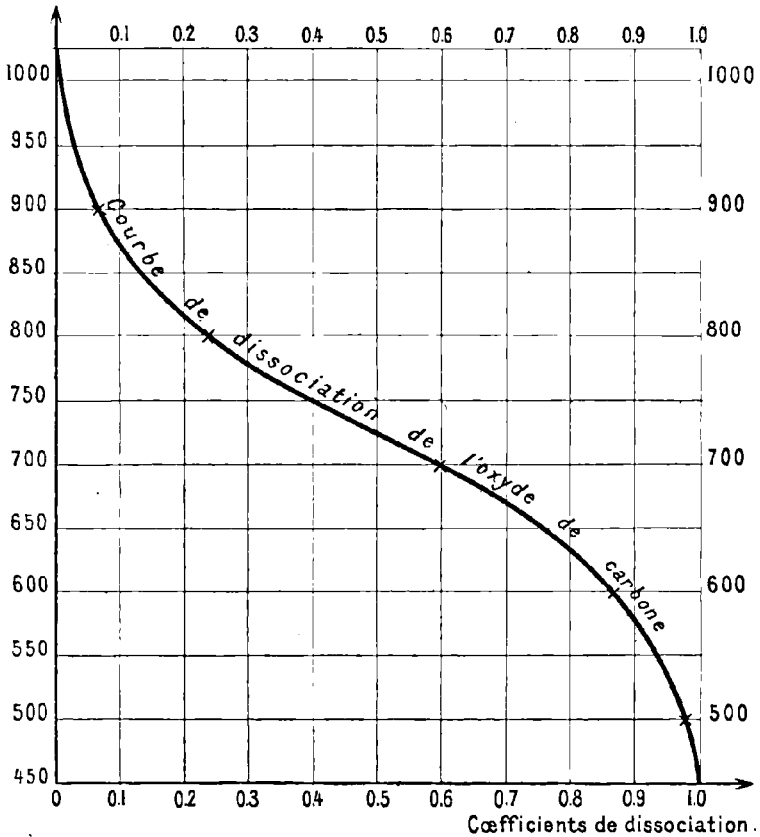


Fig. 4. — Courbe de dissociation de l'oxyde de carbone.

A l'inverse de l'acide carbonique qui se dissocie d'autant plus que

la température est plus haute, l'oxyde de carbone a son maximum à basse température (450°) tandis qu'à partir de 1000°, la rétrogradation de cette réaction de gazogène est nulle.

Cette loi comporte plusieurs conséquences qu'il est utile de signaler.

Si nous envisageons d'abord le cas tout pratique des poêles à combustion lente, on y voit le danger que peuvent présenter ces appareils lorsqu'ils fonctionnent à marche un peu forcée, sans que l'évacuation des fumées soit assurée par une bonne cheminée; si un tel poêle est maintenu au rouge cerise et surtout au rouge vif, il y a toujours formation d'oxyde de carbone, d'autant plus abondante que le feu est plus vif. Si au contraire on les maintient à petite marche au-dessous du rouge sombre, l'oxyde de carbone qui a pu se produire par l'effet de la couche épaisse d'anthracite se dissocie en $\text{CO}^2 + \text{C}$ et il ne reste que de l'acide carbonique dans les fumées. Ceci explique le succès de certains appareils de chauffage des appartements qui avec un bon réglage ne présentent pas le danger qu'on leur attribue généralement.

Dans les gazogènes, la dissociation de l'oxyde de carbone explique l'impossibilité où l'on est, dans les conditions habituelles de travail de ces appareils, de fabriquer un gaz exempt d'acide carbonique.

Dans les gazogènes ordinaires, la température est en général de 700° à 800° au maximum. A cette température, si l'on opère à la pression atmosphérique, il y a de 4 à 6 p. 100 d'acide carbonique inévitable. Il n'y a que deux moyens d'enrichir le gaz en oxyde de carbone : augmenter par un moyen quelconque (chauffage de l'air primaire ou protection contre le rayonnement) la température de régime de cet appareil dont la surface supérieure peut être utilement maintenue au rouge vif; ou modifier le régime de l'appareil suivant des indications que l'étude des lois d'équilibre nous permettra de déterminer.

Enfin, dans les hauts fourneaux, la dissociation de l'oxyde de carbone, découverte par Lowthian Bell et le dépôt abondant de charbon pulvérulent à la partie supérieure du fourneau sont encore une conséquence importante de la loi de dissociation, jouant un rôle essentiel dans la production des carbures de fer de la fonte.

La raison pour laquelle on peut se rendre compte de ces anomalies apparentes de la loi de dissociation, telle qu'elle avait été formulée par Sainte-Claire Deville, est la simultanéité de la décomposition du

gaz CO et du dépôt de charbon, laissant en présence CO^2 , CO et C. Dans ces conditions, il ne s'agit plus que d'un véritable équilibre chimique, d'une réaction constamment réversible.

La loi de dissociation que nous venons d'étudier pour tous les gaz de la combustion, qui n'est qu'un cas particulier des lois d'équilibre, n'est, sous sa forme primitive, qu'une loi limitative s'opposant à la réalisation de phénomènes que l'on croyait complets et irréversibles. En réalité, la plupart des réactions de combustion et plus particulièrement celles de la gazéification sont des phénomènes partiellement réversibles, et les gaz qui circulent lentement dans les gazogènes sont à l'état de variations différentielles incessantes; ce sont donc les lois différentielles des équilibres chimiques qui les régissent et qui seules permettent d'en raisonner complètement, de prévoir les phénomènes et de régler les combustions et surtout la conduite des gazogènes.

§ 2. — ÉQUILIBRES CHIMIQUES DES GAZ ET COMBUSTIBLES. APPLICATION DE CES LOIS A L'ÉTUDE DES GAZOGÈNES

L'application des lois de l'équilibre chimique à l'étude des combustions partielles et réversibles des gazogènes est relativement récente. La première détermination de la constante de la formule de Van t'Hoff a été faite par Le Chatelier à la suite de l'étude expérimentale du gaz de gazogène de la C^{ie} Parisienne du Gaz alimenté au coke et soufflé par ventilateur, sans injection de vapeur — conditions représentant l'équilibre de l'oxyde de carbone, acide carbonique et carbone en présence de la quantité d'azote correspondant à la composition de l'air atmosphérique.

Depuis lors, les travaux de Boudouard sur les équilibres de l'acide carbonique; de l'oxyde de carbone et du charbon, ont apporté une mesure plus scientifique de cette constante, tout en confirmant le chiffre adopté par Le Chatelier.

Nous ne rapporterons pas ici ces diverses expériences qui ont été publiées et reproduites dans les ouvrages déjà cités¹. Mais ce qu'il est intéressant de signaler, c'est cette parfaite concordance entre des expériences de laboratoire et des mesures faites sur des fours

¹ LE CHATELIER, *Introduction à l'étude de la métallurgie*, p. 80.

BABU, *Traité de métallurgie*, Paris, 1906.

BOUDOUARD, *Ann. Chim. Phys.*, (7), **24**, 5; 1901.

d'industrie, car elle démontre l'intérêt général de l'application des lois d'équilibre aux problèmes industriels et la nécessité de la connaissance de ces lois pour l'étude rationnelle du gazogène. C'est une théorie nouvelle que l'ingénieur ne peut se dispenser de connaître.

Avant de l'exposer, nous devons rappeler quelques définitions dont nous n'avons pas eu jusqu'ici à nous servir mais qui sont nécessaires à l'intelligence des formules d'équilibre.

Condensation des gaz. — On appelle *condensation d'un gaz*, le nombre des molécules ou la fraction de molécule contenus dans une phase gazeuse.

En d'autres termes, si un volume de gaz homogène (phase gazeuse) pris pour unité (notre unité est toujours le volume moléculaire 22,32 l.) contient un seul gaz, par exemple CO_2 , et si cette phase est à la température normale de 15° à la pression de trois atmosphères, la condensation de l'acide carbonique est 3; si ce gaz est à la pression atmosphérique, sa condensation est 1. Si ce gaz supposé toujours à la température de 15° est mêlé d'azote comme dans le cas de la combustion par l'air, la condensation n'est plus que de $1/5$ tandis qu'elle est de $4/3$ pour l'azote. Dans une phase gazeuse à la pression atmosphérique et à la température de 15° , la somme des volumes moléculaires des constituants est évidemment égale au volume total de la phase, ce qui s'exprime en disant que *la somme des condensations est égale à l'unité*.

Soit un gaz Siemens de composition suivante :

CO_2	CO	Az	Total.
3,9	23,5	70,6	100

la condensation de l'acide carbonique est 0,059, celle de l'oxyde de carbone 0,235, celle de l'azote 0,706.

Si la température ou la pression changent, la condensation subira des variations suivant les lois de Mariotte et Gay-Lussac, en raison directe de la pression et en raison inverse de la température.

Coefficient de dissociation. — On appelle *coefficient de décomposition ou coefficient de dissociation*, le rapport de la condensation du gaz résultant de la décomposition à la condensation du gaz qui se décompose, pris à l'origine de la réaction, c'est-à-dire avant décomposition.

Si nous revenons au gaz Siemens ci-dessus, si l'on admet que tout l'acide carbonique indiqué par l'analyse chimique résulte de la

décomposition de l'oxyde de carbone par la réaction $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$, le coefficient de décomposition ou dissociation du gaz est

$$\frac{5,9}{5,9 + 23,5} = 15 \text{ p. } 100.$$

Inversement, si dans des fumées de four on trouve à l'analyse la composition suivante :

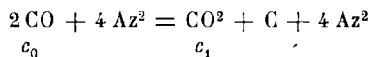
CO_2	CO	Az
19,5	0,5	80

et si l'on admet que l'oxyde de carbone est dû uniquement à la dissociation de l'acide carbonique sous l'influence d'une température supérieure à $1\ 500^\circ$, le coefficient de dissociation est :

$$\frac{0,5}{19,5 + 0,5} = \frac{0,5}{20} = 0,025.$$

Ces termes étant définis, cherchons à établir les lois d'équilibres chimiques dans les gazogènes, d'abord dans le cas le plus simple du gaz Siemens (CO_2 , CO , Az), puis dans le cas du gaz à l'eau théorique, et enfin dans le cas général des gaz mixtes.

a) **Gaz Siemens.** — La formule de réaction est



La formule générale d'équilibre est :

$$500 \text{ L} \frac{dT}{T^2} - \log. P + \log. \frac{c_1}{c_0^2} = \text{constante.}$$

Nous pouvons admettre que la chaleur dégagée $L = 39$ ne varie pas avec la température parce que la formule ne s'applique qu'entre des températures peu différentes, de 500° à 800° ou $1\ 000^\circ$ au maximum dans les gazogènes. D'autre part, la plupart des gazogènes fonctionnant à la pression atmosphérique, le terme $\log P$ est une constante que nous pouvons faire passer dans le second membre de l'équation. Nous arrivons ainsi à la formule que nous avons déjà citée :

$$\frac{19\ 500}{T} - \log. \text{nép.} \frac{c_1}{c_0^2} = \text{constante.}$$

Cherchons maintenant la relation qui existe dans les gazogènes entre les concentrations c_0 et c_1 . Il suffit pour cela d'écrire que le

rapport de l'oxygène contenu dans les deux gaz carbonés est dans le même rapport avec l'azote que dans l'air atmosphérique, soit dans le rapport de 1 à 4, d'où la relation

$$3 c_0 + 5 c_1 = 1$$

l'équation précédente devient alors :

$$\frac{19\,500}{T} - \log. \text{ nép. } \frac{9 c_1}{(1 - 3 c_1)^2} = \text{constante.}$$

En faisant les calculs on trouve pour les différentes températures les valeurs suivantes des concentrations de l'oxyde de carbone et de l'acide carbonique :

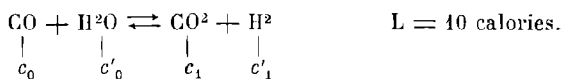
TABLEAU DES CONCENTRATIONS DE L'ACIDE CARBONIQUE ET DE L'OXYDE DE CARBONE DANS LES GAZOGÈNES

TEMPÉRATURES	c_0 (CO)	c_1 (CO ²)
500°	0,02	0,188
600°	0,12	0,128
700°	0,23	0,062
800°	0,29	0,026
900°	0,32	0,005
1 000°	0,33	0,002

Ce tableau est d'un usage constant dans l'étude des gazogènes ; il permet, en comparant les teneurs en oxyde de carbone et acide carbonique du gaz produit avec les teneurs déterminées par le calcul, de se rendre compte si la marche de l'appareil est normale ou non.

On utilise également ces chiffres dans les études relatives aux hauts fourneaux, car ils indiquent, pour un gaz de composition donnée, la température au-dessous de laquelle le dépôt de charbon commence à être possible¹.

b) Équilibre du gaz mixte CO + CO² + H² — L'oxyde de carbone, la vapeur d'eau, l'hydrogène et l'acide carbonique donnent lieu, en l'absence de carbone solide, à un équilibre caractérisé par la réaction



¹ LE CHATELIER, *Introduction à l'étude de la métallurgie*, p. 84.

La formule d'équilibre est dans ce cas :

$$500 \int L \frac{dT}{T^2} + \log. \text{ nép. } \frac{c_1 c_1}{c_0 c'_0} = \text{constante.}$$

On ne possède pas encore de données absolument précises qui permettent de déterminer la grandeur de la constante. Cependant Le Chatelier a pu, en partant d'expériences de Dixon et en supposant la chaleur de réaction invariable entre les températures que l'on peut rencontrer dans les gazogènes, arriver à l'équation d'équilibre intégré suivante :

$$- \frac{5000}{T} + \log. \text{ nép. } \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} = -5$$

avec la valeur ci-dessous indiquée du rapport $\frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0}$.

$$\begin{aligned} 500^\circ \quad \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} &= 3,10 \\ 900^\circ \quad \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} &= 0,48 \\ 1300^\circ \quad \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} &= 0,20 \\ 1500^\circ \quad \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} &= 0,16 \\ 1900^\circ \quad \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} &= 0,11 \end{aligned}$$

Si nous appliquons la formule ci-dessus à un gaz de gazogène dans lequel on a dosé comme cela se fait habituellement CO, CO², H², produit dans un gazogène au coke dont la température de sortie était de 730° et de composition suivante :

CO	CO ²	H ²	H ² O
0,20	0,05	0,10	x

la formule donne dans ces conditions :

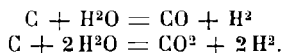
$$\begin{aligned} \log. \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} &= 0 \\ \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} &= 1 = \frac{0,05 \times 0,10}{0,20 \times x} \\ x &= 0,025. \end{aligned}$$

Ce chiffre est conforme à des expériences que nous avons faites sur un gazogène (étude du four de la verrerie de Folembay) où le dosage de l'eau contenue dans le gaz à sa sortie du gazogène, dans le collecteur, a accusé de 2 à 3 p. 100 de vapeur d'eau.

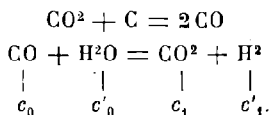
Ici encore, la concordance entre les données expérimentales et les résultats de calculs par les équilibres chimiques montre quels services l'application de ces lois peut rendre.

Il sera, en fait, inutile de doser l'eau dans les gaz de gazogènes, ce qui est toujours une opération délicate, la connaissance des trois éléments CO , CO^2 , H , permettra de calculer l'eau nécessairement contenue dans le gaz.

c) **Action de l'eau sur le charbon. Gaz à l'eau.** — La réaction de l'eau sur le charbon, utilisée pour la fabrication du gaz à l'eau, donne lieu à des phénomènes plus complexes que les précédents en raison de la présence du carbone solide. Deux réactions peuvent en effet se produire et se produisent simultanément :



On ne peut représenter un équilibre semblable par une formule unique. La méthode la plus simple pour établir les conditions de cet équilibre complexe est de le considérer comme résultant des deux équilibres simples précédemment étudiés :



La première équation donne à une température et à une pression quelconque une relation entre l'oxyde de carbone et l'acide carbonique, pouvant exister au contact du charbon ; la seconde donne les proportions relatives de vapeur d'eau et d'hydrogène pouvant exister à la même température en présence d'acide carbonique et d'oxyde de carbone calculés d'après la première formule.

Cherchons par cette méthode quelle sera la composition du gaz produit, lorsque l'on fait passer à 730° de la vapeur d'eau sur du charbon.

L'équation relative à l'acide carbonique agissant sur le charbon

$$\frac{19,500}{T} - \log. \frac{c_1}{c_0^2} = \text{constante} = 19,5$$

donne ici :

$$\frac{c_1}{c_0^2} = 1$$

La formule relative à l'équilibre des quatre gaz est

$$-\frac{5\,000}{T} + \log. \text{ nép. } \frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} = -5$$

d'où l'on tire pour la température de 730°

$$\frac{c_1 c'_1}{c_0 c'_0} = 1.$$

Nous avons ainsi deux relations entre les quatre concentrations inconnues. Nous en obtiendrons une troisième en exprimant que les proportions d'oxygène et d'hydrogène contenues dans le mélange sont les mêmes que dans l'eau

$$c_1 + 0,5 c_0 + 0,5 c'_0 = 0,5 (c'_0 + c'_1)$$

ou

$$c_1 + 0,5 c_0 = 0,5 c'_1$$

Enfin nous aurons une quatrième relation en exprimant que la somme des concentrations est égale à l'unité, puisqu'il n'y a pas d'autres gaz que ceux qui figurent dans la formule.

$$c_0 + c'_0 + c_1 + c'_1 = 1.$$

En résolvant ces quatre équations à quatre inconnues, on arriverait à une équation du 3^e degré en c_1 .

Aussi est-il plus simple de faire le calcul par tâtonnements successifs en mettant les équations sous les formes :

$$\begin{aligned} \frac{c_1}{c_0} &= c_0 = \frac{c'_0}{c'_1} \\ c'_1 &= 2c_1 + c_0. \end{aligned}$$

puis en se donnant arbitrairement la valeur de c_0 , faisant les calculs au moyen des trois équations et reportant les valeurs trouvées dans les trois dernières. Cette équation ne sera pas vérifiée tout de suite, mais en procédant par fourchettes successives on arrivera à résoudre le système d'équations.

Voici les calculs pour des valeurs successives de c_0 .

	$c_0 = 0,40$	$c_0 = 0,20$	$c_0 = 0,30$	$c_0 = 0,296$
CO = c_0 . . .	0,40	0,20	0,30	0,296
H ² O = c'_0 . . .	0,16	0,04	0,09	0,089
CO ² = c_1 . . .	0,72	0,28	0,48	0,473
H ² = c'_1 . . .	0,29	0,06	0,14	0,142
	<hr/> 1,57	<hr/> 0,58	<hr/> 1,01	<hr/> 1,000

C'est donc à la valeur 0,296 CO que correspond l'équilibre pour la température supposée de 730°. On voit qu'à cette température la proportion de gaz combustibles serait beaucoup trop faible : dans la pratique des gazogènes à l'eau, on arrive à une teneur en acide carbonique moitié moindre qui correspond à une température de 900° environ. Ici encore, plus le gazogène sera à allure chaude, plus la qualité du gaz sera satisfaisante¹.

L'étude que nous venons de faire, d'après Le Chatelier, des trois cas d'équilibres chimiques qui résument la plupart des réactions des gazogènes, nous a conduit, dans le cas du gaz Siemens ($\text{CO} + \text{CO}^2 + \text{Az}$) à un barème au moyen duquel on pourra contrôler la marche d'un gazogène, dans le cas du gaz mixte ($\text{CO} + \text{H} + \text{CO}^2 + \text{Az} + \text{H}^2\text{O}$) à une formule permettant de calculer l'un des quatre éléments en équilibre lorsqu'on connaît les trois autres, et en particulier la vapeur d'eau ; enfin dans le cas du gaz à l'eau, à une méthode de calcul permettant d'établir *a priori* la composition d'un gaz en fonction de la température.

Cette étude nous a encore permis de préciser l'importance de la température élevée (au moins 800°) dans les gazogènes, ceci, aussi bien en raison de la loi de décomposition de l'oxyde de carbone que par suite de la loi d'équilibre du gaz à l'eau ; elle nous permet donc d'ériger en doctrine une pratique que l'expérience industrielle nous avait déjà enseignée.

Ceci suffit à démontrer l'usage que doit faire l'ingénieur des formules déduites de la thermodynamique. Il y a là toute une technique nouvelle avec laquelle il est nécessaire de se familiariser, surtout à l'heure actuelle où les questions de gazéification et de progrès dans les gazogènes sont particulièrement à l'ordre du jour.

Nous ne saurions trop insister sur l'intérêt qu'il y a à pratiquer couramment ces calculs d'équilibres chimiques.

Nous nous sommes efforcé de dégager les formules de Le Chatelier des lois et formules toutes scientifiques et abstraites de la mécanique chimique. Mais il est évident *a priori* que des lois, si abstraites qu'elles puissent être, qui conduisent à des conclusions pratiques aussi précises, contiennent en elles-mêmes et dans leur énoncé primitif des enseignements qui peuvent être précieux pour l'interprétation des phénomènes observés dans les fours. Nous ne pouvons

¹ LE CHATELIER, *Introduction à l'étude de la métallurgie*, p. 86.

donc nous dispenser de donner en fin de ce chapitre les lois fondamentales de la thermodynamique.

§ 3. — PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA THERMODYNAMIQUE

a) CONSERVATION DE L'ÉNERGIE. — PRINCIPE DE L'ÉTAT INITIAL ET DE L'ÉTAT FINAL

Le premier principe, auquel nous avons déjà plusieurs fois fait allusion, est le *Principe de la conservation de l'Énergie* avec son corollaire essentiel, le *Principe de l'état initial et de l'état final*.

Dans les opérations de chauffage qui sont le but unique de notre étude, les réactions de combustion s'opérant presque toujours sans production de travail extérieur et sans dégagement d'électricité, par simple échange d'énergie chimique en énergie calorifique, ce principe peut s'énoncer sous la forme simplifiée suivante :

« Si un système de corps simples ou composés pris dans des conditions déterminées éprouve des changements physiques ou chimiques capables de l'amener à un nouvel état, sans donner lieu à aucun effet mécanique extérieur au système, la quantité de chaleur dégagée ou absorbée par l'effet de ces changements ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système ; elle est la même, quelles que soient la nature et la suite des états intermédiaires ¹. »

Si l'on veut tenir compte du travail extérieur, le principe peut revêtir la forme suivante :

« Dans une série d'opérations chimiques, l'excès de la chaleur dégagée, sur la chaleur équivalente au travail effectué par les forces extérieures, ne dépend que de l'état initial et de l'état final ². »

Enfin, dans sa forme rigoureuse, en tenant compte de toutes les formes entre lesquelles l'énergie peut se transformer, le principe de l'état initial et de l'état final s'énonce comme suit :

« Supposons un ensemble de corps passant d'un état initial A, pour arriver à un état final B, dans des conditions telles que les seuls phénomènes extérieurs au système et corrélatifs de ses changements intérieurs soient :

« 1° Des échanges de chaleur par conduction avec un calorimètre.

¹ BERTHELOT, *Mécanique chimique*.

² CHESNEAU, *Lois générales de la chimie*, Paris, 1899.

« 2° Des accumulations ou dépenses de travail sous une forme simple immédiatement mesurable comme dans le changement d'une masse gazeuse à pression constante.

« 3° Des accumulations ou dépenses d'électricité gagnées ou perdues par un condensateur.

« Dans ces conditions, la somme des quantités de chaleur, de travail, et d'énergie électrique mises en jeu à l'extérieur du système, multipliées chacune par un coefficient numérique convenable fixé d'après les unités de mesure employée, ne dépend que de l'état initial A et de l'état final B, c'est-à-dire qu'il est indépendant de tous les phénomènes intérieurs au système, chimiques ou non, qui ont pu se produire pendant le passage de l'état A à l'état B¹. »

Donnons maintenant la valeur des coefficients numériques à appliquer à chacune des formes de l'énergie, en rappelant que nos unités sont, pour la chaleur la grande calorie, pour le travail le kilogrammètre, pour l'électricité le joule. On peut évidemment prendre arbitrairement égal à l'unité le coefficient relatif à l'une quelconque des énergies : on dit alors que l'énergie totale est exprimée au moyen de l'unité relative à cette forme de l'énergie.

Soient Q la quantité de chaleur, pV le travail correspondant au changement de volume V d'une masse gazeuse prise sous pression constante p , eI l'énergie électrique, nous avons pour exprimer la loi de conservation de l'énergie ou la loi de l'état initial et de l'état final, l'une des trois expressions équivalentes :

L'unité choisie est la calorie :

$$Q + 2,36 \times 10^{-3} pV + 0,241 \times 10^{-3} eI = \text{constante.}$$

L'unité choisie est le kilogrammètre :

$$423,5 Q + pV + 0,102 eI = \text{constante.}$$

L'unité choisie est le joule :

$$4,155 Q + 9,81 pV + eI = \text{constante.}$$

Le principe de l'état initial et de l'état final a reçu dans notre étude du chauffage et dès ce premier chapitre des applications nombreuses : c'est lui qui nous a permis de déterminer la chaleur de combustion des corps qui ne peuvent se combiner directement; c'est encore

¹ LE CHATELIER, *Introduction à l'étude de la Métallurgie*, p. 58.

grâce à ce principe qu'on peut calculer la variation de la chaleur dégagée par une réaction à des températures croissantes, ou encore les chaleurs de combustion s'opérant à des températures supérieures à celles qui peuvent être pratiquées au calorimètre : rappelons enfin que c'est en nous basant sur cette loi que nous avons pu calculer l'équilibre du gaz à l'eau en passant par des réactions intermédiaires absolument différentes de celles qui se passent en réalité.

b. — LOIS DES ÉQUILIBRES CHIMIQUES

La loi générale régissant les équilibres chimiques a été formulée par Le Chatelier ; elle n'est que la généralisation du principe de Van t'Hoff à tous les facteurs de l'équilibre. Son énoncé est le suivant :

Loi du déplacement de l'équilibre.

« Tout système en équilibre chimique éprouve du fait de la variation d'un seul des facteurs de cet équilibre — pression, température, force électromotrice, concentration des corps en réaction — une transformation dans un sens tel que si elle se produisait seule elle amènerait une variation de signes contraires du facteur considéré. »

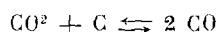
Cette loi, bien que simplement qualitative, est en réalité très féconde et avant d'en examiner les corollaires relatifs aux quatre facteurs considérés, nous voudrions montrer par quelques exemples industriels le parti qu'on en peut tirer soit pour l'explication, soit pour la prévision de certains phénomènes dans les questions du chauffage.

Le premier exemple est tiré de la conduite des gazogènes. Lorsque nous avons fait, en 1892, nos premières études sur un four Siemens, en conduisant les gazogènes, notre principale préoccupation était de réduire la proportion d'acide carbonique, de façon à obtenir un gaz plus riche en chaleur latente.

Nous n'avons jamais pu descendre au-dessous de 5 p. 100 (exceptionnellement 4,5 p. 100). Or, dès cette époque, le professeur Ledebur signalait dans son traité de métallurgie le fait que l'on pouvait améliorer le gaz par l'emploi de vent forcé. Depuis quelques années, l'emploi de souffleries à haute pression dans les gazogènes à fusion de cendres (Ebelmen, Sépulchre) ou sans fusion de cendres (Morgan, Turk, etc...) est venu confirmer l'affirmation de Ledebur, et il n'est plus rare de trouver des gaz pauvres industriels titrant de 1 à 2 p. 100 de CO² contre 23 à 26 p. 100 CO.

L'explication de ce fait d'expérience est restée longtemps pour nous obscure, et la démonstration théorique de l'amélioration du gaz sous l'influence de la pression nous a été impossible. Nous croyons qu'elle est donnée par la loi de déplacement de l'équilibre, de la façon suivante.

Lorsqu'on augmente beaucoup la pression dans un gazogène, il en résulte en général un accroissement de la température résultant de l'accélération de la combustion et de la diminution concomitante des pertes par rayonnement. Il y a donc variation positive des deux facteurs température et pression. Or, en analysant les conséquences à l'aide de la loi d'action et de réaction, on trouvera que le sens de la réaction réversible :



doit être dans le sens d'une plus grande production d'oxyde de carbone. C'est l'explication cherchée.

Plus récemment, nous avons été appelé à faire des expériences sur une chaudière marine chauffée au pétrole ; nous avons atteint dans le foyer, par suite du bon réglage de la combustion, une température très élevée, se rapprochant de la dissociation de l'acide carbonique, et comme il y avait en même temps production de fumée noire, nous étions dans un cas d'équilibre. Or l'analyse des gaz de cette combustion nous conduisit à un résultat que nous ne pouvions pas expliquer par les seules lois de la combustion et par la dissociation de CO^2 (coexistence dans les fumées, d'un excès d'air, avec de l'oxyde de carbone) et nous ne comprenions pas davantage la mauvaise combustion décelée par la fumée noire avec la haute température du foyer. Nous avons cherché le remède à cette mauvaise marche qui avait comme autre conséquence une surpression excessive dans la chambre de chauffe (chambre close) dans les lois de déplacement de l'équilibre, et nous avons pratiquement réussi.

C'est à la suite de ces résultats expérimentaux et tout pratiques que nous en sommes venu à la conviction que la loi de déplacement de l'équilibre ou ses différents corollaires d'action et de réaction appliqués aux facteurs de l'équilibre peuvent rendre de grands services au praticien, surtout pour la conduite des gazogènes.

Sans doute l'analyse de phénomènes aussi complexes, dans lesquels les quatre facteurs réagissent les uns sur les autres, est quelquefois très délicate ; sans doute, même, il arrivera à l'ingénieur de se tromper dans cette analyse.

Il n'en reste pas moins vrai qu'une loi régissant en toute certitude les phénomènes de gazéification et de combustions incomplètes sera d'un précieux secours pour le praticien qui devra se familiariser avec ses divers corollaires, dont nous donnons ci-dessous les énoncés.

1° *Variation du facteur concentration.* — Toute augmentation de la concentration de l'un des corps intervenant dans l'équilibre provoque un déplacement dans le sens de la réaction qui tend à faire disparaître une certaine quantité de ce corps et réciproquement.

2° *Variation du facteur température.* — Toute élévation de température d'un système en équilibre chimique provoque le déplacement de l'équilibre dans le sens qui correspond à une absorption de calories et inversement tout abaissement de température provoque le déplacement de l'équilibre dans le sens qui correspond à un dégagement de chaleur.

3° *Variation du facteur pression.* — Toute élévation de pression produit le déplacement de l'équilibre dans le sens de la réaction qui correspond à une diminution de volume.

4° *Variation du facteur force électromotrice.* — Toute augmentation de la force électromotrice intervenant dans une réaction produit le déplacement de l'équilibre dans le sens qui correspond à une absorption de joules, et inversement dans le cas de diminution de la force électromotrice.

Donnons quelques exemples d'application de ces lois partielles, soit par exemple le cas de la concentration. Supposons que dans un gazogène à gaz mixte, nous augmentions la condensation de la vapeur d'eau : la chose est toujours possible puisqu'il suffit pour cela d'insuffler sous le gazogène une plus grande quantité de vapeur d'eau, et si on suppose même que cette vapeur soit surchauffée à un degré tel que la température dans le gazogène soit maintenue constante, le facteur condensation se trouvera seul modifié dans l'équilibre. D'après la loi de stabilité, il se produira une réaction tendant à diminuer la proportion de vapeur d'eau. Il y aura donc production d'hydrogène. On en conclut que dans un gaz mixte, la teneur en hydrogène n'est pas régie par les lois de dissociation seules, c'est-à-dire par la pression et la température, et que l'on est maître d'enrichir à volonté en hydrogène un gaz industriel. *Le moyen d'y parvenir est la surchauffe de la vapeur injectée.*

Ici, nous sommes encore obligé d'ouvrir une parenthèse et d'in-

sister sur cette méthode d'enrichissement des gaz de gazogène par l'emploi de vapeur d'eau surchauffée que la théorie des lois d'équilibre vient de nous indiquer.

La surchauffe de la vapeur a été jusqu'ici peu ou point usitée dans les gazogènes; il n'en est en tout cas pas fait mention dans les ouvrages techniques traitant de gazéification. L'industriel, désireux d'enrichir son gaz et par conséquent d'accroître la température de combustion dans son laboratoire, y trouverait cependant un excellent moyen d'améliorer avec la qualité de son combustible gazeux, tout le fonctionnement de ses appareils de chauffage.

Il est intéressant de signaler au moment où les inventions — ou brevets — de gazogènes se sont multipliés au delà de toute analyse, que les inventeurs se sont attachés à des améliorations toutes mécaniques ou encore à des dispositifs facilitant la distillation, sans se préoccuper le plus souvent de la température de régime, de la pression et de l'influence de l'eau froide ou surchauffée sur la qualité du gaz.

Et l'on en vient à la conclusion que l'étude et l'application des lois d'équilibre dirigeant la marche d'un gazogène *quelconque* peuvent faire plus dans l'avenir, pour l'amélioration des gaz de fours, que tant de brevets achetés souvent très chers par les métallurgistes, et qui sont presque équivalents quant à la qualité du gaz produit. Nous serions même tenté de dire que tous les gazogènes sont bons, et que c'est peut-être de la manière de s'en servir, d'une application raisonnée de la science nouvelle des équilibres, que le progrès doit venir.

Appliquons maintenant la loi au cas de la dissociation de l'acide carbonique :



Cette réaction donnant lieu à une absorption de chaleur croîtra avec la température. En effet, la proportion dissociée inférieure à 1 p. 100 vers 1 500°, atteint 30 p. 100 vers 3 000°.

Étudions de même la formation de l'acétylène, ce combustible devenu industriel par l'usage de plus en plus fréquent du chalumeau oxy-acétylénique.

La réaction $\text{C}^2 \text{H}^2 = \text{C}^2 + \text{H}^2$ dégage + 51,5 Cal. D'après la loi, plus la température est élevée, plus la quantité d'acétylène existant

en équilibre stable avec l'hydrogène sera considérable. En effet, Berthelot l'a préparé à la température de l'arc électrique entre 3 000° et 4 000°. Par refroidissement lent, sa décomposition serait complète; il faut pour le conserver un refroidissement assez rapide. L'acétylène à la température ordinaire est un véritable explosif, au moins lorsqu'il est comprimé : on ne le conserve alors que par des artifices, tels que le procédé de l'acétylène dissous.

Un des phénomènes sur lesquels la loi de stabilité de l'équilibre a jeté le plus de lumière est la dissociation de l'oxyde de carbone; nous avons déjà étudié numériquement ce phénomène et avons trop insisté sur ses anomalies apparentes pour avoir beaucoup à y revenir. Constatons seulement ici que ces anomalies étaient faciles à prévoir par la loi générale d'équilibre.

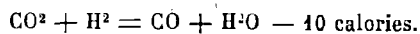
La réaction $2 \text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$ dégage 38,8 Cal. L'oxyde de carbone dégageant de la chaleur est donc de plus en plus stable à mesure que la température s'élève. C'est en opérant à des températures rendues insensiblement de plus en plus basses, que l'on peut obtenir la dissociation la plus avancée; elle est très complète entre 300° et 400°. Lowthian Bell a constaté le fait par une observation industrielle très remarquable; il a reconnu que le sommet des hauts fourneaux était rempli et souvent obstrué par un dépôt de noir de fumée provenant de cette dissociation. C'est un phénomène important au point de vue de la marche des hauts fourneaux; la réaction fonctionne en effet comme un véritable régulateur, en maintenant à une température sensiblement fixe, les gaz qui s'échappent par le gueulard. Ce phénomène explique notamment les différences de composition des gaz de hauts fourneaux quand on travaille en fonte blanche ou en fonte grise.

Il nous reste à résumer les conséquences diverses de la loi générale de stabilité de l'équilibre dans le cas habituel des gazogènes à gaz mixte où l'équilibre s'établit entre les quatre gaz



en présence du charbon.

Reprenons la réaction



Cette réaction est indépendante de la pression, puisqu'il n'y a pas changement de volume; elle se déplace par l'élévation de température vers la formation de quantités croissantes d'oxyde de carbone et de vapeur d'eau. La composition des gaz de gazogènes qui renferment ces quatre corps variera donc dans un sens tel que plus la température sera élevée, plus le rapport de l'oxyde de carbone à l'acide carbonique sera élevé. Cette loi doit se combiner avec la loi déduite de la variation du facteur condensation au point de vue de la production d'hydrogène, et avec la remarque au sujet de l'influence de la pression que nous avons faite au début de ce paragraphe; elle permet de prévoir les compositions des gaz mixtes et indique les moyens (élévation de la température, emploi de vapeur surchauffée, forte pression) par lesquels on pourra agir sur un gazogène et en améliorer la marche.

On peut en déduire que le gaz produit par un gazogène à gaz mixte sera d'autant meilleur que la *température sera plus élevée, la pression plus forte et que l'on réussira (par la surchauffe) à y injecter plus de vapeur d'eau sans modifier la température de régime de l'appareil.*

Loi d'isoéquilibre.

La deuxième loi régissant les équilibres chimiques est la loi d'*iso-dissociation* ou d'*isoéquilibre*, loi mathématique au moyen de laquelle ont été obtenues toutes les formules numériques dont nous avons précédemment fait usage, sans qu'il fût utile d'en donner la démonstration.

Cette loi s'énonce comme suit :

« Quand un système monovariant est en équilibre chimique, on démontre d'une façon rigoureuse, comme conséquence des principes de l'énergétique, que les variations simultanées de pression et de température ne modifiant pas son état d'équilibre sont liées par la relation différentielle

$$L \frac{dT}{T} + AVdP = 0 \quad (x)$$

« dans laquelle les termes ont la signification suivante :

« A équivalent calorifique du kilogrammètre.

« P pression en kilogrammes par mètre carré

« T température absolue,

« L chaleur de réaction à pression et température constantes,

« considérée comme positive quand elle est cédée par le système
« chimique au calorimètre.

« V changement de volume exprimé en mètres cubes résultant de
« la réaction effectuée à pression et température constante est rap-
« porté à la même quantité de matières que la chaleur latente de
« réaction L. Il est considéré comme positif quand il correspond à
« une augmentation de volume du système chimique.

Dans nos études expérimentales, nous n'avons qu'indirectement eu à faire usage de la loi d'isoéquilibre, mais il n'est pas douteux, à mesure que les données empiriques sur les gazogènes se préciseront, que cette loi rendra des services de plus en plus grands.

La formule simplifiée (a) qui est la traduction au cas des gazogènes de la loi d'isoéquilibre, servira notamment à maintenir un gazogène à une allure reconnue satisfaisante, et à préciser les variations soit de température, soit de pression qu'on devra lui faire subir pour l'amener à une bonne marche et l'y maintenir.

Lorsque les gaz suivent la loi de Mariotte, ce que nous avons admis dans les limites de températures et de pressions où opère l'industrie, on peut écrire

$$L \frac{dT}{T^2} + A \frac{PV}{T} \frac{dP}{P} = 0$$

ou

$$L \frac{dT}{T^2} + ARN \frac{dP}{P} = 0,$$

R étant la constante de la loi de Mariotte pour une molécule de gaz,

N le nombre de molécules dont la masse gazeuse a augmenté par le fait de la réaction.

En intégrant on arrive à la formule

$$500 \int \frac{L}{T^2} dT + N \log n \frac{P}{P} = \text{constante}, \quad (a)$$

formule approchée en raison de l'approximation de la loi de Mariotte mais absolument suffisante dans les applications industrielles.

C'est de cette formule générale qu'ont été déduites toutes les formules numériques que nous avons précédemment exposées dans les calculs d'équilibres.

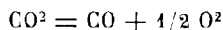
Loi de l'action de masse.

Lorsqu'on a un système gazeux à température constante, on a entre les pressions partielles p p' p'' des gaz contenus dans le système la relation

$$n \frac{dp}{p} + n' \frac{dp'}{p'} + n'' \frac{dp''}{p''} \dots = 0$$

n_0 n'_0 n''_0 , indiquant le nombre de molécules gazeuses entrant en réaction chimique, et n_1 n'_1 n''_1 indiquant le nombre de molécules gazeuses résultant de la réaction à l'état d'équilibre.

Par exemple, dans le cas de dissociation de l'acide carbonique,



on aura

$$n_0 = 1 \quad n_1 = 1 \quad n'_1 = \frac{1}{2}$$

ce qui conduit à la formule :

$$\frac{dp}{p} - \frac{dp'}{p'} - \frac{1}{2} \frac{dp''}{p''} = 0.$$

Si l'on introduit dans ces formules la notion de concentration que nous avons précédemment définie, c'est-à-dire la fraction de molécule d'un des gaz composants dans une molécule du mélange, ou ce qui revient au même le volume de ce gaz contenu dans un volume du mélange (voir ci-dessus la définition de la concentration) mesurés tous deux sous la même pression, on a évidemment :

$$c = \frac{p}{P} \quad c' = \frac{p'}{P}$$

ou

$$p = Pc \quad p' = c'P,$$

P étant la pression totale.

Et l'équation de la loi d'action de masse devient :

$$n_1 \frac{dc}{c} + n'_1 \frac{dc'}{c'} + \dots - n_0 \frac{dc_1}{c_1} - n'_0 \frac{dc'_1}{c'_1} + (n_1 + n'_1 + \dots - n_0 - n'_0 \dots) \frac{dP}{P} = 0;$$

et en posant :

$$\begin{aligned} n_1 + n'_1 + \dots - n_0 - n'_0 - \dots &= N \\ N \frac{dP}{P} + \sum n \frac{dc}{c} &= 0. \end{aligned} \quad (\beta)$$

En rapprochant cette relation de la formule analytique de la loi d'isoéquilibre, en remarquant que dP , dans cette expression, est la différentielle partielle par rapport à la température et que dans l'équation analytique dP est la différentielle partielle par rapport à la concentration, en ajoutant membre à membre les deux équations différentielles et en intégrant, on arrive, à la formule qui donne la loi complète de la dissociation d'une masse gazeuse homogène.

$$500 \int L \frac{dT}{T^2} + N \log \text{nép } P + \log \text{nép } \frac{c_1^{n_1} c'_1^{n'_1}}{c_0^{n_0} c'_0^{n'_0}} = \text{constante.}$$

Dans le cas où la variation de chaleur latente L est peu considérable et peut être considérée comme nulle dans l'intervalle de températures où se fait l'intégration il vient :

$$- 500 \frac{L}{T} + N \log \text{nép } P + \log \text{nép } \frac{c_1^{n_1} c'_1^{n'_1}}{c_0^{n_0} c'_0^{n'_0}} = \text{constante.} \quad (\gamma)$$

On déterminera la constante par une seule expérience dans laquelle on aura pu mesurer les valeurs correspondantes de P , T , c_0 , c'_0 , c_1 , c'_1 .

Ces lois mathématiques régissant les équilibres chimiques et en particulier les équations analytiques ou intégrées dont nous avons emprunté l'exposé au Cours de Le Chatelier¹, ont joué un rôle si important dans l'étude des combustions que nous ne pouvions nous dispenser de les exposer ici. Ce sont elles qui ont servi à établir les formules algébriques simples auxquelles nous avons si fréquemment eu recours. Mais il est évident que dans la pratique industrielle ces formules simples suffiront presque toujours à résoudre les problèmes de chauffage et en particulier à poursuivre l'étude aujourd'hui encore très imparfaite du gazogène.

C'est parce que ces formules sont suffisantes dans la pratique que nous les avons d'abord données sans démonstration, et nous avons, nous adressant à des praticiens, préféré indiquer d'abord les données

¹ H. LE CHATELIER, *Introduction à l'étude de la métallurgie*, p. 71 et suivantes.

numériques permettant de calculer les bilans de combustion, puis les formules algébriques permettant de comprendre les équilibres, de prévoir et régler les combustions, laissant pour le dernier exposé les lois fondamentales d'où ces données et formules sont issues.

A ceux qui voudront embrasser la question dans son ensemble et suivre la philosophie de cette science nouvelle nous ne saurions trop recommander de reprendre l'étude en sens inverse commençant par les lois de l'Énergétique, continuant par les lois analytiques et intégrées de l'équilibre, arrivant aux formules algébriques et terminant par les lois numériques qui sont d'un usage industriel courant. Nous ne pouvons à cet égard que renvoyer le lecteur au Traité de notre maître à qui nous avons fait de si fréquents et nombreux emprunts et que nous remercions ici de ses conseils.

CHAPITRE II

DE L'OBTENTION DE HAUTES TEMPÉRATURES

A. — ÉTUDE DES TEMPÉRATURES DÉVELOPPÉES DANS LES FOURS. TEMPÉRATURES DE RÉGIME ET TEMPÉRATURES DE COMBUSTION

§ 1. — DES DIFFÉRENTS MOYENS D'OBTENIR LES HAUTES TEMPÉRATURES

La réalisation des hautes températures a été longtemps, pendant toute la période de l'histoire industrielle antérieure à la découverte des fours à gaz à chaleur régénérée, la principale difficulté du chauffage industriel.

Pour la fabrication de l'acier qui, avec sa température de 1800°, représentait le maximum que l'industrie ancienne put atteindre, il fallait, soit dans le bas foyer, soit dans le four à creuset, chercher au sein de la masse de combustible en ignition le point le plus chaud, la zone de passage où la combustion est complète et sans excès d'air pour y placer le creuset ou pour y fondre le fer et le transformer en acier au sein même du combustible : la dépense de charbon était énorme et l'habileté du fondeur devait être très grande.

En verrerie où la température de régime est moindre et n'excède pas 1500°, l'habileté du maître fondeur n'était pas moins nécessaire et il n'était pas rare de voir la négligence d'un ouvrier retarder de quelques heures la fusion, sans parler de la difficulté de construction des fours dans lesquels le plus petit changement à un carneau, à une cheminée ou à la hauteur du creuset au-dessus de la grille pouvait compromettre toute une fabrication.

Ces difficultés se comprennent aisément quand on songe que le maximum de température développée par la combustion du carbone est 2040°, que le moindre excès d'air dans la combustion abaisse cette température, et que le jeu de température, l'écart entre la température de combustion à l'air froid et celle qui est nécessaire à

l'opération industrielle à effectuer, n'est que de quelques centaines de degrés en métallurgie.

Les difficultés ont disparu ou du moins la limite infranchissable représentée par la température de combustion du carbone à l'air froid a été franchie, le jour où on a eu l'idée de brûler le combustible avec de l'air préalablement chauffé, comme cela s'est pratiqué d'abord dans les hauts fourneaux, puis dans certains fours à réverbères et enfin dans les fours à gaz à chaleur régénérée.

L'idée fondamentale des fours à chaleur régénérée, de récupérer la chaleur emportée par les fumées et de la ramener au laboratoire du four, au moyen de l'air nécessaire à la combustion puis au moyen du gaz même, dont l'origine a peut-être été une pensée d'économie, a eu pour conséquence d'élever la température de combustion dans les fours, dans des proportions qui semblent théoriquement sans limites puisque la température du laboratoire et celle à laquelle les gaz de combustion peuvent être portés croissent parallèlement¹.

Pratiquement, les combustions à l'air, en raison du grand volume occupé par les produits de combustion, entraînant avec eux l'énorme poids mort d'azote (4 molécules par molécule de gaz brûlé) ne permettent guère de dépasser les températures de 2000°, par suite des pertes par rayonnement et conductibilité où la question de temps intervient, et de la lenteur des échanges de calories entre des masses gazeuses volumineuses.

Au delà de 2000° plusieurs moyens sont venus récemment donner un nouveau champ industriel pour l'obtention des hautes températures : l'emploi de l'oxygène séparé de son azote comme comburant, le four électrique, et les divers procédés métallurgiques connus sous le nom d'aluminothermie.

Il y a longtemps en vérité que la puissance du chauffage à l'oxygène pur est connue, et c'est à Sainte-Claire Deville qu'est dû le premier chalumeau oxy-hydrique industriel ou du moins pratique dans les laboratoires, avec la lumière de Drummond comme corollaire. Mais ce sont, d'une part l'abaissement énorme du prix de l'oxygène, depuis qu'il est devenu presque un sous-produit de l'industrie de l'air liquide et de l'azote, d'autre part l'usage de plus en plus facile de l'acétylène comme combustible qui ont rendu tout à fait industriel le chalumeau

¹ En signalant cet effet de la récupération sur les températures, nous insistons encore sur ce fait que l'élévation de température est due à l'addition d'une chaleur sensible à la chaleur latente contenue dans le combustible ; que le même effet pourrait être obtenu par un réchauffeur d'air indépendant du four ; qu'en un mot, la haute température n'est pas nécessairement fonction de la récupération.

à oxygène, avec le procédé métallurgique de la soudure autogène.

Quant au four électrique, on en connaît les débuts et l'essor si rapide que Moissan et son école surent lui donner.

Enfin, l'aluminothermie, plus récente que le four électrique, dont elle emploie les produits, a eu pour origine l'observation des températures très élevées développées dans certaines opérations métallurgiques, par exemple le Bessemer, par l'addition de corps oxydables, manganèse, silicium ou phosphore : de là à chercher les hautes températures par addition à froid de poudres de métaux très exothermiques intimement mélangées avec la matière à traiter et réagissant sur elle, il n'y avait qu'un pas ; c'est le principe de l'aluminothermie.

Ces trois méthodes d'obtention des hautes températures, chalumeau à oxygène, four électrique, aluminothermie, malgré leur très rapide développement industriel, sont encore, dans le problème général du chauffage, des solutions d'exception ; la plus grande partie des opérations de la grosse industrie est encore tributaire des fours ordinaires alimentés avec de l'air. Et comme les températures dans un laboratoire de four, température de régime et température de combustion, ont sur la bonne conduite d'une opération industrielle une influence décisive, nous ne saurions trop nous appesantir sur cette question, à laquelle la majeure partie de ce chapitre est consacrée, au double point de vue théorique et expérimental, ceci, dans le cas général. Nous étudierons ensuite les solutions d'exception et les très hautes températures industrielles.

DÉFINITION DE LA TEMPÉRATURE DE RÉGIME ET DE LA TEMPÉRATURE DE COMBUSTION

On appelle *température de combustion* la température à laquelle s'élèvent les produits gazeux de la combustion, en supposant le phénomène assez rapide pour que le rayonnement soit négligeable, ou en admettant que l'enceinte où se fait la combustion soit athermane.

Comme l'inflammation n'est jamais instantanée et que les enceintes sont toujours plus ou moins diathermanes, la température de combustion est un maximum que l'on observe très rarement dans les fours¹, elle ne doit pas non plus être confondue avec la température de la flamme variable d'un point à l'autre et très difficile à mesurer. C'est une donnée théorique qui mesure le potentiel thermique des produits de combustion.

¹ Dans des expériences récentes sur une chaudière à pétrole avec brûleurs concentriques, l'auteur a relevé au pyromètre une température très voisine de la température de combustion, dans le faisceau central.

On appelle *température de régime*, la température relevée au pyromètre dans le laboratoire d'un four.

Dans un four bien conduit, la température de régime est celle qui convient le mieux à l'opération que l'on doit effectuer.

Le chauffage industriel qui n'est qu'un échange de calories entre deux systèmes de potentiel thermique différent est la conséquence de la différence entre la température de combustion et la température de régime.

Il est évident *a priori*, que, toutes choses égales, le chauffage sera d'autant plus facile et le rendement calorifique d'autant meilleur que l'écart entre les températures de régime et de combustion sera plus grand.

§ 2. — TEMPÉRATURES DE COMBUSTION, CALCUL DE CES TEMPÉRATURES

Les températures de combustion se calculent au moyen des chaleurs de combustion (chaleur latente) et des chaleurs d'échauffement (chaleur sensible) des produits de combustion.

Lorsqu'une combustion s'opère dans une enceinte athermane, par hypothèse, la chaleur dégagée n'est employée qu'à élever la température du mélange gazeux final, et le phénomène étant athermane, 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 :

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

formule qui donne par la résolution d'une équation du second degré la valeur de T en fonction de T₀.

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.

a) MÉTHODE GRAPHIQUE POUR LE CALCUL DES TEMPÉRATURES DE COMBUSTION : CALCUL DES PRINCIPAUX CAS INDUSTRIELS DE COMBUSTION

On trace par points la courbe parabolique (fig. 5)

$$\Sigma a [T - T_0] + \Sigma b [T^2 - T_0^2]$$

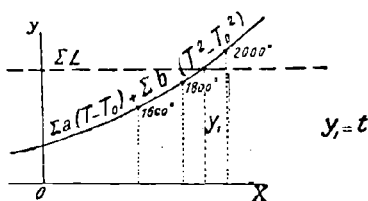


Fig. 5. — Détermination graphique des températures de combustion.

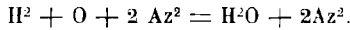
en déterminant les ordonnées pour des abscisses correspondant aux températures pour lesquelles les chaleurs d'échauffement sont immédiatement données par le barème et l'on cherche l'intersection de cette courbe avec la droite $Y = \Sigma L$ représentant la chaleur totale disponible. La détermination de la température de combustion est immédiate.

Cette méthode graphique que nous avons empruntée au cours de H. Le Chatelier nous a servi seule à tous les calculs de température; nous ne saurions trop la recommander, d'autant que si elle est moins précise que la méthode algébrique, elle expose à moins d'erreurs.

Certaines températures de combustion sont indispensables à connaître, par exemple la combustion de l'hydrogène, du carbone, de l'oxyde de carbone, du méthane et celle des combustibles usuels, gaz de gazogène, houille, pétrole.

Nous en donnerons ici le calcul détaillé, en supposant toujours que le comburant est l'air atmosphérique.

1° Combustion de l'hydrogène, du carbone et de l'oxyde de carbone dans l'air froid. — Prenons une molécule (2 grammes) d'hydrogène : pour la brûler, un demi-volume moléculaire O est nécessaire et cet oxygène est accompagné de 4 fois son volume d'azote, soit 2 volumes moléculaires :

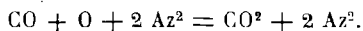


D'après le tableau des chaleurs d'échauffement on a les chaleurs nécessaires pour porter ces produits gazeux à différentes températures croissant de 200° en 200° :

PRODUITS BRÛLÉS	1 800° <i>a</i>	2 000° <i>b</i>	2 200° <i>c</i>
H ² O	23,86	27,76	31,82
2 Az ²	28,42	32,10	35,82
	<hr/> 52,28	<hr/> 59,86	<hr/> 67,64

La chaleur dégagée par 2 grammes d'hydrogène donnant de la vapeur d'eau est 58,2 Cal. qui représentent ΣL de l'équation générale. On voit immédiatement par le tableau ci-dessus 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*, l'intersection de cette courbe avec la droite $Q = 58,2$ donnera graphiquement la température de combustion de l'hydrogène 1 970°.

Faisons le même calcul pour l'oxyde de carbone :

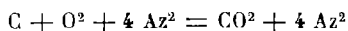


PRODUITS BRÛLÉS	1 800° <u>a'</u>	2 000° <u>b'</u>	2 200° <u>c'</u>
CO ²	27,21	31,84	36,65
2 Az ²	28,42	32,10	35,82
	<u>55,63</u>	<u>63,94</u>	<u>72,47</u>

Q = 68,2

La température est 2 100°.

Pour le carbone :



PRODUITS BRÛLÉS	1 800°	2 000°	2 200°
CO ²	27,21	31,84	36,65
4 Az ²	58,84	64,20	71,64
	<u>86,05</u>	<u>96,04</u>	<u>108,29</u>

La température est 2 040°.

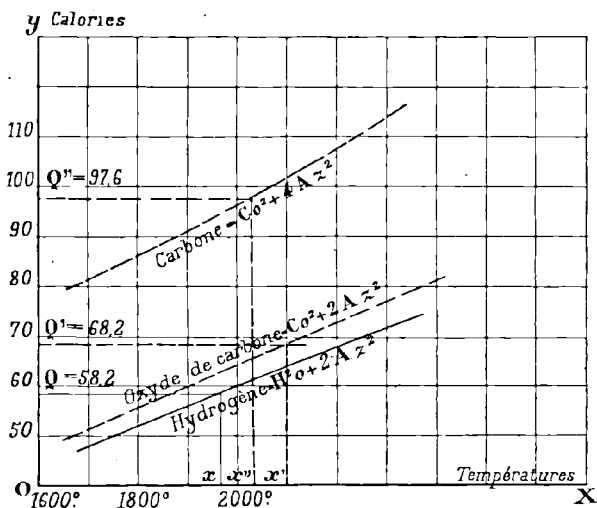


Fig. 6. — Graphiques déterminant les températures de combustion de H, C, CO dans l'air atmosphérique.

Ces calculs de températures de combustion comportent quelques enseignements.

En premier lieu, on y voit le maximum de température qu'il soit possible d'obtenir du carbone brûlant à l'air froid, 2 040°.

On peut y voir encore que la température de combustion de l'hydrogène est inférieure à celle du carbone, en supposant que cette dernière soit possible sans excès d'air.

On voit encore 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 $\text{CO} + \text{H}^2$ évidemment intermédiaire entre les deux gaz précédents a une température de combustion de $2\ 030^\circ$.

Les exemples que nous venons d'examiner se rapportent au cas le plus simple, celui où l'apport de calories est tout entier sous forme de chaleur latente : mais le plus souvent la chaleur totale disponible ΣL comprend de la chaleur sensible apportée soit par l'air de combustion, soit par le gaz, soit par les deux ensemble.

2° Exemple de calcul de température de combustion dans le cas le plus général. — Nous donnons à titre de simple exemple le calcul de la température de combustion dans le cas d'un gaz de gazogène brûlant dans un four à régénération, c'est-à-dire chauffé préalablement à une température de $1\ 000^\circ$, et rencontrant de l'air également chauffé par récupération à la même température.

Soit par exemple le gaz dont la composition en volume serait :

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

Calculons le volume d'air nécessaire pour brûler un volume de ce gaz.

L'oxyde de carbone 0,20 exige 0,10 d'oxygène qui entraîne 0,40 d'azote.

L'hydrogène 0,12 exige 0,06 d'oxygène et 0,24 d'azote.

Le formène 0,03 exige 0,06 d'oxygène et 0,24 d'azote.

D'où l'on peut former le tableau des calories apportées par ce gaz à $1\ 000^\circ$ sous forme de chaleur sensible ou existant sous forme de chaleur latente dégagée par la combustion, ΣL .

	COMPOSITION en volumes moléculaires.	CALORIES apportées.	CALORIES produites par la combustion.
CO ²	0,05	} 0,6	13,6
CO	0,20		
H ²	0,12		
Az ²	0,58		
CH ⁴	0,03		
H ² O	0,02	6,6	6,9
		0,5	»
		0,2	»
Air calculé nécessaire à la combustion	1,00 1,40	8,1	
		16,0	26,1
		ΣL = 42,1 cal.	

Les produits de combustion ont, en volumes, une composition indiquée dans le tableau ci-dessus.

	CHALEURS D'ÉCHAUFFEMENT		
	2 000°	2 200°	2 400°
CO ² : 0,05 + 0,20 + 0,03 = 0,28	8,5	10,3	11,7
Az ² : 0,58 + 0,88 = 1,46	23,4	26,1	28,9
H ² O : 0,12 + 0,06 + 0,02 = 0,20	5,5	6,3	7,2
	37,4	42,7	47,8

Ici la chaleur disponible Σ L est tellement voisine de la chaleur d'échauffement des produits de combustion à 2 200° qu'il est inutile de tracer la courbe, la température cherchée est voisine de 2 200.

On voit par ce calcul et par la haute température à laquelle il conduit, très supérieure à celle de la combustion de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone à l'air froid, l'influence que peut avoir sur les températures réalisées dans les fours le chauffage préalable du comburant et du gaz combustible.

b) INFLUENCE DU DOSAGE EXACT DE L'AIR SUR LA TEMPÉRATURE DE COMBUSTION.
 ABaisseMENT DE CETTE TEMPÉRATURE PAR UN EXcÈS D'AIR

Il est évident, d'après la notion même de la température de combustion, que pour un même poids de combustible brûlé, plus la masse calorifique des produits de combustion sera grande, plus

basse sera la température de combustion, et en particulier, que si la combustion se fait avec un grand excès d'air, il y aura nécessairement abaissement de la température.

Ceci est évident en dehors de tout calcul, puisque la chaleur latente disponible, restant la même, doit se répartir sur une masse gazeuse beaucoup plus grande.

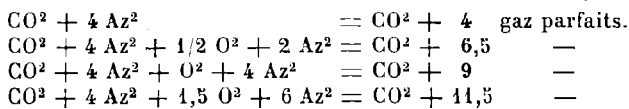
Dans les anciens fours à grille, la combustion se faisait très difficilement sans excès d'air, et là est la raison de la limitation de température dont l'industrie ancienne a tant souffert. De même, dans les foyers de chaudière, la température n'est généralement pas très élevée parce que la combustion se fait avec grand excès d'air.

Tous ces faits sont connus : mais ce que l'on ne sait pas assez, c'est l'importance extrême que cet excès d'air peut avoir, c'est l'énorme chute de température que la mauvaise conduite des feux s'écartant trop de la combustion neutre, peut provoquer. Aussi étudierons-nous cette influence par un double exemple, l'un théorique : la combustion du carbone dans l'air froid, l'autre pratique emprunté à l'industrie, où à notre connaissance, le mauvais dosage de l'air a eu et peut avoir les effets les plus néfastes, celle de l'incinération des ordures ménagères.

Combustion du carbone dans l'air froid en diverses proportions.

— Brûlons une molécule (12^{gr}) de carbone dans l'air, d'abord en combustion neutre, puis avec des excès d'air croissant de 50 en 50 p. 100, soit 50 p. 100, 100 p. 100, 150 p. 100 d'air en excès.

Nous obtiendrons les produits de combustion



Un calcul très simple donne les compositions centésimales des produits de combustion

Combustion neutre :	20	CO^2	+	80	Az^2
Excès d'air 50 p. 100 :	13,3	CO^2	+	6,7	$\text{O} + 80 \text{Az}^2$
— 100 — :	10	CO^2	+	10	$\text{O} + 80 \text{Az}^2$
— 150 — :	8	CO^2	+	12	$\text{O} + 80 \text{Az}^2$

Ces excès d'air paraissent exagérés : il n'est cependant pas rare de rencontrer dans les chaudières, même convenablement conduites, des fumées dans lesquelles l'analyse ne révèle que 8 p. 100 CO^2 et où l'oxygène libre atteint 12 p. 100 : les calculs qui suivent ont

donc un réel intérêt pratique. Cherchons donc les températures de combustion correspondant aux quatre cas ci-dessus et pour cela faisons le barème des chaleurs d'échauffement des fumées dans nos quatre hypothèses.

	800°	1 000°	1 200°	1 400°	1 600°	1 800°	2 000°	2 200°
CO ²	9,1	12,4	15,6	19,2	23,1	27,2	31,8	36,7
4 Azote.	—	—	—	—	—	56,8	64,2	71,6
6,5 —	—	—	—	69,7	81,0	92,3	—	—
9 —	66,9	81,5	96,6	—	—	—	—	—
11,5 —	66,9	85,4	104,1	—	—	—	—	—

Au moyen de ce barème cherchons les ordonnées des trois points au moyen desquels nous tracerons nos quatre courbes.

- 1° Fumées à 150 p. 100 d'air en excès.
a 800° : 76,0 b 1 000° : 97,8 c 1 200° : 119,7
- 2° Fumées à 100 p. 100 d'air en excès.
a' 1 000° : 79,3 b' 1 200° : 97,1 c' 1 400° : 115,8
- 3° Fumées à 50 p. 100 d'air en excès.
a'' 1 400° : 88,9 b'' 1 600° : 104,1 c'' 1 800° : 119,5
- 4° Fumées neutres.
a''' 1 800° : 84 b''' 2 000° : 96 c''' 2 200° : 108,3

Et traçons les quatre courbes des chaleurs d'échauffement *a.b.c. a'b'c'...* et leur intersection avec $Q = 97,6$.

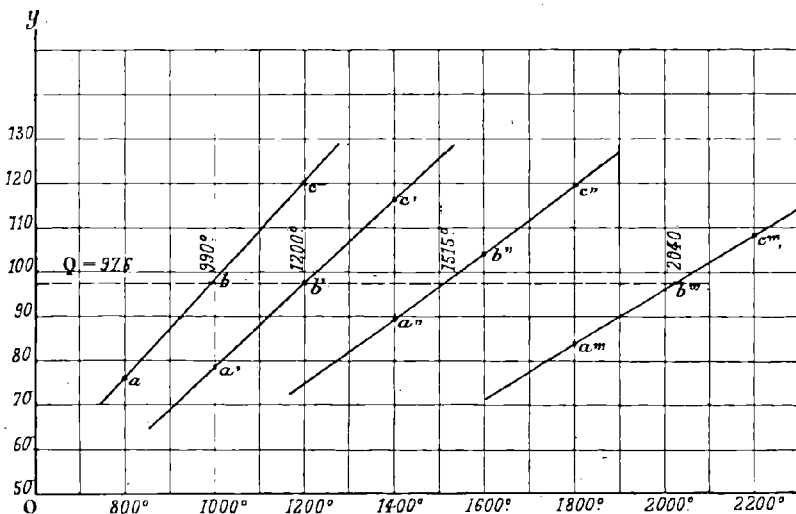


Fig. 7. — Graphique des températures de combustion du carbone dans l'air froid avec des excès d'eau de 50 à 150 %.

Nous obtenons ainsi les températures de 990°, 1 200°, 1 515° et

2040°, avec un écart de plus de 1000° entre les deux cas extrêmes.

Si nous observons que les combustibles usités en industrie sont principalement composés de carbone, ne contenant pas un quart de matières volatiles et hydrocarbures, et si nous rappelons que les excès d'air supposés ci-dessus sont de pratique industrielle courante, nous voyons que le calcul théorique que nous venons de faire est en réalité l'étude résumée des fours à chauffage direct. On peut donc en déduire quelques enseignements d'ordre pratique.

Le premier est la nécessité impérieuse de surveiller très attentivement le dosage de l'air dans les fours, en suivant la composition des fumées, soit au moyen de burettes d'analyse de gaz, burette de Bunte ou appareil Orsat, soit mieux encore à l'aide d'un enregistreur comme l'appareil Ados.

Le second enseignement est l'utilité de connaître toujours la température de combustion normale correspondant à un combustible et à un four donnés. Cette notion si nécessaire à la technique des fours était ignorée dans l'industrie ancienne parce que les chaleurs spécifiques des gaz supposées constantes et les chaleurs de combustion imparfaitement connues conduisaient à des chiffres si inexacts et toujours si exagérés que les ingénieurs ne pouvaient en tirer aucune indication; d'ailleurs, dans les fours très primitifs à température élevée de l'industrie ancienne, la nécessité de doser l'air et de conduire les feux dans ce sens était si impérieuse que les chauffeurs y arrivaient d'eux-mêmes, sous peine de ne pas atteindre le but, de ne pas fondre leur potée de verre, ou de prolonger indéfiniment une opération métallurgique. C'était le temps où la conduite des feux était un art et où la prospérité d'une usine dépendait parfois d'un bon maître-fondeur.

Mais actuellement les ressources scientifiques précises conduisant à la méthode que nous avons indiquée, et les moyens de réglage par registres ou robinets qui, existant dans tous les fours, font de la connaissance préalable de la température de combustion et du contrôle de cette température par les fumées une nécessité technique : nous considérons comme une lacune grave — bien que très fréquente encore — l'ignorance de la température de combustion et l'absence de contrôle des fumées, et pour en démontrer une fois de plus l'importance, nous examinerons encore deux cas de combustion.

EXEMPLES INDUSTRIELS DE DÉTERMINATION
DE LA TEMPÉRATURE DE COMBUSTION

1° Combustion du pétrole dans un foyer de chaudière. — L'étude de cette question nous a été demandée dans une chaudière marine de contre-torpilleur¹ dans laquelle l'amirauté demandait de pouvoir chauffer indifféremment au charbon ou au pétrole.

Dans le cas de la chauffe au charbon les analyses faites sur des chaudières Niclausse donnent la composition suivante :

CO ²	O	CO	Az
8,5	10	0,5	81

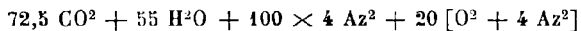
correspondant à un excès d'air d'environ 125 p. 100. La température de combustion sera comprise entre 1000° et 1100°, d'après l'étude ci-dessus.

Passons à la chauffe au pétrole : il suffit de connaître les brûleurs à pétrole pulvérisant le combustible à un état impalpable pour prévoir que le liquide peut être pratiquement assimilé à un gaz, c'est-à-dire que l'on peut se rapprocher de la combustion neutre : l'expérience nous a montré qu'en effet la combustion avec excès d'air de 20 p. 100 seulement y est possible. Cherchons la température de combustion dans cette hypothèse.

Brûlons dans la chaudière un pétrole de Bakou (huile lourde) à 1100 calories, nettes, de composition suivante :

H, 11 p. 100, C, 87 p. 100, eau et impuretés 2 p. 100, c'est-à-dire contenant $\frac{87}{12} = 7,25$ molécules de carbone et $\frac{11}{2} = 5,5$ molécules d'hydrogène.

La composition théorique des fumées avec excès d'air de 20 est, en molécules, pour 1 kilogramme de pétrole brûlé :



Calculons les chaleurs d'échauffement de ces fumées aux températures voisines de la température probable de combustion :

	1 400°	1 600°	1 800°	2 000°
72,5 CO ²	1 391	1 675	1 972	2 308
55 H ² O	935	1 119	1 312	1 527
500 gaz parfaits	5 365	6 230	7 105	8 023
	<hr style="width: 100%;"/>	<hr style="width: 100%;"/>	<hr style="width: 100%;"/>	<hr style="width: 100%;"/>
	7 691	9 024	10 389	11 860

¹ Comptes rendus du Congrès de 1910 de l'Association technique maritime.

et cherchons l'intersection de la courbe ainsi tracée par points avec la droite $Q_2 = 11\ 000$, nous trouvons environ $1\ 880^\circ$.

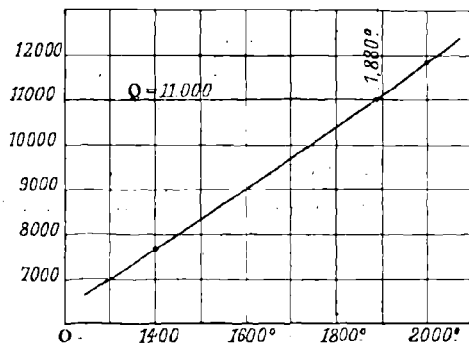


Fig. 8. — Température de combustion dans le foyer d'une chaudière marine chauffée au pétrole.

Cette température paraît excessive dans un foyer dont les parois sont des tubes d'eau à la température de 190° . Nous en avons vérifié la réalisation approchée en constatant à l'aide du pyromètre Le Chatelier plus de $1\ 750^\circ$.

Les deux chiffres de combustion avec le charbon ($1\ 050^\circ$) ou avec le pétrole ($1\ 750^\circ$) ont leur éloquence car il semble difficile d'admettre qu'un appareil ayant à subir des conditions de travail si différentes ne nécessite une construction un peu spéciale; et il paraît probable que le chauffage au pétrole amènera une usure plus rapide de la chaudière. Il y a là un danger que seul le calcul des températures de combustion a signalé.

2° Température dans les fours destructeurs d'ordures ménagères.

— Le second exemple que nous prendrons pour démontrer l'utilité de la connaissance des températures de combustion est puisé à une industrie naissante, celle des ordures ménagères.

La gadoue de Paris est un combustible très difficile à brûler parce qu'il est tantôt dense et cendrex, tantôt léger mais très humide, présentant des écarts de 25 p. 100 dans l'humidité et des écarts en sens inverse de 20 p. 100 dans la teneur en matière organique combustible. Pour remédier à cette imperfection du combustible, les constructeurs de fours destructeurs ont tous eu recours au vent forcé, parfois avec une assez forte pression. Par suite de cette soufflerie et de l'inexpérience des ouvriers dont le recrutement ne se fait

pas toujours parmi l'élite des chauffeurs, les combustions dans les destructeurs se font avec des excès d'air très variables, pouvant atteindre 200 p. 100 et même plus. Examinons les conséquences de cette marche défectueuse.

Admettons que la gadoue à incinérer contienne environ 1/4 (24 p. 100) de carbone et 36 p. 100 d'eau, ce sont à peu près les données de la gadoue de Paris en avril-mai.

Brûlons 100 grammes de gadoue contenant 24 grammes, soit 2 molécules de carbone et 36 grammes soit 2 molécules d'eau.

Supposons d'abord la combustion neutre, les produits de combustion auront comme composition :



dont les chaleurs d'échauffement à 800°, 1000°, 1200°, 1400°, 1600° seront :

	600°	800°	1 000°	1 200°	1 400°	1 600°
2 CO ² . . .	12,9	18,14	24,84	31,10	38,36	46,20
8 Az ² . . .	25,9	46,56	59,44	72,40	85,84	99,48
2 H ² O . . .	11,7	16,46	21,96	27,74	34,00	40,70
	<u>50,5</u>	<u>81,16</u>	<u>106,24</u>	<u>131,24</u>	<u>158,20</u>	<u>186,38</u>

ce qui permet de dresser la courbe des chaleurs d'échauffement du mélange.

Admettons maintenant que la combustion se fasse avec des excès d'air de 100 p. 100 et de 200 p. 100. Il faut aux chiffres précédents ajouter 2[O² + 4Az²] ou 10 v. m. de gaz parfaits et 20 v. m. de gaz parfaits ; on obtient avec 100 p. 100 excès d'air.

	600°	800°	1 000°	1 200°	1 400°
2 [CO ² + 4 Az ²] + 2 H ² O . . .	50,5	81,1	106,2	131,2	158,2
2 [O ² + 4 Az ²]	43,1	58,2	74,3	90,5	107,3
	<u>93,6</u>	<u>139,3</u>	<u>180,5</u>	<u>221,7</u>	<u>265,5</u>

Avec 200 p. 100 d'air dans les chiffres deviennent.

	600°	800°	1 000°	1 200°
	<u>93,6</u>	<u>139,3</u>	<u>180,5</u>	<u>221,7</u>
	43,1	58,2	74,3	90,5
	<u>136,7</u>	<u>197,5</u>	<u>254,8</u>	<u>312,2</u>

Traçons les trois courbes correspondant à ces trois marches différentes du four à ordures ménagères, et prenons l'intersection de ces

courbes avec la chaleur latente du carbone contenu dans la gadoue, dont il faut retrancher la chaleur de vaporisation de l'eau :

$$2 \times 97,6 - 606,5 \times 36 = 173,4 \text{ cal.}$$

Nous obtenons les températures de 810°, 980°, et 1510°. Or la température de 1510°, est une très bonne température pour un foyer de chaudière : la température de 810° est à peine suffisante pour entretenir une bonne combustion et donne naissance à ce que l'on a appelé les gaz verts, c'est-à-dire des fumées lourdes d'une odeur infecte.

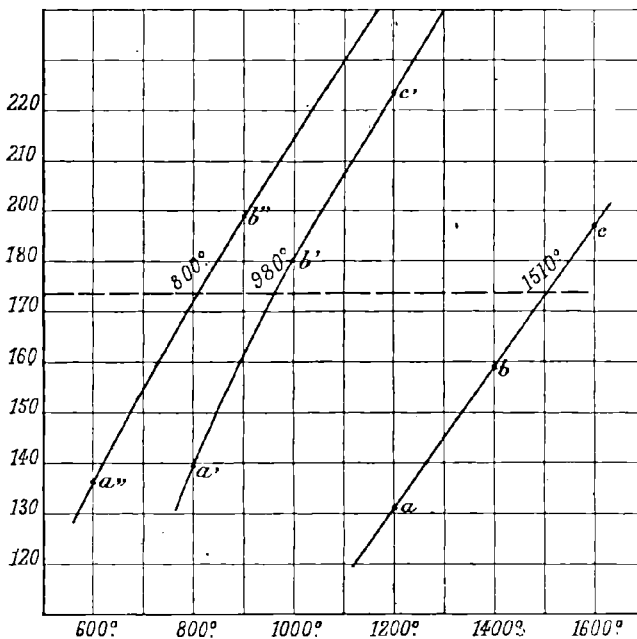


Fig. 9. — Graphiques des températures de combustion dans les fours destructeurs d'ordures ménagères.

Voilà comment, dans une industrie devenue aujourd'hui vitale dans les grandes villes, tandis que les uns promettaient une énorme production de vapeur avec la gadoue, d'autres ingénieurs doutaient de la possibilité même de l'incinération ; le plus grand nombre n'obtenaient que le quart de la quantité de vapeur normalement possible¹.

¹ Dans un four d'incinération de la Ville de Paris, l'auteur a pu obtenir avec des chaudières Babcock et Wilcox une production de vapeur de 15 à 18 kilogrammes par

La notion de température de combustion met au point cette question en même temps qu'elle indique la vraie solution du problème de l'incinération : combustion aussi exactement neutre que possible.

Le dernier enseignement, le plus intéressant peut-être, que comporte la connaissance de la température de combustion est un moyen d'évaluer le rendement d'un four par le rapprochement de la température de régime et de la température de combustion.

Ceci nous conduit à préciser la notion de régime dans les fours et à donner quelques exemples de températures de régime.

§ 3. — TEMPÉRATURE DE RÉGIME

Nous avons donné (page 76) deux définitions de la température de régime : La seconde — température convenant le mieux à l'opération industrielle que l'on veut effectuer — un peu théorique puisqu'elle suppose un four bien conduit, est celle que le technicien doit toujours avoir en vue : elle implique une connaissance parfaite de l'industrie où l'on opère, sans laquelle les conseils et le contrôle scientifiques perdent beaucoup de leur valeur, au point de devoir s'effacer devant l'opinion du praticien.

Dans certaines industries la température de régime théorique peut être déterminée facilement ; ainsi, en verrerie des écarts de température de quelques degrés (25° à 30° en plus ou en moins de la normale) peuvent rendre le verre bouillonneux ou galleux ; il suffit donc de veiller à ce que la composition du verre reste normale et de prendre la moyenne des températures relevées pendant plusieurs périodes de bon travail, pour fixer avec précision la température de régime.

En céramique, la température varie lentement pendant toute la durée de la cuisson et la connaissance du régime le plus convenable à une pâte donnée exige une expérience consommée ; il n'est cependant pas impossible de déterminer ce régime théorique, sous forme d'une courbe indiquant les températures en fonction du temps. C'est ce qu'a fait M. Parvillée, un porcelainier parisien, qui impose à ses chauffeurs, à toute heure de la cuisson, la concordance de la température relevée au pyromètre avec celle indiquée sur la courbe-

mètre carré dépassant la moyenne de ce que donnent les chaudières à tubes d'eau avec les meilleurs charbons. Ce rendement était dû uniquement à l'élévation de température dans la chambre de chauffe résultant du dosage rigoureux de l'air de combustion.

barème. C'est aussi ce qui se pratique dans la fabrication de certains aciers, dans le traitement Krupp.

Dans beaucoup de cas, la température théorique de régime est simplement le maximum que l'on puisse obtenir d'un combustible donné, avec un four donné, sous la seule réserve d'éviter les coups de feu et les variations brusques, tel est le cas de la plupart des fours métallurgiques de fusion, de réchauffage, de puddlage où l'opé-

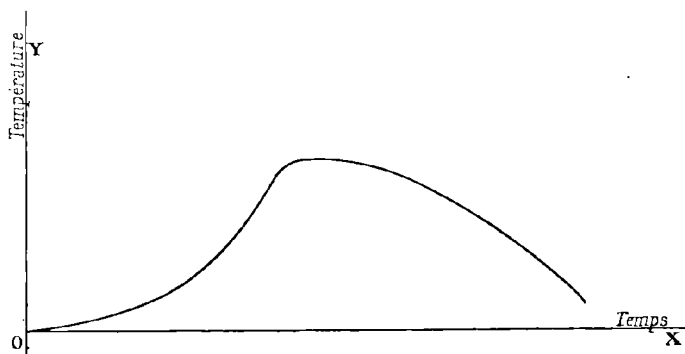


Fig. 10. — Courbe du régime de la température dans un four de cuissons céramiques.

ration va d'autant mieux que le four est plus chaud ; tel est encore le cas des foyers de chaudière pendant les heures de pointes dans les centrales électriques. Dans ce cas, la meilleure marche à suivre pour fixer une température et s'en servir pour faire progresser un four, est de relever fréquemment les températures du laboratoire, d'en préciser les maxima et de fixer par une série d'observations les conditions de bonne marche correspondant à ces maxima souvent accidentels.

Pratiquement, et suivant notre première définition, la température de régime est la « température relevée dans le laboratoire d'un four au moyen d'un pyromètre » ; c'est celle qui nous servira à calculer le rendement d'un four.

Ainsi comprise la température de régime a toujours, sauf dans le cas du four électrique, des dérivées, c'est-à-dire des températures secondaires (régime de la cheminée, des chambres de régénération, des carneaux, etc.) qui sont fonction du régime du laboratoire mais qui doivent aussi être connues.

On voit que la température de régime, dans ses deux acceptions, est une donnée toute expérimentale, déterminée par un pyromètre

placé soit dans le four, soit pour les régimes secondaires, dans l'une de ses parties annexes, tandis que la température de combustion, précédemment étudiée, était le résultat d'un calcul, un maximum. Remarquons enfin que la température de régime, donnée expérimentale, ne doit pas être confondue avec la température précise à laquelle s'effectuent certaines réactions dans le laboratoire, fusion d'un métal, distillation, vaporisation de l'eau. Ainsi, dans un four de fusion du cuivre, le régime n'est pas $1\ 080^{\circ}$, mais une température supérieure, mesurée au pyromètre dans le laboratoire, entre la surface du bain et la voûte. De même dans une chaudière, le régime n'est pas donné par la température de vaporisation de l'eau correspondant au timbre de la chaudière, mais par une série de mesures de températures prises entre le foyer et la boîte à fumées.

Ces notions générales et définitions suffisent à montrer que la température de régime, si indispensable à connaître, sans laquelle la conduite raisonnée de la combustion est impossible, n'est pas toujours d'une conception très facile. Mais lorsqu'on envisage l'ensemble de l'industrie et la variété des régimes, la question se complique au point qu'il soit nécessaire d'établir un classement entre les différents modes de chauffage ou régimes, auxquels peuvent et doivent correspondre des solutions différentes.

a) CLASSEMENT DES FOURS PAR RÉGIMES

1^o Température constante dans un laboratoire unique et invariable.

Ce cas, le plus simple, et l'exemple le plus parfait du travail continu, est synthétisé en verrerie où la plus petite variation de température est appréciée des verriers. Les fours de gobeletterie, Boëtius ou Appert, les fours à bassin Siemens en sont le type. Les fours à cornues d'usine à gaz rentrent aussi dans cette catégorie, bien que la régularité de température y soit moins observée qu'en verrerie.

Dans certains cas, qui ne sont qu'une variante du travail continu uniforme, le régime peut être à deux ou plusieurs degrés. Tel est le cas d'un four de verrerie où le compartiment de travail est séparé du bassin de fonte, chaque compartiment ayant ses brûleurs spéciaux, son chauffage à températures différentes, quoique dépendant des mêmes gazogènes et récupérateurs. Il y a alors en réalité deux températures de régime, mais au point de vue des calculs de rendement on pourra prendre la moyenne arithmétique, en tenant compte des consommations de gaz dans les deux compartiments.

2° Plusieurs températures constantes dans plusieurs laboratoires se commandant les uns les autres.

Les fours de cette catégorie, généralement des fours à réverbères, sont formés de plusieurs compartiments dont le premier est chauffé par le foyer et les suivants par les chaleurs perdues de celui qui précède.

La métallurgie offre de nombreux exemples de fours à soles successives, l'une de réaction ou de grillage, l'autre de fusion, l'autre de raffinage, avec des températures étagées qui sont autant de températures de régime.

Les plus intéressantes de ces températures sont celles du premier laboratoire qu'il est utile de rapprocher de la température de combustion et celle du dernier qui seule intéresse le rendement global.

3° Température variable décroissant insensiblement depuis le foyer jusqu'à la cheminée, avec régime continu.

Ce cas est celui des chaudières à vapeur à marche ininterrompue, dans lesquelles le régime est exprimé par une courbe où, les abscisses indiquant le parcours de la flamme, les ordonnées ou températures varient insensiblement, de 1200 dans le foyer ou la chambre de combustion à 250° dans la boîte à fumées.

Dans ce cas, comme dans le précédent, il y a plusieurs températures de régime, il y en a même une infinité, mais les deux plus intéressantes sont celles du foyer qu'on rapprochera de la température de combustion et celle de la boîte à fumée qui permet de calculer l'utilisation du combustible.

4° Combinaison du laboratoire à température constante avec second laboratoire à température variable.

Les fours à puddler ou à réchauffer suivis de chaudières, si usités dans l'industrie ancienne, en sont l'exemple le plus intéressant.

5° Fours à régime variable avec le temps, à température uniforme dans le laboratoire.

Un très grand nombre de fours, à commencer par le four à acier Martin-Siemens, le premier des fours à gaz, sont à régime discontinu avec variations périodiques de la température correspondant aux périodes de chargement, d'échauffement graduel et de réaction ou affinage.

La variation de régime avec le temps est encore plus sensible dans les fours céramiques où la matière doit être enfournée froide et défournée froide, de sorte que la température part de 0° pour monter insensiblement jusqu'à un maximum où la cuisson se fait

en peu de temps, pour redescendre insensiblement, de façon à suivre une courbe sur laquelle on ne relève aucun palier.

6° Fours à régime variable avec le temps, à températures non uniformes d'un point à l'autre du laboratoire.

C'est surtout en céramique que ce cas se présente, soit dans les fours Hoffmann, soit même dans les fours ordinaires où il est rare que l'échauffement soit parfaitement uniforme.

On voit par cette nomenclature combien nombreux sont les régimes dans les fours, combien variés sont les aspects du problème ; cependant nous n'avons cité que les cas caractérisés, et bien des cas sont intermédiaires entre ceux de notre classification.

Or il est évident *à priori* que les solutions devront être différentes avec des régimes différents, que tel mode de chauffage sera avantageux à 1 000° et très peu économique à 1 500°, que tel foyer se prêtant à un chauffage rapide sera absolument défectueux pour une opération graduellement conduite.

En général, plus on s'écarte du premier cas — travail continu et température uniforme — plus le problème du chauffage et de l'utilisation de la chaleur est difficile. Les dernières catégories, celles des fours céramiques, sont en réalité d'une difficulté telle que le progrès y a été très lent, laissant l'industrie presque au même point qu'il y a cinquante ans.

On conçoit par l'exposé qui précède l'importance de cette donnée de la température de régime, la plus importante, avec l'analyse des fumées, pour l'étude des combustions.

b) QUELQUES DONNÉES EXPÉRIMENTALES DE TEMPÉRATURES DE RÉGIME

Voici d'après Le Chatelier et d'après l'auteur quelques températures de régime caractéristiques.

Four à acier. — Intérieur du four pendant l'affinage, 1 550° :

Récupérateurs à gaz.	1 200°
— air.	1 000°
Sortie du gazogène	720°
Base de la cheminée.	300°

Four de verrerie à bassin pour bouteilles :

Régime du bassin.	1 425°
---------------------------	--------

Four à recuire le verre :

Température.	585°
----------------------	------

Four à gaz d'éclairage à cornues :

Haut du four.	1 190°
Bas du four	1 060°

Porcelaine. — Température de régime théorique :

Porcelaine dure.	1 400°
— de Chine	1 275°

§ 4. — MOYENS PRATIQUES DE DÉTERMINER LES TEMPÉRATURES DE COMBUSTION ET DE RÉGIME

Pour déterminer par le calcul la température de combustion, il faut connaître le pouvoir calorifique du combustible solide, liquide ou gazeux servant à alimenter le laboratoire, la composition de ce combustible ou au moins sa teneur en carbone, la température de l'air et éventuellement du gaz avant combustion, et la composition des fumées.

Lorsque la composition des fumées sera complètement connue par une analyse donnant la teneur en eau, l'analyse élémentaire du combustible sera inutile, le dosage du carbone — terme de comparaison entre le combustible et les fumées — suffira. Quand au contraire l'analyse des fumées ne donnera pas l'eau il sera nécessaire de faire l'analyse complète du combustible avec dosage de l'hydrogène.

En résumé : calorimétrie, analyse organique, analyse des gaz et pyrométrie : telles sont les quatre connaissances de laboratoire nécessaires à la technique des températures dans les fours.

Les méthodes de laboratoire devenues des méthodes industrielles au moyen desquelles on peut déterminer ces quatre données sont aujourd'hui trop connues pour que nous en donnions la description en détail : depuis quelques années les laboratoires publics (École des Mines, Conservatoire des Arts et Métiers, etc.) sont en mesure de donner assez rapidement aux industriels qui en ont besoin, les analyses de combustibles, de gaz et les mesures de pouvoirs calorifiques. Et si l'ingénieur étudiant un four préfère faire lui-même toutes les mesures ou analyses, nous pensons qu'il trouvera dans les ouvrages spéciaux et surtout dans les œuvres originales des auteurs et inventeurs les indications sur les méthodes à suivre.

Pour la détermination du pouvoir calorifique, le compte rendu des travaux présentés à la Société d'Encouragement, réédité chez Béranger sous le titre *Études sur les Combustibles solides, liquides et gazeux*, par P. Mahler, indique avec tous les détails les procédés de calorimétrie.

Pour l'analyse élémentaire des combustibles, le même ouvrage ou le *Traité d'analyse des substances minérales* de A. Carnot indiquent la méthode à suivre.

Pour les mesures de températures, H. Le Chatelier a publié sous le titre *Mesure des températures élevées*, en collaboration avec Boudouard, un traité complet de pyrométrie¹. Nous nous contenterons donc de donner quelques indications pratiques, en insistant sur les méthodes de dosages rapides des gaz, qui peuvent rendre de si grands services².

a) POUVOIR CALORIFIQUE

La détermination du pouvoir calorifique est une opération facile pour quiconque sait faire une pesée au milligramme et est accoutumé à manier des instruments de laboratoire.

Aussi estimons-nous que tout ingénieur s'occupant de chauffage doit en connaître le maniement : il est indiqué avec tous les détails voulus dans le mémoire de Mahler.

Mais nous avons vu que la mesure du pouvoir calorifique à la bombe calorimétrique est une donnée incomplète dans des expériences de précision, par exemple dans un bilan rigoureux. Il importe de pouvoir y suppléer sans avoir besoin de faire l'analyse organique qui présente des difficultés bien plus grandes.

Les dosages nécessaires aux corrections du pouvoir calorifique sont ceux du carbone et de l'hydrogène.

Or le dosage du carbone n'est pas impossible après la combustion dans l'obus, il suffit pour cela de faire passer les gaz emprisonnés, dans un tube de potasse caustique placé entre deux tubes à acide sulfurique, en ayant soin de vider l'obus au moyen de la trompe à mercure. L'auteur a fait cette expérience pour doser le carbone total dans les ordures ménagères et n'y a rencontré aucune difficulté. On

¹ *Mesure des températures élevées*. Bibliothèque de la Revue générale des Sciences. Georges Carré et C. Naud, éditeurs ; Paris, 1900.

² Le lecteur trouvera d'ailleurs tous les renseignements concernant l'analyse des gaz, l'analyse des combustibles et la détermination du pouvoir calorifique dans le deuxième volume de cette Encyclopédie : *Principes d'analyse minérale*, par G. Chesneau.

sait que le dosage du carbone est très utile, puisqu'il sert de terme de comparaison entre les compositions en volumes des fumées et la composition du combustible.

La méthode de dosage du carbone total à l'aide de l'obus calorimétrique, qui n'est pas indiquée dans le travail de Mahler, nous paraît

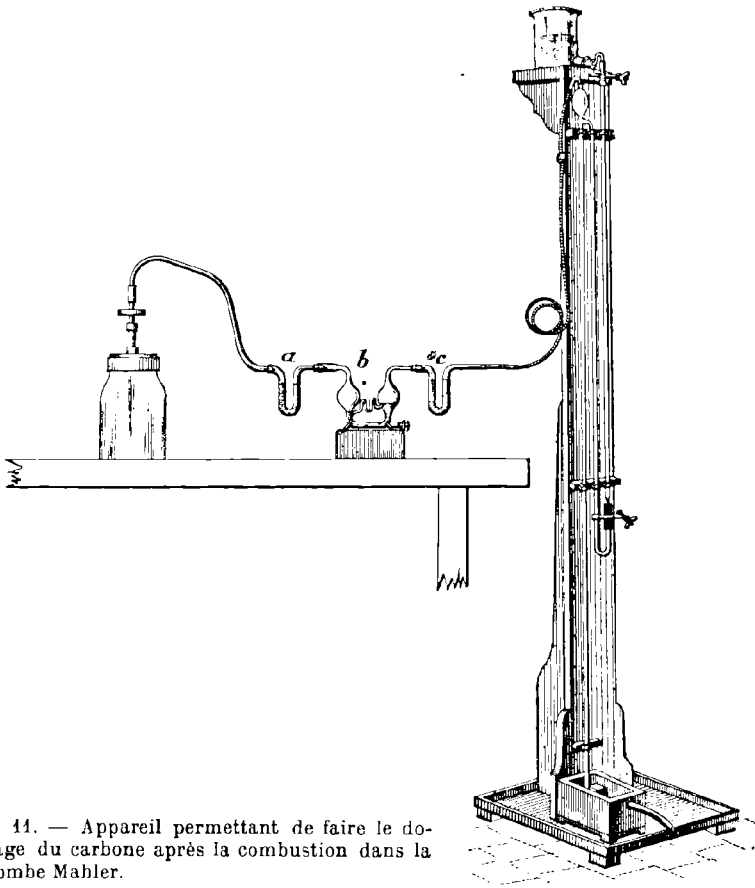


Fig. 11. — Appareil permettant de faire le dosage du carbone après la combustion dans la bombe Mahler.

donc appelée à rendre de réels services dans l'étude rapide des combustibles (fig. 11).

Quant au dosage de l'hydrogène, on pourra y suppléer par la connaissance de l'origine et de la nature du combustible. Lorsqu'on examine les tableaux de Mahler (p. 272), on y constate que les teneurs en hydrogène sont dans les anthracites de 2 p. 100, dans les houilles anthraciteuses, de 2,5 à 3, dans les houilles grasses et

demi-grasses, de 4,5 p. 100 et dans les houilles à gaz d'environ 5,2.

En adoptant ces chiffres, pour faire la correction du pouvoir calorifique, l'erreur que l'on commettra ne sera pas de $\frac{1}{10}$ de la teneur en hydrogène et si l'on se reporte au calcul que nous avons fait dans le cas extrême du pétrole, on verra sans peine que l'erreur totale dans l'évaluation de l'énergie ne dépassera pas 1/2 p. 100.

Ainsi la bombe calorimétrique seule, en l'utilisant au dosage du carbone total, permet d'estimer avec une approximation de $\frac{3}{4000}$ le pouvoir calorifique à pression constante et eau vapeur. C'est plus que suffisant pour les études industrielles.

Mais il peut arriver qu'un ingénieur à qui on demande d'étudier un four n'ait pas à sa disposition l'outillage de la bombe Mahler. Dans ce cas, il pourra se servir d'une des méthodes de calcul d'après les essais usuels et en particulier de la méthode Goutal¹.

Nous rappelons ici que la formule indiquée par Goutal est

$$P = 82 C + \alpha V$$

dans laquelle P désigne le pouvoir calorifique de 1 kilogramme du combustible, C le pourcentage de carbone fixe et V la proportion de matières volatiles, α est un coefficient dont la valeur est variable selon la teneur en matières volatiles V' du combustible supposé pur, c'est-à-dire sans eau ni cendres $V' = V \frac{100}{C + V}$.

Il ne faut pas perdre de vue, lorsqu'on appliquera cette formule, que le pouvoir calorifique ainsi calculé est, comme celui de la bombe, à volume constant et eau condensée, et il faudra par conséquent, faire la correction précitée pour l'hydrogène.

Si l'on admet avec Goutal que pour toutes les houilles ordinaires (non anthraciteuses) l'erreur ne dépasse pas 1 p. 100, et si l'on admet un maximum d'erreur de 0,5 p. 100 dans la correction, on voit que l'on pourra toujours, dans les cas les plus défavorables, loin de tout laboratoire scientifique et sans obus calorimétrique, évaluer l'énergie calorifique disponible à 1,5 à 2 p. 100 près.

b) ANALYSE COMPLÈTE DU COMBUSTIBLE

Nous n'attachons pas dans ces conditions une importance industrielle très grande à l'analyse élémentaire des combustibles, par la

¹ Cette méthode est très complètement expliquée dans le *Traité d'analyse des substances minérales* de A. CARNOT, t. II, p. 201.

grille à analyse organique. L'analyse organique, pour être tout à fait précise, est une opération délicate que seule un chimiste de carrière peut effectuer sans erreur : elle est en tout cas très longue lorsqu'on y comprend la préparation du tube et le montage de l'appareil, et il est rare qu'un ingénieur chargé de suivre des fours puisse s'y employer.

Dans chaque usine, nous conseillons donc de faire ou de faire faire au dehors un nombre d'analyses complètes de la houille régionale suffisant pour en bien connaître la nature, la teneur en eau, en cendres, en hydrogène, les principales caractéristiques, de façon à pouvoir ensuite en toute rigueur se contenter de la bombe Mahler avec ses deux données, pouvoir calorifique et carbone total.

c) ANALYSE DES GAZ ET DES FUMÉES

Les analyses de gaz nécessaires à l'étude de la combustion sont de deux sortes : les unes ont pour but le contrôle des fumées et la vérification de l'excès d'air, elles ne portent que sur l'acide carbonique et l'oxygène ; les autres sont des analyses de gaz combustibles dans le cas où la combustion se fait en deux temps, dans les fours à gaz.

1° Dosage des fumées. — Le dosage des fumées peut strictement se réduire à la détermination de l'acide carbonique, parce que pour un combustible donné, les proportions de l'azote, de l'acide carbonique et de l'oxygène sont liées par une relation, lorsque l'on connaît la composition du combustible et en particulier le rapport du carbone à l'hydrogène.

Dans les fumées du carbone, le rapport de l'azote au total $\text{CO}^2 + \text{O}$ est toujours le même que dans l'air atmosphérique puisque le volume d'acide carbonique est le même que celui de l'oxygène qui a servi à sa formation.

Il s'ensuit que pratiquement quand on a affaire à un combustible riche en carbone et peu hydrogéné, le total de l'acide carbonique et de l'oxygène doit toujours dans une analyse de gaz être aux environs de 20 p. 100 — c'est un moyen de contrôle des analyses du gaz, c'est aussi la raison qui peut dispenser du dosage de l'oxygène lorsqu'on veut faire une analyse rapide¹.

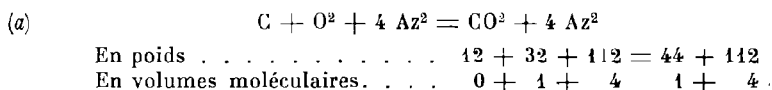
¹ Une des causes d'erreur des plus fréquentes dans les analyses de gaz est l'emploi d'eau non saturée de sel pour le prélèvement ou le transvasement des gaz : on devra

Lorsque le combustible est fortement hydrogéné, comme la vapeur d'eau produite par la combustion se condense dans la burette d'analyse de gaz, tandis que l'azote de l'air reste à l'état de gaz, les fumées contiendront une proportion d'azote plus forte ; dans ce cas le total $\text{CO}^2 + \text{O}$ est inférieur à 20 p. 100. Mais si l'on connaît les teneurs en carbone et hydrogène il est possible de calculer la composition théorique des fumées avec des excès d'air croissants, et il est nécessaire de le faire et d'en construire le barème, qui seul permettra de déduire du seul dosage de l'acide carbonique le pourcentage d'air en excès.

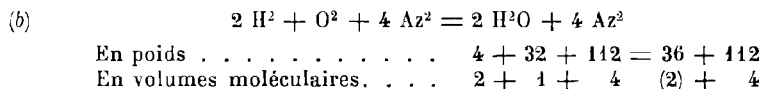
A titre d'exemple, nous donnerons le barème des compositions des fumées d'un pétrole (combustible très hydrogéné) de Bakou, le même dont nous avons calculé le pouvoir calorifique avec corrections, page 23.

Composition des fumées d'un combustible hydrogéné. — Prenons un combustible contenant 87 p. 100 C et 11 p. 100 H^2 .

La combustion du carbone, théorique, c'est-à-dire sans excès d'air, se fait par la formule suivante :



La combustion de l'hydrogène, théorique, rapportée au même volume unitaire d'air ($\text{O}^2 + 4 \text{Az}^2$) se fait par la formule :



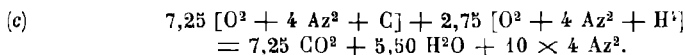
A l'aide de ces formules (a) et (b) cherchons la formule de combustion du pétrole correspondant à un volume unitaire d'air ($\text{O}^2 + 4 \text{Az}^2$).

Prenons les quotients des poids de C et H contenus dans le pétrole par les poids de ces mêmes corps correspondant à l'unité de volume d'air dans les réactions (a) et (b) (volume moléculaire et double volume moléculaire) :

Pour le carbone	87 : 12 = 7,25
Pour l'hydrogène.	11 : 4 = 2,75

s'apercevoir immédiatement de cette cause d'erreur en faisant le total de l'air et de l'acide carbonique. Si la somme de ces deux gaz est très inférieure à 20 p. 100 c'est que l'analyse est fautive.

Nous arrivons ainsi à la formule de combustion théorique, c'est-à-dire sans excès d'air, du pétrole



D'où l'on déduit, en éliminant l'eau qui est condensée, que la combustion du pétrole sans excès d'air doit donner des fumées dont la composition en volume sera pour l'acide carbonique

$$\frac{7,25 CO^2}{7,25 CO^2 + 10 \times 4 Az^2} = \frac{7,25}{47,25} = 15,35 CO^2$$

Par différence on trouve que la teneur en azote sera de 84,65 p. 100.

Supposons maintenant que la combustion se fasse avec excès d'air : on peut décomposer le mélange gazeux qui en résultera en deux parties, d'une part l'excès d'air qui contient 20 p. 100 O et 80 p. 100 Az, d'autre part la fumée neutre ayant la composition ci-dessus 15,35 CO² et 84,65 Az. On en déduit immédiatement par un calcul simple la composition des fumées de pétrole pour une combustion avec un excès constaté de n volumes d'oxygène ou $5 \times n$ volumes d'air.

$$CO^2 = 15,35 \times (100 - 5n)$$

et l'on peut établir le barème suivant :

COMPOSITIONS NORMALES DES FUMÉES D'UN PÉTROLE A 11 P. 100 H ET 87 P. 100 C BRULANT AVEC EXCÈS D'AIR CROISSANT DE 0 A 100 P. 100				
CO ²	O	Az	TOTAL	EXCÈS D'AIR
15,35	0	84,65	100	0
14,6	1	84,4	»	5,3
13,8	2	84,2	»	11,1
13,1	3	83,9	»	19,6
12,3	4	83,7	»	25
11,6	5	83,4	»	33
10,7	6	83,3	»	42,8
10,0	7	83	»	53,9
9,2	8	82,8	»	66,6
8,4	9	82,6	»	87,4
7,7	10	82,3	»	100

Ce barème permet d'interpréter immédiatement une analyse de gaz même sur le seul dosage de l'acide carbonique, si la combustion

est complète; il permet aussi de surveiller la combustion, car si l'on trouvait par exemple une proportion d'azote supérieure à ce qui est calculé, cela indiquerait qu'il y a quelque part incombustion du carbone, soit par formation de suie, soit par dépôt de coke dans le foyer ou sur les tubes.

Nous conseillons de faire ainsi l'examen préalable des fumées et le barème des compositions nécessaires, pour tout combustible hydrogéné employé dans un four, c'est le seul moyen de donner aux analyses de gaz une signification précise quant à l'excès d'air; c'est aussi le moyen de rendre inutile le dosage de l'oxygène ou d'en faire un moyen de contrôle de l'analyse.

2° Méthodes de dosage des fumées, appareils enregistreurs. — La possibilité d'analyser les fumées en ne dosant que l'acide carbonique a rendu facile la construction d'appareils enregistreurs basés sur l'absorption si facile de ce gaz par la potasse.

L'appareil « Ados » usité dans un très grand nombre de centrales électriques semble le plus pratique de ces instruments. Nous en donnons (fig. 13) la représentation et (fig. 12) la reproduction d'un graphique des dosages de CO².

Le gaz est puisé dans le carneau de la cheminée par une petite pompe à double effet actionnée par le tirage de la cheminée.

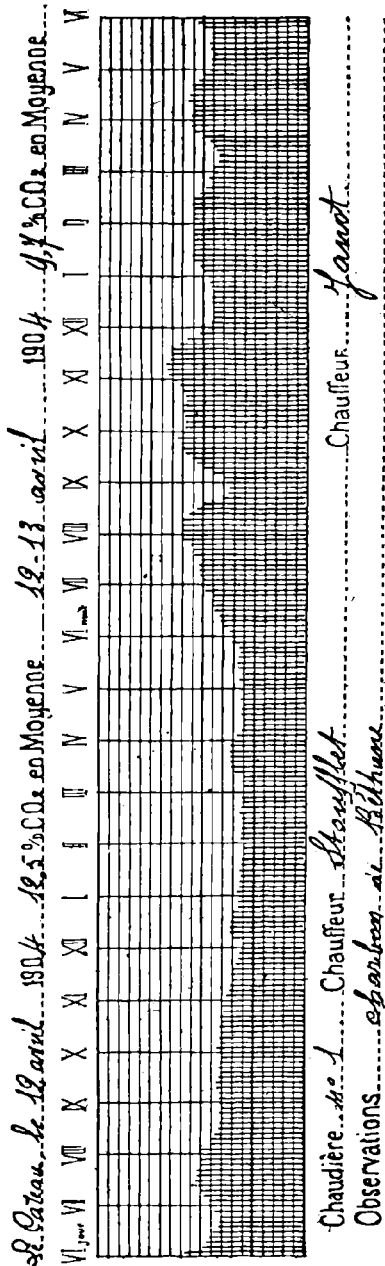


Fig. 12. — Graphique enregistré par l'appareil Ados de la composition des fumées.

Un volume invariable de 100 centimètres cubes traverse le flacon absorbant A contenant une solution concentrée de potasse. De là le gaz restant après absorption du CO_2 est envoyé dans un mesureur G. Une ligne de longueur proportionnelle à ce volume restant se trace automatiquement sur un rouleau enregistreur.

L'appareil est rempli avec de la glycérine : il est muni d'un filtre à gaz arrêtant les poussières et aussi le goudron lorsqu'on s'en servira pour étudier un gaz de gazogène. Il est réglé en général de façon à faire un prélèvement de fumées toutes les quatre minutes, mais cette période peut être modifiée à volonté.

L'emploi d'appareils enregistreurs pour un contrôle aussi important que l'excès d'air dans les fours est très recommandable en principe.

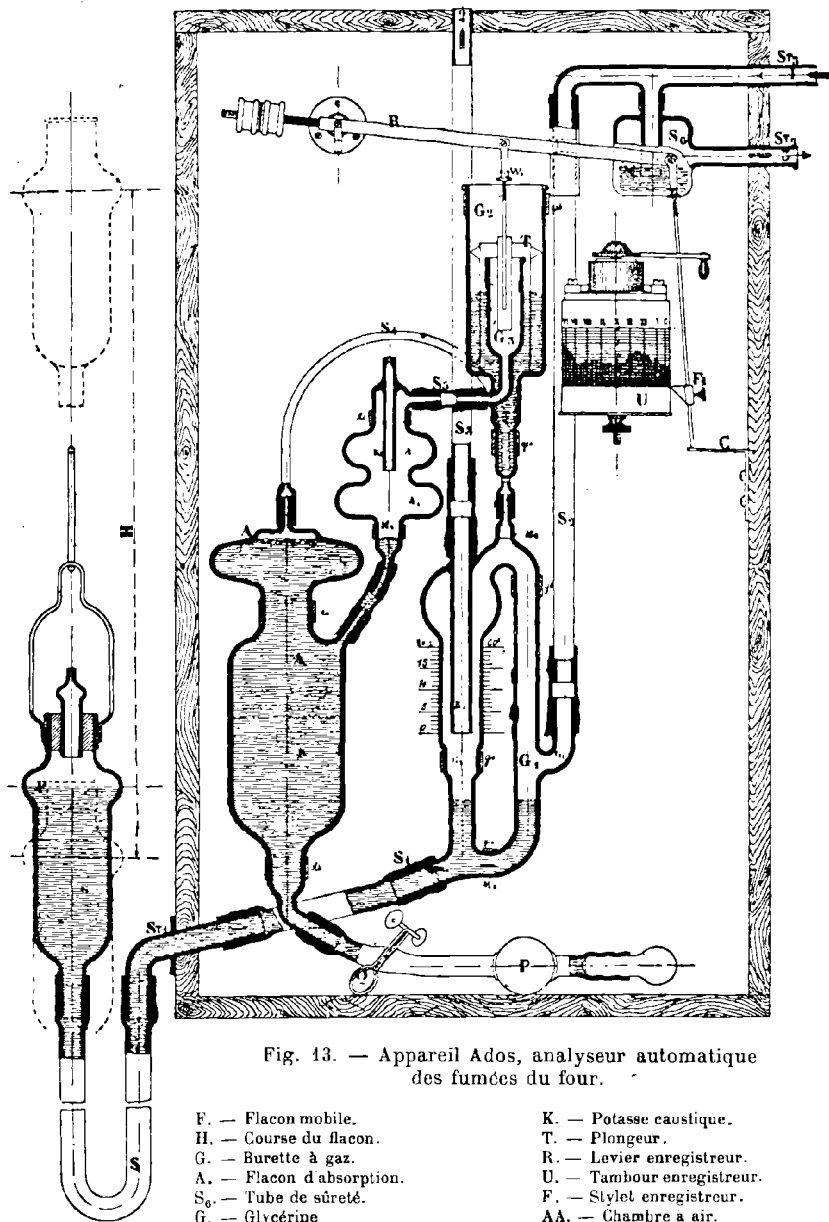
Nous croyons cependant utile de signaler un écueil de ces appareils, celui d'habituer ingénieurs et maîtres-fondeurs à certains dosages moyens et de limiter leur ambition à éviter les brusques oscillations de l'appareil enregistreur. Il n'est que trop fréquent de voir le personnel couvert par la régularité de cet enregistreur se contenter de cette honnête moyenne sans chercher si une amélioration peut être obtenue, et nous pourrions citer des exemples de fours où l'appareil Ados est installé depuis des mois et des années, et où une combustion parfaitement défectueuse est soigneusement enregistrée sans que l'idée de l'améliorer ou de la possibilité de l'améliorer se soit jamais fait jour.

A cet égard, nous pensons que les appareils de mesure directe et que les analyses faites sur place par l'ingénieur lui-même sont souvent préférables et il est naturel que celui qui a pris la peine de faire une prise d'essai et une analyse souvent dans des conditions fort peu agréables cherche à en tirer le maximum de déductions et d'enseignements utiles ; il est en tout cas hors de doute que l'ingénieur qui a des moyens de vérification personnels non exposés à la vue constante de ses ouvriers en peut tirer des moyens de surveillance et d'action sur le travail, beaucoup plus efficaces.

A ce titre, aussi bien que pour répondre aux cas nombreux où l'appareil enregistreur n'existe pas, nous donnerons des indications détaillées sur les analyses de gaz dans les usines.

3° Analyse des gaz par les burettes. — En donnant des indications sur la façon de faire les analyses de gaz nous ne prétendons en aucune façon imposer le choix d'un appareil et nous ne mettrons

pas en parallèle l'appareil Orsat généralement usité en France,



l'appareil Elliott que recommande M. Queneau dans la traduction

américaine de notre livre et la burette Bunte dont nous nous servons de préférence. Nous pensons en effet que le meilleur appareil d'analyse des gaz en industrie, où une approximation de 1 p. 100 est généralement suffisante, est celui auquel on est accoutumé.

Nous donnons ci-dessous la description et le mode d'emploi de l'appareil du D^r Bunte, parce que nous en connaissons le manie- ment, parce qu'il est le plus économique (15 à 18 francs suivant la capacité de la burette) et parce que, entièrement en verre sans aucun ajoutage fixe en caoutchouc, il est toujours prêt à servir et se conserve sans entretien dans un laboratoire, pour peu qu'on ait la pré- caution de vaseliner les robinets ; enfin et surtout parce qu'il se prête parfaitement aux prises d'essais, transvasements de gaz et toutes manutentions, sans risque de rentrée d'air.

Description et usage de la burette Bunte. — Elle se compose essen- tiellement (fig. 14) d'une cloche à gaz, sorte d'éprouvette de verre

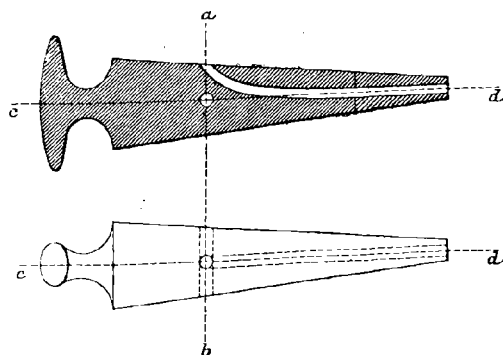


Fig. 14. — Robinet spécial à trois voies de la burette de Bunte.

graduée, d'environ 50 centimètres de long, effilée à ses deux extré- mités et fermée par deux robinets *a*, *b*. Le robinet inférieur *c* est à simple voie ordinaire, terminé par un tube assez étroit pour qu'on puisse y adapter un petit caoutchouc, au moyen duquel on reliera la burette à l'entonnoir *e*, toutes les fois qu'il sera nécessaire¹.

Le robinet supérieur *a* qui constitue l'organe le plus ingénieux de la burette, est percé de deux conduits, l'un, identique à celui d'un robinet ordinaire, permet d'établir la communication entre la cloche et le petit entonnoir qui la surmonte ; l'autre, s'insère sur le

¹ Dans la figure représentée page 107, nous avons dû représenter les caoutchoucs adap- tés à la burette, mais pendant l'analyse on doit évidemment les enlever.

fût du robinet, dans le même plan de révolution (*a*, *b*, fig. 14) que le premier conduit et suivant un diamètre perpendiculaire (comme dans un robinet à trois voies); mais s'inclinant aussitôt de façon à ne pas rencontrer le premier conduit, il se recourbe suivant l'axe de rotation du robinet et se termine par un tube prolongeant cet axe, sur lequel on peut adapter un tuyau de caoutchouc. Grâce à cette seconde voie, on peut établir la communication entre l'extérieur, la poire *P* ou tout autre réservoir contenant le gaz à analyser et la cloche graduée de la burette; on peut encore mettre en communication l'entonnoir de la burette et le tuyau de caoutchouc adapté au robinet supérieur; on peut enfin, en inclinant à 45° la tête du robinet, fermer les deux conduites et intercepter toute communication.

Pour faire une analyse, on commencera par remplir d'eau salée¹ la cloche à gaz, en élevant l'entonnoir *e* au-dessus du robinet supérieur *a*, et en y versant le liquide, qui chasse l'air et remplit la cloche et une partie de l'entonnoir de la burette.

On adapte alors au robinet *a* un caoutchouc, et on le remplit d'eau salée, ce qui est facile, en tournant la clef de façon que le conduit courbé du robinet mette en communication l'entonnoir et le tuyau de caoutchouc; puis, on ajuste ce dernier au réservoir où se trouve le gaz, poire ou aspirateur. Tournant alors de 180° le robinet *a*, on établit la communication entre le tuyau de caoutchouc et la burette, et ouvrant le robinet *b*, on abaisse l'entonnoir *e* suffisamment pour que le gaz soit aspiré et remplisse la burette jusqu'à une division convenablement choisie, voisine du zéro de la graduation.

La burette étant remplie, on ferme les deux robinets, on ôte les deux tuyaux de caoutchouc, et l'on fait la lecture précise du volume de gaz introduit. Cette lecture, ainsi que toutes celles qui se feront au cours de l'analyse, doit se faire dans des conditions de température, de pression et de tension de vapeur précises; et si ces données sont maintenues invariables dans tout le cours de l'analyse, les lectures de volumes se feront sans aucune correction; c'est ce qui rend l'usage de la burette très pratique pour des analyses rapides.

L'égalité de température est assurée, en effet, par un manchon de verre plein d'eau qui protège contre l'échauffement dû aux mains

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

de l'opérateur ou provoqué par la formation du carbonate de potasse ; on peut encore l'obtenir en plongeant la burette, avant chaque lecture, dans une cuve à eau profonde.

L'invariabilité de pression et de tension de vapeur est assurée de la façon suivante : on fait, après chaque absorption, un lavage en versant par l'entonnoir supérieur de l'eau salée qui refoule et fait écouler par le robinet *b* le réactif ; lorsque cet entonnoir est presque vide, on ralentit l'écoulement en tournant le robinet inférieur *b* et on l'arrête au moment où le liquide atteint en *a* un point de repère fixe. La pression du gaz dans la cloche est alors égale à la pression atmosphérique (qu'il est inutile de connaître), augmentée d'une petite colonne d'eau salée de hauteur connue et constante et de la tension de vapeur de l'eau salée à température constante ; elle est donc invariable.

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

Le premier réactif à introduire est la potasse qui absorbe très rapidement l'acide carbonique : puis le pyrogallate de potasse obtenu en versant une cuillerée d'acide pyrogallique dans la dissolution de potasse dans le petit entonnoir *a*. Enfin, on termine par le chlorure cuivreux qui absorbe l'oxyde de carbone. La dernière absorption se fait plus lentement et exige non seulement une agitation énergique, mais deux additions successives de réactif.

Lorsqu'il s'agit d'une analyse de fumées, le second et le troisième dosages sont le plus souvent inutiles.

L'ensemble des opérations demande à peine dix minutes ; on peut les faire commodément près d'un four, et dans ce cas la burette pourra servir à la prise d'échantillon, en la remplissant plusieurs fois pour chasser l'air du tube adducteur.

On voit donc de quelle ressource cet appareil sera pour la surveillance régulière des fours.

Analyse complète des gaz.

Lorsque l'analyse des gaz n'a pas seulement pour but d'exercer une surveillance mais doit servir à déterminer la température de

combustion ou à établir un bilan, il faut aller au delà du dosage de l'oxyde de carbone et évaluer les hydrocarbures et l'hydrogène.

Pour atteindre ce résultat, deux méthodes sont en présence, la destruction des hydrocarbures par combustion en leur faisant traverser un tube de platine chauffé au rouge, ou la combustion eudiométrique sur le mercure. Ici encore nous ne prendrons pas parti : la première méthode est préconisée par M. Queneau, l'auteur de l'édition américaine de notre livre, la seconde est celle dont nous nous sommes le plus constamment servi et que nous décrirons ici.

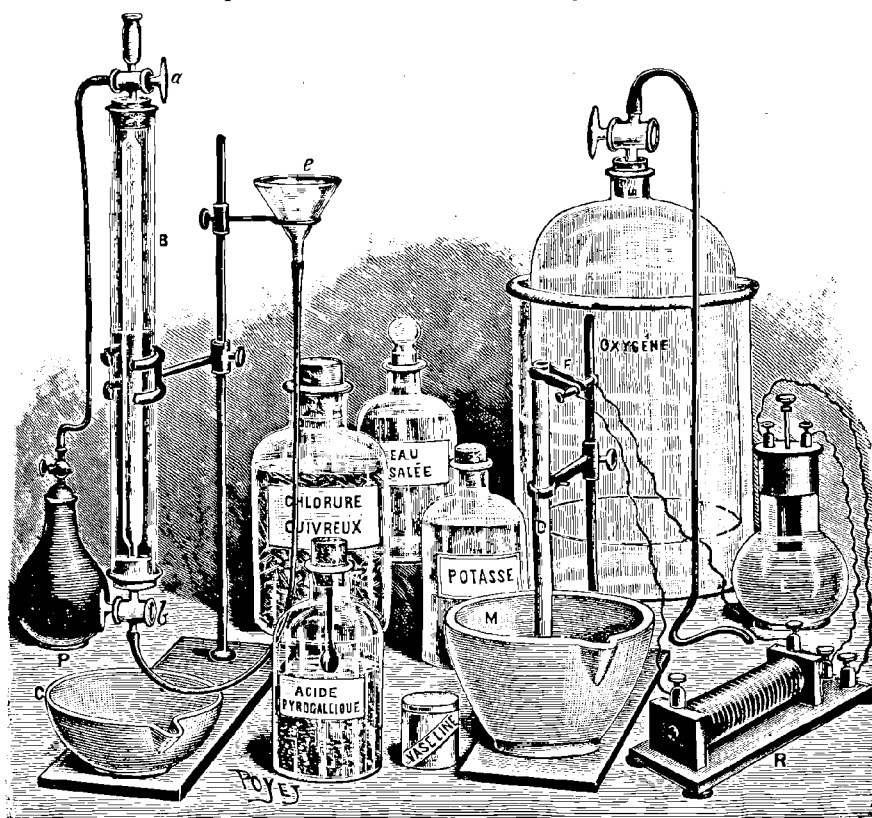


Fig. 15. — Outillage de laboratoire pour les analyses de gaz. Burette Bunte.

Analyse eudiométrique des gaz hydrogénés et hydrocarbonés. — Cette analyse portera sur le résidu gazeux restant dans la burette après absorption de l'oxygène, de l'oxyde de carbone et de l'acide carbonique, c'est-à-dire sur un mélange d'azote, d'hydrogène et de

formène (méthane). Il peut y avoir dans ce résidu des hydrocarbures plus carburés que le méthane, puisqu'il s'en produit dans la distillation de la houille, mais la proportion en est tout à fait négligeable. Il ne faut, en effet, pas perdre de vue que la méthode que nous indiquons s'applique seulement aux analyses de gaz de gazogènes, c'est-à-dire contenant au maximum 5 p. 100 d'hydrocarbures : dans ces conditions : si l'on observe que la proportion d'hydrocarbures plus carburés que le méthane n'y est que $1/50$ soit $0,05 \times 0,2$, on comprendra que l'erreur commise, lorsqu'on suppose qu'il n'y a que du formène, est négligeable. Cette remarque simplifie l'analyse d'autant plus que le méthane donne naissance par sa combustion à un volume d'acide carbonique égal au sien.

Le matériel suffisant à cette étude se compose d'un eudiomètre de Bunsen ou mieux d'un *eudiomètre de Riban* à fils de platine (D, fig. 14), d'un mortier de porcelaine contenant environ 6 kilogrammes de mercure, d'une pile et d'une bobine d'induction permettant de faire passer par le moyen de la pince F une étincelle dans l'eudiomètre¹, d'un réservoir d'oxygène, enfin d'un thermomètre et d'un baromètre.

On commence par mélanger le gaz à analyser avec un volume d'oxygène suffisant à assurer la combustion complète du gaz, d'après sa composition approchée qui, dans l'industrie, est presque toujours connue ($1/2$ volume d'oxygène pour la combustion de l'hydrogène et 2 volumes d'oxygène pour celle du formène). Il est commode de faire ce mélange dans la burette de Bunte qui se prête très bien à l'introduction et à l'exacte mesure du volume d'oxygène introduit, ainsi qu'au brassage de ces gaz comburant et combustible très nécessaire à l'inflammation lorsqu'on est près de la limite d'inflammabilité².

Après avoir rempli l'eudiomètre de mercure et l'avoir renversé sur la cuve on y transvase le mélange gazeux de gaz à analyser et d'oxygène. Pour cela on adapte au robinet *a* un tube de caoutchouc que l'on remplit d'eau salée pour le purger d'air, et où l'on chasse ensuite le gaz; introduisant alors l'extrémité du tube sous l'eudiomètre et levant l'entonnoir, on refoule le gaz jusqu'à ce qu'il remplisse environ les trois quarts de l'eudiomètre. On lit le volume et la pression qu'il suffit de mesurer avec une règle graduée, placée verticalement. On bouche partiellement l'eudiomètre à l'aide d'un bouchon de liège

¹ Ou de tout autre appareil permettant la production d'une étincelle électrique, électrophore, machine électrique, bobine avec rupteur, etc.

² Si l'on est au-dessous de la limite d'inflammabilité, on devra ajouter une quantité mesurée d'hydrogène.

échancré que l'on appuie fortement, à l'aide du support, contre le fond de la cuvette, et qui empêche la projection du mercure au moment de l'explosion. On fait enfin passer l'étincelle : la combustion se produit plus ou moins vivement et aussitôt après on observe une ascension du mercure résultant de la condensation de l'eau. On laisse refroidir, ce qui exige une dizaine de minutes à l'air, mais peut s'obtenir immédiatement en plongeant l'eudiomètre à l'aide d'une cuiller à long manche dans une cuve à eau profonde; on fait une seconde lecture de volume et de pression.

Enfin on introduit un fragment de potasse (potasse en cylindres) qui s'élevant au-dessus du mercure, se dissout dans la petite quantité d'eau inévitablement entraînée dans les manipulations de gaz et absorbe l'acide carbonique. Cette absorption sera facilitée en agitant l'eudiomètre solidement maintenu entre la main gauche et le pouce de la main droite; mais cette agitation demande quelque précaution pour éviter toute rentrée de gaz dans l'eudiomètre qui se trouve forcément en dépression, elle n'est pas indispensable. On fait alors une troisième lecture de volume et de pression.

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

On ramène tous les volumes à 0° et à 760^{mm} ce qui exige la connaissance de la température extérieure et de la pression atmosphérique, en tenant compte de la tension de vapeur d'eau.

La deuxième contraction c_2 , différence entre les volumes 2 et 3, donne immédiatement la teneur en formène; la première contraction représente la disparition de l'oxygène nécessaire à la combustion du formène soit deux fois le volume de ce dernier, et la disparition de l'hydrogène et du demi-volume d'oxygène nécessaire à sa combustion. On en déduira immédiatement la proportion d'hydrogène :

$$c_1 = 2 \text{ CH}^4 + \frac{3}{2} \text{ H}^2.$$

Toutes ces opérations ne demandent pas plus de trois quarts d'heure, en tenant compte du temps nécessaire au refroidissement. Elles n'ont évidemment pas la précision des méthodes de Bunsen et de Winkler, mais elles permettent des dosages avec une approximation¹ de

¹ Avec un eudiomètre de Riban de 20 centimètres de hauteur utile, si l'on suppose

1/100 toujours suffisante en industrie. Elles n'exigent — c'est là, rappelons-le, le mobile qui les a inspirées — qu'un matériel très simple, facile à constituer dans n'importe quelle usine.

3° Mesure des températures élevées. — Nous n'aurions aucune indication à donner sur la mesure des températures élevées, après la publication du livre de H. Le Chatelier et Boudouard, si nous n'avions constaté que bien des industriels s'effrayent encore du maniement délicat des galvanomètres et se privent d'enseignements expérimentaux qui leur seraient précieux ; et nous voudrions faire profiter de notre expérience en verrerie, en céramique, dans des études plus récentes sur les chaudières, pour amener notre lecteur à la conviction que le pyromètre thermoélectrique et d'autres appareils de mesure sont d'un maniement facile et peuvent être mis entre les mains sinon des ouvriers eux-mêmes, du moins de leurs contre-maîtres ou de personnes n'ayant que des connaissances scientifiques élémentaires.

Divers cas peuvent se présenter, dans la pyrométrie industrielle, suivant que les températures observées doivent servir de moyen d'étude ou de moyen contrôle.

La pyrométrie dans l'étude des fours. — Dans ce premier cas, le plus intéressant dans une étude des sources de l'énergie calorifique, l'appareil le plus pratique est le pyromètre thermo-électrique de Le Chatelier avec couple de *Platine — Platine-Rhodié* dont le maniement a été rendu facile par toutes les améliorations apportées par les constructeurs français, Carpentier et Pellin, et en Allemagne par Siemens et Halske.

Deux difficultés arrêtent encore quelquefois les ingénieurs qui ont à relever une température élevée : 1° l'usage du couple ; 2° la mise au point du galvanomètre et de sa graduation.

Les constructeurs livrent généralement un couple dans une canne de 1 à 2 m., tout monté, avec des bornes et une poignée en bois : il est rare que la longueur de la canne achetée soit celle qui convient exactement à l'étude qu'on veut faire. Ainsi dans un four de verrerie, il sera utile de relever la température près du milieu du bassin, c'est-à-dire à 2,50 m. ; dans une chaudière, au fond du foyer dont la profondeur n'est pas moindre.

une erreur de lecture de 1 millimètre sur les volumes, et de 2 millimètres, soit 2/760 sur les hauteurs de mercure, et si l'on admet encore que les erreurs s'ajoutent, on a, pour le formène une erreur relative de 1/2 p. 100 et pour l'hydrogène une erreur maxima de 1 p. 100.

Le plus simple pour être prêt à toute éventualité est d'acheter une longueur de fils dépassant le maximum de distance à prévoir dans ses observations et des cylindres d'argile percés de deux canaux que les constructeurs (Carpentier) livrent tout prêts ou que l'on fabriquera soi-même avec une bonne pâte à mouler.

Ces cylindres d'argile contenant les fils du couple sont placés dans

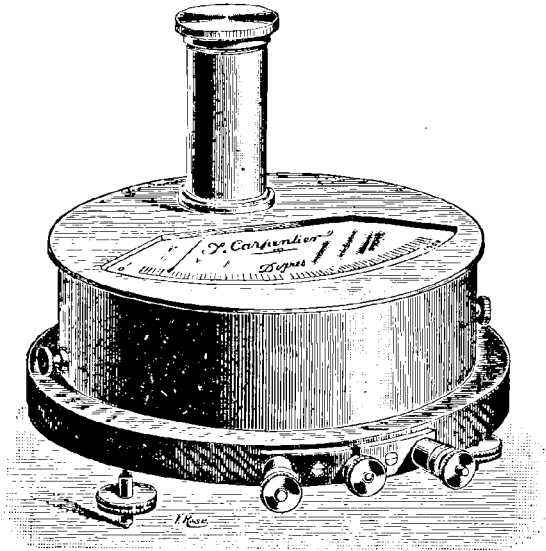


Fig. 16. — Galvanomètre J. Carpentier du pyromètre Le Chatelier.

un tube de fer que l'on prolonge par un manche, ou même dans une simple cornière.

Un autre détail embarrasse quelquefois l'expérimentateur, c'est la rupture de la soudure du couple. Toutes les précautions et la marche à suivre sont indiquées dans le livre de Le Chatelier et Boudouard pour pratiquer cette soudure, soit à l'or, soit par soudure autogène. Mais fréquemment un accident de rupture du couple se produit près du four, loin de tout moyen de réparation : il suffit alors d'enrouler les fils en spirale en les écrasant fortement l'un contre l'autre avec une pince plate pour reformer le couple. Nous avons opéré de la sorte un très grand nombre de fois, faisant toujours suivre cette réparation d'une graduation par le soufre (448°) qui est rapide, et nous n'avons jamais trouvé d'écarts dans les indications du pyromètre.

Le second point qui souvent arrête l'ingénieur dans l'emploi du pyromètre thermo-électrique est la mise au point du galvanomètre et de sa graduation. C'est pour parer à cette inconvénient que Siemens et Halske livrent des galvanomètres dans lesquels les indications en degrés centigrades sont portées sur l'échelle graduée à côté des déviations exprimées en unités électriques. Mais ceci ne

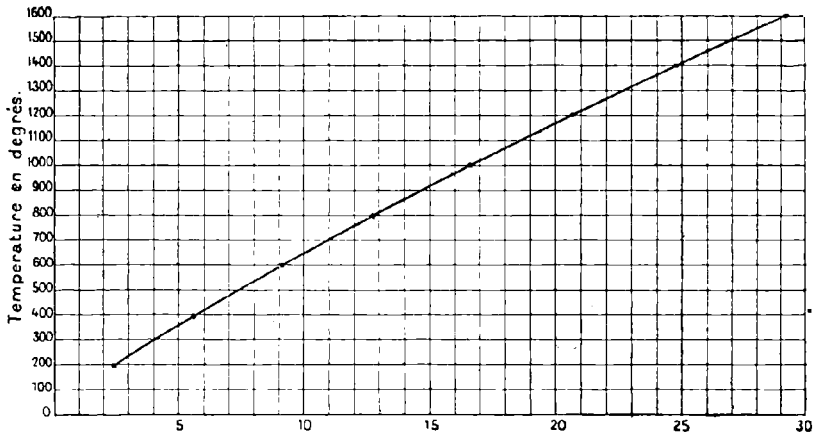


Fig. 17. — Force électromotrice développée par un couple platine-platine rhodié.

doit jamais dispenser d'une vérification et d'un repérage à une température suffisamment élevée, la vapeur de soufre. En réalité, le seul point important et sur lequel les constructeurs se sont tous mis d'accord est l'étalonnage préalable du couple indiquant les forces électromotrices en fonction des températures. C'est ainsi que procède M. Carpentier qui livre, en même temps qu'un couple, la courbe des forces électromotrices; nous préférons beaucoup cette méthode qui permet de se servir d'un galvanomètre quelconque en repérant deux points seulement, ébullition de l'eau et ébullition du soufre, et en relevant la déviation correspondant à la force électromotrice du couple pour cet écart de températures.

Pour achever de démontrer, si besoin est, le caractère pratique du pyromètre électrique, nous devons encore faire observer que dans la plupart des cas les corrections théoriques dues aux modifications de la résistance dans le couple par suite de son échauffement sont négligeables. Lorsque le couple a une certaine longueur et que la température à mesurer est très élevée, il semble que la résistance puisse subir un accroissement qui contrarie les indications du galvanomètre ;

mais il ne faut pas perdre de vue que les fils du couple sont dans des tubes en terre réfractaire isolants et que pendant les cinq secondes que nécessite une observation, l'échauffement est négligeable.

Pratiquement dans les nombreuses mesures que nous avons faites en verrerie, nous n'avons jamais relevé de différences de plus de 10° à 20°, pour des mesures de températures de 1 425° à 1 450°.

Il est naturel et même nécessaire que dans un livre didactique toutes les causes d'erreur soient analysées et discutées, mais il est permis à un praticien de dire qu'avec un peu de soin et de réflexion on peut réduire ces causes d'erreur et ces corrections à si peu de chose que les lectures directes du galvanomètre donnent les températures vraies à 10 ou 20° près.

Le seul défaut du pyromètre électrique est son prix élevé en raison de la hausse exagérée du platine. Ce prix peut restreindre l'usage de cet appareil comme moyen de contrôle et de relevé quotidien tel que nous l'avons pratiqué longtemps : il ne doit jamais arrêter dans le cas d'une étude précise de four et de fixation de son bilan.

La limite d'usage du pyromètre électrique est la fusion du platine 1 780°. Il arrive également que la mesure est impossible au moyen d'un couple, lorsque pour une raison ou une autre le point dont on veut mesurer la température est inaccessible. Dans ce cas on peut se servir d'un pyromètre à radiation.

Nous signalons à ce sujet, le pyromètre Féry, de découverte assez récente et que nous avons vu expérimenter à la manufacture de Sèvres, comme pouvant rendre de grands services notamment en céramique et dans les aciéries.

2° Le pyromètre comme moyen de contrôle. — Lorsque l'on se sert des températures comme simple moyen de contrôle, il est rare que l'on ait besoin de mesurer les températures les plus élevées qui se produisent dans un four : ainsi dans une chaudière, la température dans la boîte à fumée est plus intéressante que celle du foyer ; dans un four à récupération la température au sommet des chambres permet mieux de surveiller un four que celle du laboratoire.

Aussi conseillons-nous, dans ce but, de choisir de préférence un point du four où la température soit assez basse pour qu'un appareil enregistreur puisse y être installé. A cet égard, nous croyons devoir signaler les thermomètres à tension de vapeurs saturées.

Nous pensons encore que les montres Seger, actuellement d'un usage courant en céramique, et que les maisons de produits chi-

miques vendent avec leur échelle de graduation, doivent être répandues le plus possible, parce qu'elles sont d'un usage facile et à la portée de tous.

Enfin, pour l'ingénieur qui n'arrive pas toujours à acquérir l'expérience visuelle de l'intensité lumineuse des fours, un pyromètre optique (Le Chatelier ou Mesuré et Nouël) sera, vis-à-vis de ses contremaîtres, un moyen de contrôle précieux.

§ 4. — CALCUL DE L'UTILISATION DE LA CHALEUR OU DU RENDEMENT DANS UN FOUR AU MOYEN DES TEMPÉRATURES DE RÉGIME ET DE COMBUSTION

Nous appelons *chaleur utilisée* dans un four, la quantité de chaleur qui est consommée dans le laboratoire, par opposition aux *chaleurs perdues* qui sont les calories dépensées hors du laboratoire, dans le foyer, dans les chambres de récupération, dans les carneaux ou entraînées par les fumées.

Pour compléter cette définition, il importe de limiter exactement le *laboratoire* et accessoirement les autres parties d'un four.

Le laboratoire est l'enceinte fermée où s'accomplit l'opération industrielle nécessitant un chauffage : il est limité d'un côté par la sortie du carneau ou des carneaux amenant les gaz de combustion, de l'autre par l'entrée du carneau servant à l'évacuation des fumées.

Dans un four sans récupération il y a outre le laboratoire, le foyer et la cheminée. Le foyer et le laboratoire sont généralement un peu confondus, à moins qu'il n'y ait comme dans certaines chaudières une *chambre de combustion* intermédiaire entre eux et les séparant. La cheminée est au contraire presque toujours bien distincte, et réunie au four par un *carneau d'évacuation des fumées* ; il importe de bien remarquer que pour nous, et dans tous les calculs d'utilisation et de rendement, le commencement de la cheminée est le point de départ du carneau d'évacuation des fumées et non pas la base du tube vertical (cheminée proprement dite) servant à assurer le tirage. C'est en ce point c'est-à-dire à la sortie même du laboratoire que les températures doivent être mesurées et les prises de gaz effectuées pour faire des bilans de combustion exacts.

Dans des fours à récupération, il y a en plus des organes ci-dessus, laboratoire, foyer gazogène, cheminée et quelquefois chambre de combustion, un cinquième organe, le récupérateur, et souvent des carneaux assez longs réunissant le gazogène au laboratoire : ici

encore il est nécessaire de bien limiter les différents organes si l'on veut faire des bilans exacts, mais cette limitation est en général facile car tous ces organes sont séparés, surtout dans les fours Siemens, soit par des registres de réglage, soit par des valves d'inversion.

Nous conseillons même toutes les fois que cela est possible de multiplier ces registres de réglage qui rendent seuls l'ingénieur maître de la marche de son four.

Dans cette hypothèse : le *foyer gazogène* ou les gazogènes se terminent aux registres fermant chaque cuve de gazogène ; le *carneau d'amenée du gaz* va de ce registre à la valve ou à la cloche d'inversion ; les *récupérateurs à inversion* commencent ou finissent au clapet ou à la cloche d'inversion, et se terminent ou commencent aux lunettes d'arrivée ou d'échappement des gaz ou des fumées ; la *cheminée* commence à la valve ou à la cloche d'inversion et se termine au sommet du tube vertical d'évacuation des fumées.

Ce n'est qu'en précisant ainsi les limites des organes c'est-à-dire les points où il convient de mesurer les températures que l'on pourra préciser aussi les quantités de chaleur utilisée ou perdue et faire une étude diagnostique exacte d'un four.

La chaleur utilisée, telle que nous l'avons définie, c'est-à-dire dépensée dans le laboratoire, produit plusieurs effets distincts ; une partie sert à fournir la chaleur nécessaire à la réaction réalisée dans le laboratoire lorsqu'on est dans le quatrième cas de notre classification, celui de l'énergie chimique négative, qui est le plus fréquent ; une partie compense les pertes par conductibilité, une troisième partie fait face aux pertes par rayonnement.

Il est bien évident que l'on peut dans la pratique modifier les rapports entre ces trois facteurs de la chaleur utilisée, et agir soit sur le rayonnement soit sur la conductibilité d'un laboratoire : nous reviendrons sur ce point dans le chapitre suivant, à propos de l'économie dans les fours. Mais dans notre étude actuelle du rendement thermique d'un four et dans toutes les études de rendement thermique ou de combustion, nous devons supposer que nous avons affaire à un laboratoire donné, dont les dimensions, la forme, l'épaisseur des parois sont dictées par des considérations autres que celle du chauffage seul, dont la température de régime est fixée à l'avance, et dans ces conditions, pour un ingénieur chargé de conduire un appareil, la chaleur utilisée est bien telle que nous l'avons définie : ce sont les calories que l'on réussit à amener ou à ramener dans le

laboratoire, tandis que celles qui se dépensent au dehors sont évidemment perdues.

Si l'on désigne par Q la quantité de chaleur totale disponible dans un combustible, par U les calories consommées dans le laboratoire, par P celles qui se dépensent au dehors, on a évidemment, en raison du principe de la conservation de l'énergie.

$$Q = P + U$$

et la chaleur utilisée ou rendement thermique est

$$\text{Rendement} = \frac{U}{Q}.$$

Or si l'on limite exactement le laboratoire comme nous l'avons fait, la quantité totale de chaleur apportée soit sous forme de chaleur de combustion, soit sous forme de chaleur sensible récupérée ou non, est constituée par l'énergie calorifique des gaz à leur admission, et toute la chaleur emportée est constituée par l'énergie calorifique (chaleur sensible) emportée par les fumées. La différence entre ces deux quantités d'énergie est la chaleur cédée au laboratoire. Il suffit donc de faire ce bilan pour arriver à connaître le rendement c'est-à-dire l'utilisation plus ou moins bonne du combustible.

C'est ici qu'interviennent les températures de régime et de combustion ; c'est ici qu'entrent en jeu les analyses des gaz et des fumées, les chaleurs latentes et sensibles, les températures initiales et finales.

En effet, d'après le principe de l'état initial et de l'état final, on peut admettre que dans un laboratoire la combustion se fait d'abord instantanément, dans des conditions athermanes, sans aucun échange avec le laboratoire, puis que les gaz de combustion se refroidissent graduellement jusqu'à la température de régime en cédant leurs calories à l'enceinte à chauffer avant de s'échapper par la cheminée. Ceci démontre, que *la chaleur cédée au laboratoire est la chaleur de refroidissement des gaz résultant de la combustion, de la température de combustion à la température de régime* ou encore la chaleur d'échauffement des fumées de la température de régime à la température de combustion.

Or nous avons indiqué la méthode de calcul des températures de combustion : la température de régime est une donnée expérimentale facile à mesurer ou pratiquement connue : nous connaissons également la méthode d'analyse des fumées et le moyen (par le

dosage du carbone) de rapporter ces fumées au combustible gazeux ou solide. Il suffit donc pour avoir le rendement thermique, de tracer la courbe des chaleurs d'échauffement des fumées, de chercher son intersection avec les deux droites qui correspondent aux températures de régime et de combustion; la différence entre les deux ordonnées ainsi fixées représente la chaleur dépensée dans le laboratoire; son rapport à la quantité de chaleur totale disponible donne le rendement thermique de l'appareil de chauffage.

Nous donnerons ici à titre d'exemple de calcul, l'étude des fours à chauffage direct sans gazogènes laissant au chapitre suivant, et par une méthode différente, celle des fours à gaz à récupération.

Les fours à chauffage direct donnent en effet l'état de la question du rendement des fours avant les progrès récents du chauffage: l'étude des fours à gaz nous donnera la mesure de l'économie réalisée par les nouvelles méthodes et en particulier par la récupération.

Mais avant de passer à ces exemples concrets remarquons que la définition que nous avons donnée du rendement et la formule par laquelle elle s'exprime comportent quelques enseignements.

$$\text{Rendement} = \frac{U}{Q} = \frac{f(T_c - T_R)}{Q}$$

T_R = température de régime.

T_c = température de combustion.

Le fait que le rendement thermique dans les fours est exprimé par une fraction dont le dénominateur est la chaleur totale disponible, et le numérateur une fonction de la différence entre la température de régime et la température de combustion, montre d'abord l'intérêt que l'on a en général à augmenter la température de combustion: toute augmentation de cette température correspond en effet à un accroissement du nombre de calories cédées par une même masse gazeuse, c'est-à-dire pour un même poids de combustible brûlé; nous trouvons là la démonstration de l'utilité de la récupération.

Il est en second lieu évident que plus la température de régime sera élevée, plus sera nécessaire et efficace cette augmentation de la température de combustion: c'est une vérité évidente dont on n'a pas toujours assez tenu compte, par exemple lorsqu'on a cherché à appliquer les mêmes solutions à des problèmes de chauffage très différents, comme la métallurgie de l'acier à 1 800°, celle du cuivre à

1 050°, la verrerie à 1 450°, et même des chaudières à vapeur à 250° ou 350°. Dans les industries à hautes températures il y a un intérêt énorme à augmenter la température de combustion par un moyen quelconque et en particulier par la régénération de Siemens; dans les foyers à basses températures et en particulier dans les chaudières, la très haute température des gaz chauffants est plutôt nuisible parce qu'elle provoque une usure inutile des chaudières, et la récupération est à peu près inutile¹.

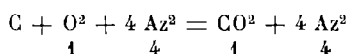
C'est ce que l'étude numérique des foyers à chauffage direct va nous permettre de démontrer et de préciser.

¹ Sauf dans les chaudières de centrales électriques aux heures de pointes.

B. — ÉTUDE DES FOURS PAR LES TEMPÉRATURES

§ 1. — ÉTUDE GÉNÉRALE DES FOURS A CHAUFFAGE DIRECT

On appelle fours à chauffage direct ou fours à grille, les appareils de chauffage dans lesquels la combustion 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 97,6 calories 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 Bicheroux en métallurgie, les fours Boëtius et leurs dérivés en verrerie et cristallerie, ne sont encore que des fours sans récupération à chauffage direct dégageant les fumées directement dans l'atmosphère.

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

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

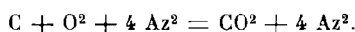
Il est juste de remarquer que, si tous ces fours sont dénués de récupérateurs par les gaz, ils ne sont pas tous dépourvus de tout organe d'utilisation des chaleurs perdues. Sans parler de ceux qui, comme les fours à puddler, sont munis de chaudières à vapeur, beaucoup de fours à réverbères sont à plusieurs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

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

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

a) CALCUL DE LA CHALEUR UTILISÉE 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 97,6 cal. 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.

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 : 97,6 CAL. : Q	300°	1 000°	1 500°
Chaleur emportée { par 1 volume moléculaire $CO^2.$	3,1	12,4	21,1
{ par 4 — — — — — $Az^2.$	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 15°, l'utilisation de la chaleur est évidemment complète, le rendement est de 100 p. 100. Remarquons que ce cas est à peu près celui du chauffage domestique, lorsque l'appareil, poêle ou cheminée

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

Au contraire, la perte de chaleur est totale et l'utilisation nulle, à partir de la température de combustion du carbone à l'air froid, que nous savons être de 2 040°.

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

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

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

conduisant à la courbe suivante

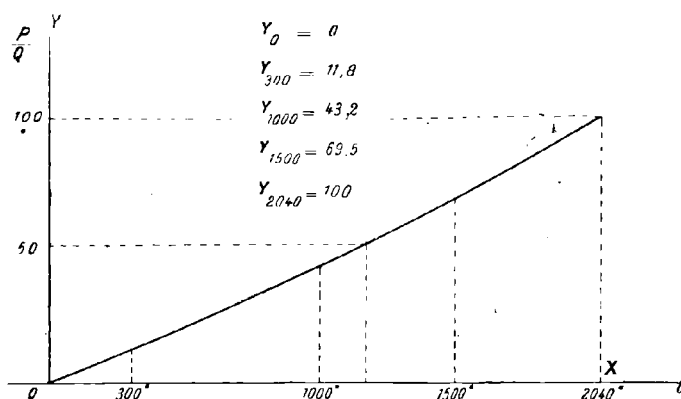


Fig. 48. — Courbe de l'utilisation de la chaleur dans les fours à chauffage direct dans le cas de combustion neutre.

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

Examinons les excès d'air de 25, 50, 100, 150 p. 100. Si l'on tient compte de la composition de l'air contenant $\frac{1}{5} O^2$ et $\frac{4}{5} Az^2$, les excès d'air ci-dessus correspondent aux compositions suivantes des fumées :

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

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

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

Pour calculer la chaleur utilisée aux températures de 300°, 1 000°, 1 500°, dans ces différentes hypothèses, il suffit de se reporter au tableau ci-dessus, d'ajouter à la chaleur emportée par les fumées neutres la chaleur emportée par l'oxygène et l'azote en excès, soit respectivement, 1,25, 2,50, 5 et 7,50 molécules de gaz parfaits, d'où le nouveau tableau :

	FUMÉES	1,25 G. P.	2,50	5	7,50
300°.	11,5	+ 2,62	+ 5,25	+ 10,5	+ 15,75
1 000°.	42,1	+ 9,28	+ 19,56	+ 37	+ 56,56
1 500°.	67,5	+ 14,5	+ 29		

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

AIR EN EXCÈS :	25 P. 100	50 P. 100	100 P. 100	150 P. 100
300°.	14,12	16,75	22	27,25
1 000°.	51,38	71,56	79,1	»
1 500°.	82	96,5		

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

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

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

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

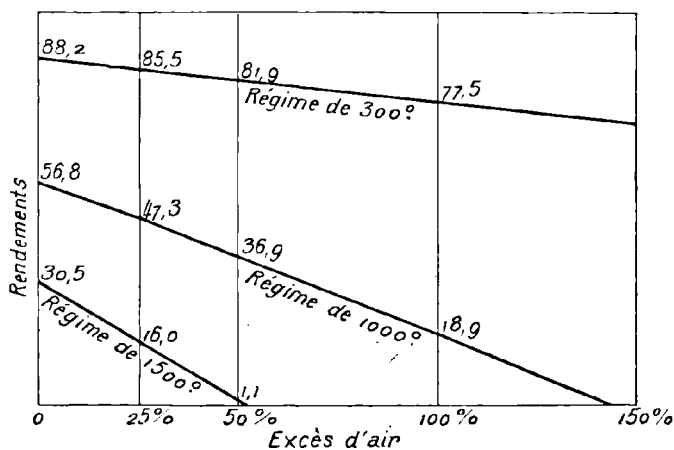


Fig. 19. — Graphique des rendements dans les fours à chauffage direct.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

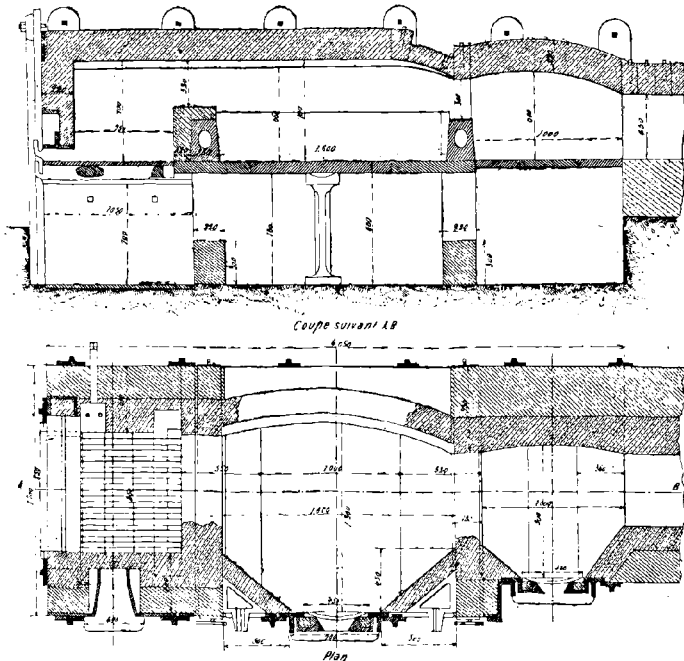


Fig. 20. — Four à puddler.

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

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

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

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

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

Chaleur absorbée par le puddlage	30,5	ou	16	p. 100
— — — la chaudière	57,7		69	—
— — — perdue	44,8		14,5	—
	<u>100</u>		<u>100</u>	

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

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

C. — DE L'OBTENTION DES TRÈS HAUTES TEMPÉRATURES

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

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

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

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

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

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

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

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

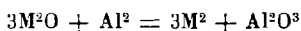
Enfin, on songeait à utiliser des sources d'énergie chimique puissantes, où l'air atmosphérique n'avait plus à intervenir, et où l'oxygène était emprunté à un composé du corps à préparer, la réaction se faisant dans un laboratoire réduit au volume strictement nécessaire au chargement des matières en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

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

§ 1. — ALUMINOTHERMIE

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

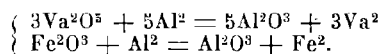
Dans une réaction aluminothermique, le corindon formé vient nager à la surface sous la forme d'une scorie liquide, tandis que le métal obtenu se rassemble dans le fond en un culot métallique.

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

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

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

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



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

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

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

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

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

§ 2. — TEMPÉRATURES OBTENUES PAR LE FOUR ÉLECTRIQUE¹

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

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

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

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

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

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

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

Voici les principaux résultats obtenus par différents savants :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHAPITRE III

DE L'ÉCONOMIE DANS LES FOURS

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

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

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

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

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

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

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

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

¹ L'affirmation que nous donnons ici de l'indifférence de beaucoup d'industriels à la question d'économie, tant qu'ils ne sont pas pressés par la concurrence, paraîtra peut-être exagérée à plusieurs de nos lecteurs. Qu'il nous soit permis de rappeler que la transformation des fours de verrerie qui réalise une économie de 2/3 du combustible, a mis trente ans (1867 à 1900) à se parfaire, en glacerie et verrerie à bouteille, et qu'elle n'atteint pas encore la gobeletterie et la cristallerie; qu'en céramique l'utilisation absolue de la chaleur est toujours inférieure à 10 p. 100, n'atteignant souvent que 3 à 4, sans qu'aucun effort vraiment sérieux ait été fait pour sortir de cette ornière; que dans les centrales électriques, industrie nouvelle mais appelée à un avenir colossal, la

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

qui importe, c'est que l'ingénieur pratique ces outils de contrôle et sache en interpréter les résultats⁴.

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

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

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

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

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

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

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

⁴ Nos préférences vont certainement vers l'appareil de Bunte, suivi s'il y a lieu de l'analyse sur l'eudiomètre à mercure.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Le bilan d'utilisation de la chaleur dans un four comporte les déterminations suivantes :

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

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

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

Si l'on veut établir le bilan d'un four par une méthode absolument rigoureuse, c'est-à-dire comportant des vérifications des principales mesures, en un mot, dresser une véritable comptabilité en partie double de la chaleur utilisée et perdue, il faudra, outre les analyses de gaz et les mesures de température, faire des mesures exactes des consommations de houille et d'eau qui permettront de contrôler par un calcul synthétique les analyses de gaz ¹. Dans ce cas, il faudra

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

faire l'expérience pendant un temps suffisamment long pour que les pesées d'eau et de houille soient faites avec précision, et les prises de gaz devront être convenablement dirigées et espacées, de façon que les chiffres d'analyses représentent bien la composition moyenne pendant la période totale de l'expérience. Enfin, les analyses de houille devront porter sur une prise d'échantillon faite sur la houille qu'on brûlera pendant l'expérience. Une durée de vingt-quatre heures pour l'établissement du bilan en partie double est nécessaire¹.

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

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

Les données expérimentales nécessaires à l'étude du rendement et des pertes de chaleur dans un four sont les suivantes :

1° *Composition du combustible. Analyse organique et pouvoir calorifique de la houille. Escarbilles.* — Ces déterminations effectuées par les méthodes indiquées doivent être faites sur une prise d'essai très soignée, car les gros morceaux de houille ont souvent une composition différente de celle des menus ; l'échantillonnage sera

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

¹ Le dosage rigoureux de la consommation de l'eau pendant un temps limité peut présenter des difficultés aussi bien quand le gazogène est alimenté par une chaudière que lorsqu'il reçoit l'eau liquide dans le cendrier. L'évaluation exacte de la consommation de charbon pendant un temps limité est elle-même impossible, en raison des variations de niveau du combustible dans les gazogènes. Voilà pourquoi la durée minima de vingt-quatre heures est nécessaire, toutes les fois que l'on veut faire un bilan complet, en partie double, avec vérification des dosages les uns par les autres.

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

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

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

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

Prenons pour notre bilan les chiffres suivants :

Consommation de houille (en 36 heures)	14 500 kilogrammes.
Production d'escarbilles	3 500 —
Composition des escarbilles	{ Eau 28 —
	{ Carbone 40 —
	{ Cendres 32 —
Le carbone de la houille = 14 500 × 82,5 =	11 960
Le carbone des escarbilles = 3 500 × 40 =	1 400

Le carbone de la houille échappant à la combustion est donc égal aux 140/1196 du carbone contenu dans la houille, d'où l'on déduit la composition suivante par kilogramme :

Carbone brûlé	728
Carbone échappant à la combustion	97
Hydrogène	50
Azote	12
Oxygène	60
Cendres	41
Eau hygroskopique	12
	<hr/>
	1 000

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

$$P = 8210 - 788 = 7422$$

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

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

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

Il est utile de rapporter ainsi à la molécule du charbon brûlé non seulement la chaleur totale disponible, mais toutes les quantités de chaleur mises en jeu dans le four, et toutes les analyses de gaz. En effet, le carbone n'étant introduit dans le four que par le combustible (si l'on néglige l'acide carbonique de l'air) c'est ce corps qui convient le mieux comme terme de comparaison¹ : le combustible correspondant à un volume donné de gaz, et, par conséquent de calculer le rapport de la puissance calorifique contenue dans ce gaz à la chaleur totale disponible ; d'autre part, comme les chaleurs d'échauffement sont toutes données pour les volumes moléculaires, c'est la molécule (12 grammes) qui sera commodément prise pour unité.

2° *Analyses de gaz.* — Les deux analyses à faire sont celles du gaz de gazogène et celle des fumées.

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

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

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

1° GAZ DES GAZOGÈNES

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

Rapportons cette composition à la molécule de carbone, en admettant que, dans l'analyse précédente, l'unité soit le volume moléculaire. Les chiffres de CO² et CO correspondent à un nombre de molécules de carbone égal à leur volume, mais le formène CH⁴ a un volume double de la molécule. Il s'ensuit que les 100 volumes de notre gaz sec ou les 102,5 vol. du même gaz humide correspondent à un chiffre de carbone brûlé exprimé en molécules par :

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

CO² CO CH⁴

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

2° FUMÉES

CO ²	14,3	} 100
Az ²	84	
O ²	8,7	
Eau		
		<u>8,7</u>
		108,7

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

3° *Mesures de températures.* — Les points où il est utile de prendre la température, sont les suivants :

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

Cette température dans notre bilan est 600°.

2° A l'entrée dans le four, dans les lunettes d'arrivée de l'air et du gaz. En ces points, la température peut changer, au cours d'une période d'inversion ; elle peut, même accidentellement, différer d'une

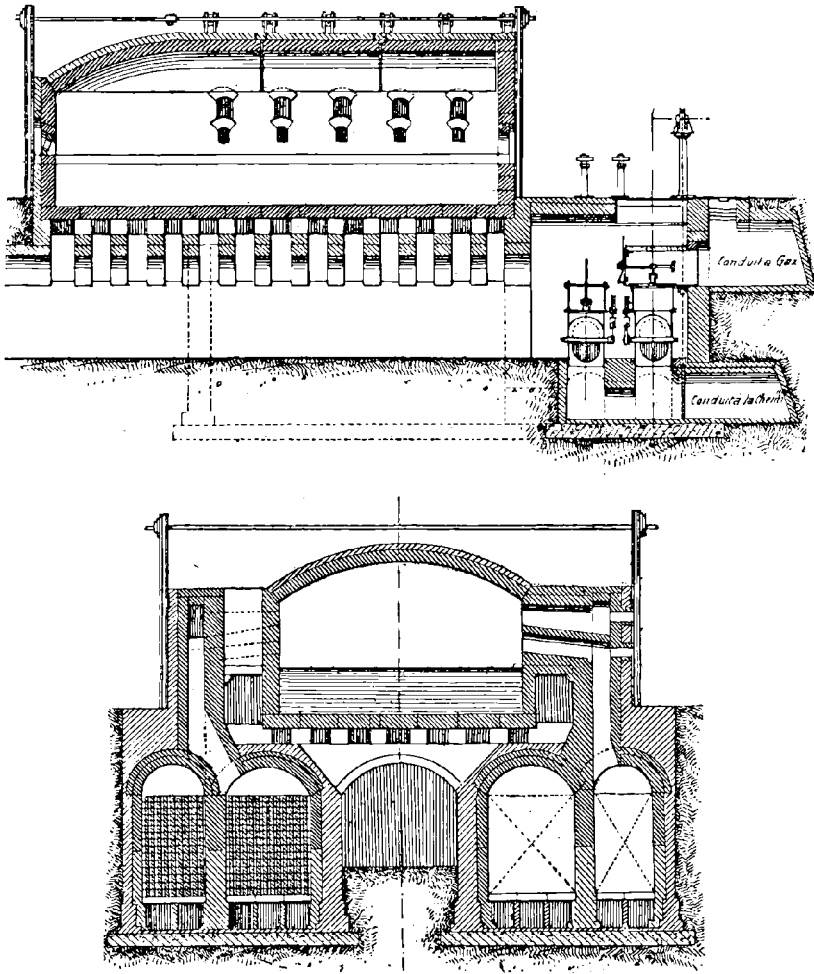


Fig. 21. — Four Siemens à bassin de la verrerie de Folembay ayant servi à l'établissement du bilan.

lunette à une autre ; il sera donc utile de prendre plusieurs mesures espacées de quart d'heure en quart d'heure pour avoir la température moyenne.

Des expériences, ainsi conduites nous ont montré que ces écarts

atteignent 50°, et nous permettent de prendre 1200° pour notre bilan, en supposant égales les températures d'admission de l'air et du gaz.

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

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

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

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

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

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

4° *Calculs du bilan de fours Siemens à gaz mixte.* — Au moyen des données expérimentales qui précèdent, il est facile de calculer le bilan du four à double récupération à gaz mixte, que nous avons pris comme exemple.

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

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

Calcul de la puissance calorifique du gaz sortant du gazogène.

GAZ	COMPOSITION	CHALEUR SENSIBLE A 600°		CHALEUR LATENTE	
		à l'unité, volume moléculaire.	dans le gaz.	à l'unité, volume moléculaire.	dans le gaz.
CO ²	5,2	6,4	32,5	—	—
CO	20,3	4,3	87,3	68,2	1,384
H ²	13,2	4,3	56,7	58,2	768
CH ⁴	3,1	8,0	24,8	195,2	515
Az ²	58,1	4,3	250,3	—	—
H ² O	2,5	5,8	14,5	—	—
			466,8		2,667
Chaleur totale				3 134	
Puissance calorifique, par molécule de carbone brûlé.				$\frac{3\ 134}{29} = 108.$	

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

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

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

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

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

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

¹ Rappelons l'analyse des fumées :

CO² = 14,3
Az² = 84
O = 1,7
Eau = 8,7

Pour 20,3 CO	= 10,1 O ²	+ 40,6 Az ²
— 13,2 H ²	= 6,6 O ²	+ 26,4 Az ²
— 3,1 CH ⁴	= 6,2 O ²	+ 24,8 Az ²
Excès d'air $\frac{(1,7 \times 29)}{(14,3)}$	= 3,5 O ²	+ 14 Az ²
	96,2	105,8
	132	

et la chaleur sensible apportée par cet air est, à 1200°, de 1188 calories, ou par molécule de charbon brûlé :

$$\frac{1188}{29} = 41.$$

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

L'excédent $\frac{167 - 122}{122} = 37$ p. 100 auquel il conviendrait encore d'ajouter les 11,5 cal. perdues dans le gazogène donne la mesure de l'effet de la récupération ; ces 48,5 cal. sont reprises sur les fumées qui, sans la récupération, les emporteraient à la cheminée.

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

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

Rapportons ce chiffre de calories aux molécules de carbone :

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

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

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

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

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

COMPOSITION	ÉCHAUFFEMENT A 400°		
CO ² 14,3	×	4,0	= 57,2
O ² + Az ² 85,7	×	2,8	= 239,9
Eau 8,7	×	3,7	= 32,2
Total			329,3
Chaleur perdue par molécule de carbone		320	= 23
		14,3	
Chaleur perdue p. 100		23	= 18,8
		122	

4° Bilan de four Siemens.

Nous arrivons ainsi au bilan suivant :

Chaleur perdue dans le gazogène	11,5
— utilisée	54
— perdue par les fumées	18,8
— — par refroidissement des chambres de récupération par (différence)	15,7
Total	100,0

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

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

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

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

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

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

$$\text{CO}^2 = 13,1 \quad \text{O} = 3 \quad \text{Az} = 83,9$$

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

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

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

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

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

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

donne

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

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

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

Prenons pour base de nos calculs la température de 500° dans la boîte à fumée et la composition des fumées déjà considérée p. 151 (a).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bilan d'une chaudière marine chauffée au pétrole.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les pertes de chaleur se ramènent à trois chefs principaux :

- 1° Pertes par rayonnement et conductibilité.
- 2° Chaleur emportée par les matières ouvrées sortant du four.
- 3° Chaleur emportée par les fumées.

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

a) RAYONNEMENT ET CONDUCTIBILITÉ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

On peut, après avoir fait le bilan d'un four, calculer la chaleur nécessaire à l'opération industrielle à effectuer, et la différence avec la chaleur totale consommée dans le laboratoire donne le rayonnement. Dans notre four de verrerie par exemple, où la chaleur totale utilisée dans le laboratoire est 54 p. 400, on calculera la chaleur nécessaire à l'échauffement des matières composant le lit de fusion, puis la chaleur de décomposition des carbonates, et enfin la chaleur de réaction de la silice sur les bases ; en retranchant le total de ces calories des 54 p. 400 décelés par le bilan, on aura le rayonnement.

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

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

b) CHALEURS EMPORTÉES PAR LES MATÉRIAUX SORTANT DU LABORATOIRE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

c) CHALEUR EMPORTÉE PAR LES FUMÉES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

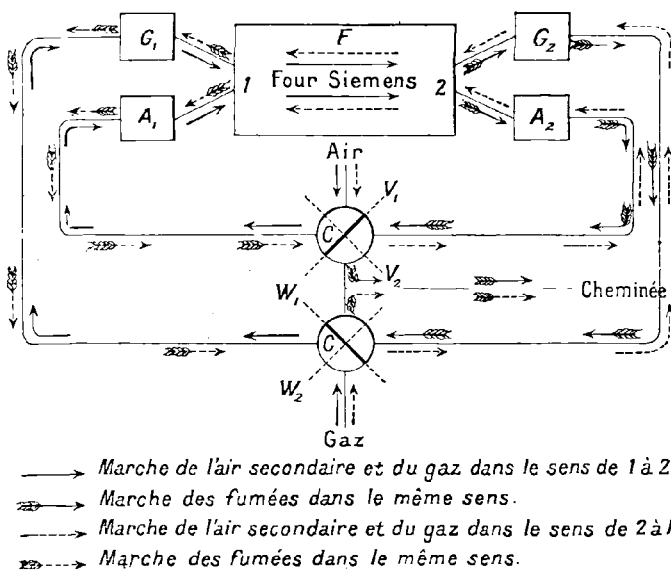


Fig. 22. — Régénérateur Siemens.

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

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

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

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

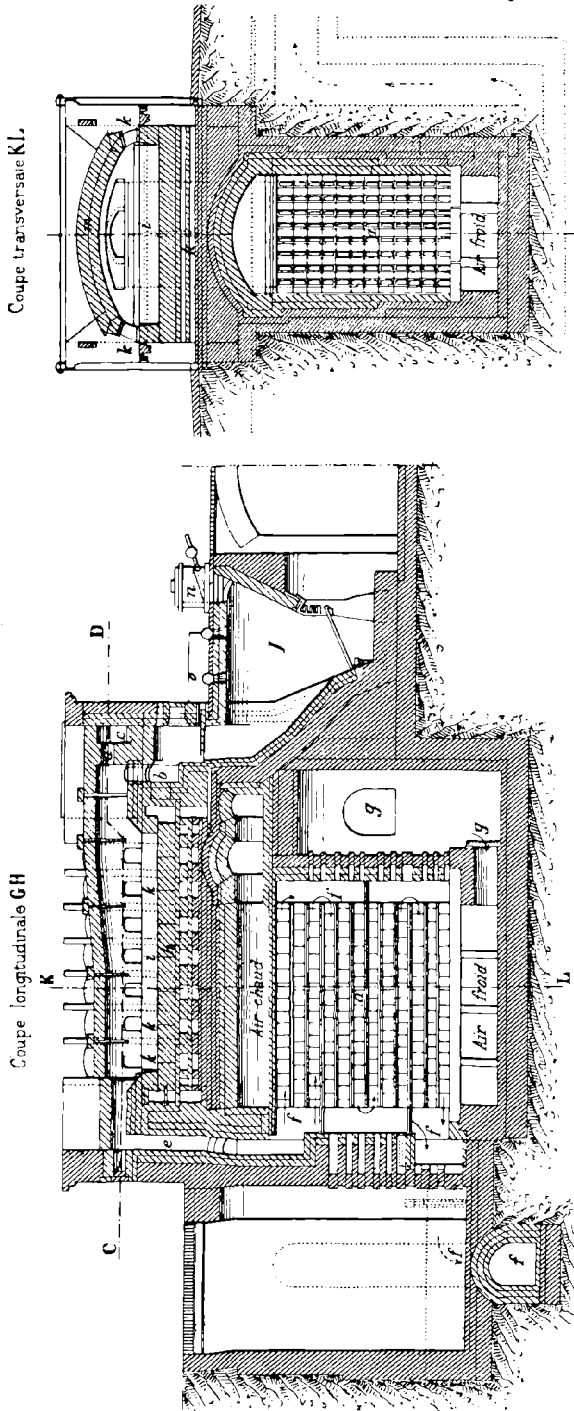


Fig. 23. — Four à récupération, système Lencauchez.

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

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

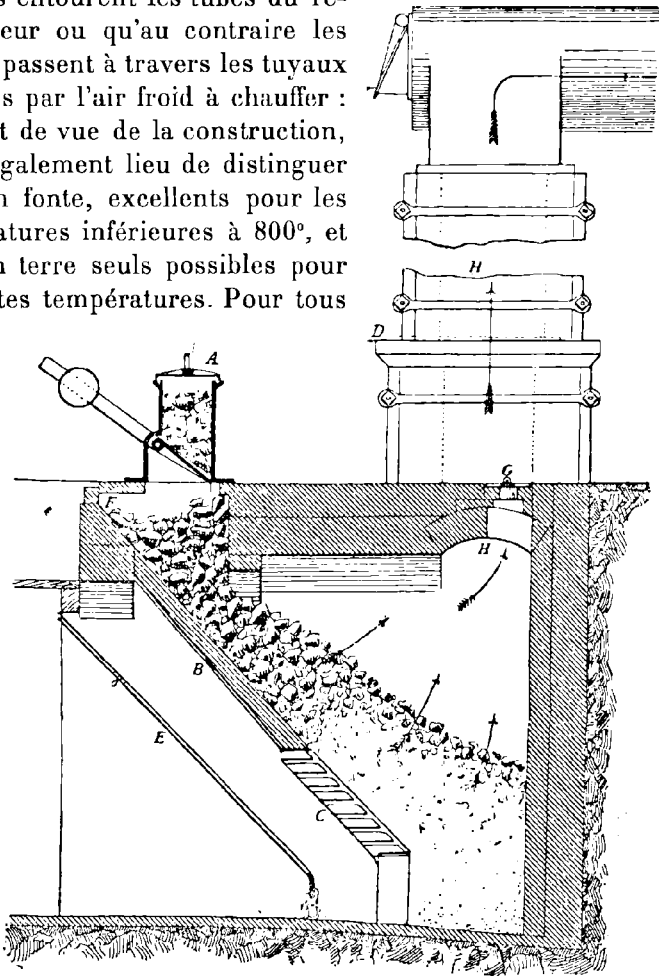


Fig. 24. — Gazogène Siemens ordinaire à grille inclinée, à siphon.

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

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

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

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

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

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

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

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

B. — THÉORIE GÉNÉRALE DE LA RÉCUPÉRATION

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

§ 3. — MÉTHODE DU CALCUL DU RENDEMENT DES FOURS

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

$$Q = P + U, ^1$$

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

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

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

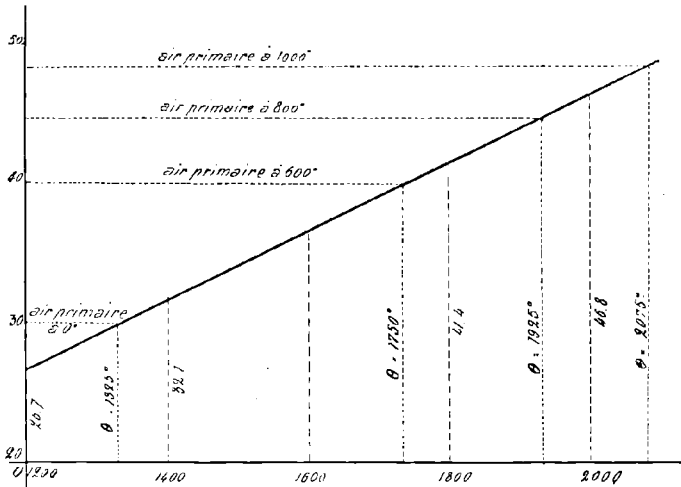


Fig. 25. — Graphique donnant les températures de gazéification du gaz Siemens théorique.

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

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

¹ Voir p. 116.

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

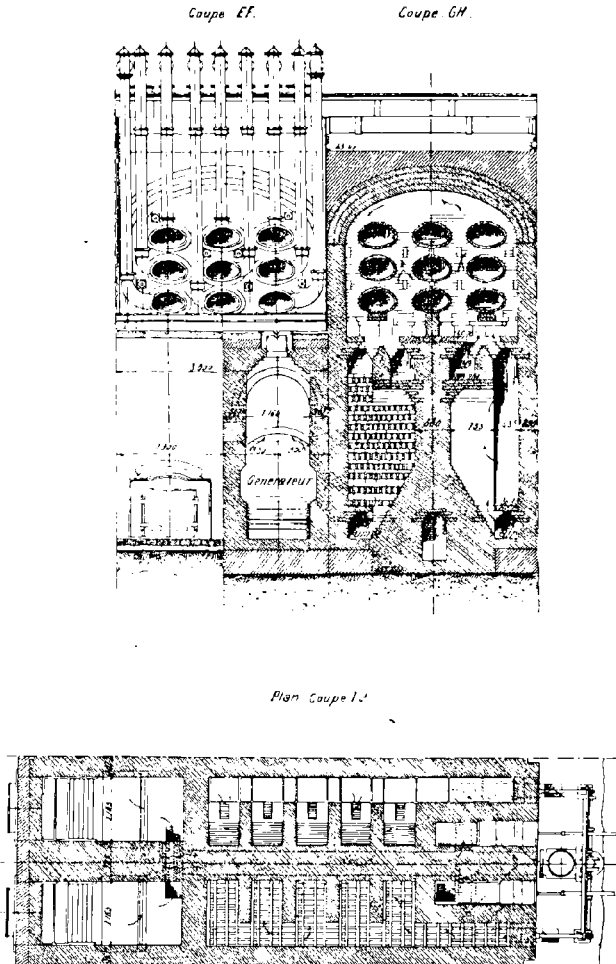


Fig. 26. — Four à cornues système Siemens, à simple récupération, de la C^{ie} Parisienne du gaz.

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

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

admise dans le laboratoire par unité de combustible brûlé est supérieure à l'énergie totale contenue dans le même combustible brûlant à l'air froid ; de même les calories sortant du laboratoire ne repré-

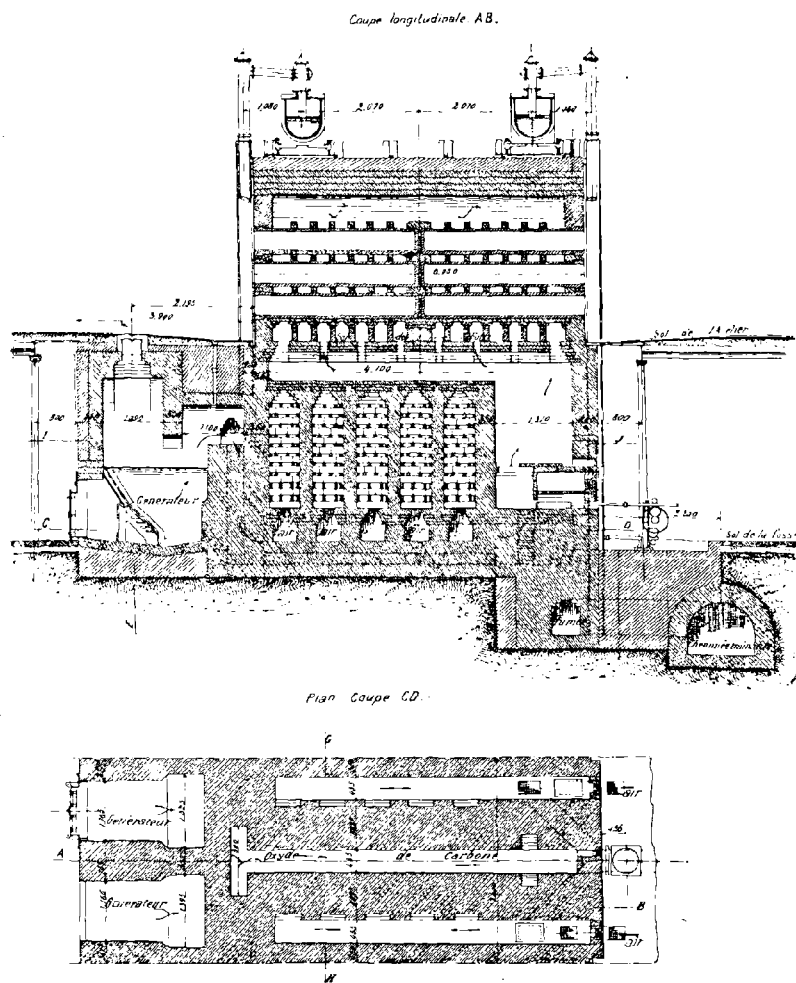


Fig. 26 bis. — Four à cornues système Siemens, à simple récupération, de la C^{ie} Parisienne du gaz.

sent pas des chaleurs perdues, puisque la plupart sont ramenées par récupération. On ne peut calculer le rendement $\frac{U}{Q}$ que par un calcul ramenant les échanges de calories dans le laboratoire au carbone contenu dans le gaz, et par là au pouvoir calorifique disponible : le

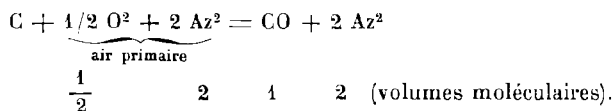
calcul de la chaleur apportée au laboratoire est plutôt une source de confusion et nous trouvons préférable de déterminer d'abord les pertes de chaleur irrécupérables P, et d'en déduire U par différence.

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

a) RÉACTIONS DE COMBUSTION

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

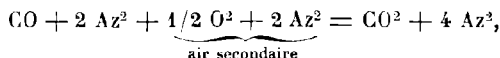
Dans le gazogène on a :



avec dégagement de 29,4 cal.

Par suite de cette chaleur dégagée, si l'air primaire est froid la température du mélange $\text{CO} + 2\text{Az}^2$ est portée à 1 325°, ainsi qu'il est facile de le calculer par la méthode graphique connue (fig. 25). Si l'air primaire est chauffé, il faut, à la chaleur de combustion, ajouter la chaleur sensible contenue dans cet air (10,7 cal. à 600°, 14,5 cal. à 800°, 18,6 cal. à 1 000°), ce qui porte la température du gaz sortant du gazogène, respectivement à 1 700°, 1 850° et 2 000°.

Dans le four, la réaction est :



dégageant 68,2 cal.

La chaleur totale dégagée est toujours 97,6.

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

Premier cas.

RÉCUPÉRATION PAR L'AIR SECONDAIRE SEUL

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

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

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

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

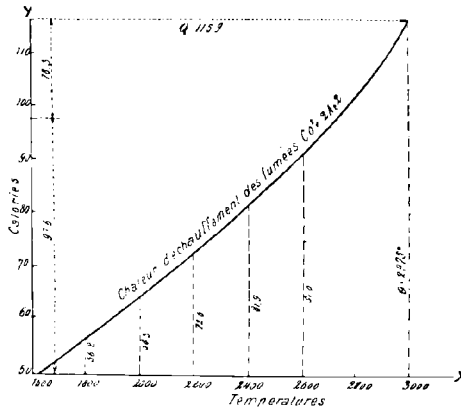


Fig. 27. — Graphique donnant la température de combustion du gaz Siemens dans le cas de simple récupération.

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

Au point de vue théorique, il offre l'intérêt de rentrer plus complètement dans nos hypothèses, puisque le combustible employé est le coke de gaz. La température de régime y est d'environ 1 000°¹.

Le second (fig. 23, p. 162), que nous devons à M. Lencaúchez, donne l'exemple du même mode de récupération dans le cas d'une température plus élevée (environ 1 400°), 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

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

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

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

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

CHALEUR DÉGAGÉE : 97,6 CAL.		1 000°	1 500°	
F	Calories emportées par les produits de combustion à 1 000° et 1 500°.	CO ²	12,4	21,1
		4 Az 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
		2 Az ²	14,8	23,2
	Total	18,5	29,0	
Différence F — R ou perte de chaleur à la cheminée.		23,6	38,5	
Rapport à la chaleur disponible 96,7 ou perte p. 100P.		24,3	39,5	
Chaleur utilisée p. 100 ou rendement maximum U.		75,7	60,5	

Comme dans les fours à chauffage direct, le rendement 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 la méthode graphique un point de combustion voisin de 3 000° (fig. 27). D'où l'on peut conclure que les fours à simple récupération, à gaz à l'air, peuvent donner toutes les températures ordinaires de l'industrie et même qu'entre les limites industrielles, l'utilisation de la chaleur pourra toujours atteindre 50 p. 100.

Aux basses températures, et en particulier dans le cas le plus intéressant de l'industrie du gaz, le rendement atteint le chiffre très satisfaisant de 75 p. 100, ce qui explique comment la Compagnie Parisienne a pu s'en tenir à un système de four où la récupération n'est, sans doute, pas parfaite, mais où l'économie de calories restant à réaliser ne justifie pas la complication et les frais de construction de fours à quatre chambres avec gaz mixte. Nous retrouvons donc, *a priori*, par la théorie, un résultat que l'expérience des usines a déjà démontré.

Deuxième cas.

FOURS A DOUBLE RÉCUPÉRATION PAR L'AIR SECONDAIRE ET LE GAZ

Les fours Siemens primitifs, et en particulier tous les fours Martin-Siemens construits au début, appartiennent à cette catégorie.

Ils sont généralement munis du siphon dont on connaît le rôle, au point de vue du tirage, mais que l'on a blâmé et condamné depuis que l'on a réussi à construire des fours sans cet organe accessoire. La discussion et les calculs qui suivent nous permettront de juger cette question encore controversée et intéressante par suite du grand nombre d'aciéries possédant des gazogènes à siphon¹.

Pour établir le bilan du four à double récupération, nous devons à la récupération par l'air secondaire, ajouter la chaleur absorbée par le gaz. Mais, on sait que, par suite de la chaleur dégagée par la formation de l'oxyde de carbone, ce gaz n'est pas froid, et sort du gazogène à 1325°². Il en résulte qu'au-dessous de cette température, toute récupération par le gaz est impossible, que les fours à quatre chambres sont inutiles, et que le rendement théorique de tels fours est le même que celui des fours à simple récupération. Nous n'avons donc à faire le calcul que pour la température à 1500°, ce qui donne une perte de 33,7 cal. p. 100, correspondant à une amélioration de 5,8 p. 100 par rapport au rendement du four à simple récupération, ainsi qu'il ressort du tableau ci-dessous :

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

CHALEUR DÉGAGÉE : 97,6 CAL. = Q.	1500°	OBSERVATION
F : Chaleur emportée par les fumées . . .	67,5	Le calcul à 1000° est impossible et donne les mêmes résultats que la simple récupération.
R : Calories récu-) pérées)	29,0	
par l'air secondaire de 0° à 1500°		
par le gaz de 1325° à 1500°	5,8	
Total	34,8	
Différence F — R ou perte à la cheminée. .	32,7	
Rapport $\frac{F - R}{Q}$ ou perte p. 100	33,7	
Chaleur utilisée p. 100 ou rendement U . .	66,3	

¹ Voir fig. 23, p. 163.

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

On voit que, malgré l'amélioration de 5,8 p. 100, il reste encore disponible à la cheminée un tiers de la chaleur totale; c'est plus qu'il n'en faut pour porter le gaz de 0° à la température de 1 325° (29,4 cal). Il s'ensuit qu'avec une bonne récupération, on peut, sans perte de chaleur, et en profitant de celle qui reste disponible, ré-

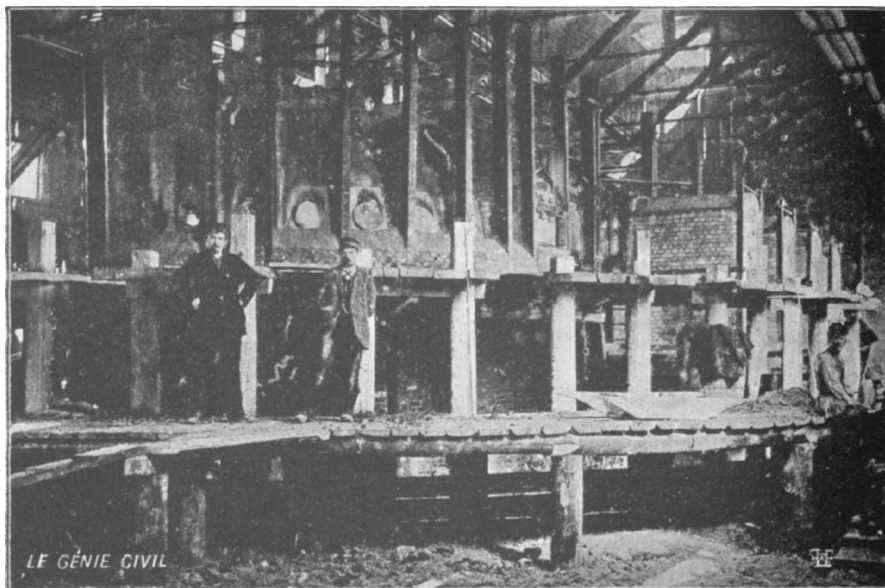


Fig. 28. — Grand tour de verrerie à bassin.

chauffer le gaz si ce gaz a été refroidi par le siphon ou par une canalisation trop longue, avant son entrée dans le four.

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

Le siphon Siemens et les trop longs carneaux ont, sans doute, des inconvénients : ils provoquent le dépôt de goudron et de suie, et peuvent un peu appauvrir le gaz. Mais ce n'est pas dans la perte inutile de la chaleur qu'il faut trouver leur condamnation : à cet égard, ils n'ont rien que de rationnel. Ils ont rendu de grands services au début

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

et peuvent encore en rendre, lorsque, par exemple, on s'interdit l'emploi de l'eau et du gaz mixte et qu'on s'impose le tirage naturel.

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

Troisième cas.

DOUBLE RÉCUPÉRATION PAR L'AIR PRIMAIRE
ET L'AIR SECONDAIRE

La double récupération complète par l'air primaire et par l'air secondaire est impossible dans l'état actuel de l'industrie. La température qui s'établirait dans un gazogène où l'air primaire serait admis à la température même du four serait tellement élevée qu'aucun des gazogènes actuels ne saurait y résister. Nous avons vu qu'elle dépasserait 2 000°.

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

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

En dehors du four Klönne, de Dortmund, qui fonctionne au gaz mixte, et sur lequel nous aurons à revenir, et de quelques tentatives de chauffage de l'air primaire sur des gazogènes Taylor, Lencauchez, Siemens, etc., il n'y a que le four Siemens nouvelle disposition qui réalise un chauffage partiel de l'air primaire. Ce four est très bien disposé à cet effet, car il suffit de le faire marcher à l'inverse du fonctionnement qu'ont indiqué MM. Biedermann et Harvey (en mettant le cendrier en communication avec la chambre où circule l'air et non plus avec la chambre des fumées), pour avoir très simplement le chauffage d'air primaire, que l'on dilue d'une quantité d'air froid

suffisante pour que la température ne s'élève pas au-dessus de 500°. Quelques-uns des nouveaux fours fonctionnent d'après cette méthode : la plupart ont une marche mixte, admettant à la fois fumées, air chaud et air froid sous le cendrier. Dans tous les cas, il est nécessaire d'étudier la double récupération par l'air primaire et l'air secondaire pour en apprécier la valeur (voir p. 197).

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

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

CHALEUR DÉGAGÉE : 97,6 CAL.	1 000°	1 500°
F Calories emportées par les produits de combustion	42,1	67,5
R Calories récupérées par l'air total	37,0	57,8
Différence F — R ou perte à la cheminée. . .	5,1	9,7
Perte p. 100 P.	5,2	10
Rendement, ou chaleur utilisée U.	94,8	90

On voit, à l'examen de ce tableau, que la double récupération par chauffage préalable de l'air total, actuellement inutilisée, ou pratiquée d'une façon rudimentaire dans l'industrie, est cependant d'un grand intérêt. A 1 500°, il reste bien une perte de 10 p. 100, et surtout la question des gazogènes est un obstacle presque insurmontable à l'application de ce système, mais, à 1 000°, l'utilisation de la chaleur peut être considérée comme parfaite, puisque les 6 p. 100 qui restent sont à peu près ce qui est nécessaire au tirage de la cheminée, et d'autre part, la construction de gazogènes admettant l'air à 1 000° ne paraît pas absolument irréalisable⁴.

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

⁴ Le cas de triple récupération par l'air primaire, l'air secondaire et le gaz est impossible dans le cas d'emploi d'air sec : en effet, la température du gaz, lorsque l'air primaire est chauffé, est trop élevée pour permettre aucune récupération.

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

Les avantages de gazogènes à haute température, à air chaud, ont été depuis longtemps pressentis par Ebelmen qui préconisait un gazogène sans grille, à fusion de cendre à vent forcé, comme un cubilot. Cette idée, après être restée longtemps dans l'oubli, a été récemment reprise, et les gazogènes Saillers et Sépulchre dont on verra la description dans la deuxième partie de cet ouvrage (p. 415 et 416), ne sont que des cubilots à vent soufflé, inspirés du gazogène Ebelmen; mais les applications en sont encore peu nombreuses. D'autre part, l'emploi de plus en plus fréquent du tirage forcé par ventilateurs, substitué au tirage par Kœrting, donne au problème du gaz à l'air un nouvel intérêt, et constitue, dans une certaine mesure, un acheminement vers la solution du gazogène à air chaud.

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

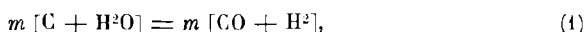
§ 5. — DEUXIÈME GROUPE DE FOURS A GAZ. GAZ A L'EAU, GAZ MIXTE

RÉACTIONS DE COMBUSTION

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

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

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



avec *absorption* de

$$[58,2 - 29,4] m = 28,8 \text{ cal. } m.$$

Le reste du combustible est brûlé par l'air :

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

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

Le mélange de ces deux gaz a la composition :

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

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

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

La proportion m suivant laquelle les réactions de gazéification [1] et [2] interviennent est arbitraire, au moins entre certaines limites, et ne dépend que de la quantité d'eau injectée sous la grille, dont on est maître; suivant que la proportion de gaz à l'eau sera plus ou moins grande, la température du gaz mixte sera plus ou moins basse. Cette température ne peut cependant être abaissée au delà d'une certaine limite, sinon le gazogène s'éteindrait et l'expérience a montré qu'au-dessous de 600° , la combustion du carbone à l'air s'opère mal.

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

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

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

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

$$- 28,8 m + 29,4 (1 - m) \geq C_9^{600} (m [CO + H^2] + (1 - m) [CO + 4 Az^2]).$$

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

Si l'air primaire est chauffé, la chaleur latente contenue dans cet air vient s'ajouter aux 29,4 cal. que produit la combustion du carbone, et la valeur de m est accrue d'autant. Aux températures de 1000° et 1500°, qui nous intéressent, le chauffage de l'air primaire permettrait de gazéifier par la vapeur d'eau 48 p. 100 et 54 p. 100 du combustible en maintenant le gazogène à 600°.

Si de même, on chauffait la vapeur d'eau, on accroîtrait la proportion de gaz à l'eau².

Premier cas.

SIMPLE RÉCUPÉRATION PAR L'AIR SECONDAIRE

Ce cas est réalisé dans les fours de la Compagnie Parisienne du Gaz, les mêmes que nous avons déjà rencontrés avec le gaz à l'air et qui fonctionnent tantôt à l'air avec cendrier ouvert et tirage naturel, tantôt avec eau sous la grille avec cendrier fermé à tirage naturel, tantôt avec injection de vapeur par Kœrting.

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

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

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

$$+ 29,4 - 58,2 + (1 - m) C_0^{900} [1,2 O^* + 2Az^*] = C_0^{900} [CO + mH^* + (1 - m) 2Az^*]$$

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

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

² Dans toute la discussion qui va suivre sur les fours à gaz mixte nous supposerons l'eau introduite sous forme de vapeur, c'est-à-dire que nous négligerons la chaleur latente de vaporisation. Et nous avons signalé, à propos de l'étude des équilibres chimiques dans les gazogènes, l'intérêt que présenterait ce surchauffage préalable de la vapeur admise dans les gazogènes.

Nous donnons ici (fig. 29), à titre d'exemple de four à simple récupération à gaz mixte, un four à laiton de la Société des Métaux avec récupérateurs à courants parallèles en sens inverse. Les gazogènes de ce four donnent un gaz mixte contenant environ 12 p. 100 d'hydrogène. La température de régime y est inférieure à 1 000°.

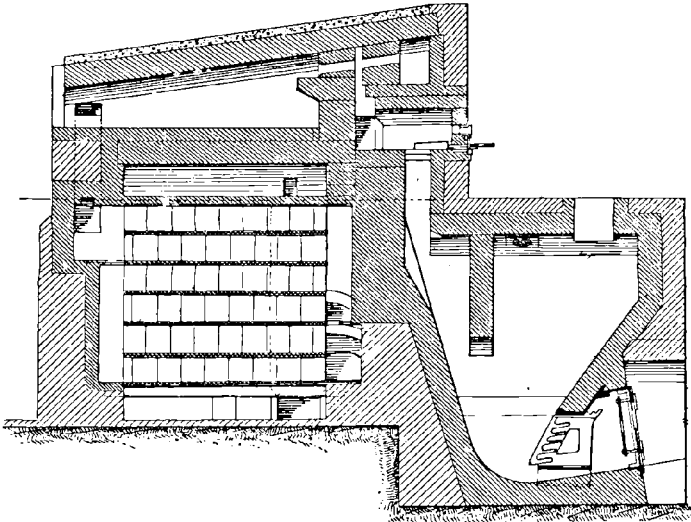
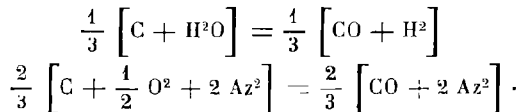
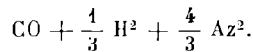


Fig. 29. — Four à cuivre, système Radot-Lencauchez.

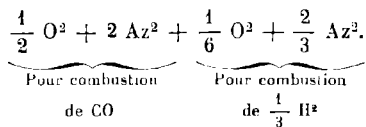
Calculons l'utilisation de la chaleur, en admettant, comme nous sommes en droit de le faire, une production de $\frac{1}{3}$ gaz à l'eau. Les réactions du gazogène sont :



La composition du gaz est :

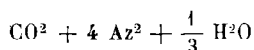


La quantité d'air secondaire nécessaire à sa composition est :



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

La composition des fumées est :



dont la chaleur d'échauffement est plus grande que dans le cas de gaz à l'air, de toute la chaleur d'échauffement de la vapeur d'eau¹.

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

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

CHALEUR DISPONIBLE : 97,6 CAL.	1 000°	1 500°
Calories emportées par les produits de combustion		
$\left. \begin{array}{l} \text{CO}^2 \dots\dots\dots \\ \frac{4}{3} \text{Az}^2 \dots\dots\dots \\ \frac{1}{3} \text{H}^2\text{O} \dots\dots\dots \end{array} \right\}$	12,4 29,7 3,7	21,4 46,0 6,4
F	45,8	73,7
Calories récupérées par l'air secondaire porté de 0 à 1 000 ou 1 500°		
$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2} \text{O}^2 + 2\text{Az}^2 \dots\dots\dots \\ \frac{1}{6} \text{O}^2 + \frac{2}{3} \text{Az}^2 \dots\dots\dots \end{array} \right\}$	18,5 6,1	28,9 9,6
R	24,6	38,5
Chaleur perdue par les fumées (F — R)	21,2	35,2
Perte p. 100 $\frac{F - R}{97,6} = P$	22	36
Chaleur utilisée ou rendement U	78	64,4

Le fait le plus saillant résultant de ce calcul, rapproché du cas correspondant du gaz à l'air, est le peu d'avantage du gaz à l'eau dans les fours à simple récupération²; l'amélioration de récupération, résultant de la plus forte proportion d'air secondaire, est compensée par la perte de calories qu'entraîne la vapeur d'eau dont la chaleur spécifique est très élevée. Ainsi à 1 500° on ne gagne que 3,5 cal. ; à 1 000° 0,8 cal. seulement.

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

Ce dernier chiffre est particulièrement intéressant, car il concerne les fours à cornues à gaz : on peut en déduire qu'il n'y a pas dans ces fours, grand avantage à marcher avec gaz à l'eau plutôt qu'avec gaz à l'air. Nous retrouvons ainsi par la théorie l'explication et la confirmation d'un fait qu'une longue expérience a déjà établi.

On peut enfin conclure, au point de vue pratique que, dans ce cas d'opérations industrielles à 1000° et au-dessous, il est inutile d'employer le gaz mixte et même que cette pratique est souvent nuisible comme grevant le coût de construction des fours et compliquant les gazogènes, sans profit.

Deuxième cas.

DOUBLE RÉCUPÉRATION PAR L'AIR SECONDAIRE ET LE GAZ

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

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

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

Nous donnons, comme exemple de four à double récupération, à gaz mixte, le four de verrerie à bassin de 150 tonnes dont nous avons donné le bilan ; les gazogènes Siemens sont à cendrier noyé d'eau donnant un gaz tenant de 8 à 10 p. 100 d'hydrogène. La température de régime y est de 1450° (voir p. 143).

La gazéification et la récupération par l'air secondaire se font ici de la même façon que dans le cas précédent ; il n'y a donc, pour avoir la valeur de la chaleur utilisée, qu'à ajouter les calories récupérées par le gaz porté de 600° à la température de régime 1000° ou 1500°. Nous avons ainsi immédiatement le tableau suivant :

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

CHALEUR TOTALE DISPONIBLE : 97,6 CAL.	1 000°	1 500°
Calories emportées par les fumées F.	45,8	73,7
— récupérées par l'air secondaire	24,6	38,5
— récupérées par le gaz $\left(\text{CO} + \frac{1}{3}\text{H}^2 + \frac{4}{3}\text{Az}^2\right)$ porté de 600° à 1 000° ou 1 500°	6,3	19,7
Chaleur totale récupérée R.	30,9	58,2
— perdue par les fumées F — R.	14,9	15,5
— perdue p. $100 \frac{F - R}{97,6} = P.$	15,2	15,8
— utilisée ou rendement U	84,8	84,2

L'avantage résultant de l'emploi de gaz mixte est ici évident : dans un four à 1 000° l'économie sera de $84,8 - 73,7 = 9,1$ p. 100; à 1 500° elle atteint $84,3 - 66,3 = 18$ p. 100 et peut réaliser une diminution de près de $\frac{1}{5}$ de la consommation de combustible. Plus la température sera élevée, plus l'économie sera grande.

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

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

La récupération par l'air est accrue de $\frac{1}{3}$ par l'augmentation équivalente de l'air secondaire; la récupération par le gaz est facilitée par l'abaissement de température de ce gaz de 1 350° à 600°, et c'est ce double résultat qui peut faire gagner jusqu'à 23 p. 100 de combustible, sur les calories qui se perdraient à la cheminée.

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

*Troisième cas.*DOUBLE RÉCUPÉRATION PAR L'AIR PRIMAIRE ET L'AIR SECONDAIRE
CHAUFFAGE DE L'AIR TOTAL

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

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

Nous donnons ici (fig. 36) le dessin schématique du four à cornues à gaz système Klönne, d'après le dessin du brevet anglais Henry. On peut y voir que la récupération se fait par le système des courants parallèles en sens inverse, au moyen de deux récupérateurs, l'un pour l'air primaire, l'autre pour l'air secondaire.

Rappelons que, par le fait du chauffage de l'air primaire à 1000° ou 1500°, la proportion de gaz à l'eau peut être portée à 48 p. 100 et 54 p. 100, en maintenant à 600° le gazogène. Le calcul fait d'après ces données, et qu'il est sans intérêt de reproduire ici dans tous ses détails, donne les résultats suivants indiqués dans le tableau ci-après.

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

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

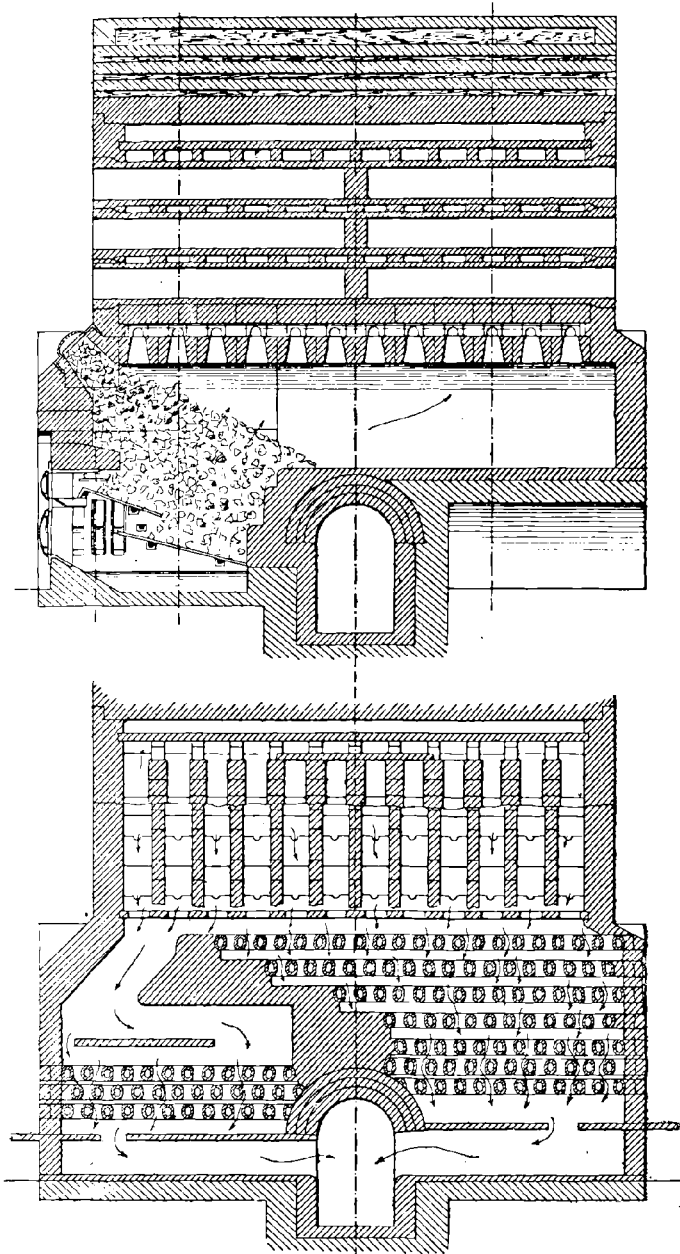


Fig. 30. — Four Klönne.

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

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

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

Il nous semble qu'il y a là, surtout aux températures moyennes, une solution du problème de la récupération qui pourrait être féconde; et elle ne paraît pas irréalisable, puisque, par exemple, il suffirait, dans le four Siemens nouvelle disposition, de remplacer le gazogène Siemens par un gazogène à l'air chaud pour avoir immédiatement un four à double récupération par l'air total¹.

Quatrième cas.

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

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

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

comporterait trois récupérateurs, le troisième recueillant par le chauffage de l'air primaire la chaleur restant disponible dans les fumées à la sortie des deux premières chambres, et que nous avons vu être de 15,2 p. 100 à 1 000° et de 15,8 p. 100 à 1 500°.

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

Pour calculer l'utilisation de la chaleur dans ce four, il faut donc fractionner la récupération en deux étapes: la première entre la température de régime du four et 600°, qui est parfaite, et où la limite de récupération étant dépassée, les gaz récupérants ne pourront atteindre la température des fumées; la seconde entre 600° et 0°, qui sera limitée par la différence des chaleurs d'échauffement des fumées et de l'air, et par conséquent incomplète.

Le tableau suivant (p. 190) résume cette discussion.

Deux résultats remarquables se déduisent immédiatement de l'examen du tableau: le rendement élevé de ce système de triple récupération, et le peu d'influence de la température sur l'utilisation de la chaleur. Les fours construits sur ce type conviennent donc surtout aux très hautes températures, et dans ce cas l'économie résultant de leur emploi pourra atteindre 10 p. 100 du combustible brûlé.

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

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

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

CALORIES DISPONIBLES : 97,6 CAL.	FOUR A 1000° 48 p. 100 de gaz à l'eau 52 — — — à l'air.		FOUR A 1500° 54 p. 100 de gaz à l'eau 46 — — — à l'air.	
	Gaz : CO + 0,48 H ² + 1,04 Az ² Fumées : CO ² + 4 Az ² + 0,43 H ² O		Gaz : CO + 0,54 H ² + 0,92 Az ² Fumées : CO ² + 4 Az ² + 0,54 H ² O	
	RÉCUPÉRATION DE :		RÉCUPÉRATION DE :	
	1000° à 600°	600° à 0°	1500° à 600°	600° à 0°
Calories emportées par les fumées F	15,6	26,5	50,6	26,8
Calories pouvant être récupérées par l'air total	45,3	21,5	36,3	21,5
Calories pouvant être récupérées par le gaz.	7,8	0,0	18,2	0,0
Total	23,4	21,5	54,5	21,5
Excédent de la chaleur d'échauffement des gaz récupérants sur celle des fumées	2,5 ¹	»	4,2 ²	»
Excédent de la chaleur d'échauffement des fumées sur les gaz récupérants, perte F — R.	»	5,1	»	5,4
Perte p. 100 P.	0	5,2	»	5,7
Chaleur utilisée U	94,8		94,3	

¹ La limite de récupération est dépassée de 3,3 cal. entre 1000° et 600°; la récupération est parfaite.

² La limite de récupération étant dépassée entre 1500° et 600°, la récupération est parfaite.

Les fours de verrerie sont l'exemple le plus intéressant de cette

récupération supplémentaire utilisant la chaleur emportée par l'acide carbonique et l'eau des lits de fusion.

Les matières premières composant le verre tiennent jusqu'à 45 p. 100 de matières volatiles, tandis que la houille nécessaire à la fusion n'est pas supérieure, dans certains fours, à 60 p. 100 du poids de verre fondu; les produits volatils dégagés dans les laboratoires ont donc une masse comparable à celle des produits de combustion, et le rapport peut parfois atteindre $\frac{1}{20}$, correspondant à peu près à une perte de calories de $\frac{1}{20}$ de la chaleur totale disponible. Récupérer ces calories perdues est un avantage appréciable qui pourra porter à 15 p. 100 l'économie totale résultant de la triple récupération : on ne saurait donc trop recommander ce système dans les grands fours à bassin de verrerie et nous estimons à environ 1 tonne de houille par jour l'économie réalisable dans un grand four produisant de 15 à 20 tonnes de verre.

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

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

§ 6. — FOUR A RETOUR DE FUMÉES OU FOUR SIEMENS, NOUVELLE DISPOSITION. — ALIMENTATION DES GAZOGÈNES PAR L'ACIDE CARBONIQUE DES FUMÉES

A. RÉACTIONS DE COMBUSTION. — CARACTÈRES GÉNÉRAUX

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

L'idée de renvoyer sous le cendrier une partie des fumées pour les

transformer en gaz combustible n'était pas nouvelle, et nous devons rappeler que M. E. Gobbe avait, avant MM. Biedermann et Harvey, pris un brevet sur la même idée, sans toutefois réussir à faire pénétrer dans l'industrie ce nouveau système ; mais ce n'est que depuis 1890 que l'on est passé de l'idée théorique à une application partielle.

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

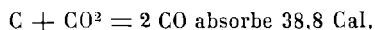
Nous avons donc deux cas à examiner : emploi des fumées, emploi d'acide carbonique pur.

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

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

1° Diminution de l'air primaire et accroissement égal de l'air secondaire ;

2° Abaissement de la température du gaz, par suite de la chaleur nécessaire à sa décomposition.



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

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

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

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

Deux cas restent seuls à examiner, au point de vue d'applications

industrielles possibles : celui qu'ont mis en avant MM. Biedermann et Harvey et celui d'une alimentation par de l'acide carbonique chaud sortant d'un autre four, four à chaux, par exemple.

Premier cas.

ALIMENTATION DES GAZOGÈNES
PAR DE L'ACIDE CARBONIQUE EXEMPT D'AZOTE ET CHAUD

Ce cas ne rentre pas réellement dans l'étude de la récupération, car il comporte un apport de calories étrangères au combustible; nous croyons bon de l'étudier comme étant le seul cas de véritable régénération du carbone.

Supposons donc que l'on dispose, à proximité du gazogène, d'acide carbonique sortant à 1 000° d'un four voisin, et cherchons l'économie qui en peut résulter.

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

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

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

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

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

La composition du gaz sera :

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

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

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

On voit donc que le tiers du combustible sera gazéifié par l'acide carbonique à 1 000°, le reste par l'air. Et pour chaque unité de combustible brûlé dégageant 97,6 cal., l'économie maximum sera du tiers de la chaleur d'échauffement de l'acide carbonique de 1 à 1 000, c'est-à-dire $\frac{12,7}{3}$, ce qui représente une économie de carbone régénéré de 4,3 p. 100.

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

Deuxième cas.

ALIMENTATION DU GAZOGÈNE PAR LES FUMÉES NOUVEAU FOUR SIEMENS

L'alimentation des gazogènes par les fumées sortant du laboratoire peut s'appliquer comme le gaz à l'eau à tous les systèmes de récupération simple, double ou triple. Il y aurait donc théoriquement quatre cas à examiner, mais comme les applications de ce système sont très limitées, que deux d'entre elles (triple récupération et double récupération par l'air et le gaz) n'ont jamais été essayées, que les deux autres, enfin, n'ont jamais reçu que des réalisations partielles, il est sans intérêt de développer tous les calculs d'une discussion dont nous indiquerons seulement les résultats.

Ce qui caractérise l'alimentation par les fumées, c'est que l'acide carbonique y est accompagné d'un volume d'azote qu'on sait invariable dans tous les fours où le combustible est du carbone et où le comburant est l'air, et qui augmente beaucoup la chaleur sensible disponible pour une masse donnée d'acide carbonique envoyé sous la grille. Il en résulte que l'on peut envoyer sous le gazogène, sans le refroidir au-dessous de 600°, un volume d'acide carbonique beaucoup plus grand que s'il s'agissait d'acide carbonique pur ou de vapeur d'eau et que, toutes choses égales, son influence sur la récupération sera d'autant accrue. Il est aisé de calculer, par exemple, que, si les fumées sont à 1 450°, *tout le charbon pourra être gazéifié par l'acide carbonique des fumées*, il n'y aura plus d'air primaire, tout l'air

sera secondaire : à 1 000° on pourra encore envoyer 44 p. 100 d'acide carbonique.

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

CHALEUR DISPONIBLE : Q = 97,6 CAL.	SIMPLE RÉCUPÉRATION par l'air secondaire.		DOUBLE RÉCUPÉRATION par l'air et le gaz.		DOUBLE RÉCUPÉRATION par l'air primaire et secondaire.		TRIPLE RÉCUPÉRATION par l'air total et le gaz.	
	1 000°	1 500°	1 000°	1 500°	1 000°	1 500°	1 000°	1 500°
Calories emportées par les fumées F.	42,1	67,5	42,1	67,5	42,1	67,5	42,1	67,5
Calories récu- pérées par le chauffage. { del'airsec- daire. } { de l'air pri- { maire } { du gaz }	26,5	57,8 ¹	26,5	57,8	37,0	57,8 ²	37,0	57,8 ⁴
	—	—	7,5 ¹	7,3 ¹	—	—	5,1 ³	7,3 ³
Total R.	26,3	57,8	34	65,1	37,9	57,8	42,1	64,5
Différence F — R ou perte.	15,6	19,7	8,1	2,4	5,1	9,7	2,4	2,4
Perte p. 100 $\frac{F-R}{Q} = P$.	16	10	8,5	2,5	5,6	10	2,5	2,5
Chaleur utilisée ou rende- ment U.	84	90	94,5	97,5	94,4	90	97,5	97,5

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

² Air total.

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

⁴ Air total.

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

Le fait le plus important se dégageant de ce tableau est l'excellence des rendements théoriques qui sont presque tous supérieurs

aux cas correspondants du gaz à l'eau et du gaz à l'air. Ce résultat

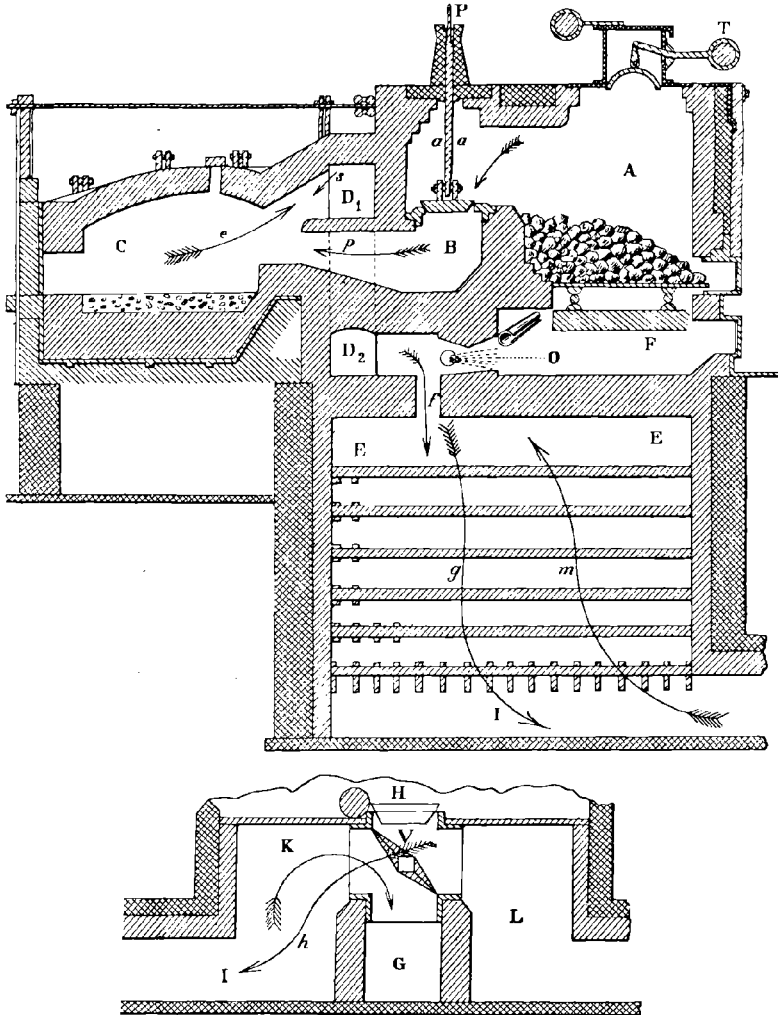


Fig. 31. — Four Siemens nouvelle disposition, coupe schématique.

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

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

plètement, à égalité de volume moléculaire, sur la récupération et que l'emploi de cet auxiliaire ne modifie pas la masse des fumées, n'augmente pas, par conséquent, la quantité de calories inutilement déversées dans l'atmosphère. Mais il ne faut pas perdre de vue que ces résultats sont ici tout à fait théoriques. Les seuls cas réalisés jusqu'à présent, sont la simple récupération et la double récupération par l'air primaire et secondaire, et encore ne le sont-ils que pour une portion de fumées assez faible¹.

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

Prenons, par exemple, le cas d'un four à 1000°. Le chauffage de l'air primaire assure un rendement maximum de 75,7 p. 100 avec gaz à l'air, de 78 avec gaz à l'eau et de 84 p. 100 avec les fumées. Le chauffage de l'air secondaire porte ces divers rendements à 94,8, 89,4 et 94. Le four Biedermann aura un rendement intermédiaire entre ces divers nombres. Remarquons que le plus faible de ces chiffres est celui du four à simple récupération avec gaz à l'air, et que, comme nous l'avons déjà fait observer, ce dernier chiffre de 75 p. 100 est très voisin de celui que donne le four à simple récupération avec gaz à l'eau. On en peut déduire que le nouveau four sera à 1000° un peu plus avantageux que tout autre système de four à simple récupération.

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

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

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

A 1 500°, au contraire, les rendements des fours à simple récupération (60,5 avec gaz à l'air, 64,4 avec gaz à l'eau) que l'injecteur de fumées se propose d'améliorer, et le rendement du four à double récupération à gaz mixte (84,3 p. 100) sont trop considérables pour qu'une application partielle de cette régénération des fumées puisse combler la différence, si parfaits que soient les rendements théoriques du nouveau four. On pourra peut-être atteindre et même dépasser le rendement des premiers fours Siemens à siphon et à gaz à l'air, mais nous ne pensons pas, jusqu'à preuve expérimentale du contraire, qu'on obtienne les résultats des fours Siemens à gaz mixte à double récupération.

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

§ 7. — RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS, CLASSEMENT DES FOURS

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

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

C'est sur de telles bases, et sans revenir ici sur une discussion

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

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

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

1° *Aux températures de 1 500° et au delà*, le meilleur des fours à gaz actuellement en usage (au point de vue de l'utilisation de la chaleur), est le four Siemens à double récupération par l'air et le gaz, sans siphon, avec gaz mixte : son rendement de récupération est de 85 p. 100.

On pourrait gagner encore une quantité de chaleur importante (10 p. 100) en chauffant l'air primaire, puisque la limite d'utilisation dans les fours à triple récupération est de 95 p. 100, et la solution du chauffage de l'air primaire n'est pas ici aussi difficile que dans les fours à simple récupération, puisque, pour gagner ces 10 p. 100, il suffirait de porter à 800° l'air d'alimentation du gazogène et la vapeur d'eau qui y est mélangée. Ce progrès, réalisable par les fours à triple récupération, avec gaz à l'eau, sans siphon, donnerait à 1 500° une utilisation vraiment très parfaite des calories et une solution du problème que l'on pourrait considérer comme définitive¹.

En seconde ligne, et avec une grande infériorité (66 p. 100), viennent les fours à double récupération avec gaz à l'air (four Siemens primitif) ; puis, avec un faible écart (64 p. 100), les fours à simple récupération avec gaz à l'eau ; enfin (60 p. 100) les fours à simple récupération avec gaz à l'air.

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

Le classement serait donc le suivant :

- 1° Fours à triple récupération, à gaz mixte ;
- 2° Fours à gaz mixte, à double récupération pour l'eau et le gaz ;
- 3° Fours à gaz à l'air, — — — —

¹ Rappelons d'ailleurs que le four à triple récupération présente un intérêt spécial dans le cas où, à la masse des fumées, vient s'ajouter une masse gazeuse provenant des matières mises en œuvre dans le laboratoire, ce qui est le cas des fours de verrerie. Nous avons vu que l'économie supplémentaire qui en résulterait peut atteindre de 3 à 4 p. 100 ; on pourrait donc, dans cette industrie, escompter une économie de 10 à 14 p. 100 de combustible. C'est un avantage très appréciable dans une industrie où le chauffage est rigoureusement continu, et où le charbon est un élément important du prix de revient.

3° bis (?) Fours à double récupération par l'air primaire ou à retour de fumées ; Four Siemens nouvelle disposition.

4° Fours à simple récupération à gaz mixte ;

5° Fours à simple récupération à gaz à l'air ;

6° Fours à chauffage direct.

2° *Aux températures moyennes*, 1 000° pour fixer les idées, la tête du classement est encore occupée par le four Siemens à double récupération à gaz mixte, mais il ne semble pas que la double récupération ait un intérêt très grand : l'écart entre le rendement d'un four à une paire de chambres (78 p. 100), et celui du four à double récupération avec gaz à l'eau (88 p. 100), est trop faible pour justifier la complication, le coût élevé d'un appareil récupérateur quadruple, et peut-être pour compenser le rayonnement des chambres de récupération du gaz. C'est donc sur les fours à récupérateur unique que l'attention et la critique doivent se porter.

Actuellement, on se sert surtout de fours à simple récupération par l'air secondaire seul, avec gaz ordinaire à l'air et avec gaz à l'eau. La théorie nous a montré qu'à 1 000° ces systèmes sont équivalents, en sorte qu'il n'y a pas intérêt à marcher avec injection de vapeur, ou simplement à grille noyée, dans ces fours qui intéressent surtout l'industrie du gaz.

Mais il serait avantageux, si l'on ne se heurte pas à des difficultés de construction, de substituer aux fours actuels un système permettant, sans augmenter le nombre des chambres, soit de chauffer l'air primaire, comme dans le four Klönne, soit de renvoyer une partie des fumées sous la grille, soit de faire l'un et l'autre, comme dans le nouveau four Siemens. D'après notre discussion, ces divers progrès tendent à la même limite, une utilisation maximum de 94 p. 100, et leurs effets dans le cas d'applications partielles seraient à peu près les mêmes ; tous sont d'ailleurs limités par la question de conservation de la grille. En supposant que l'on chauffe à 400° seulement l'air primaire, ce qui est actuellement possible, l'économie réalisable serait 6 p. 100 ; elle ne nous paraît pas négligeable pour une industrie aussi continue que celle du gaz d'éclairage, et il y a ici encore une solution intéressante à poursuivre dans la construction des fours.

D'après ces conclusions, le classement des fours à 1 000°, d'un intérêt industriel, serait le suivant :

1° Fours à double récupération par chauffage de l'air primaire ou par retour des fumées ; four Siemens, nouvelle disposition ;

- 2° Fours à simple récupération à gaz à l'eau ;
 3° Fours à simple récupération à gaz à l'air (*presque ex æquo*) ;
 4° Fours à chauffage direct.

Signalons enfin un point qui, plus que tout autre peut-être, mérite examen et étude, dans ces fours à 1 000°, c'est l'adoption du chauffage au gaz à récupération par toutes les industries qui s'en tiennent toujours aux fours à chauffage direct. Il semble que l'économie de 30 p. 100, sur laquelle on pourrait compter, n'est pas négligeable, et l'on a même de la peine à s'expliquer les résistances que ce progrès rencontre auprès de beaucoup d'industries, les hésitations et même les reculs, à moins qu'il ne soit beaucoup plus difficile de trouver un personnel technique connaissant la science de la conduite des fours à gaz qu'un maître fondeur expert dans l'art de chauffer un four à grille. En tout cas, il est hors de doute qu'il y a un sérieux effort à faire de ce côté.

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

En résumé, aux trois grandes étapes de la question : 1 500°, 1 000°, 500°, il reste un pas à franchir pour atteindre une utilisation rationnelle de toutes les calories contenues dans le combustible. Ce progrès, en vérité, n'est pas énorme ; 10 à 15 p. 100 de la chaleur totale disponible, en amélioration du rendement, par rapport aux meilleurs appareils actuels ; mais, dans l'industrie moderne, une telle économie n'est pas négligeable.

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

§ 8. — DISCUSSION DE LA THÉORIE DE LA RÉCUPÉRATION D'APRÈS LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES CONCERNANT LES FOURS. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET CLASSEMENT.

Il résulte de l'étude pratique que nous avons précédemment exposée qu'il peut y avoir entre le rendement théorique d'un four et son rendement industriel un écart assez sensible : ainsi le four à double récupération à gaz mixte qui nous avait donné en théorie une utilisation de la chaleur de 85 p. 100 n'a plus en pratique qu'un rendement de

54 p. 100. Les pertes par rayonnement du gazogène et des chambres de récupération, la combustion anticipée du carbone dans le gazogène, et, en général, toutes les conditions de la pratique en contradiction avec les hypothèses que nous avons dû faire pour notre théorie mathématique ont une influence sensible sur le rendement.

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

Observons d'abord, avant toute discussion de détail, que le tableau que nous avons donné, indiquant les rendements maxima des différents systèmes, tous ces chiffres sont des limites dont les fours tendront à se rapprocher de plus en plus à mesure que progresseront la construction des fours et les solutions du problème d'utilisation de la chaleur. Notre classement est donc un classement limite dont les divers systèmes de fours tendront à se rapprocher de plus en plus, et qui, à supposer qu'il ne soit pas tout à fait exact de nos jours, le deviendra certainement dans l'avenir. De ce fait seul, il nous semblerait présenter de l'intérêt.

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

La première hypothèse ², *gazéification complète du carbone en oxyde de carbone*, est loin d'être réalisée : il y a presque toujours 5 p. 100 d'acide carbonique contre 20 à 22 p. 100 d'oxyde de carbone. Cette combustion anticipée nuit évidemment au rendement en augmentant l'air primaire et élevant la température du gaz, double effet qui tend à nuire à la récupération. Mais si l'on ne tient pas compte du léger accroissement de rayonnement du gazogène résultant de l'élévation

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

² Voir plus haut les hypothèses ayant servi de base à la théorie.

de température du gaz, accroissement tout à fait négligeable puisque le rayonnement total n'est pas supérieur à 10 p. 100, il est facile de voir que cette combustion anticipée ne peut modifier le classement. On peut, en effet, considérer que les fours marchant avec 5 p. 100 d'acide carbonique aux gazogènes fonctionnent pour $\frac{1}{3}$ comme des fours à chauffage direct, et pour $\frac{4}{3}$ suivant les rendements que nous avons calculés : les différences entre les rendements seront donc modifiées proportionnellement dans le rapport de 4 : 5, l'ordre de classement ne sera en rien altéré.

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

Le *refroidissement du gazogène* que nous avons négligé par une troisième hypothèse a une importance plus grande ; nous l'avons trouvé de 7 p. 100, et c'est un minimum, car la température de 800° est exceptionnelle dans le cas de gaz mixte. Mais pour un même mode de gazéification, et si les gazogènes fonctionnent de même, cette perte de chaleur sera une constante qui ne changera pas le classement ; et si l'on passe du gaz à l'air au gaz à l'eau, le refroidissement sera moindre dans le dernier cas que dans le premier, ce sera un avantage à ajouter aux autres, au profit du gaz à l'eau. Cet avantage ne fera qu'accroître les différences indiquées par la théorie, dans le même sens que la récupération et accentuer le classement.

Il reste les deux hypothèses les plus importantes et le plus en contradiction avec la pratique : celle relative au *rayonnement des chambres* de récupération et celle qui suppose *complet l'échange de calories entre les gaz froids et les fumées chaudes*. L'expérience nous a montré que le refroidissement des chambres peut atteindre 20 p. 100 et que l'écart de température entre les gaz brûlés et les gaz combustibles peut être de 300° pour une température de régime de 1500°, qu'enfin malgré cet écart qui réduit de plus de $\frac{1}{3}$ l'effet de la récupération, la chaleur récupérée est encore de 40 à 50 p. 100 ; chiffres qui sont loin d'être négligeables et qu'il importe de discuter. Pour en apprécier l'influence sur les rendements, remarquons que ces deux causes d'erreurs sont l'une et l'autre liées à l'existence de l'appareil de récupération, et si nous montrons qu'elles sont, en outre, fonctions proportionnelles de la récupération même, c'est-à-

dire de la chaleur reprise aux fumées dans le récupérateur, nous aurons, par là, prouvé qu'elles agissent sur les rendements proportionnellement à ces rendements mêmes et ne peuvent modifier le classement.

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

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

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

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

Il nous est permis, après cette discussion, d'affirmer que le classement des fours, basé sur leur rendement calculé, est bien d'accord

avec la réalité industrielle et pourra servir de guide sûr dans les études et constructions de fours.

Sans doute, la pratique industrielle pourra fournir quelques exceptions apparentes à ces lois ; sans doute, un mauvais four à double récupération pourra consommer plus de combustible pour une opération donnée qu'un bon four à simple récupération, mais il est impossible et il n'est pas légitime d'en déduire aucune conclusion concernant la supériorité du second système sur le premier.

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

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

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

Nous croyons donc pouvoir conclure :

1° En affirmant de nouveau la valeur pratique du tableau des rendements sous réserve des interprétations que nous avons données.

2° En signalant une fois de plus les deux résultats qui nous semblent le plus intéressants : — la supériorité actuelle des fours à double récupération à gaz mixte, dans le cas de chauffage à température élevée — l'intérêt que présente le perfectionnement des gazogènes à haute température, qui seuls permettront, quel que soit d'ailleurs le mode de gazéification, d'obtenir avec un récupérateur plus simple des rendements supérieurs aux rendements actuels.

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

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

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

Nous ne saurions trop recommander la pratique de cette science.

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

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

CHAPITRE IV

HOUILLE BLANCHE. — FOURS ÉLECTRIQUES

FOUR ÉLECTRIQUE

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

Après les brevets de fourneaux électriques de Pichon en 1853, puis de Siemens en 1879, on voit éclore rapidement toute une floraison d'inventions, je ne citerai pour mémoire que celles de Clerc en 1880, de Cowles en 1885-86-87, Hérault en 1886, Minet en 1887, Crompton en 1888 et 93, Readmann en 1888, Kiliani en 1889, Wilson en 1890 et 91. En 1892, Moissan entreprend l'étude complète des réactions à haute température puis avec Bullier, de Laval, Girard et Street, le four électrique entre dans la phase industrielle pour revêtir enfin la forme moderne des appareils de Hérault, Girod, Stassano, Gin et Leleux, Keller, Kjellin, Rochling et Rodenhauser.

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

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

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

On peut donc considérer deux grandes catégories de fours élec-

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

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

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

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

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

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

INDUSTRIE ÉLECTROSIDÉRURGIQUE

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

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

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

Voici ce tableau :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ce four a été perfectionné en 1904 : le creuset mobile a été supprimé et on a percé dans la paroi deux trous de coulée, l'un pour le laitier, l'autre pour le métal.

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

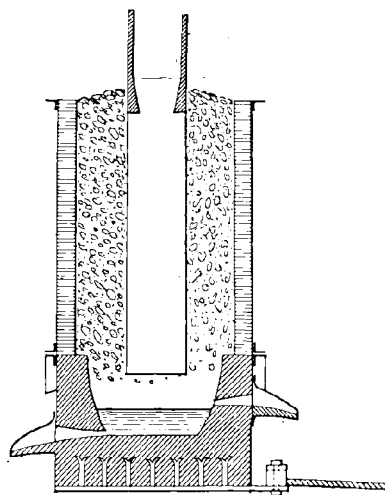


Fig. 32. — Four de Froges.

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

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

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

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

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

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

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

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

Pour que la marche soit continue on met en parallèle plusieurs

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

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

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

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

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

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

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

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

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

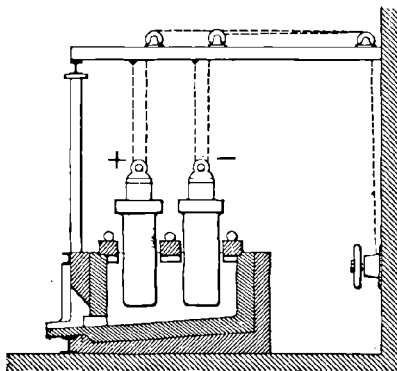


Fig. 33. — Four d'affinage Keller.

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

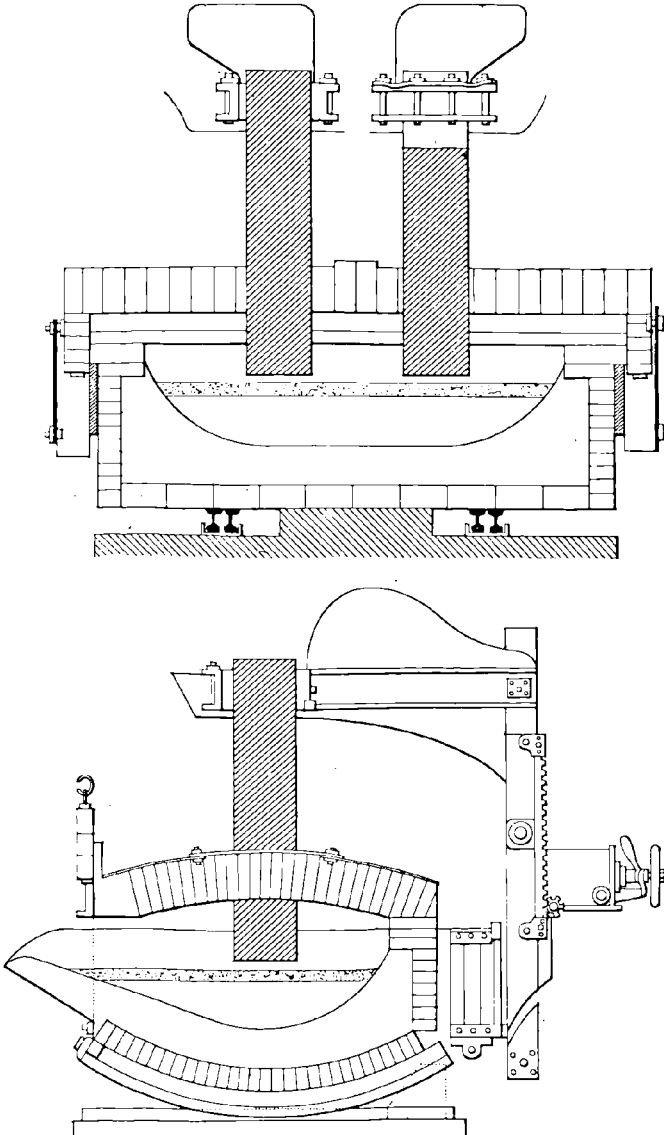


Fig. 34. — Four Héroult.

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

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

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

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

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

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

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

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

A l'usine de la Praz, un four Héroult pouvant donner en une seule coulée 3 000 kilogrammes de métal absorbe en moyenne 4 000 ampères sous 110 volts avec du courant alternatif monophasé à 33 périodes par seconde et le temps d'une coulée est d'environ sept heures, ce qui donne une production d'environ 0,7 kilogramme de métal par HP heure.

Avec un four pouvant contenir 500 kilogrammes on abaisse le nombre de périodes jusqu'à 23 par seconde.

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

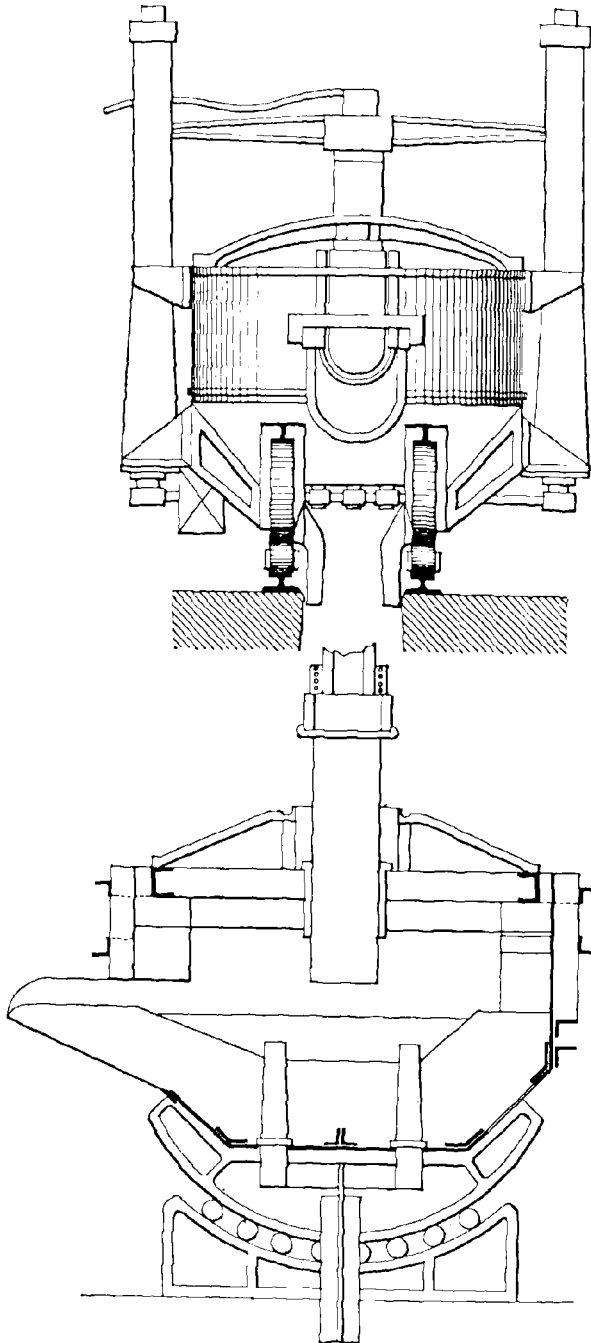


Fig. 35. — Four Girod.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

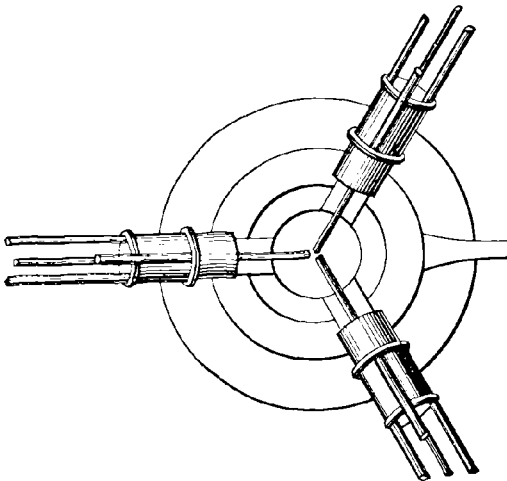
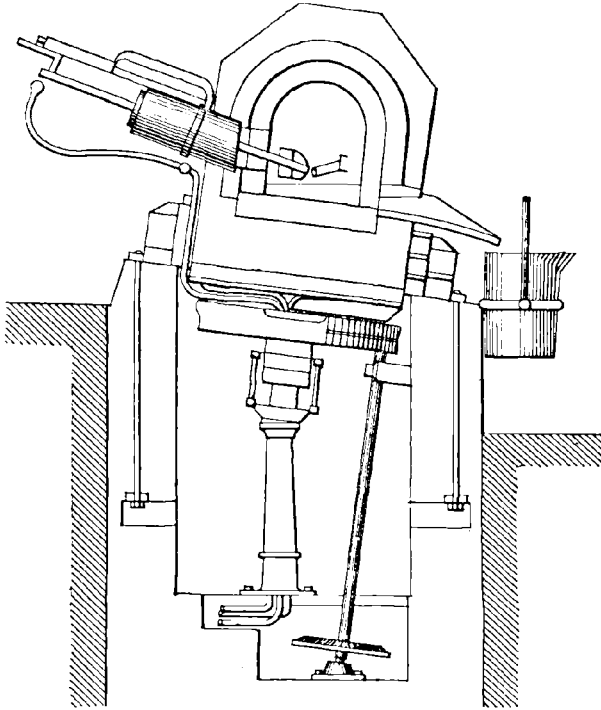


Fig. 36. — Four Stassano.

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

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

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

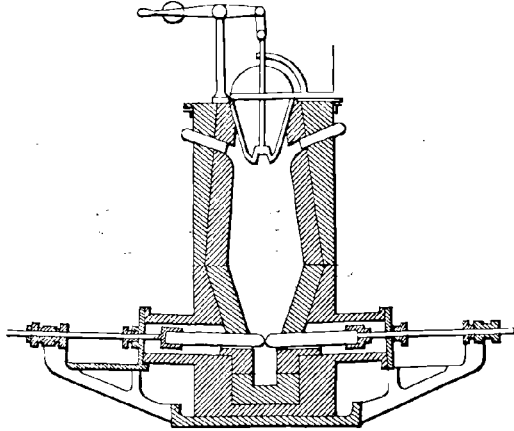


Fig. 37. — Four Stassano.

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

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

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

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

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

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

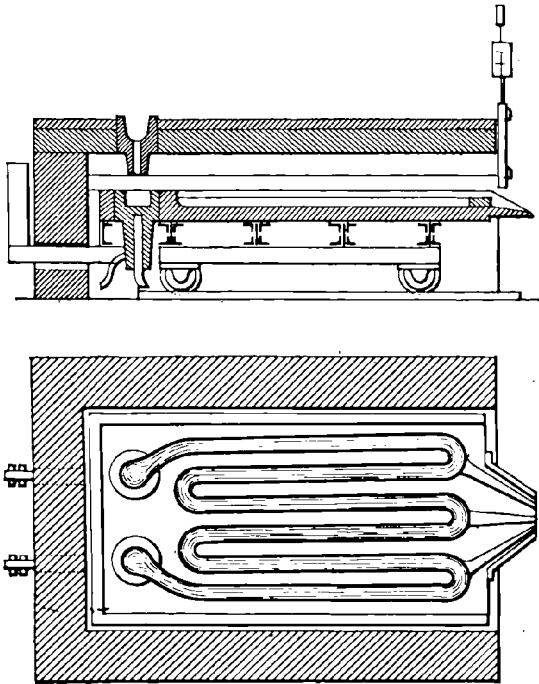


Fig. 38. — Four Gin à canal résistant.

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

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

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

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

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

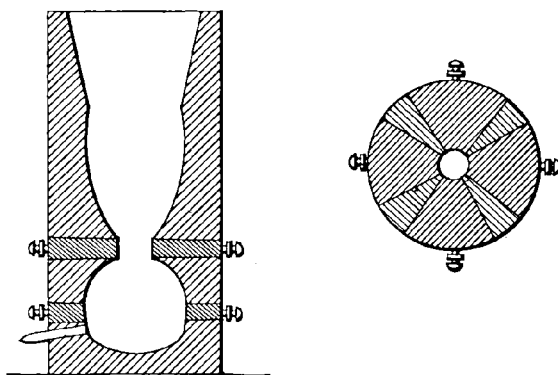


Fig. 39. — Four Conley.

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

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

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

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

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

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

1° Four produisant 100 tonnes d'acier par jour en partant du minerai brut à 65 p. 100.

Dépenses journalières.	}	5 000 HP à 75 francs le cheval an	4 250 francs.
		30 tonnes de coke à 10 francs	300 —
		200 — de minerai à 65 p. 100 à 17,50 la tonne	3 500 —
		Réparations et entretien	250 —
		Main-d'œuvre	625 —
			5 925 francs.

Soit par tonnes d'acier 59,25 fr.

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

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

Soit par tonne d'acier 141 francs.

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

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

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

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

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

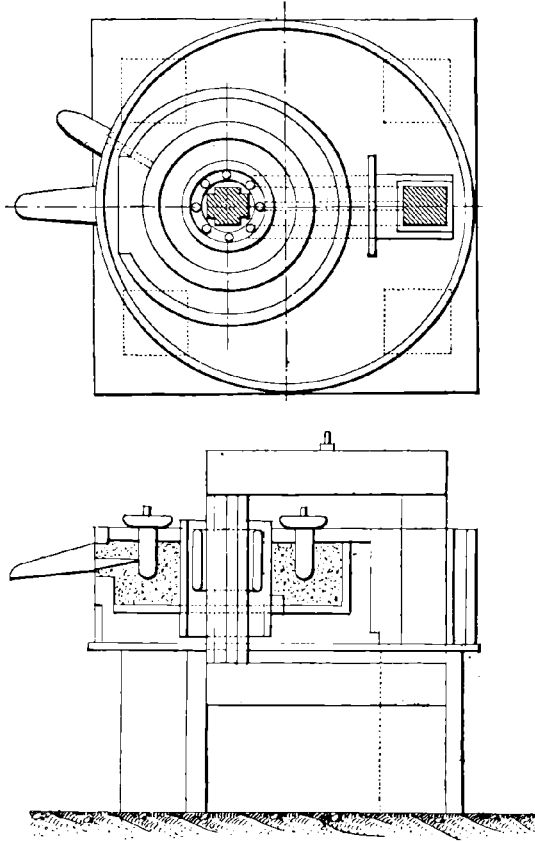


Fig. 40. — Four Kjellin.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

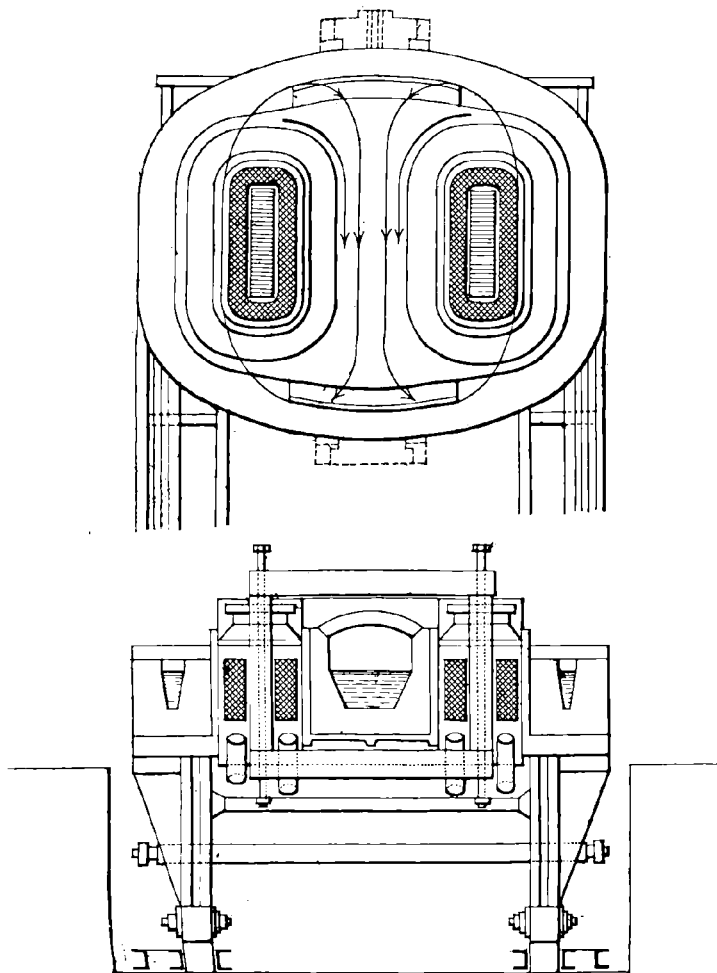


Fig. 41. — Four Rochling pour courants monophasés.

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

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

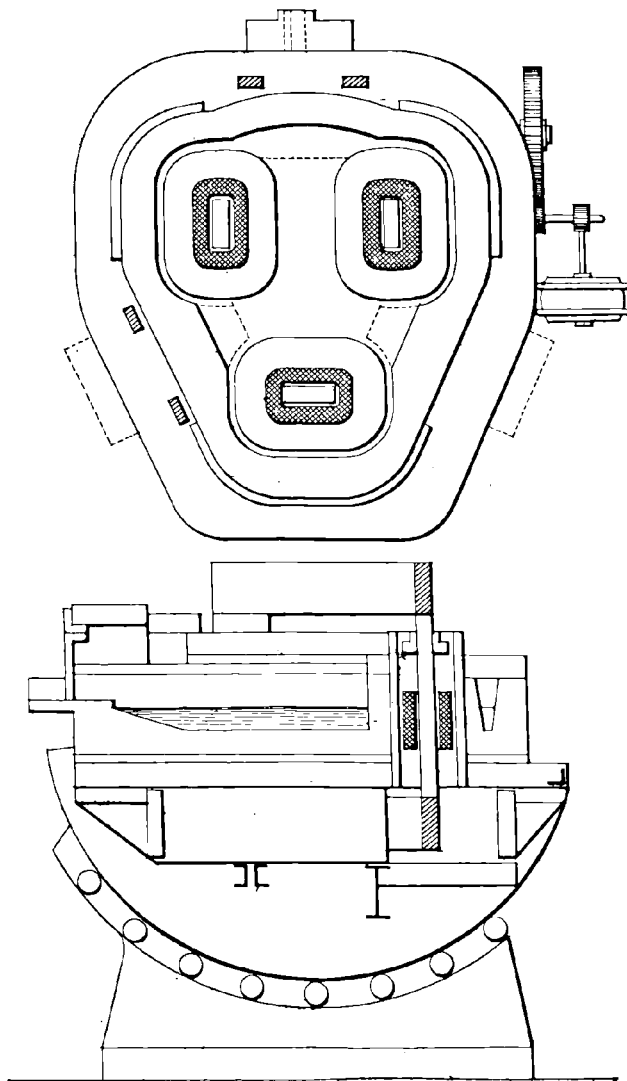


Fig. 42. — Four Rochling pour courants triphasés.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

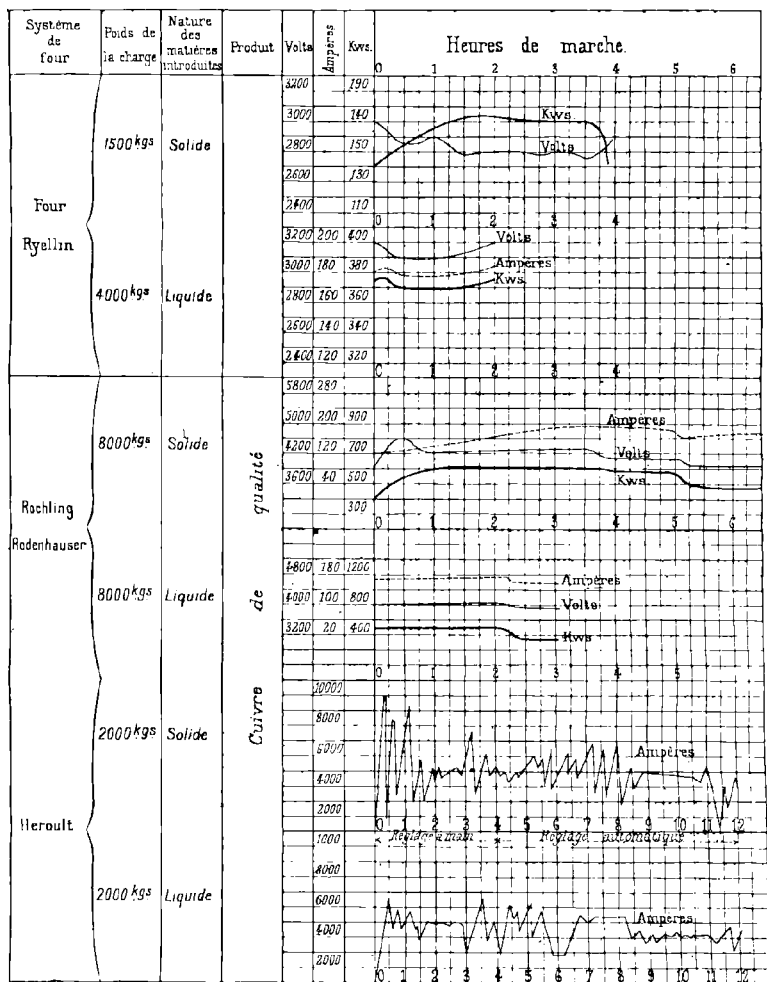


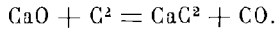
Fig. 43. — Courbes caractéristiques de quelques fours électriques.

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

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

§ 2. — INDUSTRIE DU CARBURE DE CALCIUM

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



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

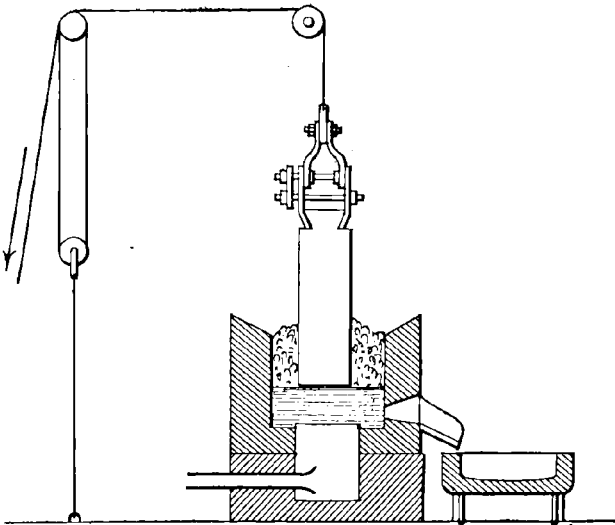


Fig. 44. — Four de la société des carbures métalliques.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

MM. Gin et Leleux avaient observé que fréquemment en raison de la température trop élevée, une partie des corps mis en présence dans les fours à carbure était volatilisée ce qui diminuait dans une notable proportion le rendement de ces fours. En outre, cette haute température était très nuisible aux électrodes qui, s'échauffant jusqu'à la partie supérieure exposée au contact de l'air, s'oxydaient très rapidement.

Ils eurent l'idée de modifier dans leur four l'écoulement des matières pour le faire fonctionner, non plus en four à arc, mais en four direct avec résistance.

L'appareil comporte une sole de forme spéciale portée sur un chariot et formant électrode, l'autre électrode est comme précédemment suspendue à la partie supérieure et mobile.

Cette dernière est construite d'une façon spéciale : elle comprend 4 lames en charbon très conducteur noyées dans un entourage en charbon aggloméré et cuit au moufle. Le courant est amené dans les lames conductrices de façon qu'elles subissent le principal échauffement et on les relie par le haut à des lames conductrices métalliques de grande surface rayonnante qui empêchent leur température de s'élever d'une façon exagérée.

La température de l'aggloméré qui seul est au contact de l'air reste dès lors assez basse pour que l'oxydation ne se produise pas et que la conservation de l'ensemble soit assurée.

La sole comprend 2 couches de charbon très conductrices reliées électriquement et séparées par une paroi aussi réfractaire que possible. La couche inférieure sert à l'amenée du courant.

Le trou de coulée est entouré, lui aussi, de matière conductrice reliée à l'électrode de façon qu'il soit échauffé par le passage du courant et maintienne le carbure en fusion pendant la coulée.

Le rendement de ce four est d'environ 4,5 kg de carbure par kilowatt-jour, il fonctionne normalement avec une intensité de 48 000 ampères sous une tension de 35 volts.

Fours de l'usine de Flums (Suisse). — Il s'est créé en 1901 une importante fabrique de carbure de calcium à Flums, en Suisse, qui utilise 18 fours à fonctionnement intermittent. Ces fours sont alimentés par du courant alternatif monophasé. Chaque arc absorbe de 2 200 à 2 500 ampères sous 65 à 70 volts. L'opération dure deux heures et demie environ et le refroidissement du bloc de car-

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

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

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

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

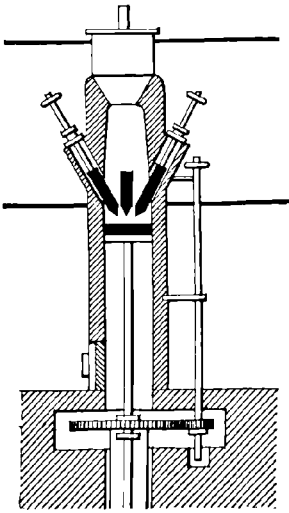


Fig. 45. — Four Memmo de la société Piémontaise de carbure de calcium.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CYANAMIDE CALCIQUE

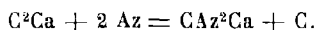
A la production du carbure de calcium on a ajouté dans certaines usines une industrie annexe dont le rôle déjà important est appelé à le devenir encore davantage en raison des services qu'elle peut rendre à l'agriculture, c'est celle de la cyanamide calcique.

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



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

En 1893, MM. Franck et Caro remarquèrent que les carbures alcalino-terreux absorbaient l'azote sous l'influence de la chaleur. De là le procédé qui consiste à soumettre le carbure de calcium, porté à haute température, à un courant d'azote qui donne un mélange de cyanamide calcique et de charbon suivant la formule



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1 tonne de carbure à 80 p. 100.	130 francs.
200 kilogrammes d'azote	20 —
Entretien du matériel	20 —
Broyage et fabrication	25 —
Frais généraux.	10 —
Transport.	20 —
Amortissement et intérêt.	35 —
	280 francs.

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

La tonne de cyanamide commerciale renferme donc environ 600 kilogrammes du corps répondant à la formule CAz^2Ca et le prix du kilogramme d'azote correspondant à un prix de revient de 280 francs pour la tonne de cyanamide ressort à 4,33 fr.

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

	Le kilogramme d'azote.
Salpêtre du Chili à 23 francs les 100 kilogrammes. . .	4,45 fr.
Sulfate d'ammoniaque à 28 francs les 100 kilogrammes. .	1,40 —
Nitrate de chaux de Norvège à 21 fr. les 100 kilogrammes. .	1,60 —

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

§ 3. — ÉLECTROMÉTALLURGIE DE L'ALUMINIUM

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

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

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

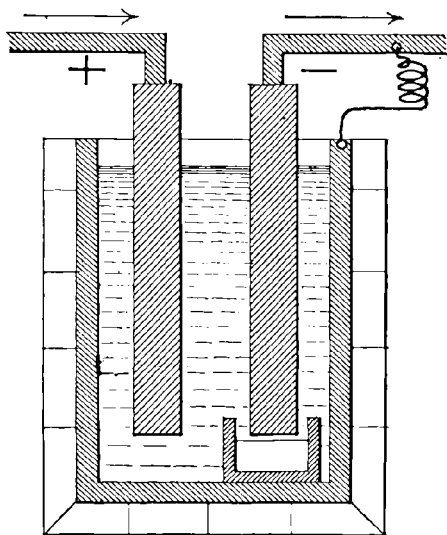


Fig. 46. — Four Minet à deux électrodes et à source de chaleur extérieure.

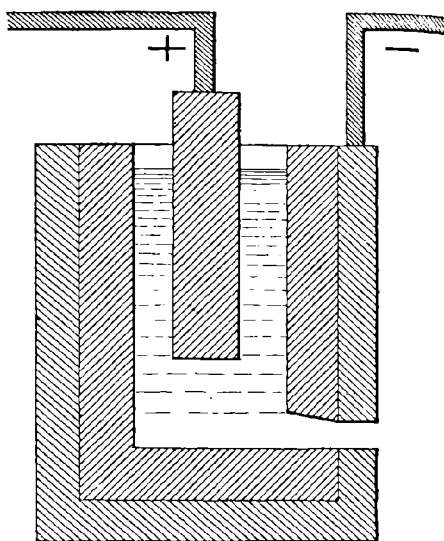


Fig. 47. — Four à une électrode et sans source de chaleur extérieure.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

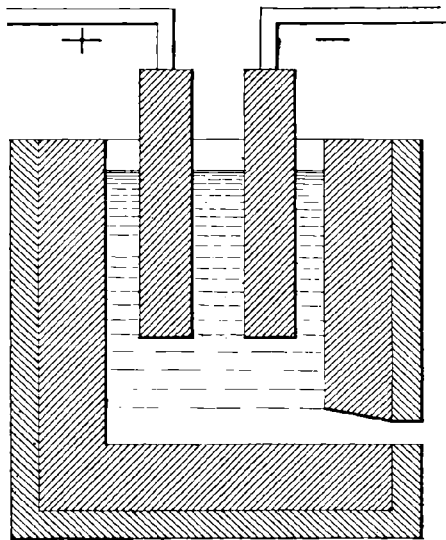


Fig. 48. — Four à deux électrodes et sans source de chaleur extérieure.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

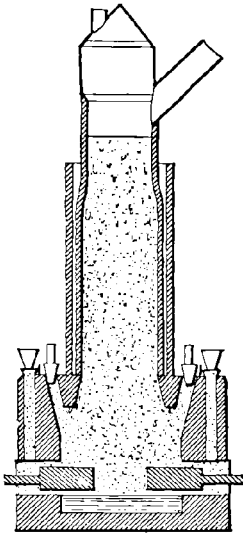


Fig. 49. — Four Taylor pour la fabrication du sulfure de carbone.

§ 4. — INDUSTRIE DU SULFURE DE CARBONE

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

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

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

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

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

Le four absorbe environ 2 000 ampères sous 60 volts et produit une moyenne de 6 000 kilogrammes de sulfure de carbone par vingt-quatre heures.

CHAPITRE V

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

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

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

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

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

§ 1. — GAZOGÈNES

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

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

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

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

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

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

Gazogènes pour moteurs.

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

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

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

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

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

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

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

Gazogènes de fours.

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

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

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

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

— Quels sont les moyens d'enrichir un gaz de gazogène ? Nous les avons précisés dans l'examen fait au chapitre 1^{er} des lois du déplacement de l'équilibre.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

§ 2. — FOURS A COKE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Nous donnons la solution ci-dessus pour l'emploi des escaillages sous toutes réserves ; mais ce qu'il nous est permis d'affirmer après nos études de la combustion de la gadoue¹, c'est que l'emploi des chambres de combustion précédant une chaudière est très avantageux et que c'est en combinant une combustion oxydante avec une combustion franchement réductrice que nous avons pu obtenir des températures de 1100° et 1200° et un rendement des chaudières tout à fait satisfaisant avec un combustible inférieur.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La chaleur sensible apportée par le gaz et l'air à 1 200°, qui donne l'effet exact de la récupération, atteint une valeur importante dans les fours Siemens à quatre chambres, variant de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{5}$ de la quantité totale de calories entrant dans le laboratoire ; et comme l'effet de la récupération varie avec la composition du gaz, avec la proportion d'air primaire et secondaire, généralement avec la façon dont la combustion est conduite, il s'ensuit que l'apport de calories dans le laboratoire n'est absolument pas proportionnel au pouvoir calorifique du gaz brûlé dans un four.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Or il est aisé de comprendre que dans un four à récupération, la température de combustion croît avec la température de régime, d'autant plus rapidement que la récupération est plus parfaite.

Dans un four à gaz riche à double récupération, la récupération peut être *totale*, aucun élément des fumées n'échappe au rôle de récupérateur de la chaleur ; les masses des gaz récupérant et récupérateur sont égales.

Ceci demande quelques explications.

Pour que la récupération complète, c'est-à-dire l'épuisement total des calories contenues dans les fumées soit possible, il faut que la masse calorifique des gaz qu'on chauffe soit égale à celle des fumées qui cèdent leur chaleur. Dans un four à simple récupération, la limite de la récupération à 1 600° est 65 p. 100 parce que la moitié des éléments de la combustion (l'air primaire) échappe à la récupération. Dans les fours à double récupération, le combustible, la houille chargée au gazogène échappe partiellement à la récupération, c'est pour cela que la limite d'utilisation des calories n'est encore que de 85 à 92 p. 100. *Il n'y a que le four à double récupération à gaz riche* qui chauffe tout, combustible et comburant, avant admission dans le laboratoire, et dans lequel les masses calorifiques des gaz chauffé et chauffant passant dans les chambres soient identiquement

¹ Voir note page 254.

égales : la limite théorique d'utilisation des calories y est voisine de $100 p. 100^4$.

Plus la récupération est parfaite, plus l'échauffement des chambres suivra de près l'élévation de température du laboratoire, plus rapidement aussi croîtra la température de combustion.

Donc avec un gaz riche il y aura une seconde cause d'accélération de l'échauffement ou plus exactement de mise en température du laboratoire, une seconde cause d'économie de temps et par suite de calories s'ajoutant à celle déjà citée.

Les chiffres que donneront nos calculs sont donc aussi des minima.

5° Nos calculs sont basés sur une dernière hypothèse, celle de l'atmosphère rigoureusement neutre.

Nous l'avons adoptée, parce que nous savons ce dosage exact de l'air possible dans un four bien conduit.

Mais s'il se rencontre quelque praticien contestant la possibilité d'une semblable marche que peu de fours réalisent en fait, nous ferons observer simplement que le dosage précis d'un gaz riche et froid sous pression de gazomètre est beaucoup plus facile que le réglage d'un gazogène et le maniement du clapet d'admission d'un gaz pauvre plus ou moins chaud et à pression de quelques millimètres d'eau.

Ici encore tout est à l'avantage du gaz riche ; le dosage en étant plus facile, la température de combustion, qui subit les influences du moindre excès d'air dans des proportions généralement insoupçonnées, sera obtenue sans la moindre difficulté et il y aura pratiquement un avantage au point de vue de l'économie de temps et de calories.

Nous négligeons encore cet avantage et faisons seulement état de ce que le calcul nous donnera. Ici encore c'est un minimum que nous indiquerons.

En résumé, toutes nos remarques et hypothèses établissent que les chiffres résultant de nos calculs ne donneront qu'un minimum des économies de calories, c'est-à-dire des avantages résultant de l'emploi du gaz riche dans les fours à acier.

2° Bilan d'un four à acier au gaz pauvre. — Nous prendrons comme composition de gaz pauvre un excellent gaz mixte obtenu dans un

⁴ Cette récupération limite totale, qui implique le chauffage à 1200° de gaz hydrocarbonés, suppose que l'on mêle autant que de besoin de la vapeur d'eau au gaz du four à coke, pour éviter les dépôts de suie.

gazogène Siemens à cendrier noyé avec une bonne houille du Pas-de-Calais à 8 210 calories.

1° *Composition de la houille*

C	H	Az	O	CENDRES	EAU HYG.
82,5	5	1,2	6	4,1	1,2/100.

2° *Composition normale de gaz obtenu au gazogène Siemens*

CO ²	CO	H ²	CH ⁴	Az ²
5	21	13	3	38/100.

Un tel gaz contient nécessairement d'après les lois d'équilibre une petite quantité d'eau, 2,5 p. 100 à ajouter à l'analyse ci-dessus en volumes.

3° *Fumées résultant de la combustion neutre du gaz ci-dessus*

CO ²	H ² O	Az ²	MOLÉCULES
29	21,5	150	/200,5
14,4	10,7	74,9	/100.

Au moyen de ces données, il est facile de calculer la température de combustion par la méthode graphique habituelle, en cherchant l'intersection de la courbe représentant la chaleur totale d'échauffement des fumées avec la droite $y = Q + L$ représentant la chaleur totale sensible et latente apportée dans le laboratoire. On trouve que la température développée dans le four à gaz pauvre est :

Température de combustion **2 350°** (fig. 50).

Le calcul du bilan du four donne les résultats suivants :

La chaleur apportée par 100 volumes moléculaires de gaz, ou 2232 litres, est de **4 823** calories.

La chaleur emportée par la quantité correspondante de fumées, soit 200,5 volumes moléculaires sortant à 1600° du laboratoire, est de **2 983** calories, ou 1 443 pour 100 molécules de fumées.

La chaleur consommée dans le laboratoire ou utilisée est donc :

$$4\ 823 - 2\ 983 = 1\ 840 \text{ calories.}$$

En rapportant ce chiffre au volume unitaire (100 molécules) de fumées, on trouve une utilisation de :

$$\frac{1840}{200,5} = 915 \text{ calories.}$$

Reportons-nous à la composition centésimale des fumées, nous

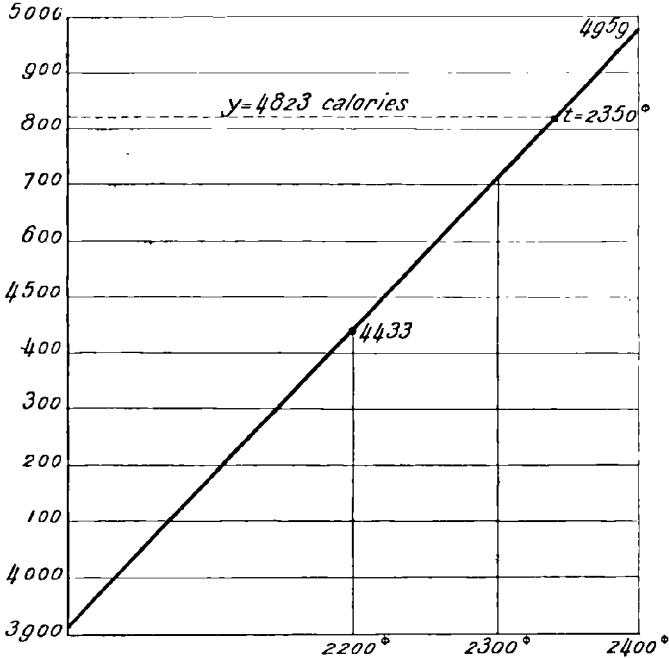


Fig. 50. — Température de combustion de gaz pauvre.

savons qu'elles contiennent 14,4 molécules d'acide carbonique correspondant elles-mêmes à :

$$14,4 \times 12 = 162,8 \text{ gr. de carbone.}$$

Or notre houille contient 825 grammes de carbone pur par kilogramme.

On en déduit par une règle de trois que les 915 calories correspondant à notre volume unitaire de fumées sont fournies par un poids de combustible égal à 196 grammes.

On en déduit encore que pour 1 kilogramme de houille consommée dans le gazogène il sera consommé :

$\frac{915 \times 1000}{196} = 4668$ calories dans le laboratoire, de sorte que le rendement sera : $\frac{4668}{8210} = 59$ p. 100¹.

3° Bilan de la combustion d'un gaz riche². — Nous prenons comme composition de gaz riche un gaz obtenu par Mahler dans le traitement industriel par distillation d'une houille Commentry.

1° La houille avait la composition suivante, en poids :

C	H ²	O	Az	CENDRES	H ² O
75,2	5,2	8,2	0,9	7	3,25/100.

Le pouvoir calorifique observé était de 7423 calories.

2° Le gaz obtenu par la distillation avait la composition suivante, en volumes :

C ² H ⁴	CH ⁴	H ²	CO	CO ²	Az ²
5	33	50	9	2	1/100.

Son pouvoir calorifique calculé au mètre cube était 5712.

3° Les fumées correspondant à un tel gaz dans le cas de combustion neutre ont la composition suivante :

CO ²	H ² O	Az ²
54	126	442 /622
8,6	20,3	71,4/100.

¹ Note concernant la gazéification en gazogène et la combustion incomplète du carbone. — Variante au calcul précédent.

Il est assez rare dans un gazogène Siemens que la gazéification totale du combustible soit obtenue : une partie du carbone échappe à la combustion sous forme d'escarbilles.

Dans le cas du gazogène auquel nous avons emprunté nos chiffres, il y avait 9,7 p. 100 de carbone échappant à la combustion, contre 72,8 réellement gazéifié.

Nous serons donc en droit de ne compter que 72,8 de carbone utile au lieu de 82,5 que nous avons admis, ce qui augmenterait de plus de 10 p. 100 la dépense de houille.

Nous n'avons pas voulu le faire pour rester toujours dans les chiffres minima, les moins favorables au gaz riche, et parce que la gazéification totale est possible dans des gazogènes à cendrier fermés, soufflés à la vapeur.

En tenant compte de cette perte à la gazéification, on trouverait 228 grammes comme poids de houille correspondant au volume unitaire de fumées ; on en déduirait comme nombre de calories consommées dans le laboratoire par kilogramme de houille :

$$\frac{915 \times 1000}{218} = 4013 \text{ calories;}$$

ce qui porterait le rendement à :

$$\frac{4013}{8210} = 48,8,$$

sensiblement inférieur à ce que nous avons obtenu en comptant la gazéification totale.

² Le bilan de combustion du gaz riche a été calculé sans tenir compte de la décompo-

Effectuons d'après ces données les mêmes calculs, et cherchons la température de combustion, les calories apportées et emportées ; puis rapportons ces chiffres au volume unitaire de fumées.

Cherchons d'abord la température de combustion par la méthode graphique connue : on trouve que la température développée avec le gaz riche atteint 2660° , soit près de 300° de plus qu'avec le gaz pauvre (fig. 52).

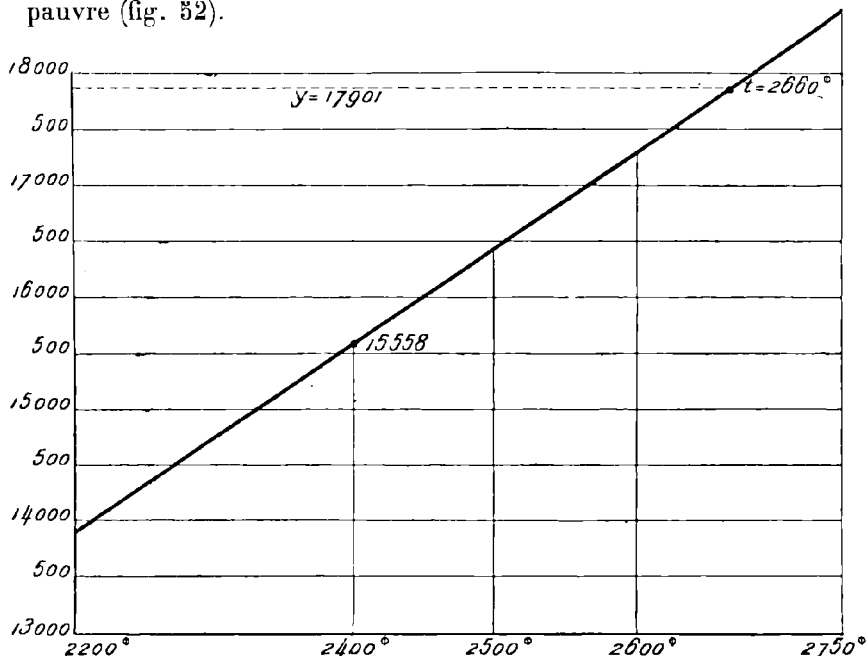


Fig. 51. — Température de combustion du gaz riche.

La chaleur apportée par 100 volumes moléculaires de gaz ou 2 232 L. est de 17 901 calories.

La chaleur emportée par la quantité correspondante de fumées soit 622 molécules est 9 342 calories, ou 1 505 pour 100 molécules de fumées

La chaleur absorbée par le laboratoire ou utilisée est la différence : $17\,901 - 9\,342 = 8\,559$.

sition des hydrocarbures qui serait difficile à éviter si l'on soumet ce gaz à la récupération. Ces carbures disparaîtraient en donnant naissance à un dépôt de noir de fumée.

Mais on sait qu'il est possible de remédier à ce dépôt de noir de fumée par une addition préalable de vapeur d'eau au gaz ; et il y aurait intérêt à le faire pour obtenir le maximum de température.

Notre calcul de température combustion et notre bilan sont donc des maxima mais dont on pourra en pratique se rapprocher de très près.

En rapportant ce chiffre au volume unitaire de fumée (2232 L.) on trouve : $\frac{8559}{622} = 1,376$ Cal.

Si l'on veut enfin rapporter ce chiffre au mètre cube de gaz consommé dans le four, on trouve que la chaleur utilisée dans le laboratoire est de $\frac{8559}{2232} = 3,834$ Cal. par mètre cube, et comme la chaleur de combustion du mètre cube est 5804, on arrive enfin au rendement : $\frac{3834}{5172} = 74,5$ rendement supérieur d'environ 20 p. 100 à celui obtenu par le gaz pauvre.

Résumé et conclusions. — Il convient d'abord de résumer dans un tableau les résultats des deux bilans, en rapportant tous les chiffres à un même volume unitaire de fumées :

Tableau comparatif du chauffage par gazogène et du chauffage au gaz riche.

	GAZ PAUVRE	GAZ RICHE
1° Chaleur utilisée dans le laboratoire pour un même volume de fumées, c'est-à-dire par unité de temps	915 Cal.	1 376 Cal.
2° Température de combustion en atmosphère neutre	2 350°	2 660°
3° Rendement thermique ou chaleur utilisée rapportée à la chaleur totale disponible dans le combustible 48,8 à	59 p. 100	74,5
4° Calories fournies au laboratoire :		
a) Par kilogramme de houille	4 668	
[ou :	4 013	
en se basant sur la gazéification partielle].		
b) Par mètre cube de gaz		3 834

Les chiffres de ce tableau permettent déjà de juger de certains avantages du chauffage au gaz riche, et, en particulier d'apprécier cet énorme écart de la température de combustion qui doit rendre beaucoup plus facile la conduite des fours et le succès des opérations.

A l'examen de ces températures et de l'écart de 300° qui les sépare, on a tout de suite une idée de l'intérêt que peut présenter le chauffage des fours à acier par les gaz de fours à coke. On ne peut s'empêcher de penser ici aux fours américains de Pittsburg alimentés au gaz riche naturel et le prodigieux essor de la métallurgie en Pen-

sylvanie distançant les autres districts, même ceux situés sur les meilleurs gisements de houilles américaines, se trouve ainsi expliqué.

Mais le dernier chiffre du tableau ne permet pas encore de juger de la valeur relative des deux combustibles.

C'est ici, en effet, que la question de durée des opérations intervient.

Si le rapport du nombre des calories apportées par unité de temps varie dans le rapport de 1 360 à 913, inversement la durée de l'opération sera raccourcie dans la proportion de 913 à 1 360, c'est-à-dire que telle opération qui durerait une heure, ne durera que quarante minutes, et qu'une fusion d'acier exigeant six heures au gaz pauvre sera ramenée à quatre heures avec l'emploi du gaz riche¹.

Il est intéressant et nécessaire d'évaluer quelle économie de combustible peut résulter de cet avantage.

L'abrègement de l'opération supprimera pendant le tiers du temps toutes les pertes par rayonnement, c'est-à-dire par le laboratoire, une quantité de chaleur sensiblement égale à celle qui est dépensée, et pour les chambres de récupération une quantité de chaleur que des expériences sur un four Siemens m'ont prouvé être d'environ 15 p. 100; seule la quantité de chaleur emportée par les fumées restera la même puisqu'elle ne dépend que du régime du four et des chambres.

En comptant 60 p. 100 pour la chaleur utilisée dans le laboratoire et 15 p. 100 pour les chambres, on arrive ainsi à une économie de combustible de 75 p. 100 pendant un tiers du temps, soit à peu près 25 p. 100.

De ces raisonnements et données expérimentales, on peut conclure que 3/4 de mètre cube de gaz riche produiront effectivement le même effet que celui que nous avons précédemment calculé pour un mètre cube et l'équivalence entre le gaz riche et la houille pourra s'établir sur la formule suivante :

$$x \times 0,750 \text{ m}^3 = 1 \text{ kilogramme} \times \frac{3\,834}{4\,668}$$

$$x = 1,095.$$

¹ L'abrègement de la durée d'une fusion d'acier dans un four Martin en raison de l'élévation de la température de combustion nous a été pratiquement confirmée par un maître fondeur qui avait conduit deux fours Siemens, l'un à double récupération à quatre chambres, l'autre à simple récupération (four Siemens nouvelle disposition).

Ce maître fondeur nous a déclaré que telle opération qu'il effectuait en quatre heures dans le premier cas lui demandait six heures avec son nouveau four.

Cette donnée expérimentale que nous donnons sous réserves, n'ayant pu la vérifier nous-même, aurait son éloquence car on conçoit l'intérêt que peut avoir une aciérie à faire par exemple six charges au lieu de quatre en vingt-quatre heures dans un même four, en y élevant la température de combustion par l'emploi de gaz riche.

Donc 1 mètre cube de gaz a la même valeur que 1,095 kg. de bonne houille à gaz.

Ce chiffre est un minimum, même au point de vue thermique théorique, et ne tient aucun compte de tous les avantages accessoires que nous avons signalés.

Si l'on voulait traduire ce chiffre par une valeur à attribuer au gaz riche pour une aciérie qui voudrait l'acheter d'une compagnie minière ou de fours à coke, il convient de remarquer que le prix de la houille sur lequel on se baserait devrait être majoré des frais de gazéification qui, suivant les gazogènes et le taux de la main-d'œuvre, varient de 2 francs à 5 francs par tonne de houille passée au gazogène.

Si par exemple, la tonne de houille a une valeur d'achat de 20 francs, elle vaudra 25 francs après sa gazéification en gaz pauvre, et le prix du mètre cube de gaz équivalent à celui de cette houille serait :

$$0,025 \text{ fr.} \times 1,095 = 0,0275 \text{ fr.}$$

Dans le cas plus conforme à la vérité industrielle de gazéification incomplète de la houille, que nous avons établi comme variante de notre calcul avec le gaz pauvre, l'équivalence de la houille à gaz et du gaz riche s'établit par la formule :

$$x \times 0,750 = 1 \text{ kilogramme} \times \frac{3834}{4013}$$

$$x = 1,278.$$

D'où l'on déduit le prix en francs :

$$0,025 \times 1,278 = 0,032 \text{ fr.}$$

Le chiffre 0,0275 est un minimum: la réalité se rapprochera de 0,032.

L'étude qui précède nous semble mettre au point la question du chauffage des fours à aciers par les gaz riches. Elle indique la méthode de calcul qui dans chaque cas particulier permettra de fixer l'économie ou la dépense de la substitution du gaz riche à la houille c'est-à-dire au gaz pauvre.

Remarquons en terminant que le chiffre auquel le calcul nous a conduit, 0,032 pour le mètre cube, est très intéressant, non seulement pour les fours à coke mais même pour les usines à gaz.

Aujourd'hui où les deux industries gazières se rapprochent, où les usines à gaz des villes commencent à vendre du coke métallurgique, tandis que les usines à coke se préoccupent de fabriquer du

gaz de ville, on peut entrevoir le jour où beaucoup de fours à acier s'alimenteront au gaz riche, soit produit par les fours à coke, soit même acheté au compteur à des usines à gaz. Ce serait certainement un progrès en métallurgie pour la précision dans la conduite des fours, un avantage pour la fabrication des aciers.

§ 4. — LA QUESTION DES CHAUDIÈRES A VAPEUR

Le chauffage des chaudières à vapeur, question si importante au point de vue de la bonne marche des Centrales électriques, n'a pas beaucoup plus progressé que la gazéification et la conduite des gazogènes depuis une vingtaine d'années, au point de vue de la combustion. Dans notre étude « Le chauffage industriel et les fours à gaz » publiée il y a quinze ans, nous avons signalé que le principal défaut de marche des meilleures chaudières — et nous avons pris pour exemple des chaudières marines — était le grand excès d'air constaté dans les produits de combustion ; nous disions même, en terminant l'étude des fours à chauffage direct, que c'était du côté de la combustion neutre sans excès d'air qu'il y avait le plus à gagner, et nous avons évalué l'économie possible à 10 ou 20 p. 100 suivant la température relevée dans la boîte à fumées, c'est-à-dire suivant que le feu était plus ou moins poussé.

De nos jours, lorsqu'on interroge un constructeur de l'un des types de chaudières les plus réputées sur la combustion dans le foyer, il est invariablement répondu que la combustion neutre est impossible sur une grille de chaudière et que l'on doit s'estimer heureux quand les fumées contiennent de 10 à 12 p. 100 d'acide carbonique, ce qui correspond, on le sait, à un excès d'air de 100 à 66 p. 100 : le progrès depuis quinze ans est, on le voit, à peu près nul. Seuls les dispositifs des tubes d'eau ont permis d'améliorer la production au mètre carré de surface de chauffe, mais très peu la production par kilogramme de charbon.

Il convient cependant ici de signaler une tentative récemment présentée à l'industrie et qui nous vient des États-Unis, le Tirage équilibré, appareil fort ingénieux qui tend à régulariser la combustion, à éviter les rentrées d'air au moment de l'ouverture des portes et finalement à obtenir une combustion se rapprochant plus de la combustion neutre ($\text{CO}^2 + 4\text{Az}^2$), avec 14 et 15 p. 100 CO^2 .

Nous signalons, en passant, ce Tirage équilibré sans donner la description de cet appareil de réglage, beaucoup plus mécanique que

chimique, parce qu'il est un symptôme de la préoccupation du constructeur d'éviter l'excès d'air si nuisible au rendement maximum d'une chaudière.

La question du rendement maximum des chaudières a pris depuis quelques années une importance beaucoup plus grande dans les Centrales électriques, à cause du travail très irrégulier que l'on demande aux appareils générateurs de vapeur, travail aussi irrégulier que la consommation d'électricité dans les villes, avec des *pointes* de surtravail excessif, suivies de repos presque complet.

La marche des chaudières dans les Centrales électriques est tout à fait différente de celle d'une chaudière ordinaire d'usine, et c'est pour ne s'être pas rendu compte de cette différence et de l'importance de la température de combustion aux heures de pointes que la consommation de houille est si forte et que le prix du kilowatt s'élève tant pendant ces périodes.

Nous nous défendons, ici encore, de vouloir donner une solution universelle d'un problème essentiellement variable suivant les combustibles et suivant les Centrales, nous nous proposons seulement de poser ce problème, de signaler le but et d'indiquer quelques moyens d'y atteindre.

La chaudière de Centrale électrique doit pouvoir passer rapidement d'une production moyenne à une surproduction, et cela sans que la pression de vapeur soit abaissée, car le rendement des turbines s'en trouverait diminué et la consommation s'accroîtrait sans limite jusqu'à chute complète de la pression.

Pour accroître la vaporisation et faire face à cette consommation forcée, le seul moyen est d'augmenter la température de régime des gaz circulant contre les parois de la chaudière ou entre les tubes d'eau. Il y a pour cela deux méthodes : 1° on peut accroître la vitesse de circulation des produits de combustion, c'est-à-dire augmenter le tirage ou la soufflerie du foyer ; c'est la méthode généralement usitée ; 2° on peut accroître la température de combustion.

Or il est aisé de comprendre que la première méthode est anti-économique ; lorsque les gaz de combustion circulent avec une vitesse telle qu'ils n'ont pas le temps de se refroidir et que les surfaces postérieures de la chaudière sont maintenues à une température de régime élevée, 450° ou 500° par exemple, les fumées s'échappent elles-mêmes à cette température et le rendement de combustion s'abaisse, nous l'avons vu, à 75 et même 65 p. 100. Il s'ensuit que c'est aux heures de pointes, aux heures de forte consommation, que

le rendement est le plus mauvais, et que par suite le rendement moyen est souvent très défectueux dans les Centrales, quelque bonnes que soient, en marche normale, les chaudières. De là le haut prix de revient du kilowatt.

Peut-on pour remédier à ce défaut, augmenter par un autre moyen l'échange de calories entre les gaz du foyer et la chaudière? Il suffit pour cela d'accroître la température de ces gaz, ce qui peut s'obtenir soit en neutralisant la combustion, soit en insufflant sous le foyer de l'air chauffé préalablement dans un récupérateur placé en queue de chaudière après le réchauffeur d'eau d'alimentation.

Ces principes ne sont en rien théoriques, et c'est en les appliquant au chauffage d'une chaudière dans un four destructeur de l'usine de la Ville de Paris de Saint-Ouen que nous en avons vérifié l'exactitude et le caractère pratique.

Un four d'incinération d'ordures ménagères est constitué par quatre grilles ou foyers jumeaux, suivies d'une chambre de combustion accolée à une chaudière, et enfin d'un récupérateur à tuyaux de fonte chauffant préalablement l'air de combustion.

Pour obtenir d'un tel appareil, considéré comme une chaudière ordinaire alimentée par un combustible très inférieur, le maximum de vapeur, nous avons opéré de la façon suivante : 1° neutralisation de la combustion en faisant marcher deux des foyers en gazogène et deux autres en combustion oxydante ; 2° chauffage aussi intense que possible de l'air d'alimentation des grilles par le jeu d'un by-pass qui permettait de dévier vers le récupérateur une partie des produits de combustion. Nous avons dit que cette méthode nous avait donné 18 kilogrammes de vapeur par mètre carré avec le plus mauvais des combustibles connu, dans une chaudière à tubes d'eau.

Ce que nous avons pu faire dans un appareil où la production de vapeur n'était que secondaire, rien ne s'oppose à ce qu'on le fasse ou qu'on tente de le faire dans une chaudière alimentée par un combustible quelconque et spécialement étudiée pour la production intensive aux heures de pointes. Rien n'empêche en effet, dans une chambre de combustion suffisamment grande, de neutraliser la combustion et d'obtenir des températures de 1 200 à 1 500°. Rien ne s'oppose non plus, lorsque la circulation plus active expose à ce que les gaz sortent d'une chaudière encore très chauds, à faire de la récupération, et même à consacrer une partie des calories à chauffer l'air, c'est-à-dire à élever la température de combustion.

Ces remarques, ces observations empiriques, et plus encore la

vérité évidente que le moyen le plus efficace d'accroître la production d'une chaudière sans en abaisser le rendement est l'accroissement de la température de régime et par suite de la température de combustion ont conduit les auteurs à généraliser la solution que l'un d'eux avait spécialement étudiée dans un four de la Ville de Paris. De là le dépôt de pli cacheté à l'Académie des sciences dont nous donnons ci-dessous le texte¹.

La surproduction de vapeur par élévation de la température de

¹ Copie du pli cacheté déposé par MM. Emilio Damour et Jean Carnot au secrétariat de l'Académie des Sciences, le 30 octobre 1909. — L'objet de cette invention est l'association de deux foyers ou d'un four et d'un foyer, l'un à combustion oxydante, l'autre à combustion franchement réductrice (gazogène) réunissant leurs gaz ou fumée dans une chambre de seconde combustion commune, pour améliorer le rendement et l'effet utile des deux foyers en vue du chauffage d'une chaudière ou de tout appareil similaire.

La première application que nous comptons en faire est une amélioration des fours d'incinération des ordures ménagères, par l'adjonction aux fours existants qui sont à combustion nettement oxydante d'un gazogène Riché, déjà connu de l'Académie des Sciences ou de tout autre gazogène capable de brûler les ordures ménagères passablement humides.

C'est spécialement en vue de cette application initiale que nous voulons nous garantir, mais notre invention s'applique aussi bien à toute combinaison d'un foyer oxydant et d'un foyer réducteur par exemple un foyer de chaudière à vapeur, un four à puddler, un four de grillage Perret et un gazogène quelconque. Elle a encore pour but de permettre ou de faciliter l'emploi de tous les combustibles inférieurs et à bas prix en choisissant pour chacun d'eux le foyer et le mode de combustion les mieux appropriés, soit oxydants, soit réducteurs et en rectifiant par un second foyer inversement réducteur ou oxydant, la combustion, tant au point de vue de la neutralisation des gaz qu'au point de vue de la température de combustion laquelle se trouvera forcément accrue.

Sous cette forme générale, notre invention peut avoir des applications multiples. Il nous suffira pour préciser nos idées d'en donner deux exemples inverses :

1° Enrichissement en calories des fumées et accroissement de la puissance de vaporisation d'une chaudière à charbon ordinaire par l'envoi à la suite du foyer d'un jet de gaz produits en gazogène par un combustible très inférieur.

Ce cas serait intéressant pour la réalisation des pointes dans les stations électriques.

2° Amélioration de la vaporisation produite par un four destructeur d'ordures ménagères, par l'envoi des gaz d'un gazogène séparé alimenté par un combustible qui pourrait être du coke ou de la houille (ou même de la gadoue).

Citons encore comme pouvant être intéressant un four de grillage système Perret, brûlant de l'escalage de charbon (30 à 40 p. 100-C) et conjugué à un gazogène Siemens pour chauffer une chaudière.

La valeur inventive de notre idée réside principalement dans la double et mutuelle réaction des 2 foyers et dans la réciproque amélioration de marche et de rendement de chacun d'eux.

Le gazogène réagit sur le four ou foyer oxydant par l'intermédiaire de la chambre de seconde combustion parce qu'il élève considérablement la température de combustion : par un dosage méthodique du gaz réducteur (CO, H, Az.) avec les fumées oxydantes du four, on peut arriver à neutraliser la fumée résultante, de façon à ne plus obtenir que (CO², H²O, Az) ou à se rapprocher de cette composition théorique. On sait que l'élévation de température qui en résulte peut atteindre 500° et plus, si le foyer est très oxydant.

Inversement le four ou foyer oxydant réagit sur le gazogène et c'est même ici que se place la partie caractéristique de notre invention. Au lieu de brûler notre gaz réducteur à l'aide d'air chaud ou froid, mais avec de l'air seul, nous en assurons la combus-

combustion s'est encore vérifiée dans la chaudière Normand dont nous avons donné la monographie de même que nous y avons démontré la possibilité de porter à 1 600 et 1 700° les chambres de combustion de chaudières.

Nous indiquons donc ici une méthode générale à laquelle les Centrales doivent se soumettre et que les constructeurs ne doivent pas perdre de vue.

§ 5. — LES GRANDES CENTRALES ÉLECTRIQUES

La question des fours à coke et celle des chaudières nous ont conduit incidemment à aborder l'étude des Centrales électriques établies à côté des houillères, et nous avons indiqué comme nous paraissant la plus rationnelle dans ce cas une solution mixte, comportant d'une part des moteurs à explosion utilisant le gaz pauvre produit dans une batterie de gazogènes, d'autre part des turbines actionnées par des chaudières à foyers spéciaux utilisant les escaillages.

Dans les agglomérations urbaines éloignées des centres miniers et des centres de production de la houille blanche comme la Ville de Paris, la question ne se pose pas de la même manière, car l'écono-

tion par des gaz déjà partiellement brûlés, par les fumées du premier foyer; nous utilisons l'excès d'air contenu dans ces fumées oxydantes sans apport d'air spécial pour la combustion de notre gaz.

Les avantages de ce dispositif nouveau sont multiples :

Le premier est celui qui caractérise la réaction du foyer oxydant sur le gazogène et résulte du fait que la combustion du gaz bénéficie de la température développée dans le premier foyer et s'effectue à une température beaucoup plus élevée que dans les conditions ordinaires : de là amélioration de la combustion qui pourra se faire même dans le cas d'un gaz très pauvre non combustible lui-même à l'air froid.

Le second avantage est l'utilisation de l'excès d'air des fumées du four oxydant et en même temps la récupération indirecte des calories que cet air emporterait finalement de la cheminée s'il n'était neutralisé : il en résulte une amélioration du rendement même du four.

Enfin la température initiale de la chambre de seconde combustion étant donnée par le premier foyer, le gazogène permet, par une admission dosée de gaz, de régler presque à volonté la température de régime jusqu'au maximum donné par la combustion rigoureusement neutre du combustible considéré. Ce dernier avantage est appréciable dans les chaudières à débits très variables, *telles que celles des Centrales électriques.*

En résumé, nous revendiquons comme notre invention le dispositif d'accouplement d'un foyer oxydant et d'un foyer réducteur que nous considérons comme une solution absolument générale du problème de la combustion des combustibles *inférieurs de toute nature*, avec réaction mutuelle de ces deux organes dans une chambre que nous appelons « chambre de seconde combustion » ou « chambre de combustion neutre », et nous revendiquons comme idée secondaire celle de la combustion d'un gaz (CO, H, Az) exclusivement à l'aide de fumées déjà partiellement brûlées et chaudes en n'utilisant que l'air en excès résultant d'une première combustion.

mie des transports oblige à n'employer que des combustibles riches, dans ces immenses Centrales atteignant une puissance de 80 000 à 120 000 kilowatts comme celle que projette la Société d'Electricité de Paris.

Quelle doit être dans ces Centrales urbaines la solution préférable et la plus économique ? Doit-on adopter le gaz pauvre et le moteur à explosion ou faut-il s'en tenir à la vapeur avec les avantages que la turbine et la surchauffe de vapeur lui ont récemment reconquis ?

Si l'on s'en tenait à l'expérience faite récemment à Madrid et aux difficultés énormes qui ont marqué cette entreprise, il semblerait que la question ne se pose presque plus et que la lutte entre le gaz et la vapeur doive se terminer à l'avantage de la dernière.

Mais nous avons dit que le gazogène était loin d'avoir atteint la perfection de sa marche et démontré que la gazéification des charbons courants, gras et demi-gras pour usage de moteurs était un problème d'une solution certaine, prochaine peut-être.

Dans ces conditions, plus que jamais nous devons nous demander quelle est la solution de l'avenir ; la question est d'assez d'importance pour que nous cherchions à tirer de notre théorie de la combustion quelques indications précises.

Si nous nous reportons à quelques années en arrière, à l'époque des premières applications des gaz pauvres des hauts fourneaux dans les grands moteurs à explosion, il semblait alors que le moteur à gaz prenait définitivement l'avance sur la vapeur pour la fabrication de l'énergie. Mais, depuis cette époque est venue la découverte de la turbine et surtout de la turbine différentielle qui réalisa sur les meilleures machines alternatives une économie de vapeur de près d'un tiers ; plus récemment l'idée de la surchauffe de la vapeur a permis de réaliser un supplément d'économie d'environ 10 p. 100.

La vapeur reprit alors tous ses avantages et la turbine, avec ses avantages de continuité et de faible encombrement, retient actuellement la faveur des constructeurs des centrales électriques.

Donnons à cet égard quelques chiffres. Nous avons vu qu'une très bonne turbine arrive à produire le kilowatt avec 6 kilos de vapeur surchauffée, qu'une très bonne chaudière fournit de la vapeur à raison de 10 kilos par kilogramme de houille brûlée sur la grille.

Nous avons montré, d'autre part, que ces chiffres d'expérience, actuelle correspondent à une utilisation effective de 17 p. 100.

Dans les grands moteurs à explosion alimentés au gaz pauvre on admet actuellement que le rendement en énergie électrique peut

atteindre de 30 à 35 p. 100, l'excédent des calories se répartissant à peu près par moitié entre les produits brûlés de l'explosion et l'eau de refroidissement du moteur.

Il semblerait déjà par ces chiffres que l'avantage se dessine en faveur du gaz.

Examinons aussi les économies qui resteraient à réaliser de part et d'autre.

Dans le domaine de la vapeur, nous ne voyons plus guère d'économie réalisable que celle signalée dans les chaudières par la combustion neutre remplaçant très facilement la combustion très oxydante à 50 p. 100 d'excès d'air actuellement pratiquée partout. Cette économie s'appliquerait aux heures de pointes, mais en marche normale elle ne dépasserait pas de 5 à 10 p. 100.

Dans le domaine des moteurs à gaz, la même économie ou du moins la même amélioration de marche pourrait être obtenue, car nous avons pu constater par des analyses de fumée d'échappement combien rare est le dosage exact de l'air de combustion dans un cylindre de moteur à gaz ; mais en outre il n'est pas interdit d'entrevoir d'autres moyens d'augmenter le rendement par l'utilisation des calories perdues soit dans les fumées, soit dans l'eau de refroidissement.

Depuis que la turbine à basse pression existe, depuis que les découvertes de Rateau ont permis d'utiliser même les vapeurs d'échappement des moteurs sans condensation ; depuis, en un mot, que l'énergie calorifique à très faible potentiel est devenue utilisable, il n'est pas impossible de récupérer les calories contenues soit dans de l'eau à 80 et 90° soit dans des fumées à 200-250°.

Nous n'insistons pas davantage sur ce problème et nous nous défendons absolument de vouloir donner à ce sujet autre chose que de simples indications.

Nous ne voulons pas davantage pronostiquer de l'avenir et affirmer que la lutte entre le gaz et la vapeur se terminera à l'avantage du gazogène.

Nous pensons même que la meilleure solution doit être éclectique ; que le moteur à explosion sera plus économique et s'imposera pour la production de la constante de consommation diurne et nocturne dans les Centrales ; mais que pour les pointes la chaudière et le moteur à vapeur reprendront peut-être l'avantage en raison de leur capacité de surproduction et de leur souplesse.

Nous n'avons pas pu passer sous silence la grosse question des

centrales électriques dans une étude des sources de l'énergie calorifique, pour les deux raisons suivantes :

Si le rendement de transformation d'énergie calorifique en kilowatt gagnait quelques unités et arrivait par exemple à 50 p. 100, par suite de l'économie considérable que présente le four électrique par rapport aux fours à chauffage direct au point de vue du rayonnement et des facilités de traitement, on peut prévoir le jour où les Centrales électriques deviendraient de véritables sources de calories utilisables pour le chauffage même dans les grandes villes éloignées des mines et des chutes d'eau : Le kilowatt électrique deviendrait partout une importante source de calories.

En second lieu nous remarquerons en terminant que ce progrès des centrales électriques et l'abaissement du prix de revient du kilowatt qui en serait la conséquence sont liés étroitement à la question des gazogènes dont nous avons signalé tous les défauts actuels. Nous avons indiqué en même temps en nous basant sur les données précises de la thermodynamique les remèdes à apporter et le sens des progrès à étudier pour produire le bon gaz avec un combustible quelconque.

C'est là, nous le croyons, la preuve la plus éclatante des services que peut rendre à l'industrie une science toute mathématique et abstraite ; c'est la raison d'être de notre livre.

Tableau des pouvoirs calorifiques rectifiés à pression constante. Eau vaporisée.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES	ANALYSE ÉLÉMENTAIRE					Pouvoir calorifique observé	Correction pour pression constante	Correction pour vapeur d'eau	Pouvoir calorifique vrai.		
	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Eau hygrosco- pique.	Cendres.						
Anthracites et Houilles anthracif. Houilles anthraciteuses de Blanzy, Puits Sainte-Barbe, 1 ^{re} couche. Houille anthraciteuse Grand-Combe, couche Champelaison, Puits Petassas. Houille anthraciteuse du Creusot.	Anthracite de Pensylvanie	4,395	2,199	3,450	5,900	7 484	5,4	406,8	7 383		
	Anthracite de la Mare (Grande couche)	4,367	2,969	4,700	4,400	7 468	3,7	73,5	7 398		
	Anthracite de Hay-Duong (Tonkin)	2,000	4,626	3,260	4,000	7 533	5,4	107,3	7 431		
	Houille anthraciteuse de Kébao (galerie U)	85,746	2,733	2,800	3,450	7 858	7,4	146,5	7 719		
	Houille anthraciteuse de Commentry	84,928	2,892	4,775	5,400	7 850	7,8	455,0	7 706		
	Houille anthraciteuse de Blanzy, Puits Sainte-Barbe, 1 ^{re} couche.	82,746	2,916	4,760	6,300	7 773	7,8	156,1	7 625		
	Houille anthraciteuse Grand-Combe, couche Champelaison, Puits Petassas	84,068	3,631	4,220	0,831	7,250	7 850	9,8	194,7	7 655	
	Houille anthraciteuse du Creusot.	89,386	3,661	3,703	1,800	1,450	8 404	9,9	196,3	8 318	
	Houilles grasses et demi-grasses à coques.	Demi-grasse d'Anzin, Fosse Saint-Marc, 4 ^e veine du Nord	88,473	4,139	4,338	1,350	1,700	8 392	11,2	222,1	8 181
		Demi-grasse de la Grand-Combe, couche du Puits Saint-Jean	87,464	4,263	4,161	0,610	3,800	8 374	11,5	228,6	8 154
Demi-grasse de la Roche-la-Molière		85,691	4,167	5,242	-0,900	4,000	8 417	11,3	223,7	8 205	
Demi-grasse d'Aniche, veine Ferdinand, F. l'Archevêque		5,934	4,198	5,240	0,625	4,000	8 426	11,3	225,4	8 212	
Grasse d'Anzin, grande veine, Fosse Enclos		83,754	4,383	5,761	1,100	5,000	8 051	11,8	235,0	8 828	
Grasse Ronchamp, Puits Magny, 2 ^e couche		79,200	4,314	5,589	1,200	9,700	7 839	11,6	234,2	7 609	
Grasse de Lens, fosse n ^o 8, veine de 1 ^{re} 90.		87,736	4,678	5,036	1,000	1,550	8 614	12,6	251,0	8 376	
Grasse de Carmaux		85,200	4,724	7,076	1,500	1,500	8 380	12,7	253,2	8 139	
Grasse maréchal de Roche-la-Molière		85,636	4,628	5,386	1,350	3,000	8 482	12,8	248,4	8 246	
Grasse des Houillères de Saint-Btienne, 8 ^e couche, Treuil		84,516	4,712	5,432	1,250	4,000	8 392	12,9	255,9	8 049	
Grasse des Mines de Portes (Gard)	78,240	4,370	7,700	0,780	8,910	8 616	11,8	234,5	8 393		
Houilles grasses à gaz.	De Béthune (gazogène de la verrerie Follembroy).	82,418	5,089	7,193	1,200	4,100	7 270	13,7	273,1	6 951	
	De Lens (veine Dusouch, fosse n ^o 5)	83,727	5,216	7,007	1,050	3,000	8 395	14,1	280,4	8 129	
	De Firminy	81,273	5,309	8,593	4,225	3,600	8 161	14,3	284,8	7 890	
	De Montrambert, grande couche, étage 356 mètres.	80,182	5,330	9,553	0,844	3,000	8 268	14,4	285,9	7 996	
	De Commentry	80,182	5,243	8,173	3,000	3,400	7 870	14,1	281,1	7 693	
	Cannel de Wigan (Lancashire). Col. de l'École des Mines)	78,382	5,060	5,058	0,600	10,000	7 761	13,7	271,6	7 593	
	Cannel-Coal Niddrie	76,345	6,003	8,800	3,950	4,700	7 703	16,2	321,9	7 397	

Houilles lignieuses (Hambanais)	De Montvic	76,310	5,122	9,468	4,300	4,800	7 790	43,8	274,6	7,439
	De Blancy (puits Sainte-Marie, 3 ^e couche, 354 mètres).	79,378	1,967	9,855	3,900	4,900	7 866	5,3	405,7	7,706
	De Blancy (puits Sainte-Eugénie, 1 ^{re} couche, étage 380 mètres).	73,273	5,144	40,083	4,700	7,800	7 486	43,9	275,7	7,224
	De Decazeville (Bourran)	74,727	4,756	41,756	3,500	4,850	7 408	14,0	277,4	7,145
Lignites	De Decazeville (Tramont).	75,273	5,425	14,922	4,580	2,800	7 494	44,6	290,8	7,218
	De la Terre-de-Feu.	43,459	3,862	44,979	16,500	18,500	4 885	40,4	207,4	4,688
Tourbe	De Trifait (Styrie). (Col. de l'Ecole des Mines).	69,435	4,782	24,303	0,710	4,750	6 284	12,9	256,4	6,040
	De Vaugirard	59,795	4,512	23,799	3,144	6,750	5 536	12,2	244,9	5,506
Bois.	De Bohème.	53,483	5,542	34,230	6,125	0,950	5 489	14,9	297,2	5,207
	Bois de sapin de Norvège partiellement desséché.	47,366	5,581	39,780	6,940	0,333	4 477	15,1	209,4	4,193
Cokes.	Bois de chêne de Lorraine partiellement desséché.	46,568	5,427	40,335	6,920	0,750	4 359	14,7	204,3	4,032
	Céllulose C ⁴ H ¹⁰ O ¹⁰	44,440	6,170	49,390	»	»	4 200	16,7	331,0	4,886
Houille oxydée	Métallurgique de la Grand-Combe	89,273	0,212	2,215	0,500	7,800	7 040	0,5	40,7	7,000
	De houille de Commentry, préparé à l'Ecole des Mines	92,727	0,444	2,629	»	4,200	7 665	1,2	23,6	7,642
Coke de pétrole d'Amérique (Pour mémoire).	De houille demi-grasse d'Anzin, préparé à l'Ecole des Mines	94,582	0,633	1,585	»	3,200	7 787	1,7	34,7	7,734
	D'antrace de Pensylvanie, préparé à l'Ecole des Mines	91,036	0,685	2,146	0,233	5,900	7 528	1,8	36,4	7,493
Huile lourde de pétrole d'Amérique	à chaud de Commentry.	70,036	3,314	23,053	3,600	3,600	6 155	8,9	177,2	5,987
	à froid de Blancy, 1 ^{er} échantillon	72,436	4,314	15,020	3,600	4,600	7 419	11,6	231,2	6,899
Huile raffinée d'Amérique	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	72,546	5,032	13,722	3,500	5,200	7 169	13,6	209,8	6,913
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	97,855	0,489	1,222	»	0,20	8 057	1,3	26,3	8,032
Essence de pétrole d'Amérique	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	85,894	13,107	»	»	»	10 913	35,4	703,4	10,245
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	85,491	14,216	0,293	»	»	11 047	38,4	762,9	10,322
Pétrole brut d'Amérique	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	80,583	15,101	4,316	»	»	11 086	40,8	810,1	10,317
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	83,042	13,886	3,099	»	»	11 094	37,5	745,2	10,386
Huile lourde de Bakou (Russie)	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	87,700	12,944	3,099	»	0,95	10 805	34,9	694,2	10,446
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	84,906	11,636	3,458	»	0,35	10 323	31,4	624,5	9,735
Naphtho-schiste de la Nouvelle-Galles	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	74,574	10,576	3,913	»	10,937	9 246	28,6	567,2	8,707
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	83,510	14,440	0,100	»	1,95	10 946	39,0	774,7	10,210
Goudron du collecteur, condensé à 70° C.	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	75,482	5,476	8,296	7,05	7 423,30	7 423,30	13,9	277,4	7,149
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	85,773	0,444	2,405	10,27	7 019,4	7 019,4	1,1	122,0	6,908
Goudron du réfrigérant, température à l'entrée 51° C.	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	90,186	4,848	4,966	»	8 887,0	8 887,0	12,9	260,1	8,638
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	89,910	4,945	5,145	»	8 942,8	8 942,8	13,3	265,0	8,634
Goudron du condenseur, température à l'entrée 16° C.	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	87,222	5,499	6,279	»	8 831,0	8 831,0	14,8	294,5	8,551
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	85,183	5,599	9,218	»	8 538,4	8 538,4	15,1	300,4	8,253
Gaz de la houille	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	55,086	21,460	23,254	»	41 141,0	41 141,0	57,9	1251,3	9,918
	à froid de Blancy, 2 ^e échantillon	55,086	21,460	23,254	»	41 141,0	41 141,0	57,9	1251,3	9,918

Analyses et chaleurs de combustion de divers gaz d'éclairage.

DESIGNATION	ANALYSE EN POIDS								Chaleur de combustion du kilogramme.
	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène, azote et soufre.	Carbone des hydrocarbures.	Hydrogène.	Oxyde de carbone.	Acide carbonique.	Oxygène, azote et soufre.	Chaleur de combustion du mètre cube (0° et 76° m/m).
Gaz de Cannel Niddrie (31 octobre 1891).	52,077	43,598	34,325	43,333	43,598	46,843	9,262	16,964	6,365
Gaz de houille de Commentry (3 octobre).	55,086	21,460	23,454	43,740	21,460	24,964	7,087	5,749	41,111
Gaz d'émission de la Villette (31 octobre).	53,219	21,342	25,439	42,254	21,342	21,237	6,834	8,333	10,744
Gaz du laboratoire de l'École des mines (septembre 1891)									5,640

OBSERVATIONS

COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE DES GAZ D'APRÈS LES ANALYSES INDUSTRIELLES FAITES A L'USINE

	Gaz de Cannel.	Gaz de Commentry.	Gaz d'émission.
Vapeurs de benzol	4,53	1,41	1,09
Autres carbures absorbables par le brome	44,03	3,88	3,28
Hydrogène protocarboné et azote	38,00	33,56	33,09
Hydrogène	30,41	49,44	50,88
Oxyde de carbone.	11,09	9,15	8,86
Acide carbonique	8,85	4,87	4,80
Oxygène	4,09	0,99	1,00
Pouvoir éclairant en litres.	100,00	100,00	100,00
	72	99	105

Analyses faites suivant la méthode indiquée par M. Sainte-Claire Deville (*Étude sur le gaz de la houille*, Paris, 1888).

DEUXIÈME PARTIE

LES COMBUSTIBLES

PAR

E. RENGADE

AVANT-PROPOS

Dans les pages qui précèdent, le lecteur a vu quelles étaient les meilleures conditions pour obtenir avec économie une température élevée dans un four quelconque. Il reste, pour répondre complètement au titre de ce volume, comme aussi à la définition générale du chauffage industriel donnée au début de la première partie, à voir de quelles manières on peut utiliser dans ce but un combustible quelconque. Ce sera l'objet de cette seconde partie, dans laquelle nous devons envisager successivement les différents combustibles et leur emploi dans les foyers. Nous ne reviendrons pas sur les théories générales de la combustion et des équilibres chimiques déjà exposées, et nous nous bornerons à étudier à un point de vue plus pratique l'origine, la préparation et les usages des combustibles, ne mentionnant les détails purement techniques qu'autant que ceux-ci nous sembleront indispensables au lecteur désireux d'acquérir une idée suffisamment nette de la question, et insistant surtout sur les idées générales qui se rapportent à cette étude, de manière à rester fidèle à l'esprit de cette Encyclopédie.

E. R.

CHAPITRE PRÉLIMINAIRE

Définition et classification des combustibles. — On appelle combustible toute substance capable de se combiner avec une élévation notable de température à l'oxygène de l'air.

C'est Lavoisier qui a montré le premier que la combustion n'est autre chose qu'une oxydation, c'est-à-dire une combinaison de la matière inflammable avec la partie active de l'air, l'oxygène.

On peut généraliser et traiter de combustion une oxydation quelconque. Seulement la température de la réaction sera très variable suivant les cas : tantôt, soit parce que la chaleur d'oxydation est faible, soit parce que la vitesse d'oxydation est lente, la température ne s'élève pas sensiblement au-dessus de celle de l'air ambiant : on dit qu'il y a *combustion lente*. D'autres fois la chaleur produite est assez grande pour élever notablement la température du corps oxydé ; et alors généralement la réaction s'accélère d'elle-même ; la vitesse d'oxydation augmentant très rapidement avec la température, la quantité de chaleur produite dans l'unité du temps croît dans le même rapport et la masse se trouve rapidement portée à l'incandescence. Le corps oxydé s'enflamme : on dit qu'il y a *combustion vive*. Le même corps pourra d'ailleurs, suivant les circonstances extérieures, donner lieu à l'un ou à l'autre phénomène, mais il est évident qu'au point de vue industriel la combustion vive sera seule intéressante en permettant d'utiliser la chaleur produite ; ce qui explique la restriction apportée au début à notre définition sur la nécessité d'une élévation notable de température.

On peut d'ailleurs généraliser davantage la notion de combustion et l'étendue à toute réaction chimique, même endothermique. C'est ainsi que l'on pourra dire que le charbon brûle dans la vapeur d'eau, avec absorption de chaleur, pour donner du gaz à l'eau. Quelques intéressantes que puissent être ces généralisations, elles ne correspondent pas au point de vue auquel nous devons nous

placer ici, et qui est de produire de la chaleur (et pratiquement une température assez élevée).

Nous diviserons cette étude en classant d'abord les combustibles suivant leur état physique : solides, liquides ou gazeux, ces trois classes correspondant à des procédés d'utilisation très différents. Dans chacune d'elles, nous distinguerons les combustibles naturels et les combustibles artificiels. Enfin les combustibles solides naturels se subdivisent eux-mêmes en combustibles actuels, que la végétation produit sous nos yeux, et combustibles fossiles, qui constituent des réserves accumulées depuis les périodes géologiques¹.

Nous étudierons ainsi successivement :

A) COMBUSTIBLES SOLIDES.

a) Naturels :

1° Actuels : bois ;

2° Transformés ou fossiles : tourbe, lignite, houille, anthracite.

b) Artificiels : charbon de bois, coke.

B. COMBUSTIBLES LIQUIDES.

Naturels : pétroles.

Artificiels { Huiles de schistes ;
Benzol ;
Alcool.

C. COMBUSTIBLES GAZEUX.

Gaz naturel ;

— d'éclairage ;

— Riché ;

— de générateurs { à l'air ;
à l'eau ;
mixte ;

Air carburé ;

Hydrogène ;

Acétylène.

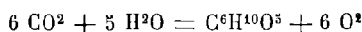
Ces différents combustibles présentent une importance très inégale. Tandis que la houille et ses dérivés, le coke et le gaz des géné-

¹ Les agglomérés, souvent classés dans les combustibles artificiels, seront étudiés après chaque catégorie de combustible naturel, l'agglomération ne modifiant pas en général, ou très peu, la nature de la substance primitive.

rateurs, fournissent la presque totalité de l'énergie thermique utilisée dans l'industrie, d'autres, tels que la tourbe, les pétroles, ont une consommation plus restreinte ou plus spécialisée, et certains, acétylène, gaz d'éclairage, ne sont employés qu'en quantités relativement infime et dans des cas tout à fait particuliers. Cependant une étude d'ensemble doit nécessairement les envisager les uns après les autres, quitte à ne s'arrêter que quelques instants à ceux dont l'importance est moindre.

Origine de la puissance des combustibles. — Un combustible constitue une réserve d'énergie que l'on utilise au moment voulu en provoquant son inflammation au contact de l'air. Le combustible et l'air ambiant réalisent donc un système hors d'équilibre, qui peut se transformer en produisant de la chaleur, c'est-à-dire de la puissance motrice. Cette transformation devrait par suite se faire spontanément. Si elle ne se produit pas, cela tient à l'existence de résistances passives qui peuvent être annulées de différentes façons : soit en élevant suffisamment la température, procédé universellement suivi pour enflammer les corps ; soit à l'aide de catalyseurs convenables, permettant à l'oxydation de s'effectuer à la température ordinaire. Les ferments constituent de tels catalyseurs, et l'on sait que le bois qui se putréfie à l'air disparaît peu à peu sous forme d'anhydride carbonique et de vapeur d'eau. La houille s'oxyde aussi spontanément, et les recherches de Moissan ont montré également que le charbon de bois commence à se combiner à l'oxygène dès la température de 100°¹.

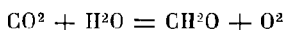
Quant à la provenance de cette énergie emmagasinée dans les combustibles, nous la trouvons dans la radiation solaire. Tous les combustibles, en effet, comme nous le verrons (peut-être faut-il en excepter les pétroles, dont l'origine est d'ailleurs encore très mal connue) proviennent de végétaux. Or la croissance du végétal nécessite une dépense d'énergie : la cellulose, qui en constitue l'élément fondamental, a été formée à partir de l'anhydride carbonique et de la vapeur d'eau atmosphériques, suivant une série de réactions certainement très complexes, mais que l'on peut écrire, en se bornant aux termes extrêmes :



Cette réaction est fortement endothermique, puisqu'elle est préci-

¹ H. Moissan. *C. R.* **135**, 925; 1902.

sément l'inverse de la combustion de la cellulose. Elle n'a pu se produire que grâce à l'énergie solaire. Sous l'action de la lumière, les parties vertes des plantes ont absorbé l'anhydride carbonique de l'air et ont régénéré l'oxygène. Telle a du moins été la réaction définitive, qui n'est évidemment que la résultante d'une suite probablement fort complexe de réactions élémentaires, sur lesquelles on n'a pu jusqu'à présent que faire des hypothèses. La plus vraisemblable, due à Bæyer, consiste à admettre que le premier terme de cette suite serait l'aldéhyde formique, formée d'après l'équation :



Cette aldéhyde se polymériserait et se condenserait au fur et à mesure de sa production en donnant naissance à des sucres, puis à de l'amidon ou de la cellulose ¹.

Quoi qu'il en soit, le rendement de l'énergie lumineuse dans l'assimilation chlorophyllienne est très mauvais : en évaluant successivement le nombre de calories reçues annuellement par une surface donnée du sol sous notre latitude, et le pouvoir calorifique des végétaux formés durant le même temps, on trouve qu'il n'atteint pas un pour cent. Ce rendement déplorable s'explique si l'on réfléchit aux mauvaises conditions dans lesquelles travaille la plante, qui est obligée de puiser son carbone dans un acide carbonique extrêmement dilué : l'air atmosphérique ne renfermant qu'un millième environ en poids de ce gaz ².

Si l'on essaie d'augmenter artificiellement la richesse de l'atmosphère en acide carbonique, on n'obtient aucune amélioration : au contraire la plante, n'étant pas habituée à vivre dans ces conditions, ne tarde pas à mourir ³.

¹ On doit remarquer que l'amidon ne peut pas se transformer *directement* en cellulose car, ainsi que l'a fait observer Skraup, ces deux substances dérivent de deux chaînes différentes : la première donnant par hydrolyse du maltose $\text{C}^{12}\text{H}^{22}\text{O}^{11}$, tandis que la seconde se résout en un isomère, le cellose. Il faut descendre jusqu'au terme en C^6 pour trouver le même produit de dégradation, le glucose. L'amidon ne peut donc se transformer en cellulose que par une hydrolyse préalable, il ne joue par suite dans le développement de la plante que le rôle d'une substance de réserve.

² L'énergie rayonnée par le soleil sur la surface de la terre équivaut à 200 billions de chevaux-vapeurs. De ces radiations les plantes n'absorbent que la partie comprise dans le rouge et le jaune, et assimilent journellement sous cette influence 4 milliards de kilogrammes d'anhydride carbonique, ce qui correspond à 45 milliards de chevaux-vapeur-heure (*Zeit. wiss. Phot.*, 3, 1, 258; 1905).

³ Voyez J. Duclaux, *La Chimie de la matière vivante*, Paris, 1910.

CHAPITRE PREMIER

LES COMBUSTIBLES SOLIDES

A. — LES COMBUSTIBLES SOLIDES NATURELS

a) COMBUSTIBLES ACTUELS

§ 1. — LE BOIS

Le bois est évidemment le premier combustible dont l'homme a dû se servir ; il a été le seul à peu près exclusivement employé soit tel quel, soit après carbonisation, jusqu'au moment où l'usage de la machine à vapeur a fait reconnaître la supériorité du charbon de terre ; il n'est plus aujourd'hui employé industriellement que pour quelques opérations spéciales, et encore peut-on prévoir que dans un avenir assez prochain il ne sera plus utilisé comme combustible.

Les principales essences exploitées en Europe sont : le chêne, le hêtre, le charme, l'ormeau, le tilleul, le châtaignier, le peuplier, le bouleau et les bois résineux : pin maritime et pin sylvestre, sapin, épicéa, mélèze. Ce sont les pins et les sapins qui constituent, avec les bouleaux, les forêts de la Suède, de la Norvège et de la Russie.

Classification des bois. — DENSITÉS. — On divise pratiquement les bois en *bois durs* ou *lourds* et *bois tendres* ou *légers*.

Les premiers ont un grain plus serré et une densité apparente plus élevée, supérieure à 0,55 à l'état sec et à 0,90 pour le bois vert. Ce sont le chêne, le hêtre, le charme, l'ormeau, le châtaignier.

Les bois tendres sont plus mous, leur densité apparente à l'état sec est généralement inférieure à 0,50 : ce sont le tilleul, le peuplier et les essences résineuses.

Quant au bouleau il se place entre les deux catégories. Voici du

reste un tableau extrait du *Traité de Métallurgie* de Babu ; les bois ont été desséchés par un séjour prolongé à l'air :

BOIS DURS	POIDS SPÉCIFIQUES
—	—
Hêtre. . *	0,77
Chêne.	0,71
Frêne	0,67
Erable	0,64
Ormeau	0,57
BOIS INTERMÉDIAIRES	
Bouleau	0,55
Aulne	0,54
BOIS TENDRES	
Sapin blanc.	0,48
— du Nord (rouge).	0,47
Pin sur terrain sec	0,55
Méleze.	0,47
Tilleul.	0,44
Saule.	0,48
Erable.	0,43
Peuplier d'Italie.	0,39
— noir.	0,39

Ces différences de densité¹ proviennent de la porosité plus ou moins grande des bois, due aux canaux qui servaient au transport de la sève dans l'arbre vivant. Si l'on cherche au contraire la densité réelle du bois, en le réduisant en poudre et le laissant séjourner plusieurs jours dans un picnomètre où l'on fait le vide, on trouve pour toutes les essences très sensiblement la même densité, 1,50; ces valeurs obtenues ne diffèrent guère entre elles de plus de 1 p. 100.

Composition des bois. — Cette constance du poids spécifique fait pressentir une composition identique. En effet, le bois est constitué essentiellement par de la cellulose $C^6H^{10}O^5$, à laquelle vient s'ajouter la sève, formée en grande partie d'eau, les diverses substances organiques groupées sous le nom de matière incrustante, et de différents sels minéraux. Si l'on dessèche le bois, il ne reste, à côté de la cellulose, que la matière incrustante et les sels minéraux,

¹ Le poids du mètre cube ou stère de bois débité en bûches et séché à l'air varie, d'après les observations de Berthier et Sauvage, depuis 200 kilogrammes pour le peuplier jusqu'à 500 kilogrammes pour le hêtre et le chêne.

dont la proportion relative est d'autant plus faible que l'on a choisi une partie de bois moins riche originairement en sève, c'est-à-dire de formation plus ancienne. Le tableau ci-dessous, extrait de l'ouvrage sur *Les combustibles industriels* de MM. Colomer et Lordier¹, fait ressortir la presque identité de composition des différentes espèces de bois (échantillons prélevés sur les troncs). Nous y avons ajouté la composition de la cellulose : on voit que le tissu ligneux est plus riche en carbone d'environ 3 p. 100, et plus pauvre en oxygène de la même quantité ; il renferme de plus en moyenne 1 p. 100 d'azote.

NOMS DES ARBRES	C	H	O	Az
Chêne.	48,94	5,94	43,09	2,03
—	49,43	6,07	44,50	—
Hêtre.	48,29	6,00	45,14	0,57
— rouge	48,18	6,28	45,54	—
— blanc	48,53	6,30	45,17	—
Bouleau.	48,89	6,19	43,93	0,99
Charme.	48,08	6,12	44,93	0,87
Aulne.	49,20	6,22	44,59	0,68
Frêne.	49,35	6,07	44,56	—
Marronnier d'Inde	49,08	6,71	44,21	—
Peuplier noir	49,70	6,31	43,99	—
Tilleul	49,41	6,86	43,73	0,63
Pin sauvage (vieux bois)	49,87	6,09	43,41	—
— — (jeune bois)	50,62	6,27	42,58	0,53
Faux sapin	49,95	6,41	43,65	—
Sapin commun	49,59	6,38	44,02	—
Méleze.	50,11	6,31	43,58	—
Pommier	48,90	6,23	44,83	—
Buis	49,37	6,52	44,11	—
Noyer.	49,11	6,44	44,44	—
Cellulose pure.	44,40	6,17	49,39	—

TENEUR EN EAU. — Le bois fraîchement coupé renferme une grande quantité d'eau, provenant de la sève qui l'imprègne. La proportion en varie naturellement suivant les essences, suivant la saison et suivant la partie de l'arbre que l'on considère : elle est plus abondante dans les bois tendres que dans les bois durs ; au printemps, époque de la montée de la sève, qu'en hiver où la végétation s'arrête ; dans les feuilles, dans l'écorce et les petites branches que dans le tronc. Elle est généralement supérieure à 45 p. 100 d'après Le Play.

¹ Colomer et Lordier, *Les combustibles industriels*, Paris, 1906.

Cette eau s'évapore spontanément après l'abatage, laissant vides les vaisseaux où elle était contenue. Aussi le bois se contracte-t-il pendant la dessiccation de plus de 10 p. 100. Mais cette contraction n'est pas suffisante pour combler tous les vides, car la densité apparente diminue notablement.

La rapidité de la dessiccation augmente beaucoup quand le bois est écorcé au préalable : voici par exemple les chiffres donnés par Uhr :

	PERTE P. 100 DU POIDS PRIMITIF DU BOIS			
	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.
Troncs écorcés (conifères).	34,53	38,77	39,34	39,62
Troncs avec écorce	0,41	0,84	0,92	0,98

La dessiccation à l'air n'est du reste jamais complète ; il reste une proportion de 15 à 20 p. 100 d'eau, suivant l'état hygrométrique de l'atmosphère ambiante. Pour expulser complètement cette eau, il faut porter le bois dans une étuve à la température de 125°. On réalise ainsi une dessiccation absolue. En chauffant plus fortement, il se dégage encore de grandes quantités de vapeur d'eau, mais cette eau provient de la décomposition commençante des tissus ligneux ; tandis que le bois séché à 125° n'est pas altéré, et, replacé à l'air, reprend peu à peu la proportion primitive d'eau hygrométrique de 15 à 20 p. 100.

CENDRES. — Quand on brûle le bois, le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote dont il était formé se dégagent à l'état de composés gazeux, il reste des *cendres* provenant des matières minérales apportées par la sève. La proportion de cendres sera donc, pour un même végétal, d'autant plus grande que la partie calcinée était plus riche en sève : ce seront les feuilles, les menues branches et les écorces qui en donneront le plus. Nous donnons ci-contre un tableau résumant les expériences de M. Violette sur un cerisier¹.

La composition de ces cendres est extrêmement variable. Elle dépend beaucoup moins de l'espèce du végétal que de la nature du sol où il a poussé. Les éléments les plus importants sont la potasse, à l'état de carbonate, la chaux, la magnésie, l'acide phosphorique et la silice. La chaux y existe toujours pour une forte proportion, ce qui explique leur infusibilité.

¹ VIOLETTE, *Ann. Chim. Phys.*, (3), 39, 296; 1833.

PARTIE ÉTUDIÉE	CARBONE	HYDROGÈNE	OXYGÈNE ET AZOTE	CENDRES
Feuilles	45,015	6,971	40,910	7,418
Petites branches . .	écorce. 52,496	7,312	36,737	3,454
	bois. . 48,359	6,605	44,730	0,304
Moyennes branches .	écorce. 48,855	6,342	41,121	3,682
	bois. . 49,902	6,607	43,356	0,134
Grosses branches . .	écorce. 46,871	5,570	44,656	2,903
	bois. . 48,003	6,472	45,170	0,354
Tronc	écorce. 46,267	5,930	44,755	2,657
	bois. . 48,925	6,460	44,319	0,296
Racine.	écorce. 50,367	6,069	41,920	1,129
	bois. . 47,390	6,259	46,126	0,234

Pouvoir calorifique. — Le pouvoir calorifique du bois complètement desséché est de 4 000 à 4 500 calories. Mais le bois de chauffage usuel, contenant de 20 à 55 p. 100 d'eau, a naturellement un pouvoir calorifique beaucoup plus faible, que l'on peut évaluer à 2400-2800 calories.

Emploi des déchets de bois. — On utilise fréquemment le pouvoir calorifique des déchets et des résidus ligneux fournis par diverses industries : en particulier la sciure de bois, la tannée ou tan épuisé, la bagasse ou résidu de canne à sucre. On doit naturellement disposer de foyers spéciaux pour les brûler ; on peut encore agglomérer la sciure en *briquettes* et la tannée en *mottes*.

Dessiccation du bois. — La dessiccation par la chaleur ou torréfaction du bois est pratiquée toutes les fois que l'on veut utiliser ce combustible à produire des températures élevées, par exemple pour les fours à céramique. La température de dessiccation ne doit pas dépasser 140°, sinon le bois subirait un commencement de décomposition. On utilise généralement pour cet usage les gaz chauds venant des fours, que l'on envoie dans des chambres en maçonnerie au contact du bois à dessécher, après leur avoir fait traverser un espace vide, dit chambre à étincelles, où ils sont mélangés à de l'air frais de manière à éviter une température trop élevée.

Au lieu d'entasser le bois dans ces chambres, il est préférable de le faire circuler, au moyen de wagonnets, dans de longues galeries ou fours-tunnels, que les gaz chauds traversent en sens inverse. On

donne à la galerie une longueur telle que les gaz en sortent sensiblement froids, tandis que les wagonnets, poussés les uns derrière les autres, sont amenés à des températures progressivement croissantes. On prolonge en général la galerie au delà du point d'arrivée des gaz chauds, de manière à permettre au bois de se refroidir dans un courant d'air avant d'être déchargé.

b) COMBUSTIBLES TRANSFORMÉS OU FOSSILES

Nous désignons ainsi les combustibles formés par la décomposition plus ou moins profonde des matières organiques à la suite de leur enfouissement dans le sol ou sous les eaux. Ils comprennent la tourbe¹, les lignites et les différentes variétés de houille. Leur apparence, leur composition, leurs propriétés sont très différentes, et leur ancienneté extrêmement variable : la tourbe se produit d'une manière continue de nos jours, tandis que les houilles et les anthracites remontent aux périodes géologiques. Mais si leurs origines sont différents, leurs transformations paraissent s'être effectuées de façons non pas identiques mais très analogues, à des degrés différents d'ailleurs suivant leur ancienneté ou suivant les conditions où ils se sont trouvés placés.

Formation des combustibles fossiles. — Nous avons vu précédemment que les végétaux étaient formés en majeure partie de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, combinés pour former principalement de la cellulose. Mais on pourrait imaginer une infinité d'autres manières de grouper ces trois éléments. Ces groupements ont naturellement des stabilités différentes, et le plus stable est celui vers lequel tendront à se transformer tous les autres. Il correspond à la formation d'anhydride carbonique, de méthane et de carbone libre. Tel est donc le terme final, l'arrangement définitif vers lequel évolueront par une série d'étapes successives de plus en plus voisines de l'état d'équilibre, et caractérisées par un résidu de plus en plus riche en carbone, les matériaux qui constituaient initialement le végétal.

Mais cette évolution ne se fera pas spontanément à la température ordinaire, par suite de résistances passives. Elle ne se produira

¹ La tourbe est rangée fréquemment parmi les combustibles actuels : il est vrai qu'elle se forme continuellement sous nos yeux ; mais sa formation présente des analogies si évidentes avec ce que dut être la formation de la houille, qu'il nous semble plus logique de la placer dans le même groupe que les combustibles anciennement transformés.

qu'en élevant la température, de manière à diminuer ces résistances, ou par l'emploi de catalyseurs convenables qui joueront le rôle de lubrifiants. C'est par le premier procédé que s'effectue la *carbonisation* du bois dans les meules du charbonnier. En ce qui concerne la formation des charbons fossiles, il est possible également que la température et aussi la pression aient joué un certain rôle. Cependant il paraît bien probable à l'heure actuelle que les catalyseurs aient eu une action importante, peut-être même prépondérante.

Ces catalyseurs seraient intervenus sous forme de ferments, ferments solubles ou ferments figurés.

L'hypothèse d'une formation microbienne de la houille, d'abord entrevue par van Tieghem, qui avait trouvé les premières bactéries fossiles en 1879 dans les silex de Grand Croix, a été développée depuis par B. Renault¹ et surtout par Lemièrè². D'après cet auteur, les végétaux de l'époque secondaire auraient été entraînés au fond des eaux, soient courantes, soient stagnantes, en formant des amas bientôt recouverts par des sédiments détritiques encore meubles, et dans lesquels une fermentation intense devait nécessairement se développer. En effet, ces végétaux avaient entraîné avec eux des microbes de l'atmosphère; de plus, les fruits et graines qu'ils portaient toujours (puisque, suivant l'opinion des géologues, il n'y avait pas de saisons sensibles à l'époque secondaire) renfermaient des diastases. Ces diastases, ou celles sécrétées par les ferments figurés, transformèrent rapidement la cellulose en une sorte de « gelée humique », base de tous les combustibles fossiles: c'est la période préalable de *macération*. A ce moment, les ferments figurés apportés par les végétaux prolifèrent, ils brûlent la gelée humique aux dépens de l'air entraîné; mais celui-ci une fois épuisé, le milieu devient anaérobie, et les hydrates de carbone sont dédoublés en anhydride carbonique, méthane et autres hydrocarbures, qui forment le combustible fossile; de même que sous l'influence de la levure de bière, le moût sucré se transforme en alcool en dégageant de l'acide carbonique.

La fermentation des végétaux s'arrêtera quand, par suite de la présence des hydrocarbures formés, le milieu sera devenu antiseptique. Enfin la pression graduelle des sédiments supérieurs achèvera la transformation en houille.

Ces hypothèses sont fort séduisantes. Cependant il faut remarquer que l'action microbienne ne peut pas toujours être invoquée: on a

¹ B. RENAULT. *Bull. Ind. Minér.*, 1899 et 1900, *passim*.

² LEMIÈRE, *Bull. Ind. Minér.*, 4, 861 et 1249; 1905.

parfois démontré au contraire (Ch. E. Bertrand) le caractère aseptique de certaines formations houillères.

Pour beaucoup d'auteurs, l'action microbienne n'aurait fait que commencer la transformation des matières végétales, qui se serait arrêtée aux tourbes et aux lignites. La transformation en houille aurait exigé des pressions élevées ; l'hydrogène et l'oxygène se seraient dégagés en majeure partie sous forme de vapeur d'eau, avec un peu d'anhydride carbonique.

Quelles que soient les théories invoquées, il est certain que la carbonisation des végétaux s'est effectuée par étapes successives, qui n'ont pas été toujours les mêmes, mais dont nous avons une idée par les différents types de combustibles fossiles que nous connaissons : la richesse en carbone augmentant au fur et à mesure de la transformation, de manière à passer graduellement de la composition de la cellulose à celle des anthracites qui représentent la carbonisation la plus parfaite. Voici en effet d'après Mène la composition moyenne de quelques combustibles :

	C	H	O	H en excès après formation d'eau.
Cellulose	100	13,88	411,44	»
Bois	100	12,48	83,07	1,80
Tourbe.	100	9,85	53,67	2,80
Lignite.	100	8,37	42,42	3,07
Houille très grasse (Staffordshire)	100	6,42	21,23	3,47
Houille pour coke	100	5,91	18,32	3,62
Houille sèche (pays de Galles)	100	4,75	5,28	4,09
Anthracite.	100	5,84	4,74	5,63

De nombreuses expériences ont été effectuées dans le but de reproduire artificiellement les combustibles fossiles. C'est ainsi par exemple que Frémy, en chauffant en tubes scellés à 200°-300° différents hydrates de carbone (amidon, sucre, gomme arabique), avait obtenu des produits dont la composition était très analogue à celle de la houille. Tout récemment, M. Dowling, en distillant du bois sous la pression ordinaire, a remarqué que la proportion d'hydrogène qui reste combinée au charbon est inférieure à celle que l'on trouve

* D. B. Dowling, *Rev. Métal.*, 7 bis, 484 : 1910.

dans les lignites et les charbons bitumineux. Il en déduit que dans la formation de la houille, il y a eu nécessairement une cause qui s'est opposée au départ de l'hydrogène; ce ne peut être que la pression.

§ I. — LA TOURBE

La tourbe est le produit de la décomposition des matières végétales enfouies de nos jours sous les eaux stagnantes ou dans les sous-sols des prairies marécageuses. C'est le plus récent des combustibles fossiles, puisqu'il se produit d'une façon continue et sous nos yeux. C'est également le moins transformé, c'est-à-dire celui dont la composition diffère le moins de la matière végétale primitive.

La tourbe se forme de préférence dans les plaines marécageuses, sur les bords des cours d'eau : c'est la *tourbe des vallées*, dont l'épaisseur atteint et dépasse 12 mètres. On la trouve en France principalement dans la Somme, l'Oise et le Pas-de-Calais. La *tourbe des plateaux* se forme sur les versants montagneux et les plateaux à sous-sol argileux et imperméable à l'eau. Son épaisseur est beaucoup plus faible et ne dépasse guère 1 mètre; il en existe en France dans le Plateau Central, le Jura et les Vosges; on la rencontre surtout en Bavière, en Suisse, en Irlande; il existe également au centre du Canada de vastes tourbières que l'on cherche actuellement à mettre en valeur.

Les végétaux qui concourent à la formation de la tourbe peuvent être différents : outre les mousses appartenant au genre *Sphagnum*, qui en forment presque toujours, au moins en Europe, l'élément principal, on y trouve toutes les plantes des prairies humides ou des marais : la plupart des cypéracées, les joncs, de nombreuses graminées, et aussi les bruyères, les saules et quelques espèces résineuses. La structure des débris végétaux reste visible dans la tourbe de formation récente à la surface des tourbières, dans laquelle on distingue des brindilles entrelacées, et que l'on nomme *tourbe mousseuse* ou *fibreuse*, tandis que dans les parties profondes, de formation plus ancienne, on n'aperçoit plus que quelques grosses branches ou troncs au milieu d'une matière compacte de couleur foncée; c'est la *tourbe brune* ou *noire*.

L'examen microscopique des tourbes permet le plus souvent d'y reconnaître des cellules et des débris d'organes végétaux, des grains de pollen, etc. M. Eckenberg a remarqué que ces fragments étaient

imprégnés et entourés d'une sorte de gelée transparente, que l'on rend très visible en colorant la préparation avec du bleu de méthylène



Fig. 52. — Tourbe vue au microscope.

ou de la fuchsine, et qui ne serait autre que de l'hydrocellulose provenant du contact prolongé de la cellulose avec l'eau ; cette hydro-



Fig. 53. — La même après chauffage à 200°.

cellulose disparaît complètement si l'on chauffe la tourbe à 200° en présence d'eau (fig. 52 et 53)¹.

¹ D^r ECKENBERG, *Communication au meeting de l'Iron and Steel Institute, 1909* ; *Rev. Métal.*, 6 bis, 416 ; 1909.

Composition. — HUMIDITÉ. — La tourbe, au moment de son extraction, contient une quantité d'eau considérable; cette eau s'évapore en partie par une exposition prolongée de la tourbe à l'air, mais il en reste toujours de 20 à 50 p. 100. En chauffant la tourbe, elle continue à se dessécher, mais dès 120° elle commence à se décomposer.

CENDRES. — La proportion de cendres contenues dans la tourbe est extrêmement variable, et cela se comprend quand on réfléchit à la manière dont ce combustible s'est formé dans des eaux plus ou moins claires ou limoneuses. On peut admettre comme teneur moyenne 5 à 10 p. 100, mais cette proportion peut dans certains cas atteindre 50 p. 100. Leur composition est également très variable : on y trouve, outre les éléments des cendres proprement dites des végétaux constituants, du sable, de l'argile, du calcaire, de la pyrite, du sulfate de chaux. Celui-ci atteint dans quelques tourbières de la Somme jusqu'à la moitié du poids des cendres.

MATIÈRES VOLATILES. — Déduction faite des cendres, la tourbe séchée à 110° contient en moyenne

C.	60
H.	6
O.	32
Az	1,5 — 2

Voici d'ailleurs la composition de quelques échantillons de tourbe examinés par Regnault (séchés à 120°) :

	C	H	O + Az	CENDRES
Tourbe de Vulcaire près Abbeville	67,03	5,63	31,76	5,58
Tourbe de Long	58,09	5,63	31,37	4,61
— de Framont (Vosges)	57,19	6,11	30,77	5,33

Pouvoir calorifique. — Le pouvoir calorifique de la tourbe est naturellement très variable suivant sa teneur en cendres et en humidité. Fischer a trouvé, pour une tourbe pressée contenant 11,9 p. 100 d'eau et 2,5 p. 100 de cendres, le chiffre de 5 430 calories

(eau condensée) ou 4 961 calories (eau vaporisée). Mais en général la tourbe est plus humide et moins pure. Avec les chiffres moyens de 25 à 30 p. 100 d'humidité et 6 à 8 p. 100 de cendres, on doit compter seulement 3 000 calories, c'est-à-dire la même quantité de chaleur que le bois séché à l'air.

En revanche la tourbe complètement déshydratée par compression, après cuisson préalable suivant le procédé Eckenberg que nous décrirons tout à l'heure, possède un pouvoir calorifique de 6 200 calories.

Exploitation. — L'extraction de la tourbe est conduite différemment suivant les conditions où elle se présente. Quand le marais tourbeux n'est pas profond, on y établit un canal servant à l'écoulement et permettant à la couche de tourbe de se dessécher peu à peu, en même temps qu'elle diminue d'épaisseur de telle sorte que sa densité peut augmenter de 50 et 60 p. 100. Quand cette contraction s'arrête, on découpe la tourbe en longues bandes, que l'on divise ensuite à la bêche de manière à constituer des blocs parallélépipédiques dont il faut achever la dessiccation. A cet effet on les empile les uns sur les autres en forme de muraille à claire-voie, d'abord en plein air¹, puis sous des hangars à l'abri de la pluie.

Quand l'assèchement du marais est impossible, la tourbe extraite soit à la pelle, soit à la drague, est imprégnée d'une proportion d'eau considérable atteignant 8 à 9 fois son propre poids. On expulse généralement une partie de cette eau par un foulage préalable sur une aire battue ou recouverte de foin. Le foulage, effectué d'abord avec les pieds, puis au moyen de battoirs, produit une espèce de gâteau de 20 à 30 centimètres d'épaisseur, qu'on laisse ensuite se dessécher à l'air, et que l'on divise finalement en briquettes, dont on achève la dessiccation comme précédemment.

Ces procédés primitifs ne produisent qu'un combustible de mauvaise qualité : sa dessiccation est loin d'être complète ; il s'émiette et se pulvérise facilement ; enfin son volume est considérable, ce qui en rend l'emmagasiner onéreux et empêche de l'employer dans les locomotives ou les bateaux à vapeur.

On a tout naturellement été conduit à rechercher les moyens de comprimer la tourbe, de manière à réduire son volume, à diminuer sa fragilité et à améliorer sa dessiccation. Malheureusement le pro-

¹ Il faut éviter de laisser la tourbe humide exposée à la gelée, qui l'émiette et lui fait perdre la plus grande partie de sa valeur.

blème est plus difficile qu'il ne le paraît au premier abord : sous l'effet de la pression, la tourbe humide se comporte comme une gelée qui passe à travers les mailles de l'enveloppe, ou les brise si elles sont assez fines et si l'on essaie de la comprimer rapidement. Il faut faire croître la pression lentement et dépenser finalement une assez grande puissance, ou bien on doit commencer par faire subir à la tourbe une préparation préalable.

La meilleure solution paraît avoir été donnée récemment par le D^r Eckemberg, qui a reconnu au microscope, comme nous l'avons vu plus haut, que les fragments de tourbe étaient environnés d'une couche translucide d'hydrocellulose. C'est la présence de cette hydrocellulose qui explique la difficulté que l'on éprouve à comprimer la tourbe, car c'est elle qui constitue une gelée transmettant en tous sens les pressions comme un liquide et faisant éclater les enveloppes. Pour arriver à un résultat, il faut donc commencer par détruire cette substance; on y arrive très simplement par un chauffage préalable, et l'on constate qu'en portant la tourbe à des températures croissantes avant de la comprimer, on arrive à expulser de plus en plus complètement l'eau qui l'imprégnait. Voici par exemple les chiffres donnés par une tourbe noire à haut pourcentage en hydrocellulose et qui contenait 7 kilogrammes d'eau par kilogramme de tourbe. La pression employée était de 20 kilogrammes par centimètre carré :

TEMPÉRATURE DE CHAUFFAGE PRÉALABLE.	KILOGRAMMES D'EAU ÉCOULÉE.	RESTENT
80	—	—
100	0,5	6,5
125	1,0	6,0
150	3,5	3,5
160	5,0	2,0
180	5,5	1,5
200	6,0	1,0
220	6,25	0,75
240	6,50	0,50

Afin d'économiser la chaleur, on fait circuler la tourbe brute à chauffer en sens inverse de la tourbe chauffée à travers une double enveloppe tubulaire, de manière à récupérer autant que possible la chaleur dépensée. Une pompe envoie la pulpe à travers l'appareil sous une pression un peu supérieure à celle de la vapeur d'eau à la

température de cuisson ; la pulpe cuite est refroidie et façonnée en briquettes dans un compresseur (fig. 54).

Les essais effectués sur 227 300 m³ ont donné les résultats suivants :

Température moyenne au bout chauffé des tubes.	152°
— de la pulpe entrant dans l'appareil.	10°
— — déchargée.	80°
Régénération.	72
Nombre net de calories employées à la cuisson .	70 calories.

Les briquettes obtenues ont une densité de 1,29 à 1,35. Elles pré-

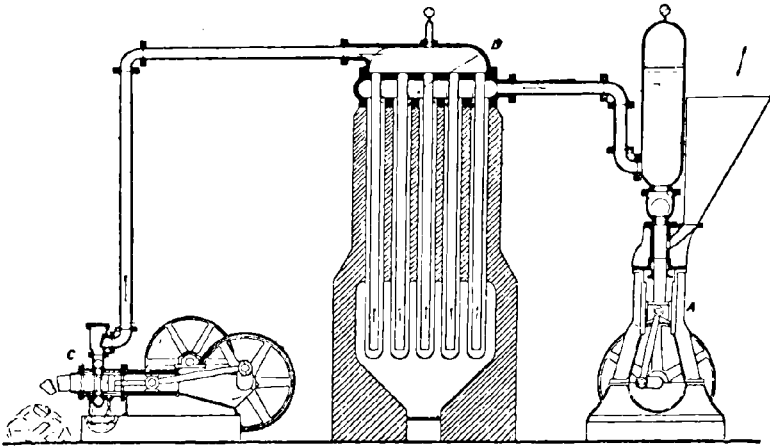


Fig. 54. — Chauffage et compression de la tourbe.
A, Pompe. — B, Caloriseur. — C, Presse.

sentent une surface compacte d'un noir brillant, par suite de la formation pendant la cuisson d'une substance paraffineuse qui agglomère les particules, et qui rend les briquettes pratiquement imperméables à l'eau, sous laquelle elles peuvent rester une semaine sans prendre plus de 0,9 p. 100 d'humidité, tandis que les briquettes de tourbe séchée à l'air en prennent dans les mêmes circonstances plus de 6 p. 100. Le pouvoir calorifique des briquettes fraîches, préparées après cuisson humide à 220° et contenant encore la moitié de leur poids d'eau, est très approximativement de 4 000 calories ; il devient de 4 785 calories après une semaine d'exposition à l'air, qui réduit la proportion d'eau au 1/4 du poids de la tourbe. Enfin après dessiccation complète il atteint 6 200 calories.

La fabrication des briquettes a été d'ailleurs également essayée

en Allemagne : la tourbe d'abord réduite en pulpe est lessivée pour enlever le sable et les matières inertes ; l'excès d'eau est ensuite éliminé par centrifugation ; la pulpe est moulée par compression en bandes minces que l'on fait passer sur des cylindres sécheurs, puis que l'on façonne en briquettes sous une pression de 2 000 atmosphères. Leur pouvoir calorifique serait de 4 800 calories (Colomer et Lordier).

Pouvoir nitrifiant. — Bien qu'il ne s'agisse ici que des combustibles, nous ne pouvons passer sous silence l'aptitude extraordinaire de la tourbe au développement des bactéries nitrifiantes, découverte par MM. Müntz et Lainé ¹, et qui pourrait créer un débouché industriel de cette matière, servant à établir des nitrrières à rendement intensif. Ces savants ont trouvé en effet que le rendement en nitrate pouvait atteindre 6,550 kg par mètre cube de tourbe et par vingt-quatre heures à partir de solutions ammoniacales que l'on pouvait elles-mêmes préparer par distillation de la tourbe dans un courant de vapeur d'eau surchauffée. La tourbe constitue également, en raison des mêmes propriétés, une matière précieuse pour l'épuration des eaux d'égouts ².

§ 2. — LES LIGNITES

Les lignites représentent un stade de décomposition de la cellulose plus avancé que la tourbe, mais moins que la houille. Comme le bois et comme la tourbe, ils donnent à la distillation des produits volatils à réaction fortement acide. Très riches en matières humiques, ils se dissolvent en partie à chaud dans la lessive de potasse, qu'ils colorent en brun ; cette réaction peut d'ailleurs manquer chez certaines variétés.

Mentionnons également la formation de pyrocatechine par fusion des lignites avec les alcalis caustiques.

Classification des lignites. — On divise les lignites en plusieurs catégories suivant leur aspect, leurs propriétés, et semble-t-il leur ancienneté géologique : les lignites fibreux, ou lignites xyloïdes, ou bois fossiles ; les lignites terreux ; les lignites proprement dits, ou lignites communs, ou lignites secs ; enfin les lignites bitumineux, ou lignites gras.

¹ C. R., **142**, 1 239 ; 1906.

² MüNTZ et LAINÉ, C. R., **144**, 466 ; 1907 ; **146**, 53 ; 1908.

LIGNITES FIBREUX. — C'est la variété la moins ancienne et celle qui a conservé le mieux l'aspect primitif du bois. Certains bois fossiles se coupent à la hache et brûlent dans les foyers à bois avec une flamme claire et pétillante. D'autres sont un peu plus transformés, leur cassure devient conchoïdale. En même temps la proportion du carbone augmente.

Voici la composition moyenne des lignites fibreux :

Carbone	57-67
Hydrogène	6-5
Oxygène et azote	37-28

On voit que la proportion d'oxygène est encore très élevée. Il faut ajouter à ces chiffres environ 30 p. 100 d'eau, jusqu'à 50 p. 100 dans certains échantillons. Cette eau s'en va d'ailleurs en grande partie par simple exposition à l'air comme dans le bois frais. Mais le bois fossile se fendille et se délite en petits fragments.

La proportion de cendres varie entre 5 et 15 p. 100.

Le pouvoir calorifique du bois fossile brut est d'environ 3 000-3 500 calories, il devient de 5 500 calories après dessiccation complète.

LIGNITES TERREUX. — Ces lignites ne présentent plus l'aspect fibreux du bois; leur cassure est terne et irrégulière ou conchoïdale. Ce sont en quelque sorte des tourbes fossiles; ils contiennent une forte proportion de cendres, qui les rendent impropres aux usages métallurgiques.

La *terre d'ombre*, ou *terre de Cologne*, employée comme couleur, appartient à cette classe de lignites.

LIGNITES PROPREMENT DITS OU COMMUNS. — Les *lignites communs* sont au contraire très compacts, bruns foncés ou noirs, à cassure conchoïdale; ils renferment beaucoup moins d'eau que les variétés précédentes, 5 à 10 p. 100.

Ce sont les variétés brunes (*braunkohle*) qui sont le plus répandues. On y distingue encore des formes organisées, aiguilles de conifères, grains de pollen, mousses; on les trouve dans le miocène et le pliocène; les lignites noirs au contraire semblent de formation plus ancienne: leurs gisements sont situés à la base du tertiaire et dans le secondaire. Certaines variétés de lignites noirs sont assez brillants et compacts pour être utilisés en joaillerie, sous le nom de *jais* ou *jayet*.

Les lignites communs ont une densité voisine de 1,25; leur composition moyenne, déduction faite de l'eau et des cendres, répond à

une proportion de carbone plus forte et d'oxygène plus faible que dans le bois fossile :

C	63-73 p. 100
H	6-4 —
O + Az	29-21 —

A la distillation, ils donnent des gaz, de l'eau et des matières bitumineuses. Leur pouvoir calorifique varie depuis 4500-5000 calories pour les variétés brunes, à 5500-6000 calories pour les variétés noires.

LIGNITES BITUMINEUX. — Ces lignites servent de transition entre les précédents et les bitumes proprement dits ou les asphaltes ; ils sont de formation encore plus ancienne que les lignites secs. Leur cassure est conchoïdale, avec éclat gras.

Chauffés, ils s'enflamment facilement et brûlent avec une flamme fuligineuse, en gonflant beaucoup et parfois en fondant complètement. Ils ne renferment pour ainsi dire pas d'eau (1 à 2 p. 100); ils sont aussi relativement assez pauvres en oxygène. Leur composition moyenne peut se représenter par :

C	70-80
H	6-8
O + Az	24-12

Leur pouvoir calorifique atteint 8000 calories.

Principaux gisements. — Les lignites se rencontrent en France principalement dans les départements du Gard et des Bouches-du-Rhône, ainsi que dans les Basses-Alpes, à Manosque, où se trouvent des variétés bitumineuses. On en rencontre aussi quelque peu en Italie. Mais les gisements les plus importants sont en Allemagne, et surtout en Autriche-Hongrie.

Voici quelques analyses de lignites d'après Regnault :

PROVENANCE	COKE par calcination.	C	H	O + Az	CENDRES
Jayet de Sainte-Colombe	61,4	»	»	»	1,7
Lignite des Bouches-du-Rhône	41,1	63,01	4,58	18,98	13,43
— des Basses-Alpes	49,5	69,5	5,20	22,74	3,01
— de Grèce	38,9	60,36	5,00	25,62	9,02
— de Cuba	39,0	74,82	7,25	13,99	3,94
Terre d'ombre	36,1	63,42	4,98	27,11	5,49

Nous donnons également les compositions de quelques lignites autrichiens (Colomer et Lordier) :

PROVENANCE	C	H	H ² O	CENDRES	S	O + Az	POUVOIR calorifique.
Csibor	43,56	5,59	31,42	15,05	3,47	4,38	4 888
Millenium.	47,29	5,35	30,03	10,65	3,50	6,68	5 046
Theodora.	52,44	6,50	27,96	9,20	2,88	3,90	5 895
Saint-Pierre (supérieur).	52,37	6,15	29,00	9,50	1,96	2,98	5 793
Saint-Pierre (inférieur).	51,32	6,15	30,68	7,25	2,67	4,60	5 655

La composition des cendres de lignites est très variable, car, comme pour la tourbe, elle dépend beaucoup plus de la constitution du terrain où s'est formé le lignite que des matières minérales contenues dans les végétaux transformés. La pyrite qui existe dans beaucoup de ces charbons donne des cendres très riches en soufre. Quand elle se trouve associée à l'argile, on peut employer le lignite pour la préparation de l'alun.

Voici la composition des cendres de quelques lignites, d'après le *Traité de Métallurgie* de Schnabel :

	LIGNITE DE TRIFAIL	LIGNITE DE L'HÉRAULT	LIGNITE DE DIOSZYOR
SiO ²	26,15	12,00	34,52
Al ² O ³	7,58	9,00	10,86
Fe ² O ³	9,97	56,21	14,53
CaO.	23,96	12,50	13,33
MgO.	8,98	2,25	0,86
K ² O + Na ² O	5,39	traces	6,06
SO ³	15,38	7,50	13,40
P ² O ⁵	2,11	0,54	0,84
Zn.	0,05	»	»
Cu.	traces	»	»
Mn	traces	»	»

Briquettes de lignite. — C'est à Bruhl, en Bavière, que l'on fabriqua pour la première fois des agglomérés de lignite, améliorant ainsi notablement la qualité de ce combustible, et le rendant plus facilement transportable en lui enlevant une grande partie de son humidité. Cependant on fut assez longtemps à se rendre compte des avan-

tages de la compression en briquettes. Actuellement, au contraire, cette industrie est très prospère, non seulement en Allemagne, dans la province Rhénane, mais aussi en Italie. Le procédé est d'ailleurs très simple : il suffit de soumettre le lignite, préalablement pulvérisé et séché, à une pression énergique. Les grains se soudent l'un à l'autre sans qu'il soit besoin d'ajouter un agglomérant étranger ; les matières bitumineuses que contiennent tous les lignites en petite quantité suffisent à tenir cet emploi, d'autant que la dessiccation préalable a eu pour effet de faire suinter le bitume à la surface des grains.

Les opérations successives nécessitées par l'agglomération sont en définitive les suivantes :

Broyage, au moyen de cylindres cannelés, suivi d'un tamisage qui ne laisse passer que les parties suffisamment pulvérisées et renvoie les autres dans les cylindres broyeurs.

Dessiccation effectuée dans des appareils à circulation méthodique et chauffés soit par les gaz du foyer, soit par de l'air chaud ou de la vapeur d'eau. Le degré de dessiccation à obtenir dépend de la variété de lignite traitée et doit être surveillé avec soin ; la dessiccation peut être poussée d'autant plus loin que le lignite est plus riche en bitume ; mais si l'on va trop loin, la briquette se délitéra ultérieurement.

Enfin *moulage* au moyen de presses très puissantes, exerçant une pression de 10 tonnes par centimètre carré.

Les modèles de sècheurs employés sont assez nombreux ; un grand nombre sont des fours à plateaux circulaires superposés, sur lesquels on fait circuler de haut en bas le lignite à dessécher : il est poussé par les palettes d'agitateurs mécaniques alternativement vers le bord et vers le centre des plateaux successifs, pendant que le fluide desséchant circule entre les plateaux. Les premiers fours employaient directement les gaz du foyer. On préfère aujourd'hui se servir d'air chaud, ou mieux de vapeur que l'on fait circuler à cet effet dans les plateaux eux-mêmes, qui sont creux, tandis qu'on ménage entre les plateaux une circulation d'air qui emporte l'eau volatilisée.

L'emploi des briquettes de lignite se vulgarise de plus en plus en Allemagne. Dans un rapport présenté au XI^e Congrès des fondeurs allemands, M^r Krumbriegel a montré que ces briquettes étaient couramment employées dans les fonderies. Leur teneur en eau n'est que de 12 à 13 p. 100, et leur pouvoir calorifique atteint 5 000 calories. Elles sont très recommandables pour le chauffage des chaudières,

ainsi que pour le chauffage direct des chambres de séchage, fours à adoucir et fours de goudronnage; on les emploie également au chauffage de fours transportables pour le séchage des moules de grandes dimensions; il faut pour ces fours, à égalité de temps, 50 p. 100 en plus de briquettes que de coke, mais le prix de ce dernier est de 100 à 150 fois plus élevé.

Enfin, les briquettes de lignite peuvent très bien être utilisées dans les gazogènes¹.

§ 3. — LA HOUILLE

On désigne sous le nom de houilles des variétés assez diverses de charbons fossiles, de formation plus ancienne et plus complètement transformés que les lignites, dont elles se séparent par une proportion de carbone plus forte, et une teneur en oxygène et en eau beaucoup plus faible. Elles ne présentent plus la structure fibreuse. Elles ne contiennent pas (du moins à l'état frais) de matières humiques colorant en brun les lessives alcalines, et elles ne donnent pas d'acide acétique à la distillation.

Nous étudierons plus loin avec plus de détails les classifications que l'on en a donné. Mais nous verrons de suite apparaître nettement trois grandes divisions : les charbons maigres ou charbons à gaz, les houilles grasses et les anthracites.

Caractères physiques. — COULEUR. — La couleur de la houille est noire, mais avec des teintes assez variables : les houilles riches en matières volatiles, les charbons à gaz, ont un aspect mat tirant sur le brun; les houilles grasses ont des reflets d'un noir brillant caractéristiques, tandis que les houilles anthraciteuses présentent une teinte plus ou moins grisâtre, vraisemblablement due à la petite proportion de pyrite de fer qu'elles contiennent toujours.

CASSURE. — La cassure des houilles présente aussi des différences suivant leurs qualités : les houilles grasses présentent une cassure conchoïdale, les fragments s'effritent d'ailleurs souvent assez facilement. Dans les anthracites les faces sont plus nettes, semblables à des clivages de cristaux; ces faces ne sont pas lisses, mais formées par la réunion d'un grand nombre de petites facettes. Les charbons bitumineux ont également une cassure nette, mais les faces sont lisses.

¹ *Rev. Métal.*, 7 bis, 243; 1910.

DURETÉ. — La dureté est beaucoup plus grande chez les anthracites et les charbons maigres que chez les houilles grasses.

TRANSPARENCE AUX RAYONS X. — Il résulte des expériences de M. Louis Benoist¹ que la transparence de la matière aux rayons X est une propriété atomique et qu'elle est d'autant plus grande que le poids atomique est plus faible. Le carbone sera donc facilement traversé par les rayons X, qui seront arrêtés au contraire par les gangues formées de silicates.

L'examen radiographique a ainsi permis à M. Courtiot de reconnaître très facilement les parties schisteuses au milieu des fragments de houille. On peut même doser approximativement la teneur en cendre dans les charbons homogènes en les réduisant en poussière fine, radiographiant cette poussière sous une certaine épaisseur et comparant la teinte obtenue avec celle que donnent des lames d'aluminium d'épaisseurs variables servant de repères.

DENSITÉ. — La densité des houilles est d'autant plus grande que leur teneur en carbone est plus élevée : les anthracites atteignent le chiffre de 1,40 à 1,50. Les houilles grasses n'ont guère que 1,30 et les charbons à gaz 1,25.

Le poids du mètre cube varie de 800 à 1 200 kilogrammes.

ASPECT DE LA FLAMME. — La flamme produite par les charbons à gaz est longue et fuligineuse. La fumée est moins grande avec les houilles grasses, mais la flamme est toujours très éclairante. Avec les anthracites, la flamme devient très courte et prend une teinte bleue due au soufre qui y est contenu à l'état de pyrite.

Propriétés chimiques. — **COMPOSITION.** — La teneur en carbone oscille de 75 à 95 p. 100. Nous verrons à propos de la classification des houilles qu'elle est caractéristique de chaque variété. Elle augmente régulièrement depuis les charbons à gaz jusqu'aux anthracites, en passant par les houilles grasses.

On considère aussi souvent dans une houille ce que l'on appelle le *carbone fixe*, c'est-à-dire la proportion de coke qui reste lors de la distillation pyrogénée. Cette proportion est toujours inférieure à la teneur centésimale en carbone puisque la distillation donne naissance à des gaz et vapeurs carburées ; elle varie d'ailleurs dans une

¹ C. R., 132, 324, 545, 727 ; 1911.

certaine mesure avec les conditions dans lesquelles s'est opérée la distillation.

Le rapport entre l'oxygène et l'azote d'une part et l'hydrogène d'autre part qui existent seuls ou combinés dans les gaz dégagés par distillation pyrogénée est également caractéristique. Il varie de 4, pour les charbons à gaz, à 0,5 pour les anthracites.

Le soufre existe dans toutes les houilles, à des états variables : soit sous forme de sulfates, principalement de gypse ; soit à l'état de pyrite de fer ; soit enfin combiné sous forme organique, provenant des plantes dont la décomposition a formé la houille. Sa teneur ne doit pas être trop élevée ; à partir de 3 p. 100, elle peut faire rejeter le charbon pour les emplois industriels.

Le phosphore, qui paraît provenir des spores des végétaux préhistoriques, varie de quelques dix-millièmes à 0,7 p. 100.

CENDRES. — Les cendres des houilles proviennent pour la majeure partie des matières argileuses ou schisteuses qui leur sont mélangées, tantôt de façon très irrégulière ou sous forme de couches stratifiées, tantôt disséminées dans toute la masse. Dans les premiers cas on peut réduire beaucoup la proportion des cendres par un triage convenable effectué, soit à la main pour les gros morceaux, soit par lavage au moyen d'un courant d'eau.

Les principaux éléments des cendres sont la silice, l'alumine, le fer et la chaux, auxquels s'adjoignent assez fréquemment la magnésie ou les alcalis, soude et potasse. Voici la composition de quelques cendres de houilles (d'après Babu) :

ORIGINE DES HOUILLES	SiO ²	Al ² O ³	Fe ² O ³	CaO	MgO	K ² O	Na ² O
La Grand Combe.	51,5	24,4	10,4	7,8	2,0	2,6	0,6
Tréllys.	49,0	29,0	7,3	8,2	2,5	2,35	0,5
Molières.	48,0	26,0	7,3	14,6	3,70	—	—
Aniche.	48,5	33,7	7,9	2,0	—	—	—
Aubin.	50,0	32,0	8,0	5,0	—	—	—
Dowlais.	24,1	20,8	16,0	9,4	9,7	—	—
	39,6	39,2	7,5	1,8	2,6	—	—
Newcastle.	44,6	26,4	16,0	3,6	0,6	—	—
	29,5	22,0	17,8	10,6	1,0	—	—
	61,0	35,0	1,2	1,5	0,1	—	—
Pensylvanie.	34,0	34,1	21,0	1,5	0,1	—	—
	28,4	17,0	27,0	11,2	—	—	—
Durham.	42,1	28,0	12,0	6,0	0,2	—	—

Les meilleures variétés de houilles renferment de 4 à 8 p. 100 de cendres, les qualités moyennes de 8 à 12 p. 100, mais on peut encore utiliser des charbons qui en renferment jusqu'à 30 et 40 p. 100, pourvu qu'elles soient peu fusibles.

FUSIBILITÉ DES CENDRES. — La fusibilité des cendres est en effet plus importante que leur proportion relative. Les cendres fusibles s'agglomèrent en produisant des mâchefers qui bouchent rapidement les grilles et arrêtent la combustion. Le silicate d'alumine pur ne fond guère que vers 1 800°, mais sa fusibilité est augmentée rapidement par la chaux, la magnésie et les alcalis, et aussi par l'oxyde de fer, et s'abaisse à 1 300 ou 1 400°; elle peut même tomber à 1 100°. Il est vrai que le point de fusion se relève quand les cendres sont presque exclusivement ferrugineuses.

Le fait d'avoir une cendre peu fusible augmente notablement la valeur d'une houille.

HUMIDITÉ. — La houille, contrairement au lignite, ne renferme qu'une quantité très faible d'eau de constitution, 2 à 3 p. 100 environ; exposée à l'air humide ou à la pluie, elle se charge d'eau hygroscopique et peut en absorber ainsi jusqu'à 10 et 20 p. 100, mais cette eau est facilement abandonnée par égouttage et exposition à l'air.

Constitution. — Les houilles, et plus généralement les charbons fossiles, ne sont évidemment pas des corps chimiquement définis, mais bien plutôt des mélanges extrêmement complexes de corps différents. La manière même dont elles se sont formées par décomposition lente des matières cellulosiques prouve que le carbone n'y est pas contenu à l'état libre, mais combiné avec les autres éléments. Malheureusement les essais faits jusqu'à ce jour pour tâcher d'isoler ces différentes combinaisons n'ont pas donné encore de résultats définitifs. Le problème est certainement difficile, car les molécules très condensées que l'on doit s'attendre à y trouver sont pour la plus grande partie insolubles dans les dissolvants usuels. Quant à l'emploi de la distillation, il est bien aléatoire, puisqu'on ne pourra jamais savoir si telle substance extraite par ce procédé existait réellement dans le charbon primitif ou si elle ne s'est pas formée par décomposition pyrogénée d'autres substances.

C'est donc l'emploi des dissolvants qui seul a pu donner quelques

indications. C'est ainsi que Donatti, en épuisant certaines houilles par le sulfure de carbone ou le chloroforme, a pu isoler de l'anthracène ou du chrysène. Ces corps n'existent pas dans la nature; leur présence dans la houille témoigne de la décomposition profonde éprouvée pendant la transformation géologique et qui doit être assimilable à une distillation pyrogénée sous pression ¹.

Bedson ² a pu extraire des houilles pulvérisées, par traitement à la pyridine à chaud, de 22 à 33 p. 100 d'une substance solide soluble dans ce solvant, dont le benzène permet de retirer deux combinaisons, l'une $C^{14}H^{18}O^2$ soluble dans l'éther, l'autre $C^{13}H^{20}O$, insoluble. Les mêmes houilles pulvérisées, traitées par le mélange oxydant d'acide chlorhydrique et de chlorate de potasse, fournissent les combinaisons chlorées $C^{38}H^{22}Cl^8O^{10}$, $C^{24}H^{14}Cl^8O^9$ et $C^{35}H^{38}Cl^8O^{20}$.

C. Hübner ³ a pu retirer d'un charbon bitumineux, par traitements convenables au benzène et à l'éther, différents constituants : un carbure $C^{23}H^{18}$ fusible à 52-53°; deux combinaisons cristallisées en aiguilles, $C^{16}H^{32}O$ fusible à 77°-78°,5 et $C^{12}H^{24}O$ fondant à 82-83°; enfin un acide amorphe $C^{38}H^{31}O^{13}S^2$, voisin des acides humiques, et un autre acide amorphe, brun, non sulfuré, fondant mal vers 100°.

Ces différentes recherches ⁴ prouvent surtout l'extrême complexité du problème : les diverses variétés de charbons se sont produits dans des conditions certainement différentes, souvent même peut-être tout à fait dissemblables; pour chaque charbon, formé à partir de substances très complexes déjà, la lente décomposition a dû créer une série de combinaisons presque illimitée : il suffit d'examiner la complexité des produits renfermés dans le goudron de houille pour avoir une idée de ce que peut renfermer la houille elle-même. Il est possible, cependant, que certains types de composés s'y trouvent en plus grandes proportions, et en expliquent les propriétés principales. Mais jusqu'à présent nous ne pouvons rien dire de certain sur leur existence.

Pouvoir agglomérant. — Toutes les variétés de houilles présentent

¹ *Chem. Zeit.*, **32**, 1271; 1908.

² *Chem. Ind.*, **27**, 147; 1908.

³ *Arch. Pharm.*, **244**, 196; 1906.

⁴ Tout récemment MM. A. Pictet et Ramsayer [*Chem. Zeitg.*, **35**, 865 et 907; 1911] ont extrait de la houille, au moyen du benzène bouillant ou par distillation sous pression réduite (10 mm.), de l'hexahydrofluorène $C^{13}H^{16}$ bouillant à 250° sous la pression atmosphérique.

la propriété de se ramollir plus ou moins par une élévation suffisante de température, vers 350-400° ; mais l'intensité de ce phénomène varie beaucoup suivant la variété considérée. Avec les houilles dites grasses, il se produit une fusion presque complète. C'est là une propriété qui peut être gênante dans certains cas mais qui dans d'autres est extrêmement précieuse : c'est grâce à elle que l'on obtient par distillation un coke compact formé par la soudure des fragments primitifs. De même elle est très importante pour la conduite des feux de forge.

Le pouvoir agglomérant d'une houille est donc en rapport avec la proportion de constituants fusibles qu'elle renferme. Comme la température à laquelle se produit le ramollissement est la même pour les diverses houilles, on est conduit à penser que ce constituant est également toujours le même, ou tout au moins qu'il s'agit de composés de constitution voisine.

Des recherches systématiques sur cette question ont été entreprises récemment par M. Boudouard. Elles ont montré que les houilles perdaient complètement leur pouvoir agglomérant quand on les oxydait, soit par une exposition prolongée à l'air à la température de 100°, soit par un réactif oxydant tel que l'acide azotique ; et que les houilles oxydées (phénomène d'ailleurs déjà connu depuis longtemps) renfermaient des produits humiques colorant la potasse en brun, tandis que les houilles primitives n'en contenaient pas.

Le pouvoir cokéfiant est dû par suite à une substance ou à un groupe de substances capables de s'oxyder pour se transformer en produits humiques. M. Boudouard pense que ces substances sont sinon des hydrates de carbone identiques à la cellulose végétale, du moins des corps analogues, bien que plus condensés ; car les produits humiques formés par oxydation sont tout à fait analogues à ceux obtenus artificiellement par l'action des acides sur le sucre, par exemple. Comme vérification, on constate que les houilles perdent complètement leur pouvoir agglomérant quand on les traite successivement par la potasse, par l'acide chlorhydrique et par la liqueur de Schweitzer, qui a la propriété de dissoudre la cellulose¹.

Oxydabilité. — On sait depuis longtemps que les houilles exposées à l'air s'échauffent spontanément, et peuvent même s'enflam-

¹ O. Boudouard, *Bull. Soc. Chim.*, (4), 5, 365, 572, 377, 380 ; 1909. Voyez aussi Fayol, *Bull. Ind. Min.*, 1879.

mer. Cet échauffement avait été attribué à l'oxydation de la pyrite. Mais les houilles non pyriteuses elles-mêmes s'oxydent et s'échauffent. Cependant l'oxydation de la pyrite est un fait très réel, et les houilles contenant de notables proportions de ce sulfure, tels que certains anthracites, sont plus que les autres sujettes à l'inflammation spontanée, les deux phénomènes se produisant en même temps.

L'échauffement des houilles non pyriteuses est dû à leur oxydation propre. Comme le pouvoir cokéfiant disparaît complètement chez les houilles oxydées, on est conduit à penser que l'oxydation se porte sinon exclusivement, du moins en grande partie sur le constituant agglomérant, constituant d'origine cellulosique selon l'hypothèse de Boudouard.

Cette oxydation conduit à de nombreuses conséquences : au point de vue de la variation de poids, elle occasionne d'abord une diminution due à la perte d'eau et de formène ; puis une augmentation, provenant de l'oxygène fixé ; finalement, l'oxydation continuant, on constate de nouveau une perte de poids qui peut atteindre 50 p. 100 au bout d'un temps suffisant.

En même temps on constate :

1° La perte totale du pouvoir agglomérant, ainsi que nous l'avons vu ;

2° Une diminution du pouvoir calorifique et éclairant par perte des gaz combustibles, qui peut atteindre 31 p. 100 en un mois (fig. 55) ;

3° Une diminution des sous-produits atteignant 50 p. 100 des produits ammoniacaux récupérables ; de plus le coke est inutilisable en métallurgie (fig. 56)¹.

On doit donc éviter soigneusement, autant qu'il est possible, de laisser s'oxyder les houilles à l'air. On y parvient en les emmagasinant sous forme de couches de faible épaisseur, ou mieux en les noyant complètement sous l'eau : on a ainsi construit des magasins noyés de 10 000 tonnes à Chicago ; la compagnie du gaz de Stettin en a construit plus récemment de 20 000 tonnes le long du quai de l'Oder².

Suivant des théories récentes, cette oxydation ne pourrait se produire que grâce à l'action de bactéries spéciales qui amorceraient la réaction ; on pourrait donc l'empêcher par l'usage des antiseptiques, lait de chaux ou créosote par exemple.

Enfin dans la préparation et la dessiccation des échantillons de

¹ Fayol, *loc. cit.* ; Lécivain, *Revue G^le Chim.*, **13**, 423, 1910 ; Kurt Seidl, *Glück.*, 1909.

² *Le Gaz*, **55**, 4 et 33 ; 1911.

houille destinés à l'analyse, on évitera soigneusement le séjour à l'étuve en vase ouvert, qui pourrait fausser comme on le voit complètement les résultats (beaucoup d'analyses anciennes sont complè-

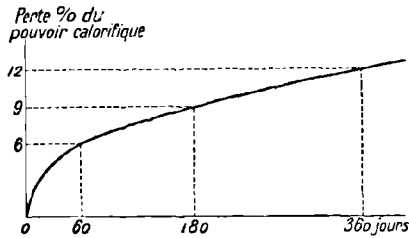


Fig. 55.

tement erronées de ce chef et indiquent une proportion d'oxygène trop considérable).

Rappelons que la houille oxydée se reconnaît très facilement à la

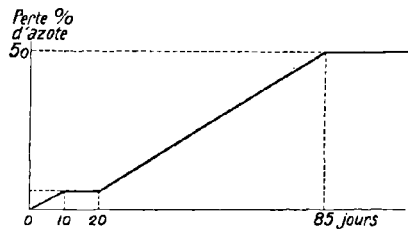


Fig. 56.

coloration brune qu'elle communique à une lessive de potasse, par suite de la dissolution des produits humiques formés.

Distillation pyrogénée. — La houille, soumise à la distillation pyrogénée, dégage des gaz et des produits volatils; ce dégagement gazeux commence vers 450°, température où se produit aussi le ramollissement; il est terminé vers 900° pour les charbons gras, et à 1100° pour les anthracites. A basse température, les gaz sont principalement formés de carbures d'hydrogène, surtout d'éthane et d'homologues supérieurs; mais leur dégagement s'arrête vers 700° pour faire place à de l'hydrogène. La composition des produits volatils est d'ailleurs différente suivant que la distillation a été conduite lentement ou que le charbon a été porté brusquement au rouge vif; dans le second cas la proportion des gaz combustibles est notablement plus

élevée, tandis que la quantité des goudrons est plus faible. Suivant Burgess et Wheeler, tous les charbons renfermeraient un composé se décomposant vers 700° en donnant de l'hydrogène, ou à plus basse température en produisant des carbures forméniques¹.

Pouvoir calorifique. — On a vu dans la première partie de cet ouvrage comment se détermine le pouvoir calorifique des houilles, au moyen de la bombe de Mahler. C'est là le seul procédé exact, et son exécution est très facile.

Rappelons cependant que la formule de Goutal permet, comme première approximation, de calculer une valeur approchée du pouvoir calorifique connaissant simplement la teneur en cendres et en matières volatiles. L'écart entre le nombre calculé et la valeur expérimentale déterminée avec l'obus Mahler ne dépasse pas en général 2 p. 100 sauf pour les qualités extrêmes, anthracites et houilles très sèches ou lignites.

La formule de Goutal montre que le pouvoir calorifique des houilles varie avec le poids de matières volatiles et présente vers 25 p. 100 un maximum égal à 8 750 calories.

Classification des houilles. — La classification la plus généralement suivie est celle due à Gruner, qui est basée sur la teneur en matières volatiles et sur la manière dont se comportent les houilles à la combustion, et représente assez bien en même temps leur formation géologique. Elle divise les houilles en six catégories :

- 1° Les houilles sèches à longue flamme ;
- 2° Les houilles grasses à longue flamme ;
- 3° Les houilles grasses proprement dites ;
- 4° Les houilles grasses à courte flamme ;
- 5° Les houilles maigres à courte flamme, ou anthraciteuses ;
- 6° Les anthracites.

Le tableau de la page 311 justifie cette classification.

La classification admise par l'Administration française des Mines ne comprend que cinq catégories :

- Houille sèche à longue flamme ;
- Houille grasse à longue flamme ;
- Houille grasse maréchale ;
- Houille maigre à courte flamme ;
- Anthracite.

¹ *Chem. Soc.*, 97, 1917 ; 1910.

En Angleterre on n'admet que trois types :

Charbons bitumineux } non collants.
 } ou collants.

Charbons à vapeur.

Anthracite.

Nous allons passer en revue rapidement les différents types de la classification de Gruner :

	COMPOSITION déduction faite des cendres et de l'eau.			$\frac{O + Az}{H}$	EAU	COKE	NATURE ET ASPECT DU COKE
	C	H	O + Az				
	Houille sèche à longue flamme	77,5	5,5	17,0	4-3	2,4	
Houille grasse à longue flamme	82,0	5,5	12,5	3-2	2,4	60-68	Aggloméré, le plus souvent fondu.
Houille grasse propre- ment dite	86,5	5,0	8,5	2-1	2,4	68-74	Fondu et boursou- flé.
Houille grasse à courte flamme	89,5	4,5	6,0	1	2,4	74-82	Fondu et com- pact.
Houille maigre anthra- citeuse	92,0	3,0	5,0	1	2,4	82-90	Pulvérulent ou fritté.
Anthracite	94,0	2,0	4,0	1	2,4	90-92	Pulvérulent.

1° HOUILLES SÈCHES A LONGUE FLAMME. — Ce sont les houilles qui se rapprochent le plus des lignites; elles sont dures, peu friables, mais se délitent assez facilement à l'air; leur couleur est noire, terne, ou d'un brun foncé. Leur cassure est lamelleuse ou conchoïdale; leur densité est faible, 1,25.

Elles s'allument facilement et brûlent avec une longue flamme sans se ramollir sensiblement et sans former de mâchefers. Elles ne peuvent servir à faire du coke, car elles ne fondent ni ne s'agglomèrent à la distillation.

Leur pouvoir calorifique est en moyenne (pour les houilles pures) de 8000 calories, et leur pouvoir évaporatoire de 6 à 6,25 kg.

Ces houilles se trouvent principalement en Belgique, où on les désigne sous le nom de flénus; en Allemagne, dans les couches supérieures des bassins de la Saar et de la Haute Silésie; en Angleterre et en Écosse. D'ailleurs toutes passent graduellement aux houilles grasses à longue flamme quand on pénètre plus profondément dans

l'épaisseur des couches; on trouve de ces houilles de transition en France, dans le bassin de l'Allier principalement.

2° **HOUILLES GRASSES A LONGUE FLAMME.** — Ces houilles se rencontrent en France dans le bassin de Saint-Étienne et dans le Pas-de-Calais, et surtout en Angleterre, à Newcastle, et aux États-Unis, en Pensylvanie; on en trouve également en Belgique, à Mons, mais elles se rapprochent alors beaucoup des houilles grasses proprement dites.

Les houilles grasses à longue flamme sont franchement noires, à cassure lamelleuse; elles sont moins dures et plus friables que les houilles sèches, et un peu plus lourdes (densité 1,30).

Elles s'enflamment facilement et brûlent rapidement en donnant une grande flamme et beaucoup de fumée. Elles fondent au feu et donnent à la distillation un coke bien aggloméré, plus ou moins poreux, en même temps que les gaz dégagés ont un grand pouvoir éclairant; aussi sont-elles recherchées pour la fabrication du gaz d'éclairage, bien que leur rendement en matières volatiles soit plus faible que celui des houilles sèches.

Leur pouvoir calorifique est en moyenne de 8 500 calories et leur pouvoir évaporatoire de 7 à 7,5 kg. suivant leur teneur en cendres,

Cannel-coal. — On désigne sous ce nom une houille très riche en produits volatils, et donnant à la distillation des gaz très carburés et très éclairants. On la rencontre principalement dans le Lancashire et en Écosse; on en trouve en France aux mines de Montrambert (Loire) et en Espagne aux mines de Teberga (Asturies). Dans ces mines la couche de cannel-coal, de 30 centimètres d'épaisseur, est directement superposée à la couche de houille, montrant la similitude d'origine.

La distillation des cannels donne de 280 à 420 m³ de gaz par tonne. Voici d'après Lozé la composition de quelques-uns de ces charbons.

	LESMAHAGO	BOGHEAD	CAPELDRAC	LOCHGELLY
Matières volatiles	49,60	68,40	54,50	33,50
Coke.	50,40	31,60	43,50	66,50
Cendres.	9,10	22,80	10,50	13,10
Soufre dans le charbon.	2,23	0,53	0,65	0,75
— — le coke	1,14	0,08	0,20	0,25
— — les matières volatiles.	1,09	0,45	0,45	0,50
Cendres dans le coke.	18,05	70,25	23,07	29,70

3° **HOUILLES GRASSES PROPREMENT DITES.** — On en trouve de nombreux gisements en France, dans le Nord, dans le Pas-de-Calais et dans la Loire, et en Belgique, dans les bassins de Liège et de Mons; on les rencontre également en Allemagne dans le bassin de la Ruhr, et en Angleterre dans le bassin de Bristol et dans le Yorkshire.

Ces houilles possèdent une couleur d'un noir brillant; elles sont moins dures et plus friables que les houilles à longue flamme; leur densité est d'environ 1,30.

Elles fondent complètement sous l'action de la chaleur, et sont tout à fait propres au travail de la forge, car elles forment au-dessus des pièces chauffées une voûte qui concentre la chaleur et permet d'atteindre une haute température. Aussi les désigne-t-on couramment sous le nom de houilles grasses maréchales ou charbons de forge.

Elles peuvent remplacer les houilles grasses à longue flamme pour la préparation des gaz d'éclairage, car si leur rendement est un peu inférieur, le gaz produit est un peu plus éclairant; de plus, leur coke est d'excellente qualité.

Le pouvoir calorifique des variétés pures est en moyenne de 8800 calories, et le pouvoir évaporatoire de 9 kilogrammes.

4° **HOUILLES GRASSES A COURTE FLAMME.** — Ce sont surtout les houilles du Nord de la France, à Aniche, Béthune, Nœux, Lens, et aussi du centre à Firminy, à Carmaux. En Belgique, on les trouve à Charleroi; en Angleterre, à Cardiff. On les exploite également en Allemagne, dans le bassin de Sarrebrück, en Westphalie et dans la Haute Sibérie; en Russie, dans le bassin du Donetz; en Amérique et en Australie.

Ces houilles présentent un éclat moins vif que celles de la variété précédente, elles sont beaucoup plus friables; leur poids spécifique est de 1,30-1,35.

Elles sont assez difficiles à enflammer, et brûlent avec une flamme courte, peu éclairante, souvent bleue à la base. Elles se ramollissent beaucoup encore à la distillation, et donnent un coke compact bien aggloméré, et avec un bon rendement car leur teneur en matières volatiles est déjà assez faible. Aussi constituent-elles les *charbons à coke* par excellence, surtout les qualités moyennes à 20-22 p. 100 de matières volatiles. Si cette proportion diminue notablement, le coke n'est plus aussi bien aggloméré.

Ces houilles s'oxydent très facilement à l'air, et nous savons que

dans ce cas elles perdent leur pouvoir agglomérant et ne peuvent plus servir à la fabrication du coke.

Ce sont celles dont le pouvoir calorifique est le plus élevé : il est d'environ 8900 calories; le pouvoir évaporatoire atteint 9,25 kg. pour les houilles pures et 8,93 pour les houilles marchandes.

5° HOUILLES MAIGRES ANTHRACITEUSES. — On les rencontre en France dans les bassins du Nord et du Pas-de-Calais; en Belgique à Charleroi; en Angleterre, à l'Ouest du pays de Galles, et dans la partie Sud du bassin de Pensylvanie aux États-Unis.

On les divise parfois en deux catégories : les charbons demi-gras et les charbons quart-gras, les premiers tenant de 18 à 14 p. 100 de matières volatiles, les seconds de 14 à 10 p. 100.

Ces houilles sont ternes; les charbons quart-gras sont moins friables que les demi-gras. Le poids spécifique est voisin de 1,40.

Elles s'enflamment difficilement, et brûlent avec une flamme très courte, sans presque donner de fumée, et sans se ramollir sensiblement; mais elles décrépitent et se brisent en menus morceaux; aussi les emploie-t-on de préférence dans les gazogènes et pour la fabrication des agglomérés.

Leur pouvoir calorifique est de 8700 calories en moyenne; le pouvoir évaporatoire des houilles à 10 p. 100 de cendres est d'environ 8 kilogrammes.

Ces houilles sont quelquefois désignées sous le nom d'anhracites, bien que cette qualification revienne à la classe suivante.

6° ANTHRACITES. — Ce sont les houilles les plus anciennes et les plus complètement transformées, chez lesquelles la proportion de carbone est la plus forte. On les rencontre surtout en Angleterre et aux États-Unis. En France il en existe un gisement d'excellente qualité à La Mure, dans l'Isère.

La couleur des anhracites est noire ou tire souvent sur le gris. Leur cassure est très nette; leur dureté en général est assez grande, quelquefois considérable. Il est à remarquer que la friabilité du charbon augmente d'abord en suivant la classification de Gruner, puis diminue pour les deux derniers termes. En sorte que ce sont les charbons les plus collants qui sont les moins durs et les plus friables.

D'ailleurs tous les anhracites s'effritent peu à peu à l'air. Leur densité varie de 1,40 à 1,75 quand ils renferment beaucoup de cendres.

L'anhracite s'allume difficilement et ne brûle bien qu'avec un tirage suffisant et une masse assez grande de combustible. Il ne se produit ni agglutination, ni fumée. La flamme est courte et bleue.

Le pouvoir calorifique est d'environ 8 300 calories; le pouvoir évaporatoire des bonnes variétés atteint 9 kilogrammes.

L'anhracite peut remplacer le coke dans les hauts fourneaux, pourvu qu'il ne se délite pas trop; on s'en sert également pour la fusion de l'acier au creuset. Enfin, c'est le combustible par excellence des calorifères et des poêles à combustion lente.

UTILISATION DES DÉCHETS DE HOUILLE

Nous ne parlerons pas du triage et du lavage des houilles, les principes et les appareils relatifs à ces opérations devant être étudiés dans un autre ouvrage de cette collection; nous n'envisagerons ici que les manipulations ayant pour but de permettre l'utilisation des déchets et des poussières de houille.

On peut utiliser ces déchets de trois manières différentes: soit tels quels, sous forme de poussières dans des foyers spéciaux, mais il est nécessaire auparavant de les sécher parfaitement; soit après les avoir agglomérés et comprimés en briquettes, toujours après un séchage préalable; soit enfin en les transformant en coke. Nous étudierons plus loin la carbonisation, et nous ne parlerons ici que du séchage et de l'agglomération.

Séchage des houilles. — Le séchage des houilles s'effectue soit dans des fours fixes ou mobiles, soit dans des sécheurs. Parmi les premiers nous citerons le four de Molières qui est un four tournant horizontal chauffé directement par un foyer placé à l'une de ses extrémités; les gaz du foyer traversent le four dans sa longueur pour sortir à l'autre extrémité par une cheminée. Le charbon est poussé en sens inverse à l'aide de vis sans fin.

On emploie aujourd'hui plus volontiers les sécheurs, qui peuvent se diviser en trois types: les sécheurs à tubes, à plateaux et à trombels. Le chauffage est produit par les gaz d'un foyer, par de l'air chaud ou par la vapeur. Toutefois, ce dernier mode de chauffage est de moins en moins utilisé, comme trop onéreux.

Les sécheurs à tubes comprennent un faisceau de tubes parallèles horizontaux ou inclinés. Le poussier de charbon circule soit à l'intérieur des tubes, soit à l'extérieur, pendant que l'agent de chauffage,

air chaud ou vapeur, circule de l'autre côté de la paroi. Nous représentons ici (fig. 57) le sécheur Mertens, qui est chauffé à la vapeur.

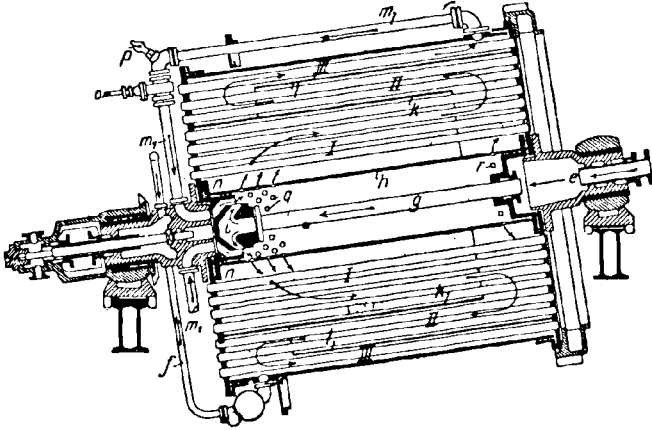


Fig. 57. — Sécheur Mertens.

Les sécheurs à plateaux sont formés d'une série de plateaux horizontaux superposés, fixes ou pouvant tourner autour d'un axe vertical commun. Ce dernier dispositif est réalisé par exemple dans

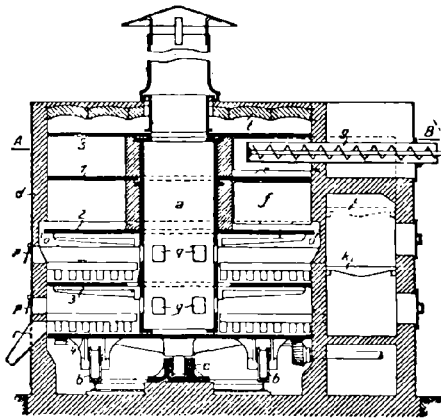


Fig. 58. — Sécheur Ostertag, de Winterthur.

le sécheur Ostertag, de Winterthur (fig. 58) dans lequel le charbon est desséché, sur les deux plateaux supérieurs, par de l'air chaud qui circule dans le même sens que lui, tandis que les deux plateaux inférieurs sont parcourus par un courant d'air froid qui

termine la dessiccation en même temps qu'il ramène le charbon à la température ordinaire.

Les sècheurs à trommels comportent un tambour cylindrique

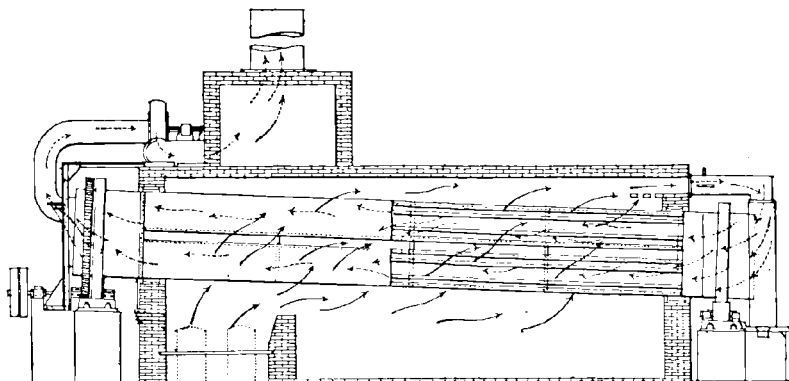


Fig. 59. — Sècheur de la Bartlett and Snow Co.

incliné, tournant autour de son axe; des cloisons ou des bras sont disposés à l'intérieur de manière à brasser la poussière de charbon pendant son parcours, et à renouveler sans cesse son contact avec

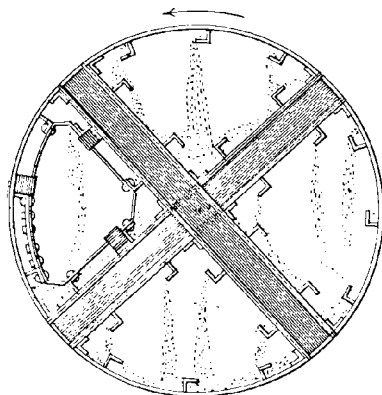


Fig. 60. — Coupe perpendiculaire à l'axe.

l'air chaud qui traverse le cylindre. Nous donnons ici (fig. 59) la figure du sècheur Bartlett et Snow de Cleveland. La figure 60 indique comment l'on obtient un brassage énergique de la poussière dans le courant de gaz chaud venant du foyer¹.

¹ Jordan, *Glück.*, **46**, 607; 1910. — W.-D. Ennis, *Eng. Mag.*, **34**, 463; 1908. — *Rev. Mét.*, **5 bis**, 751; 1908.

Fabrication des agglomérés. — L'agglomération de la houille s'obtient au moyen d'un ciment agglomérant convenable, goudron ou brai, et d'une compression énergique à l'aide d'une presse spéciale donnant à la matière la forme de *briquettes* ou de *boulets* ovoïdes.

C'est en France que ce procédé fut inauguré au milieu du siècle dernier. La première usine fut installée à Bérard, près Saint-Etienne, par MM. Ferrand et Marsais. Cette industrie est devenue par la suite extrêmement prospère, surtout en France, en Belgique et dans le bassin de Westphalie où les charbons sont assez friables et occasionnent beaucoup de déchets inutilisables dans d'autres conditions.

Les charbons les plus propres à l'agglomération sont les demi-gras, contenant de 14 à 18 p. 100 de matières volatiles. Les houilles grasses ou les houilles sèches à longue flamme peuvent également convenir, mais elles ont l'inconvénient de donner beaucoup de fumée, inconvénient que l'on essaie d'amoindrir en diminuant autant que possible la proportion d'agglomérant. Quant aux houilles très maigres, contenant moins de 12 p. 100 de matières volatiles, elles se moulent difficilement et tombent en poussière sur la grille du foyer si elles ne contiennent pas une proportion très élevée d'agglomérant; on obtient de meilleurs résultats en leur mélangeant des houilles grasses, mais les briquettes obtenues ne valent jamais celles de charbon demi-gras.

On prépare aussi des agglomérés en mélangeant à la houille des lignites ou de la tourbe.

SUBSTANCES AGGLOMÉRANTES. — Le goudron brut de houille est la première substance que l'on ait eu l'idée d'employer pour l'agglomération. Il est liquide à la température ordinaire, et permet par suite d'opérer le mélange à froid. Mais il a l'inconvénient de produire beaucoup de fumée; aussi est-on obligé de soumettre à une calcination préalable les briquettes au goudron, afin d'en éliminer les substances les plus volatiles.

Le goudron n'est plus guère employé aujourd'hui, on le remplace par le *brai*.

On désigne sous ce nom le résidu de la distillation incomplète du goudron, après qu'on a éliminé les portions les plus volatiles. On distingue le *brai gras* et le *brai sec*. Le premier s'obtient en arrêtant la distillation à 200°, aux huiles d'antracène; pour obtenir le

second, on laisse passer une partie de ces huiles, environ 5 p. 100, jusqu'à 220° environ.

Le brai gras est solide à la température ordinaire, mais se ramollit complètement vers 50°. Il produit une bonne agglomération, dans la proportion de 7 à 8 p. 100, mais donne encore beaucoup de fumée. Le brai sec au contraire, tout en présentant tous les avantages du brai gras, ne donne sensiblement pas de fumée; aussi est-il de plus en plus employé. Il se ramollit à 70° et fond vers 100°.

On emploie aussi comme agglomérant la terre glaise, principalement pour les boulets destinés au chauffage domestique.

On a essayé également d'utiliser l'amidon ou les farines avariées, le silicate de soude, la mélasse, le ciment magnésien (magnésie et chlorure de magnésium), le mazout ou résidu de distillation des pétroles — ce dernier paraît devoir donner de bons résultats.

On a aussi tenté de réaliser l'agglomération sans l'aide de substance étrangère, au moyen d'une pression suffisante, comme pour les lignites, mais sans obtenir de résultats satisfaisants.

PRÉPARATION DES AGGLOMÉRÉS. — Cette préparation comprend successivement : le broyage, le lavage et le séchage du charbon; le broyage et la fusion du brai; le malaxage et le chauffage de la pâte; enfin le moulage.

La houille doit d'abord être broyée et triée de manière à assurer aux grains une grosseur uniforme, qui peut être d'autant plus considérable que la houille est plus dure. Avec les houilles très friables, on doit augmenter beaucoup la finesse des grains, mais il faut dans ce cas augmenter également la proportion de brai à ajouter pour l'agglomération.

Le broyage est généralement aujourd'hui suivi d'un lavage, puis d'un égouttage et d'un séchage.

D'autre part le brai doit être également broyé avant d'être mélangé au charbon. On se sert dans ce but d'un appareil à noix. L'emploi des meules tournant sur une aire en fonte a dû être abandonné. Le broyage du brai doit naturellement s'effectuer à une température aussi basse que possible afin d'éviter son ramollissement : on placera les broyeurs à l'ombre et à l'abri du rayonnement des fours ou des courants d'air chaud. Quelquefois pendant les fortes chaleurs le brai est trop mou pour que le broyage puisse se faire dans de bonnes conditions; on le mélange dans ce cas à la moitié de son poids de houille pulvérisée avant de l'envoyer dans le broyeur.

On peut se dispenser d'ailleurs de cette opération du broyage en additionnant le brai sec d'une certaine quantité de goudron à chaud, de manière à obtenir une masse fluide qu'on puisse facilement mélanger à la houille. Il est bon de prendre du goudron déjà débarrassé par distillation de ses huiles les plus légères.

Le mélange du charbon avec le brai pulvérisé ou fondu doit être effectué dans des proportions invariables. On emploie à cet effet, soit le dosage à la main pour des petites installations, soit des chaînes à godets.

Le mélange convenablement dosé passe ensuite dans un malaxeur qui lui donnera l'homogénéité nécessaire avant d'être soumis à la compression. Cet appareil est constitué par des cylindres verticaux en tôle dans lesquels le mélange circule de haut en bas, en même temps qu'il est énergiquement brassé par des bras horizontaux fixés sur un arbre tournant. Le chauffage est obtenu par injection directe de vapeur dans la pâte; mais pour éviter que cette vapeur, en se condensant, n'augmente trop l'humidité de la masse, on la surchauffe préalablement à un degré convenable.

Au lieu des malaxeurs verticaux, on peut également employer des cuves horizontales demi-cylindriques, dans lesquelles la pâte est poussée par une vis sans fin, en même temps qu'elle est chauffée par injection de vapeur. L'évaporation qui se produit à la surface libre de la pâte s'oppose à ce qu'elle se charge d'une trop grande quantité d'eau.

Pour les pâtes très humides on remplace les malaxeurs par des fours dans lesquels le mélange est chauffé par un foyer extérieur, en même temps qu'il est brassé par des agitateurs mécaniques; par exemple le four Biérix, dont la sole a la forme d'une plate-forme tournante montée sur un arbre vertical. Il est chauffé par les gaz chauds issus d'un foyer latéral. Le mélange en sort à la température de 95°.

Enfin la pâte doit être moulée au moyen d'une compression énergétique. On emploie dans ce but des presses appartenant à une infinité de modèles, appartenant à différents systèmes: tantôt elles comportent deux roues tangentielles, portant sur leurs jantes des pleins ou des creux se correspondant, de manière à réaliser un moule, tantôt ce sont des moules véritables, à pression hydraulique ou à vapeur; tantôt la pâte est comprimée dans un cylindre dont elle sort sous forme d'un boudin continu, et qu'un couteau coupe en tronçons de longueurs égales. On trouvera dans l'ouvrage sur *Les combustibles*

de MM. Colomer et Lordier, auquel nous avons emprunté la plupart des détails qui précèdent, la description d'un grand nombre de modèles.

AVANTAGES DES AGGLOMÉRÉS. — Non seulement la fabrication des agglomérés est intéressante en ce qu'elle permet l'utilisation de poussières dont la valeur serait beaucoup plus faible, mais encore elle fournit à l'industrie un combustible qui dans certains cas est préféré à la houille : les briquettes présentent en effet sur la houille l'avantage d'économiser beaucoup de place (20 p. 100 au moins) puisqu'elles peuvent être alignées les unes à côté des autres sans vides intermédiaires ; de donner beaucoup moins de poussières, et d'avoir une combustion facile et régulière, n'exigeant pas un chauffeur très exercé. Aussi sont-elles de plus en plus employées pour la navigation et pour le chauffage domestique.

B. — LES COMBUSTIBLES SOLIDES ARTIFICIELS

§ 1. — CHARBON DE BOIS

Le bois, soumis en vase clos à l'action de la chaleur, ne tarde pas à se décomposer. Dès la température de 140°, la transformation commence, caractérisée par le brunissement de la fibre et le dégagement de gaz. La teneur en carbone du résidu augmente, à mesure que la température s'élève, en même temps que sa couleur se fonce graduellement, pendant que les éléments volatils, oxygène, hydrogène et azote, diminuent peu à peu, expulsés à l'état gazeux avec une partie du carbone. Il se produit en définitive, de même que dans la transformation de la cellulose en tourbe et en houille, une dégradation continue de la matière organique, dont le dernier terme, en dehors des produits gazeux, serait le carbone pur. Mais cet état limite ne se trouve jamais atteint, et ce que l'on appelle charbon de bois en diffère d'autant plus qu'il a été préparé à une température plus basse. On s'en aperçoit immédiatement à la couleur du produit obtenu, qui, si l'on s'arrête à 250-270°, est *roux* et ne devient franchement noir qu'au delà de 400°. On s'en rend mieux compte en déterminant la proportion de matière volatile que contient le charbon préparé à différentes températures. On trouve ainsi¹ que la proportion de matières volatiles contenues dans le charbon de bois de bourdaine est

Pour un charbon préparé à 150° égale au poids du charbon ;	
— — 250° égale à la moitié du poids du charbon ;	
— — 300° égale au 1/3 ;	
— — 350° — au 1/7 ;	
— — 400° — au 1/20 ;	
— — 450° — au 1/100 ;	

¹ Violette, *Ann. Chim. Phys.*, (3), **23**, 476; 1848 et **32**, 322; 1851.

Voici d'ailleurs les analyses effectuées sur ces charbons :

TEMPÉRATURE de la CARBONISATION.	COMPOSITION CENTÉSIMALE DU CHARBON OBTENU			
	C	H	O + Az par différence.	Cendres.
150	47,51	6,12	46,29	0,08
160	47,60	6,06	46,27	0,08
170	47,77	6,19	45,93	0,09
180	48,93	5,84	45,12	0,12
190	50,61	5,11	44,06	0,22
200	51,81	3,99	43,98	0,23
210	53,37	4,90	41,54	0,20
220	54,57	4,15	41,39	0,22
230	57,14	5,50	37,05	0,31
240	61,30	5,50	32,70	0,51
250	65,58	4,81	28,97	0,63
260	67,89	5,04	26,49	0,56
270	70,45	4,64	24,19	0,85
280	72,64	4,70	22,09	0,57
290	72,49	4,98	21,93	0,61
300	73,23	4,25	21,96	0,57
310	73,63	3,83	21,81	0,74
320	73,57	4,83	21,09	0,52
330	73,55	4,63	21,33	0,48
340	75,20	4,40	19,96	0,48
350	76,64	4,13	18,44	0,62
432	81,97	2,29	14,15	1,60
1 020	83,29	1,70	13,79	1,22
1 110	88,14	1,41	9,26	1,20
1 350	90,81	1,58	6,49	1,15
1 500	94,57	0,74	3,84	0,66
au-dessus de 1 500	96,52	0,62	0,94	1,95

Comme une partie du carbone se volatilise avec l'hydrogène et l'oxygène sous forme de composés organiques, il en résulte que le rendement en charbon est d'autant plus faible que la température de carbonisation est plus élevée, c'est-à-dire que le charbon obtenu est plus pur. Violette a ainsi trouvé que le poids de carbone volatilisé est :

- A 200° égal au 1/5 du poids du charbon restant ;
- A 250° égal à la moitié du poids du charbon restant ;
- A 300-350° égal au poids du charbon restant ;
- A 1 500° égal au double du poids du charbon restant.

Ces chiffres n'ont d'ailleurs qu'une valeur comparative, car le rendement en charbon dépend dans une très large mesure de la vitesse de distillation. Il varie par exemple de 15 p. 100 pour une distillation

rapide à 25 p. 100 pour une carbonisation lente. Cette variation s'explique facilement : Les premiers produits volatils dégagés sous l'action d'une élévation graduelle de température renferment principalement de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau. Si la carbonisation est menée très rapidement, ces gaz se trouvant en contact avec du charbon incandescent sont décomposés à son contact, l'acide carbonique en oxyde de carbone, en volatilissant son propre poids de charbon, la vapeur d'eau en oxyde de carbone et hydrogène, ce qui entraîne une perte presque aussi considérable.

Il en résulte que l'on doit toujours chercher, afin d'obtenir un meilleur rendement, à conduire la carbonisation le plus lentement possible et à la température la plus basse possible ; et que l'on doit éviter avec le plus grand soin de mettre en contact avec le charbon incandescent les vapeurs dégagées pendant l'opération.

Propriétés du charbon de bois. — Composition. — Nous venons de voir que le charbon de bois renferme toujours, à côté du carbone, des matières volatiles, en proportions variables suivant les conditions dans lesquelles s'est effectuée la carbonisation. L'essence du bois influe également, comme on peut le penser, sur cette composition. On peut cependant prendre comme moyenne 10 p. 100 de matières volatiles et 2 à 3 p. 100 de cendres. En outre le charbon est très hygroscopique et contient normalement une proportion assez élevée d'humidité, 8 p. 100 en moyenne.

Voici un tableau indiquant, d'après Colomer et Lordier, les variations de composition du charbon suivant l'essence du bois :

BOIS soumis à la carbonisation.	C	H	O + Az	CENDRES
Bourdaine.	73,24	4,25	21,96	0,55
Bouleau.	71,15	4,55	23,55	0,75
Buis.	70,50	3,75	25,10	0,65
Frêne.	70,40	4,55	24,37	0,68
Erable.	70,05	4,60	24,90	0,45
Cornouiller.	69,05	3,85	26,49	0,61
Charme.	68,85	4,15	26,38	0,62
Peuplier.	68,75	4,85	25,54	0,86
Houx.	68,50	4,75	25,89	0,86
Tremble.	68,15	5,50	25,73	0,62
Chêne.	67,42	4,10	28,48	0,20
Orme.	66,85	4,67	28,18	0,30

DENSITÉ. — La densité réelle du charbon de bois réduit en poudre est supérieure à l'unité, et d'autant plus élevée que le charbon a été préparé à plus haute température. Elle varie, d'après Violette, de 1,5 à 2 pour des charbons préparés de 150° à 1500°. Mais le charbon de bois est très poreux, et contient même un grand nombre de vides et de fissures qui font que sa densité apparente est bien inférieure à l'unité, et oscille de 0,20 à 0,50 suivant l'essence du bois, les bois résineux et les bois blancs donnant les charbons les plus légers, les bois durs donnant les plus lourds. Le poids du mètre cube sera proportionnellement encore plus faible, en raison des vides existant entre les morceaux de charbon. Il oscille, selon Grüner, de 125 à 240 kilogrammes, suivant les essences.

COULEUR. — Les charbons préparés de 270 à 300° sont d'un brun foncé ; ils laissent une trace brune sur le papier, d'où leur nom de *charbons roux*. Ces charbons étaient préparés autrefois spécialement pour la fabrication de la poudre. Ils ne sont plus guère utilisés depuis le développement des explosifs nitrés.

A partir de 350° les charbons sont noirs.

INFLAMMABILITÉ. — Le charbon de bois est d'autant plus inflammable qu'il a été préparé à plus basse température ; préparé entre 260 et 280°, il s'enflamme, d'après Violette, entre 340 et 360° ; préparé à 432°, il s'enflamme vers 400° ; préparé entre 1 000-1 500°, il ne s'enflamme plus qu'entre 600 et 800°. De plus le charbon préparé à basse température continue à brûler très facilement à l'air, tandis que le charbon calciné s'éteint au contraire facilement. Nous trouvons donc encore ici de nouvelles raisons imposant en pratique l'obligation d'effectuer la carbonisation à basse température.

POUVOIR CALORIFIQUE. — Le pouvoir calorifique du charbon de bois est d'environ 8 000 calories.

PRÉPARATION DU CHARBON DE BOIS

On peut effectuer de trois manières différentes la carbonisation du bois : en meules, en fours ou en cylindres. Dans les deux premiers procédés, on sacrifie une partie du bois dont la combustion produit la chaleur nécessaire à la décomposition ; dans le procédé des cylindres on emploie un foyer extérieur.

Carbonisation en meules. — MEULES VERTICALES FRANÇAISES. — La carbonisation en meules se fait pendant la belle saison, sur le terrain de la coupe ou à proximité. On choisit (fig. 61) une aire plane A, on la défriche et la nivelle soigneusement de manière qu'elle aille en s'élevant légèrement du périmètre vers le centre, où l'on plante verticalement dans le sol trois perches ou *mâts* que l'on réunit par des liens en branchages, de manière à former une cheminée rem-

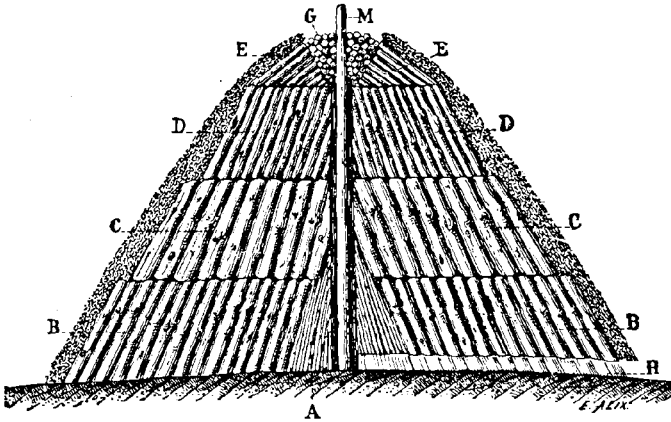


Fig. 61.

plie de brindilles et de feuilles sèches, ou de fumerons provenant d'une opération précédente. Puis on entoure la base de la cheminée de menu bois bien sec, s'appuyant sur elle de manière à former une sorte de cône de 1 mètre à 1,50 m. de diamètre, qui fournira par sa combustion la chaleur nécessaire à la carbonisation. Enfin tout autour on dispose une première assise de bûches B, inclinées à 45°, et reposant sur le sol par leur extrémité la plus large. Ces bûches ont 1 mètre de longueur au maximum, et doivent être tassées autant que possible les unes contre les autres de manière à éviter les vides.

Par-dessus cette première assise, on en dispose une autre C rangée de manière analogue, et qu'on appelle *éclisse*; c'est elle qui fournira le meilleur charbon. Enfin on dispose encore généralement une troisième et quelquefois même une quatrième assise, la dernière, appelée *chapeau*, pouvant être constituée par des rondins placés horizontalement, afin de donner à la meule une forme plus arrondie.

On recouvre ensuite la meule d'une double couverture, la pre-

mière de gazon, de bruyère ou de mousse, la deuxième de terre molle mélangée de poussier, que l'on tasse fortement en la battant au moyen d'une pelle. Cette couverture repose généralement à la base sur un petit mur en pierres sèches de 20 centimètres de hauteur environ, qui laissera circuler l'air et permettra l'allumage. L'épaisseur du revêtement varie de 20 centimètres à la base à 10 centimètres au sommet de la meule.

On introduit alors par le haut de la cheminée des charbons en-

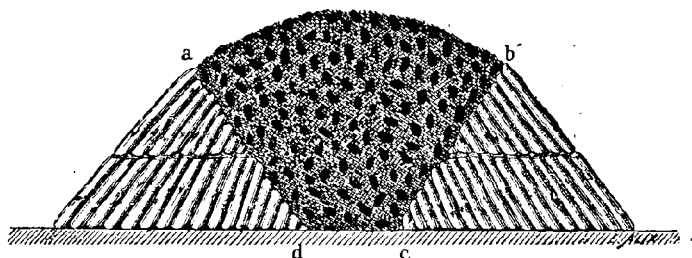


Fig. 62.

flammés ou une boule de résine qui communique le feu aux brindilles remplissant la cheminée, puis au cône de combustion A. Quand le feu est bien pris on bouche la cheminée. L'air continue à pénétrer par les interstices du mur en pierres sèches au bas de la meule, et la combustion se propage régulièrement avec production de vapeurs fuligineuses à odeur âcre qui sont le signe que la distillation est commencée¹.

La vapeur d'eau produite par cette distillation se condense sur les bûches avoisinantes, et se trouve chassée peu à peu vers la périphérie qu'elle atteint au bout de vingt-quatre heures environ. Le revêtement commence alors à suinter; c'est la période dite de *la suée* qui dure environ une huitaine de jours. En même temps la fumée devient de plus en plus claire, et la meule se tasse peu à peu par suite de la diminution de volume due à la carbonisation. Si les tassements sont irréguliers, on renforce la couverture du côté où ils se produisent avec le plus d'intensité, et l'on ouvre des événements aux endroits où la combustion est moins rapide.

Quand la suée a cessé, on ralentit la combustion en augmentant

¹ Quelquefois au lieu de produire l'allumage par le haut de la cheminée, on ménage au bas de la meule un conduit H par où l'on pousse jusqu'à la cheminée un fagot de brindilles enflammées. On bouche ensuite le trou H et l'on continue l'opération comme ci-dessus.

l'épaisseur de la couverture et bouchant en partie les orifices d'aération ou recouvrant le mur de la base. Il se produit alors une distillation lente aux dépens de la chaleur emmagasinée au centre de la meule. La figure 62 montre l'aspect d'une meule à cette phase de l'opération suivant une observation due à Ebelmen¹; on voit que la combustion se propage régulièrement de haut en bas et du centre vers la périphérie.

Pour terminer la carbonisation des couches extérieures, on procède alors à la mise à *grand feu* : on pratique dans le revêtement de la meule, près du sommet, deux rangées circulaires de trous ou événements, espacées d'environ 0,40 m. l'une de l'autre; des fumées noires se dégagent aussitôt abondamment de la rangée supérieure; quand ces fumées sont devenues claires et bleuâtres, on bouche la première rangée d'événements et l'on en pratique une troisième au-dessous de la seconde, par où les fumées se dégagent à leur tour; on continue ainsi la combustion de proche en proche, jusqu'à ce qu'on soit arrivé au bas de la meule.

Voici d'après Ebelmen la composition des fumées qui s'échappent aux différents moments de la distillation :

	COMPOSITION EN VOLUMES P. 100			
	CO ²	CO	H	Az et pertes.
Fumées brunes, fuligineuses.	26,7	9,7	9,9	53,7
Fumées blanches, légères . .	22,6	5,7	12,3	59,4

On voit que malgré l'insuffisance de l'accès de l'air et la lenteur de la combustion, ces gaz sont beaucoup plus riches en acide carbonique qu'en oxyde de carbone. Ce fait, qui avait surpris Ebelmen, montre que la température reste très basse dans la meule, et que par suite, en vertu des lois énoncées dans la première partie de ce volume, l'équilibre $CO = CO^2 + C$ se déplace dans le sens de la plus grande chaleur dégagée, et conduit à un mélange riche en acide carbonique.

Une fois la distillation terminée, on bouche tous les événements, et

¹ *Recueil des travaux scientifiques d'Ebelmen*, 2, p. 194.

l'on attend plusieurs jours afin de laisser un peu refroidir la meule dont on enlève ensuite la couverture à la partie supérieure. Dès qu'on a mis à nu le charbon, on y jette de l'eau ou de la terre meuble de manière à en empêcher l'inflammation, et on l'enlève peu à peu par couches successives. C'est la deuxième assise, ou éclisse, qui donne le meilleur charbon. Celui du voisinage de la cheminée est trop brûlé et passé à l'état de braise; celui des parties périphériques est souvent incomplètement carbonisé et contient des *fumerons* que l'on sépare et que l'on met de côté pour une nouvelle opération¹.

Le rendement d'une meule est en moyenne de 20 à 25 p. 100 en poids du bois employé, ou de 60 à 65 p. 100 en volume.

MEULES HORIZONTALES. — Dans le nord de l'Europe, surtout en Autriche et en Suède, les bois résineux sont carbonisés dans des meules disposées d'une manière différente :

La trace de la meule sur le sol a la forme d'un rectangle de 10 mètres sur 25 environ; l'aire est inclinée suivant le grand axe du rectangle. On place sur le sol, suivant cet axe et suivant les deux grands côtés, deux longues pièces de bois, sur lesquelles on place perpendiculairement les bûches ou plutôt les tiges coupées à la longueur du petit côté. On maintient ces tiges du côté le plus bas de la meule en enfonçant verticalement dans le sol deux pieux de 2 mètres de hauteur. On empile alors les troncs sur une hauteur de 1,80 m. à l'avant et de 3 mètres à l'arrière, et l'on recouvre le tout d'une couverture en terre, que l'on contient le long des parois verticales au moyen de cloisons en planches maintenues par des piquets ou des contreforts. Enfin on a réservé un canal d'allumage à environ 1,50 m. du sol et à 50 centimètres de la face antérieure de la meule. On met le feu à l'aide de ce canal rempli de brindilles enflammées, et l'on concentre d'abord la carbonisation à la base de la meule, puis on la conduit de proche en proche vers l'arrière, au moyen d'évents que l'on ouvre successivement, en ayant soin de fermer au fur et à mesure ceux qui donnent sur des parties déjà carbonisées. La cuisson complète dure de 2 à 5 semaines.

Le rendement des meules horizontales est sensiblement plus élevé que celui des meules verticales : de 25 à 28 p. 100 en poids, ou de 65 à 70 p. 100 en volume.

¹ O. PETIT, *Emplois chimiques du bois*, Paris 1888.

MEULES A RÉCUPÉRATION DE GOUDRONS. — Dans le procédé des meules tel que nous venons de le décrire, les produits volatils condensables résultant de la décomposition pyrogénée du bois sont perdus. On peut, moyennant une légère modification, recueillir facilement les produits les moins volatils, qui constituent ce que l'on appelle les goudrons, et d'où l'on pourra extraire ultérieurement de l'acide phénique et de la créosote. Il suffit à cet effet de construire la meule sur une cuvette concave en maçonnerie (fig. 63) en forme d'entonnoir, et dont le centre communique, par la conduite A avec un réservoir B où se rassemblera le goudron. Ce dispositif est usité dans le département des Landes, où l'on carbonise les vieux pins d'où l'on a extrait la résine. La meule est construite comme à l'ordinaire, et la combus-

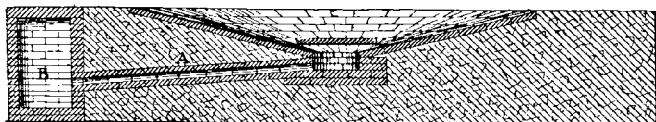


Fig. 63. — Aire en maçonnerie pour meule landaise.

tion réglée comme nous l'avons expliqué précédemment. Le conduit A est bouché au début par un tampon de bois. Les liquides produits par la distillation se réunissent alors dans la cuvette où ils subissent, sous l'action de la chaleur de la meule, une sorte de pyrogénéation qui volatilise les portions les plus légères (alcool méthylique, eau, acide acétique et acétone, benzine) de manière à produire un goudron riche en produits lourds. Au bout de quelques jours de cuisson, on retire le tampon de manière à faire couler les liquides dans le réservoir ; puis on rebouche le conduit, et on le débouche de nouveau à partir de ce moment toutes les six heures pour faire s'écouler les nouvelles portions produites.

Le rendement des meules landaises est d'environ 20 p. 100 de goudron en poids et de 25 à 30 p. 100 de charbon.

En Russie et en Pologne on emploie pour distiller les bois résineux un dispositif (fig. 64) du même genre. L'aire concave est surélevée et construite en argile battue. Au centre est ménagée une sorte de chambre souterraine, où l'on recueille dans des cuves en bois le goudron produit. Les meules sont beaucoup plus grandes que les meules des Landes : elles comprennent jusqu'à 2 000 stères de bois.

On y met le feu par des carneaux réservés à la base, et la combustion se propage de l'extérieur à l'intérieur, aussi le rendement

en charbon est-il beaucoup plus faible ; c'est surtout le goudron que l'on se propose de préparer dans ce cas.

Carbonisation en fours. — La carbonisation en meules fournit les meilleures qualités de charbon de bois. Mais elle présente l'inconvénient de ne pouvoir être exécutée que durant la belle saison. Aussi dans les pays du Nord, en Suède et dans l'Oural, emploie-t-on de

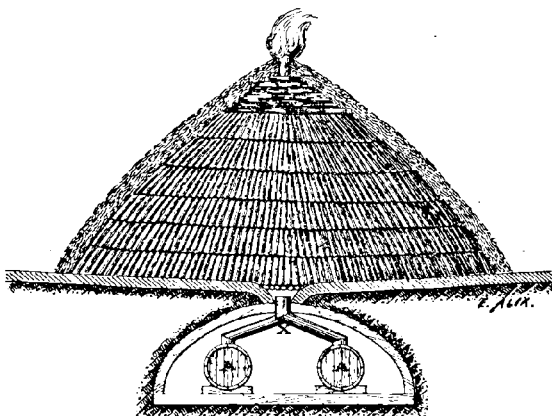


Fig. 64.

grandes chambres construites en briques, qui peuvent être considérées comme des meules à enceinte permanente. Ces chambres présentent la forme rectangulaire, et sont recouvertes par une toiture de bois. Elles sont munies sur chacun de leurs petits côtés d'une porte en tôle que l'on peut luter avec de l'argile. La mise à feu s'effectue au moyen d'un foyer extérieur pénétrant sous le plancher du four et placé au milieu d'un des grands côtés. La combustion se propage peu à peu à partir de ce point, les produits gazeux se dégageant par quatre conduits percés dans le sol aux quatre angles de la chambre et communiquant avec une petite cheminée verticale en planches. Le rendement de ces fours, en tenant compte du bois dépensé pour l'allumage dans le foyer extérieur, est de 15 à 20 p. 100 plus élevé que celui des meules.

Carbonisation en vase clos. — **PRODUITS VOLATILS DÉGAGÉS PENDANT LA DISTILLATION DU BOIS.** — Nous avons vu que le bois, chauffé progressivement à l'abri de l'air, éprouve dès 160° une modification qui

se traduit par le brunissement de la fibre et la transformation graduelle en charbon au fur et à mesure qu'on élève la température. En même temps il se dégage des produits volatils ; tout d'abord, uniquement de la vapeur d'eau, puis, dès que la température s'élève, des gaz carbonés et des vapeurs condensables également carbonés. D'ailleurs la manière dont on conduit la distillation exerce la plus grande influence sur la nature et la proportion des produits dégagés : en élevant lentement et progressivement la température, on obtient relativement peu de gaz et beaucoup de produits liquides ; au contraire si l'on porte brusquement le bois à la température du rouge, ces produits condensables réagissent avant de se dégager sur le charbon incandescent et en gazéifient une nouvelle proportion, et l'on obtient finalement un rendement beaucoup plus faible en charbon de bois comme en produits liquides, et une proportion beaucoup plus considérable de produits gazeux.

Comme, dans la distillation du bois en vase clos, on cherche surtout à obtenir du charbon et des produits liquides, on conduira toujours l'opération à une température relativement basse, pratiquement vers 400°.

Avec les bois non résineux, les produits condensables se divisent en deux couches non miscibles, la supérieure, aqueuse, brune, d'odeur empyreumatique et de réaction très acide, est appelée *vinaigre de bois*, et la couche inférieure, huileuse, noire, constitue le *goudron*.

Les gaz non condensés sont formés principalement d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, avec un peu de méthane et d'hydrogène, et de très petites quantités d'azote et de carbures éthyléniques. La proportion des gaz combustibles est d'environ 40 p. 100.

Le vinaigre de bois contient, outre une forte proportion d'eau (80 p. 100 environ) :

De l'acide acétique, avec ses homologues, acide formique, acides propionique, butyrique, etc. ;

De l'alcool méthylique ;

De l'alcool allylique ;

De l'acétone et quelques autres cétones grasses ;

De l'aldéhyde acétique ; de l'acétal méthylique ; de l'acétate de méthyle ;

Du furfurane et de l'acide pyromucique ;

De la pyrocatéchine ;

De l'ammoniaque et les trois méthylamines ;

Plus une certaine quantité de produits goudronneux.

Le goudron renferme en solution la plupart des produits précédents, et de plus des carbures aromatiques (benzène, toluène, xylènes, cumène, rétène, chrysène), des phénols et leurs éthers méthyliques, dont le mélange des moins volatils constituera la créosote, et de la paraffine.

Quand on distille les bois résineux, au contraire, il passe une assez grande quantité de produits terpéniques plus légers que l'eau, qui maintiennent en solution les produits phénoliques et aromatiques, de sorte que dans ce cas la couche goudronneuse, mélangée d'essence de térébenthine, surnage à la surface et que le vinaigre de bois constitue la couche la plus dense. Enfin si la température s'abaisse beaucoup, la solubilité des phénols dans les terpènes peut devenir assez faible pour qu'il y ait séparation de trois couches : une couche supérieure terpénique, une couche moyenne aqueuse et une couche inférieure goudronneuse.

Le vinaigre de bois est distillé et les vapeurs sont conduites dans un lait de chaux bouillant, qui fixe les acides et donne du pyrolignite de chaux d'où l'on extraira l'acide acétique ; les vapeurs qui ne se sont pas combinées à la chaux seront ultérieurement rectifiées dans un appareil à plateaux et fourniront l'esprit de bois ou alcool méthylique brut. Il reste dans la cornue du goudron. 100 parties de vinaigre de bois donnent environ 5 à 10 p. 100 d'acide pyroligineux, 2 à 3 p. 100 d'esprit de bois, 8 à 10 p. 100 de goudron.

Le goudron brut contient en moyenne :

20 p. 100 vinaigre et esprit de bois,

5 p. 100 huile légère,

10 p. 100 huile lourde

que l'on sépare par distillation. Il reste dans la cornue 60 p. 100 de résidu ou *brai*.

Nous allons maintenant passer rapidement en revue les différents dispositifs imaginés pour effectuer la distillation en vases clos et recueillir les sous-produits ; nous remarquerons d'ailleurs que les meules landaises et russes à récupération de goudrons constituent déjà une solution approchée de la question ; mais les produits les plus volatils, acide acétique et alcool méthylique, ne sont pas conservés.

Fours Schwartz. — Le principe de ces appareils consiste à sou-

mettre le bois à l'action d'une flamme réductrice qui le décompose sans le brûler.

Le four Schwartz a la forme d'une chambre rectangulaire voûtée dont les parois sont constituées par de la marne argilo-siliceuse ; la chaux doit être proscrite, car elle serait rapidement dissoute par l'acide acétique formé pendant la distillation. Le sol du four va en s'abaissant vers les grands côtés, au milieu desquels viennent s'ouvrir deux tuyaux en fonte T, par lesquels les goudrons s'écouleront jusque dans les cuves *f*. Quant aux produits plus volatils, ils sont conduits par les tuyaux *g* jusqu'à des appareils réfrigérants *h*,

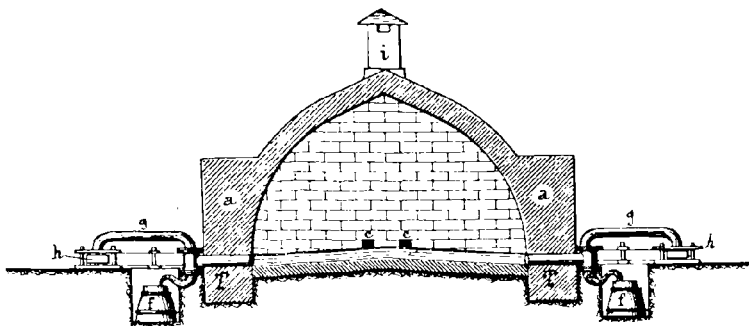


Fig. 65. — Four Schwartz.

où ils se condensent et sont ramenés dans les cuves *f*, tandis que les gaz non condensés s'échappent par une cheminée d'appel.

Les gaz chauds réducteurs qui provoqueront la carbonisation sont produits par la combustion du bois dans deux fourneaux extérieurs, et ils pénètrent dans le four par les orifices *c*.

Au début de l'opération, on garnit complètement le four de bûches que l'on introduit par des portes percées sur un des côtés du four. On ferme ensuite complètement ces portes et l'on allume les deux foyers qui provoquent la distillation. On s'aperçoit que celle-ci est terminée au changement de teinte des fumées sortant par la cheminée, qui passent du brun au bleu clair ; ce résultat est généralement atteint au bout de deux jours. On ferme alors toutes les ouvertures et on laisse refroidir le four, ce qui demande environ trois semaines.

Il faut, pour distiller 100 mètres cubes de bois de sapin, en brûler 10 dans les foyers, et l'on obtient un rendement de charbon de 25 p. 100 et de 14 p. 100 de goudron et acide pyroligneux, calculé à partir du poids total de bois dépensé.

CARBONISATION EN CYLINDRES : APPAREIL KESTNER. — Dans cet appareil (fig. 66), le bois est introduit dans un cylindre en fonte C, fermé hermétiquement par un couvercle et chauffé par un foyer extérieur. Les gaz produits s'échappent par le tube T et traversent une série de tuyaux en cuivre munis de manchons réfrigérants M dans lesquels circule en sens inverse un courant d'eau froide. Les produits condensés se déversent en D dans des bacs, tandis que les gaz non condensés aboutissent par le tube Q jusque dans le foyer où ils brûlent.

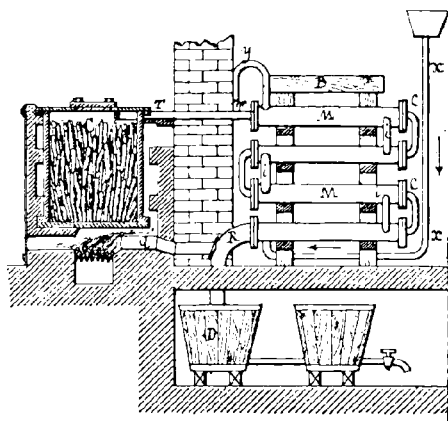


Fig. 66. — Appareil Kestner.

en entretenant la distillation qu'il suffit seulement de mettre en train au début au moyen de quelques fagots.

Quand la distillation est terminée, on laisse refroidir et l'on ouvre, à la partie inférieure du cylindre, un tampon de défournement de manière à faire tomber le charbon dans des étouffoirs. Le rendement de l'appareil Kestner est évalué pour les bois durs à 40-45 p. 100 d'acide pyroligneux et de goudron, et à 22-25 p. 100 de charbon.

APPAREIL A CYLINDRES MOBILES. — On a perfectionné le cylindre Kestner en le rendant mobile de manière à pouvoir être enlevé quand la distillation est terminée et remplacé séance tenante par un nouveau cylindre chargé. A cet effet les cylindres sont placés par couples dans les fours, qui sont munis d'un système de carneaux et de registres permettant de faire circuler les gaz chauds autour des deux cylindres ou d'isoler l'un d'eux à volonté. Quand le contenu d'un cylindre est distillé, on ferme les registres qui amenaient les gaz de

chauffage, on l'enlève au moyen d'une grue, et on le remplace par un cylindre rempli de bois neuf; on rouvre alors les registres de manière à chauffer le nouveau cylindre, et dès que les vapeurs se dégagent abondamment par son orifice, on fait communiquer celui-ci avec une tuyauterie amenant les gaz à l'appareil réfrigérant. On change donc alternativement l'un ou l'autre cylindre de manière à en carboniser six par vingt-quatre heures. L'opération est ainsi rendue continue.

FOURS A TUNNEL. — Le premier four de ce système, construit par MM. Astley et Paston-Price, comportait un tunnel en briques réfractaires dont le sol, légèrement incliné, portait une voie sur laquelle pouvaient descendre des wagonnets. La longueur du tunnel était suffisante pour laisser entrer trois wagonnets; il pouvait être séparé aux deux tiers à partir de l'entrée par une cloison mobile en tôle; le deuxième tiers était chauffé au moyen d'un foyer latéral, qui envoyait également un peu de chaleur au premier tiers, tandis que le tiers restant se trouvait isolé par la cloison mobile.

Le bois placé dans le premier wagonnet à l'entrée du four se trouve soumis à l'action d'une température modérée (environ 140°) qui le dessèche et commence la distillation; le deuxième wagonnet placé dans la partie la plus chaude est carbonisé, et les produits volatils se dégagent par des tuyaux s'ouvrant sur le plafond du tunnel. Quand la carbonisation est terminée, on soulève la cloison mobile et l'on avance d'un wagon la file des wagonnets, de telle sorte que le wagon carbonisé vient prendre place dans le compartiment froid où il se refroidit à l'abri de l'air, tandis que le wagon précédent subit la distillation au milieu du tunnel, et qu'un autre wagon à l'entrée du four commence à se déshydrater. On réalise ainsi une marche continue et dans les meilleures conditions pour assurer le chargement du bois frais ou le déchargement du charbon.

L'inconvénient de ces fours était l'altération rapide des wagonnets sous l'action de la chaleur. On y a remédié en construisant en matières réfractaires la plate-forme qui porte le bois, les roues seules et le châssis restant métalliques; afin de protéger ces parties métalliques contre l'action de la chaleur, on place au-dessous de la plate-forme réfractaire une lame de tôle glissant dans une rainure remplie de sable, de manière à isoler complètement les châssis, que l'on peut alors refroidir par un courant d'air. Ce système est employé

depuis quelques années au Canada et paraît devoir donner de bons résultats⁴.

Avantages comparés des différents modes de distillation du bois.

— Au point de vue du rendement, le procédé des meules apparaît comme primitif et barbare; il laisse perdre dans l'atmosphère ou dans le sol la totalité ou la plus grande partie des produits volatils, dont beaucoup ont une valeur industrielle assez considérable; il ne permet pas davantage de récupérer l'énergie calorifique emportée par les vapeurs combustibles; enfin même au seul point de vue du charbon obtenu, c'est lui qui procure encore le rendement le plus faible. Mais en revanche c'est le meilleur procédé au point de vue de la qualité du charbon. Il a de plus l'avantage de pouvoir être appliqué sur le lieu même de l'abatage, et par conséquent d'éviter le transport du bois, dont le poids est environ quatre fois plus considérable que celui du charbon produit. Aussi est-il encore le plus employé.

La carbonisation en fours économise du temps et de la main-d'œuvre, et assure un meilleur rendement en charbon; par contre la qualité de celui-ci est inférieure, et il faut de plus compter le transport du bois et l'amortissement du four. L'économie devient plus grande quand on installe la récupération des produits volatils; mais la qualité du charbon est de moins en moins bonne. Il est vrai que dans ce cas le charbon n'est plus en quelque sorte qu'un sous-produit, les goudrons, l'acide pyroligneux et les produits alcooliques constituant le principal intérêt de l'opération.

Agglomération du charbon de bois. — *Charbon de Paris.* — C'est en 1850 que Popelin-Ducarre imagina de fabriquer avec des déchets de charbon de bois, de la tannée et de la braise de boulanger, mélangés à du goudron, des cylindres agglomérés pouvant remplacer le charbon de bois. Les matières solides, humectées de 10 p. 100 d'eau, sont broyées entre des cylindres, puis additionnées d'une proportion assez considérable de goudron de houille (35 à 40 p. 100), de manière à constituer une pâte qui est triturée par des meules coniques dans une auge circulaire. Cette pâte est ensuite moulée en cylindres au moyen de pistons compresseurs, puis les agglomérés obtenus, après une exposition de quarante-huit heures à l'air, sont

⁴ H. Le Chatelier, *Leçons sur le carbone*, Paris, 1908.

DAMOUR, CARNOT et RENGADE. — Les sources de l'énergie calorifique.

calcinés en vases clos dans des caisses de tôle rangées dans un four spécial, chauffé par la combustion des produits de la décomposition du goudron. Celui-ci laisse comme résidu un coke très dur qui donne beaucoup de consistance aux agglomérés. Le charbon obtenu brûle sans flamme ni fumée. Il n'est guère intéressant que pour les usages domestiques.

§ 2. — LA CARBONISATION DE LA TOURBE

La tourbe, calcinée en vase clos, laisse un résidu de charbon représentant à peu près le 1/3 de son poids, pendant qu'il se dégage en abondance des gaz et des matières volatiles, ces dernières formées principalement, comme pour le bois, par de l'acide acétique.

De même que le bois, la tourbe peut être carbonisée en meules, en fours ou en cornues.

La carbonisation en meules est facilitée par la forme régulière des fragments que l'on empile les uns à côté des autres sans laisser sensiblement de vides, en ménageant seulement sur les quatre côtés du tas des événements dirigés vers le centre où se trouve la cheminée. Le tout est recouvert de terre et d'herbe.

En Angleterre on emploie des fosses circulaires en maçonnerie de 3 mètres de profondeur.

Les fours servant à carboniser la tourbe sont de plusieurs modèles : dans les uns la chaleur est produite par la combustion d'une partie de la tourbe, ils représentent en quelque sorte des meules dont le revêtement extérieur serait en maçonnerie. En Irlande, dans la tourbière de Coy d'Allen, on emploie des fours en tôle, mobiles sur des rails, et dont le fond est formé par une plaque de tôle perforée. On remplit le four de tourbe et on le conduit dans une grande salle, au-dessous d'une cheminée d'appel, et au-dessus d'une fosse que l'on peut remplir d'eau. La tourbe est allumée et la combustion se propage grâce au tirage de la cheminée ; quand la carbonisation est achevée, ce que l'on reconnaît à la teinte claire des fumées, on remplit la fosse d'eau jusqu'à obturer les trous de la grille inférieure, et l'on arrête ainsi l'excès de l'air de manière à produire l'extinction du charbon. Chaque salle contient vingt fours analogues, et la chaleur dégagée par ces fours est employée à la dessiccation de la tourbe qui sera carbonisée à son tour ultérieurement.

Dans d'autres fours, tels que les fours Schenk, on emploie comme

source de chaleur les gaz de gazogènes. Dans les fours de Barff et Thursfield, on se sert de vapeur d'eau surchauffée.

On peut également utiliser la carbonisation en cornues, mais celle-ci est assez peu employée, et n'est économique qu'avec une bonne récupération des produits volatils, qui renferment des goudrons et une forte proportion d'acide pyroligneux.

Un fait intéressant est la faible proportion d'ammoniaque que l'on recueille à la distillation, malgré la teneur relativement très élevée de la tourbe en azote. On ne retrouve guère dans les eaux ammoniacales que la dixième partie de cet azote. Dans des expériences de laboratoire, MM. Müntz et Lainé ont obtenu au maximum 3,92 gr. d'azote dans les eaux ammoniacales pour 1 kilogramme de tourbe compacte de la Somme contenant 20,30 gr. d'azote. La plus grande partie de l'azote reste dans le coke, qui en retient 1,28 p. 100 à un état indéterminé.

Si l'on produit la distillation dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, de manière à oxyder et à gazéifier totalement le charbon du coke, on retrouve sous forme d'ammoniaque, dans les eaux de lavage du gaz produit, la presque totalité de l'azote, soit 1,790 p. 100 de tourbe. Ce traitement a été proposé par MM. Müntz et Lainé¹ pour se procurer à partir de la tourbe de l'ammoniaque que l'on pourra ensuite transformer très facilement en nitrate en se servant de la tourbe même comme supports d'oxydation.

D'après des essais de carbonisation effectués par Eckenberg, la composition du charbon préparé avec des briquettes moulées après cuisson préalable (voir p. 295) serait la suivante :

	N° 1	N° 2	N° 3
Cendres	4,10	5,6	7,8
Phosphore	0,01	0,017	0,03
Soufre	0,30	0,16	0,34
Carbone	88,1	84,4	»
Hydrogène	1,9	2,6	»
Oxygène et azote (par différence) . .	6,7	7,4	»

Le pouvoir calorifique serait d'environ 7600 calories.

¹ C. R., 142, 1239; 1906.

§ 3. — LE COKE

Le coke est le résidu de la distillation de la houille ; mais cette définition est insuffisante, car on ne donne le nom de coke qu'à un produit aggloméré, et nous avons vu que les houilles très riches en matières volatiles ou au contraire très pauvres donnent un résidu carbonisé pulvérulent ; pour qu'il se forme du coke à la distillation il est nécessaire que la houille se ramollisse sous l'action de la chaleur, de façon que les fragments ou les poussières se soudent en une masse pâteuse, qui se boursoufflera ultérieurement en laissant s'échapper des gaz. En définitive seules donneront du coke les houilles des catégories intermédiaires de la classification de Gruner.

Les meilleurs charbons à coke sont ceux qui renferment de 18 à 25 p. 100 de matières volatiles. Cependant certaines houilles s'écartant notablement de cette composition fournissent un bon coke ; mais le plus souvent on mélange différentes espèces de charbons de manière à obtenir un mélange moyen à 20 p. 100 de matières volatiles.

Le rendement en coke varie naturellement avec la qualité des houilles employées ; il est d'environ 80 p. 100 avec les bons charbons à coke ; avec les houilles grasses proprement dites il est de 65 à 70 p. 100 ; avec les houilles grasses à longue flamme, de 60 à 65 p. 100. Avec les houilles anglaises du Lancashire, il peut descendre à 52 p. 100.

Mais le rendement varie aussi notablement avec les conditions de la distillation, et en particulier avec la vitesse de chauffe ; on retrouve ici le phénomène dont nous avons déjà parlé à propos de la distillation du bois : l'acide carbonique et la vapeur d'eau peuvent réagir sur le carbone et en volatiliser une certaine quantité sous forme d'oxyde de carbone ; en revanche les goudrons, c'est-à-dire les matières hydrocarbonées volatiles, peuvent être décomposées par le coke incandescent et produire un nouveau dépôt de charbon ; les gaz carbonés peuvent se comporter de même.

D'une manière générale, un chauffage lent et progressif jusqu'à une température élevée augmentera le rendement en goudrons et diminuera le rendement en coke. Celui-ci sera amélioré au contraire par une chauffe rapide à haute température. La chaleur de distillation de la houille est du reste presque nulle, ainsi qu'il résulte des expériences de M. Euchène.

D'ailleurs il n'est pas toujours possible d'appliquer brusquement aux houilles une haute température : les houilles grasses, dans ces conditions, se boursoufflent beaucoup et donnent un coke trop poreux. Il faudra avec elles élever progressivement la température. Au contraire le chauffage brusque sera à recommander avec les houilles demi-grasses, dont il permet l'agglomération, même quand la proportion de matières volatiles ne dépasse pas 18 p. 100. Dans les mêmes conditions un chauffage lent donnerait un coke pulvérulent.

Enfin les qualités du coke dépendent également de la manière dont s'est effectuée la distillation : le coke sera d'autant plus dense et plus dur qu'il aura été porté à une température plus élevée.

La distillation de la houille peut être conduite avec deux objectifs différents : soit la préparation même du coke, pour les besoins de l'industrie (et alors les produits volatils ne sont que des sous-produits qu'on laisse perdre encore souvent), soit la fabrication du gaz d'éclairage ; nous ne nous occuperons dans ce chapitre que de la préparation du coke métallurgique.

Caractères physiques. — *Couleur.* — Le coke de bonne qualité présente généralement une couleur d'un gris clair, ou même d'un blanc d'argent, parfois irisée quand la houille est pyriteuse. Les charbons anthraciteux donnent toujours des cokes rayés de noir. Une couleur gris foncé ou noire est généralement regardée comme un signe de qualité inférieure, cependant il faut remarquer que la couleur dépend en partie du procédé de carbonisation employé, que les fours à récupération ne donnent jamais de cokes de couleur très claire, et que l'eau d'extinction, si elle n'est pas très pure, en altère toujours beaucoup l'éclat.

Sonorité. — Le coke doit être également très sonore, cette propriété est assez caractéristique, et un son lourd et mat est toujours un mauvais indice.

Densité. — La densité du coke varie de 1,20 à 1,90. Le coke destiné à la fusion de la fonte au cubilot doit avoir une densité au moins égale à 1,80. Un coke trop léger donne des pertes importantes par entraînement du laitier. Les cokes riches en cendres sont les plus denses. La densité apparente est beaucoup plus faible. Le poids du mètre cube est en moyenne de 400 à 420 kilogrammes.

Porosité. — Le coke est en effet très poreux, bien que sa porosité varie beaucoup avec le mode de préparation. Cette qualité peut avoir beaucoup d'influence sur les réactions que le coke sera appelé à effec-

tuer, en particulier sur la réduction de l'anhydride carbonique dans les hauts fourneaux. Les cokes les plus poreux réagissent beaucoup plus facilement et donnent par suite un gaz plus riche en oxyde de carbone. En revanche, le coke de fonderie doit être aussi peu poreux que possible, afin de donner surtout un gaz riche en acide carbonique ; il faut, il est vrai, dans ce cas, une pression d'air soufflé un peu plus considérable, mais cette dépense d'énergie supplémentaire est largement compensée par la diminution d'oxyde de carbone.

La porosité du coke (rapport du volume des espaces vides au volume total) varie de 25 à 55 p. 100 ; elle ne doit pas dépasser 40 p. 100 pour le coke de fonderie. Elle sera d'autant plus faible que le charbon employé sera plus fin, plus sec et moins riche en matières volatiles. La compression du charbon dans les fours à coke diminue également la porosité.

Dureté. — Le coke doit en même temps être dur, afin de ne pas donner trop de déchets pendant le transport. Ce sont les houilles demi-grasses qui donnent les cokes les plus durs, capables de résister sans s'écraser à une pression de 175 kilogrammes par centimètre carré. Les cokes sont en général d'autant plus durs qu'ils contiennent moins de cendres.

Propriétés chimiques. — Le coke est plus riche en carbone que la houille qui a servi à le préparer. Il ne faudrait pas croire cependant qu'il ne contient pas de matières volatiles : la proportion de celles-ci oscille entre 1 et 4 p. 100, l'oxygène et l'azote y étant contenus en général en plus forte proportion que l'hydrogène.

La proportion de cendres est très variable, elle ne doit pas dépasser 10 p. 100 dans les cokes de bonne qualité.

La teneur en soufre du coke est généralement plus faible que celle de la houille qui lui a donné naissance, une proportion notable de ce métalloïde s'échappant dans les produits volatils ; elle ne doit pas dépasser 1 p. 100 pour la fabrication de la fonte. Quant au phosphore, il reste au contraire en entier dans le coke.

Les cokes sont toujours légèrement hygroscopiques, et ils absorbent un peu d'humidité à l'air. Une fois mouillés, ils retiennent une proportion d'eau beaucoup plus grande, pouvant aller jusqu'à 10 et 15 p. 100. Aussi faut-il prendre garde de ne pas employer trop d'eau pour l'extinction du coke.

Le pouvoir calorifique, abstraction faite de l'eau et des cendres,

dépasse 8000 calories. Mais la présence des cendres le diminue beaucoup. Il en est de même pour l'humidité.

PRÉPARATION DU COKE

Préparation préliminaire du charbon. — Nous avons déjà mentionné que les meilleurs charbons pour la cokéfaction étaient ceux qui renfermaient de 18 à 20 p. 100 de matières volatiles, et nous avons indiqué qu'on effectuait souvent des mélanges de différentes qualités de manière à réaliser une composition moyenne voisine de celle-là. Les cendres ont aussi une grande influence : elles ne doivent pas exister en trop grandes quantités, car elles se retrouveront presque intégralement dans le coke ; de plus elles peuvent entraver le ramollissement et la fusion de la matière, surtout si elles sont riches en silice ou en fer.

On lave quelquefois les houilles trop cendreuses pour les épurer avant de les transformer en coke. Mais cette pratique n'est pas toujours à recommander, car elle peut altérer les charbons : c'est ainsi que les houilles belges ne peuvent pas être lavées sans perdre complètement leur pouvoir agglomérant, et par suite leur propriété de se transformer en coke. Dans des cas semblables il y aurait intérêt à remplacer le lavage par une épuration magnétique¹.

On broie aussi en général le charbon avant de le distiller, afin de rapprocher les grains de charbon et d'augmenter le densité du produit ; il ne faut pas cependant le pulvériser trop finement, les poussières fines donneraient un coke inutilisable. On choisit d'habitude un grain de 4 millimètres.

Distillation. — De même que la distillation du bois, celle de la houille peut s'effectuer à l'air libre ou en vases clos.

Le *procédé des meules* semblables aux meules de charbon de bois, autrefois très employé, est aujourd'hui abandonné. On formait autour d'une cheminée en briques réfractaires, une meule ronde que l'on recouvrait de coke pulvérisé. On produisait l'allumage par le haut de la cheminée, et la combustion se propageait régulièrement de haut en bas. Quand elle était terminée, on laissait un peu refroidir, puis l'on ouvrait la meule et l'on arrosait le coke incandescent. Le rendement variait de 40 à 60 p. 100 suivant la qualité de la houille.

¹ *Rev. Univ.*, (★), 19, 270 ; 1907.

Au lieu de meules rondes on employait également des *tas* rectangulaires à bords inclinés. Ce mode opératoire est encore parfois appliqué de nos jours à la carbonisation des menus.

Un premier perfectionnement aux meules fut la construction des fours rectangulaires ou *stalles* en briques réfractaires ouverts à la partie supérieure, et dont les parois latérales avaient la forme de murailles verticales percées d'une série de carnaux servant à la mise au feu et au tirage. Les *fours Schaumburg*, qui sont des stalles à deux rangées de carnaux, ont été employés en Russie jusqu'à ces dernières années.

Carbonisation dans les fours.

La carbonisation dans les fours peut s'effectuer de deux manières différentes, suivant que la chaleur nécessaire pour la distillation est produite dans le four même, par de l'air extérieur qui vient brûler une partie de la houille et les gaz dégagés, ou bien en dehors du four, par la combustion des gaz qui échauffent les parois et produisent la carbonisation de la houille contenue à l'intérieur.

a) CARBONISATION AVEC ADMISSION D'AIR

Fours de boulangers. — Ce procédé fut d'abord mis en œuvre à l'aide de fours identiques comme construction aux fours de boulangers : c'étaient des fours ovales, ayant 3 mètres environ de diamètre moyen et 1 mètre de hauteur moyenne ; le charbon était introduit par la porte latérale dans le four déjà chaud. Sous l'influence de la température élevée rayonnée par la voûte, la distillation commençait immédiatement à la partie supérieure, et les gaz dégagés, s'enflammant au contact de l'air qui pénétrait par la porte, maintenaient la température. La carbonisation se propageait ainsi horizontalement de haut en bas, la masse s'affaissait et se fissurait verticalement, et finalement le coke se divisait en prismes verticaux.

Ces fours présentaient deux graves défauts : ils étaient d'un chargement — et d'ailleurs d'un déchargement — difficiles, et l'air pénétrant irrégulièrement par la porte brûlait non seulement les gaz, mais une partie du charbon, et occasionnait des déchets assez importants.

On a construit alors des fours munis d'une ouverture sur la voûte, permettant le chargement facile, et portant une série d'ouvreaux ménagés dans les parois du four vers la partie supérieure, de manière à régulariser l'entrée de l'air au-dessus du charbon et à ne brûler

que les gaz de la distillation. La porte du four est alors maintenue fermée pendant l'opération et n'est ouverte que pour le défournement.

La figure 67 représente, d'après Babu, un four construit suivant ces données et employé à Aubin (Aveyron).

Le défournement dans ces fours étant assez pénible, on a construit des fours rectangulaires et légèrement évasés vers la porte, de manière que l'on peut sortir tout à la fois la masse entière du coke au moyen d'un râteau en fer. Tel est le *four Gibson* ou *four de Boulogne-sur-Mer*, qui se charge avec 4 tonnes et demie de charbon. La durée de la carbonisation est de vingt-quatre heures.

Les fours de boulanger ont l'avantage d'être d'une construction peu coûteuse; ils donnent un coke d'excellente qualité; mais ils ne peuvent utiliser que des houilles grasses et s'agglomérant facilement; de plus ils déterminent toujours une certaine perte due à la combustion; enfin ils ne permettent évidemment pas la récupération des sous-produits. Aussi sont-ils à peu près abandonnés en Europe, bien qu'on les ait employés aux États-Unis jusqu'à ces dernières années.

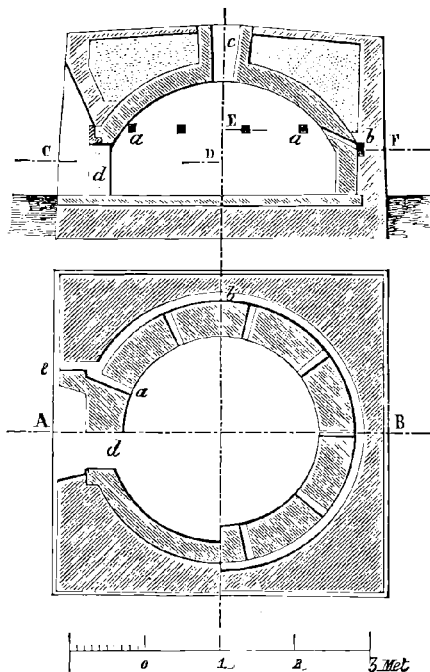


Fig. 67. — Four de boulanger pour la production du coke.

b) CARBONISATION SANS ADMISSION D'AIR

Tous les fours à coke modernes appartiennent à cette catégorie. Ce sont de vastes chambres en maçonnerie ne comportant d'autre ouverture que celles nécessaires pour l'évacuation des produits volatils; les parois latérales sont munies de carneaux, ménagés dans leur épaisseur, et dans lesquels on produit la combustion des gaz

de la distillation. En somme le four est assimilable à une cornue à gaz. La carbonisation se produit à partir des parois verticales en avançant vers le centre. Elle sera donc d'autant plus rapide que le four sera plus étroit. On pourra de la sorte traiter des houilles relativement maigres, qui, étant portées brusquement à une température élevée, pourront encore s'agglomérer, ce qu'elles n'auraient pas fait dans les fours de boulanger. Avec les houilles grasses, au contraire, il sera préférable, pour éviter un trop grand boursoufflement, de conduire la distillation plus lentement, ce qu'on obtiendra en employant des fours moins étroits.

Comme la distillation de la houille produit un retrait considérable, il en résulte que le coke se fendille à partir des surfaces latérales perpendiculairement à ces parois, et que par suite quand l'opération est terminée, la masse du coke sortie du four se divise en deux moitiés à peu près égales dont chacune se fragmente en petits prismes perpendiculaires aux parois latérales du four.

Avec ce mode de carbonisation le rendement sera à peu près quantitatif, et il sera facile de récupérer à la fois les chaleurs entraînées par les produits volatils dégagés, et ces produits eux-mêmes, dont la vente ajoutera à l'économie des fours.

Ceux-ci se divisent immédiatement en deux catégories : les fours verticaux et les fours horizontaux, ces derniers pouvant eux-mêmes être différenciés suivant que les carneaux sont disposés verticalement ou horizontalement.

Fours verticaux.

Four Appolt. — Le four Appolt se compose d'un certain nombre de cuves verticales construites dans la même maçonnerie, et dont la hauteur moyenne est de 5 mètres. Leur section rectangulaire va en s'évasant légèrement vers le bas, ce qui facilitera le défournement. Elles sont fermées dans le bas au moyen de portes en fonte à charnières, que l'on recouvre d'une certaine épaisseur d'escarbilles, et qui les séparent d'une galerie servant à amener les wagonnets de déchargement.

Le charbon est chargé par le haut au moyen d'une ouverture qu'on lute pendant la distillation. Les gaz sortent par des fentes au bas de chaque cuve, à 60 centimètres du fond, et viennent se mélanger à l'air et brûler dans les carneaux ménagés dans les parois.

Ces fours réalisent, avec un minimum d'encombrement, une très grande surface de chauffage relativement à leur volume ; ils donnent

donc une distillation très rapide et produisent un très beau coke; ils conviennent très bien pour les charbons maigres. Leur défaut réside dans le prix élevé de leur établissement, et dans l'obligation où l'on

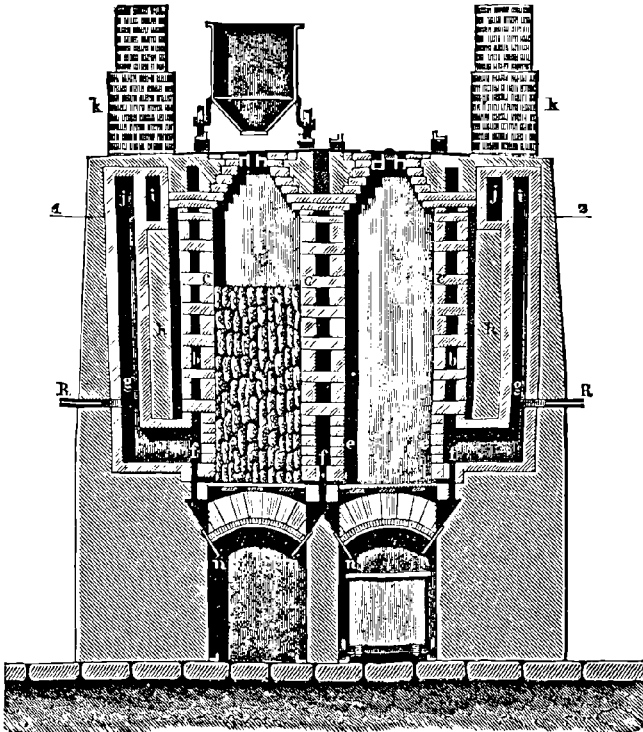


Fig. 68. — Four Appolt, coupe verticale.

se trouve d'arrêter toute la batterie du four quand une réparation est nécessaire.

Fours horizontaux. — Les fours horizontaux sont les plus employés à l'heure actuelle, car leur construction et leur entretien sont moins onéreux. Par contre, ils occupent plus de place que les fours verticaux, et leur manœuvre est moins facile. On en a créé un très grand nombre de modèles dont nous n'étudierons que les principaux. Tous ont la forme de longs tunnels à section rectangulaire, et sont réunis côte à côte en nombre assez considérable, les carneaux servant au chauffage étant ménagés dans l'épaisseur des cloisons mitoyennes, et souvent aussi sous la sole et sur une partie des voûtes. Les deux

extrémités de chaque four sont fermées par des portes en fer garnies de briques réfractaires, le défournement se faisant en refoulant le bloc entier de coke, au moyen d'un bouclier, sur une aire inclinée, placée d'un côté de la série des fours. Le chargement s'effectue au moyen d'ouvertures placées sur les fours.

Four Coppée. — Le four Coppée est le type des fours horizontaux à carnaux verticaux. Les deux figures représentent deux coupes

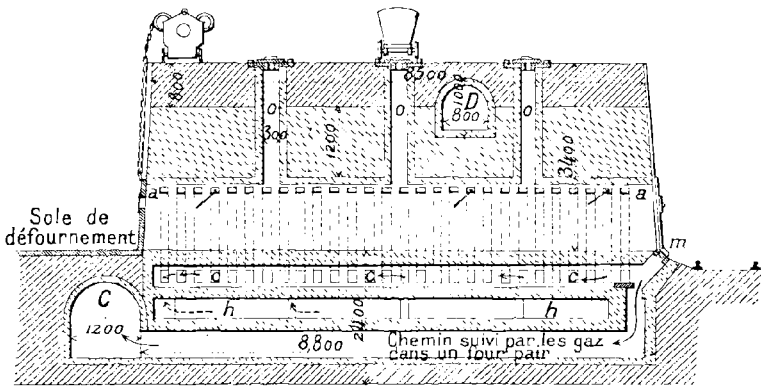


Fig. 69. — Four Coppée : coupe verticale passant par l'axe.

verticales de ce four, la première passant par l'axe du tunnel, la seconde montrant les carnaux placés dans la cloison mitoyenne de

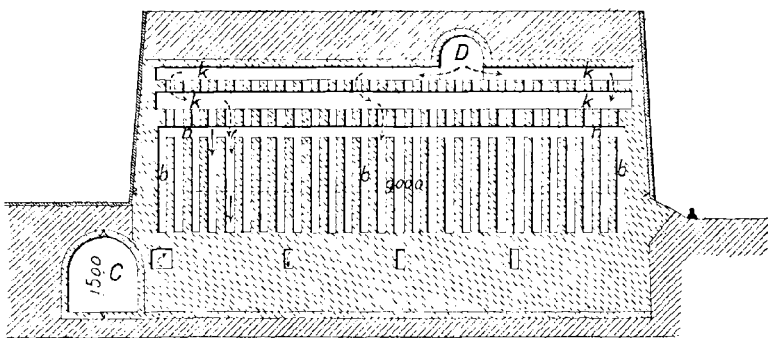


Fig. 70. — Four Coppée : coupe verticale montrant les carnaux

deux fours consécutifs. Le four se charge au moyen de trois ouvertures O. Les gaz combustibles s'échappent par vingt-huit ouver-

tures *a*, percées à la naissance des voûtes, et arrivent dans le carneau horizontal *n* où ils se mélangent avec l'air comburant venant du carneau de distribution D à travers les carneaux horizontaux *k*. Le mélange enflammé circule de haut en bas dans les carneaux verticaux *b*, puis passe sous la sole du four par les ouvertures *c*, puis circule en sens inverse sous la sole du four voisin, et finalement les gaz s'échappent par le canal collecteur C qui les conduit aux chaudières et à la cheminée. Quant à l'air destiné à la combustion, il circule d'abord au-dessous des fours dans les carneaux *h*, où il s'échauffe, puis monte à la partie supérieure de la voûte dans le carneau transversal D qui le distribue aux carneaux *k*.

Chaque four a 9 mètres de longueur, 40 centimètres de largeur et 1,25 m. de hauteur. En réalité la largeur croît légèrement d'une extrémité à l'autre vers l'aire de défournement, de manière à faciliter le refoulement du prisme de coke, dont on diminue ainsi le frottement contre les parois du four. Les fours sont groupés par série de 20 côte à côte. On fait aussi des fours de 10 mètres de long. Les ouvertures *a* sont alors au nombre de 31.

Four Smet. — Le four Smet, le premier en date des modèles de fours à carneaux horizontaux, est représenté ci-contre : les gaz s'échappent vers le milieu du four par une ouverture *a* placée au sommet de la voûte ; puis ils pénètrent dans le carneau horizontal *b* ménagé dans la cloison mitoyenne, où ils circulent jusqu'en avant du four, pour se mélanger à l'air nécessaire à leur combustion et descendre dans le carneau inférieur *c* qui les ramène en arrière ; ils pénètrent alors sous la sole, où ils circulent de façon analogue, d'arrière en avant par le carneau *d* pour revenir par le carneau *e* et s'échapper dans une cheminée. En réalité, le four est symétrique par rapport à un plan perpendiculaire au milieu de sa longueur, de sorte qu'il y a deux ouvertures *a* de chaque côté de ce plan et deux séries de carneaux *b c d e*.

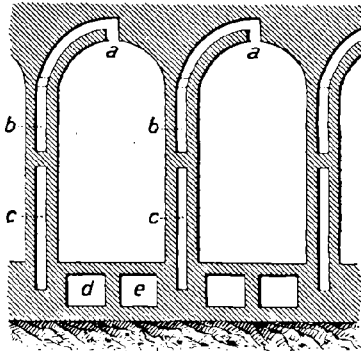


Fig. 71. — Four Smet, coupe transversale.

Ce four, sous sa forme primitive, n'est plus employé aujourd'hui ;

mais il a été le prototype de nombreux modèles, très en faveur actuellement et dont la plupart d'ailleurs sont construits pour réaliser la récupération des sous-produits.

Les fours installés à Cette par les usines du Creusot, sans récupération, ressemblent beaucoup au type primitif; mais les carneaux horizontaux tels que *b* et *c* sont au nombre de quatre superposés, séparés par trois cloisons en chicane, et l'air nécessaire à la combustion arrive par quatre trous percés près des portes, et dont chacun communique avec un des quatre carneaux. Cette disposition permet de régler la température dans chaque carneau, et de la rendre uniforme du haut en bas du four, ce qui est un perfectionnement très sérieux.

Fours à récupération.

Les fours à coke sans admission d'air que nous venons d'étudier réalisent en somme de véritables cornues à gaz d'éclairage. Les produits de la distillation sont, il est vrai, utilisés pour entretenir la température des fours, mais c'est là un véritable gaspillage. En effet la chaleur totale que peut donner la combustion des matières volatiles pour une houille à 80 p. 100 dépasse 2000 calories par kilogramme de houille. C'est beaucoup plus qu'il n'est nécessaire, car nous savons que la chaleur de décomposition des charbons fossiles est presque nulle, et que par suite la chaleur à fournir pour la distillation est presque uniquement celle qui est nécessaire pour élever la température jusqu'au point convenable. On peut donc ne brûler pour entretenir cette température qu'une faible partie des matières volatiles dégagées, par exemple la partie gazeuse, et récupérer entièrement les substances condensables à la température ordinaire.

Bien plus, nous verrons dans la suite que les gaz non condensables sont encore en proportion trop considérable, et que dans des fours bien construits on n'en utilise pour le chauffage qu'une faible partie, le reste demeurant libre et pouvant être employé pour l'éclairage ou pour la force motrice.

D'ailleurs ce terme de récupération prête un peu à ambiguïté car on peut concevoir deux récupérations possibles : la récupération des sous-produits, dont nous venons de parler, et la récupération des chaleurs emportées par les produits volatils ou par les gaz brûlés, suivant les principes développés dans la première partie de ce volume. Quand on parle des fours à coke à récupération, on a

spécialement en vue la première définition, mais beaucoup de fours à récupération de sous-produits sont également construits pour récupérer les chaleurs perdues, c'est-à-dire qu'ils réalisent au moins théoriquement la plus grande économie possible. En pratique, il est plus simple et aussi avantageux comme on l'a vu dans la première partie d'utiliser la chaleur des gaz au chauffage des chaudières.

Les fours à récupération de sous-produits s'inspirent en général des différents modèles de fours sans récupération que nous venons d'étudier. La différence essentielle consiste dans l'orifice de départ des gaz de la distillation, qui, au lieu de communiquer directement avec les carnaux de chauffage, se prolonge par un tuyau de fonte, muni de clapets, et aboutissant dans un collecteur desservant toute la batterie. De là les gaz, aspirés par un exhausteur, parcourent les appareils de condensation et de purification, puis retournent au four où ils pénètrent pour y être brûlés dans les carnaux.

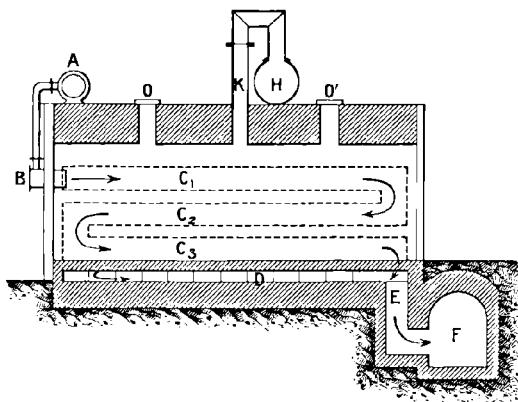


Fig. 72. — Four Seibel, coupe longitudinale.

La plupart des fours à récupération sont horizontaux. On emploie cependant en Allemagne quelques modifications du four Appolt, entre autres le four *Brunck*, réalisant la récupération.

Parmi les fours horizontaux nous retrouvons les fours à carnaux horizontaux et les fours à carnaux verticaux, qui se rapprochent comme construction des fours Smet ou des fours Coppée.

Four Seibel. — Ce four (fig. 72) rappelle beaucoup par sa disposition le four Smet. Les gaz après purification arrivent au four par la conduite A et la tuyère B où ils se mélangent à de l'air en quantité convenable. Puis ils pénètrent dans le carneau supérieur horizontal C₁,

parcourent successivement les carneaux C_2 et C_3 , passent ensuite sous la sole à travers une série de carneaux D , et enfin par la conduite verticale E arrivent dans la galerie horizontale F et de là dans la cheminée. Le chargement de charbon se fait par les deux ouvertures O et O' . Les produits distillés s'échappent par le tuyau K et le collecteur H .

Dans le *four Carvés*, dont le four Seibel n'est du reste qu'un perfectionnement, l'introduction des gaz se faisait sous la sole, en face d'une grille par où pénétrait l'air comburant, et qui était chargée de coke incandescent pour assurer l'allumage — précaution reconnue depuis inutile car la température des carneaux est bien suffisante par elle-même. Après avoir brûlé sous la sole, le mélange gazeux remontait à travers les parois du four par un carneau vertical et redescendait par les carneaux horizontaux C_1 , C_2 , C_3 pour s'échapper finalement par une galerie analogue à F . La distillation du charbon commençait donc par la partie inférieure qui était la plus chauffée, ce qui diminuait le rendement en coke. Dans le four Seibel au contraire, la distillation commence par la partie supérieure, et les gaz carburés dégagés dans la suite par les parties sous-jacentes se décomposent en traversant le coke incandescent et y laissent une partie de leur carbone, ce qui augmente la dureté et la compacité du coke et améliore le rendement. Par contre ce dispositif doit diminuer la proportion des produits volatils condensables ainsi que le pouvoir éclairant des gaz,

Four Smet-Solvay. — Le four Smet-Solvay est une variante du four Smet à récupération, mais les carneaux horizontaux qui courent dans les parois latérales sont remplacés par des tubes en terre réfractaire. Il y a trois tubes semblables superposés et communiquant deux à deux par leurs extrémités de manière à rappeler la circulation des gaz dans les fours Seibel. Seulement l'air nécessaire à la combustion est introduit en deux fois, une première fois en A à l'entrée des gaz dans le carneau supérieur C_1 , une deuxième fois en A' , de l'autre côté du four à l'entrée du deuxième carneau C_2 . Après avoir circulé dans le troisième carneau C_3 les gaz pénètrent sous la sole qu'ils parcourent dans toute sa longueur dans un carneau unique D , d'où ils passent par le carneau oblique E dans le conduit F communiquant avec la cheminée. L'air nécessaire à la combustion circule d'abord dans le carneau H , où il s'échauffe jusque vers 300° , avant d'être conduit aux orifices d'admission

dans les carneaux, aux points A et A' où sont introduits les gaz combustibles. On peut régler l'admission de l'air au moyen de registres en tôle. Quant aux gaz produits par la distillation, ils se dégagent par le tuyau K qui les conduit dans un barillet et de là aux appareils de purification.

Dans les modèles précédemment étudiés de fours à carneaux horizontaux, on était obligé de donner à ces carneaux une épaisseur

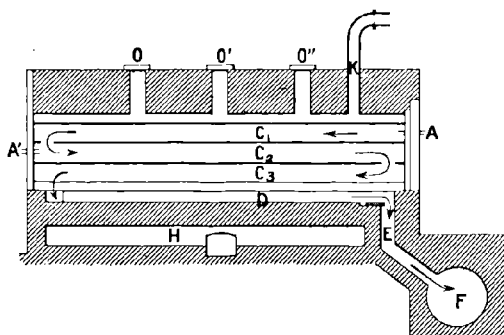


Fig. 73. — Four Smet-Solvay.

suffisante pour soutenir la maçonnerie des fours ; il en résultait des échanges de chaleur assez difficiles et c'est là un des principaux inconvénients de ce type de four. Ce défaut se trouve évité dans le four Smet-Solvay : les parois des tuyaux réfractaires peuvent être assez minces pour donner lieu à des échanges rapides de chaleur. D'autre part les voûtes des fours sont supportées non par ces tuyaux, mais par des piliers assez épais situés entre les deux rangées moyennes de tuyaux de chauffage. La maçonnerie est par suite très solide ; en outre ces piliers réalisent une sorte de régulateur de température, ils emmagasinent de la chaleur qu'ils restituent immédiatement après l'introduction dans les fours d'une nouvelle charge, au moment où les carneaux se trouvent refroidis, et l'on évite ainsi le *point mort* ou arrêt momentané de la distillation qui se produit à ce moment avec les autres fours.

Les fours actuels ont 10 mètres de longueur sur 2 mètres de haut. La cuisson s'opère en dix-huit ou vingt-quatre heures, suivant la nature de la houille, et le rendement en coke est très satisfaisant.

Le *four Collin* réalise la transition entre les fours à carneaux horizontaux et les fours à carneaux verticaux ; il est construit de manière à pouvoir fonctionner à volonté avec ou sans récupération des sous-

produits, et le passage d'une marche à l'autre peut s'effectuer pendant la marche du four.

Fours Otto. — Les fours Otto sont du type à carneaux verticaux analogue au four Coppée dont ils sont en somme de simples perfectionnements. Le four *Otto-Hoffmann* réalise à la fois la récupération des sous-produits et celle des chaleurs perdues par les gaz de la

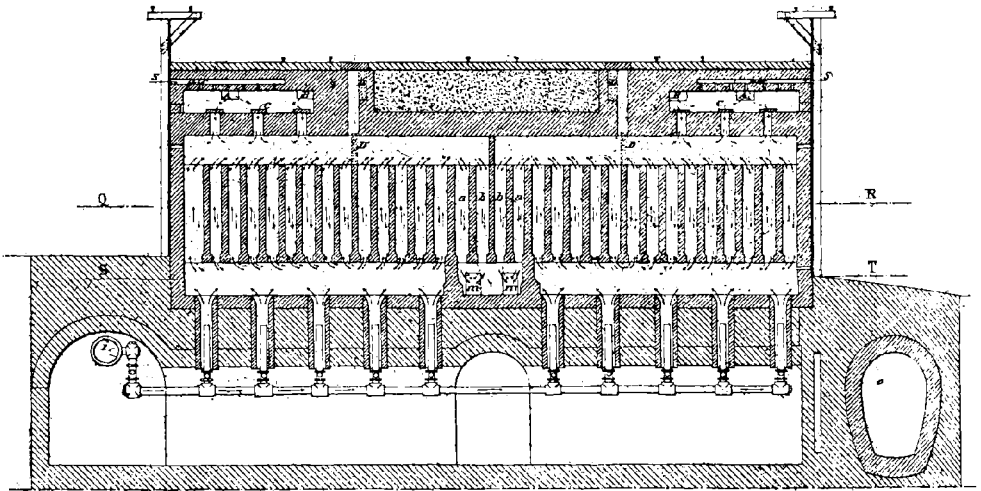


Fig. 74. — Four Otto. Coupe par les carneaux de chauffage.

combustion : ceux-ci traversent avant de se rendre à la cheminée des chambres garnies de briques qu'ils portent à une haute température, et qui servent à leur tour à échauffer l'air nécessaire à la combustion quand on a réalisé à la manière habituelle le changement de marche des gaz et de l'air.

Dans les nouveaux fours Otto (fig. 74) on a d'ailleurs supprimé les chambres de récupération de chaleur. Les gaz purifiés arrivent au four par le conduit I, et arrivent dans des sortes de brûleurs Bunsen au nombre de 10, situés à la base des piédroits, et qui aspirent eux-mêmes l'air nécessaire à la combustion. En sortant des brûleurs les gaz enflammés traversent d'abord un carneau horizontal, puis montent dans une série de carneaux verticaux et arrivent enfin à la partie supérieure dans un carneau horizontal d'où ils redescendent par deux couples de carneaux verticaux *a, b, b, a*, pour passer par les ouvertures *m m*, sous la sole du four, et de là dans la galerie *o* communiquant avec la cheminée.

Ces fours peuvent aussi marcher sans récupération des sous-produits. Dans ce cas on place deux briques en $D'D'$ de manière à diviser par le milieu les deux parties du carneau horizontal supérieur, et l'on déplace les briques obturant les ouvertures C qui communiquent, par les ouvertures A et B , avec le sommet du four. Les gaz de la distillation arrivent directement par ABC , parcourent de haut en bas la moitié des carneaux verticaux suivant les flèches pointillées, remontent à travers l'autre moitié des carneaux verticaux de l'autre côté des briques D' , et enfin redescendent par les carneaux verticaux ab en suivant dès lors la même marche que précédemment.

Les fours ont 10 mètres de long et 2 mètres de haut. Leur largeur varie comme d'habitude suivant la nature du charbon à traiter.

Fours Koppers. — Ces fours, très employés depuis quelques années en Allemagne, sont de deux types différents, avec ou sans régénération des chaleurs perdues.

1° *Four à régénérateurs de chaleur.* — Dans les fours Otto-Hoffmann et Collin, les régénérateurs sont placés de chaque côté de la batterie, latéralement à l'avant et à l'arrière. Dans les fours Koppers il y a deux régénérateurs sous chaque four, occupant chacun la demi-longueur du four, chacun de ces couples de régénérateurs récupérant les chaleurs perdues par le four correspondant ; il résulte de cette indépendance des fours que si un accident arrive à l'un d'eux, on peut l'arrêter sans préjudice pour la série entière ; d'autre part la chaleur emmagasinée par la maçonnerie et les fondations n'est pas inutilement perdue.

La capacité des régénérateurs est pour chaque four de 5,68 m³ avec une surface de 76,27 m² ; les gaz sortent des carneaux à 1000-1100°, et des régénérateurs à 250°.

Le chauffage des fours se fait par 30 carneaux verticaux indépendants de même section, sauf les deux extrêmes un peu plus larges pour compenser le rayonnement par les façades ; la section est rétrécie à l'extrémité supérieure, de manière à ralentir la circulation des gaz et à rendre la température uniforme ; les gaz pénètrent dans les carneaux par le bas, l'air est introduit au niveau de la sole, les gaz enflammés montent dans les carneaux sur une moitié du four, et redescendent par l'autre moitié des carneaux, pour s'échapper par le régénérateur correspondant ; toutes les demi-heures on change la marche, les gaz parcourent les mêmes carneaux en sens inverse et

s'échappent dans le 2^e régénérateur, le premier servant à échauffer l'air.

Le chargement se fait à l'aide de trois ouvertures percées dans la voûte. Une autre ouverture sert au départ des gaz qui vont aux appareils purificateurs, enfin une cinquième ouverture, fermée en régime normal, sert pendant l'allumage à introduire directement les gaz du four dans les carneaux, et de là dans les régénérateurs.

Suivant le constructeur, le four Koppers serait avantageux pour les charbons maigres. La récupération de chaleur permet de retrouver un notable excédent de gaz, que l'on emploie par exemple dans les moteurs : 40 p. 100 avec des charbons moyens à 13 p. 100 de matières volatiles, 50 p. 100 avec les charbons gras.

2^e Les fours sans régénérateurs se rapprochent comme construction des précédents, mais les carneaux ne sont pas indépendants : ils communiquent par le bas. Les gaz circulent de bas en haut dans les carneaux et redescendent par le carneau central.

Fours de la Rheinische-Chamotte und Dinas-Werke. — Ces fours¹ réalisent également la récupération des chaleurs des fumées. Le chauffage est disposé de manière à avoir partout la même intensité aux différents points du four; on obtient une température élevée dépassant de 300° environ au sortir des brûleurs celle de la plupart des fours similaires; les brûleurs sont disposés de manière à éviter complètement la formation de jets de chalumeau, qui détériorent et fondent rapidement les parois.

Les figures 75 et 76 montrent la disposition du four qui comporte deux récupérateurs de chaleur, à deux empilages de briques distincts, à chaque extrémité du four. Chacun d'eux est chauffé pendant une heure par les chaleurs perdues du four à coke, et sert pendant l'heure suivante à réchauffer l'air.

Le gaz dégagé par la distillation dans les chambres C sort à leur partie supérieure par des conduits D de fort diamètre traversant leur plafond, d'où il est refoulé par un ventilateur dans les appareils où se fait la récupération des substances produites. Une partie de ces gaz sert au chauffage du four et revient dans les compartiments *c*, mélangé à l'air chauffé.

Les plafonds ne sont pas chauffés, ce qui évite la décomposition pyrogénée du gaz avec encrassement du four par dépôt de graphite

¹ *Gén. civ.*, 53, 314; 1911.

et formation de naphtaline aux dépens des carbures légers; de

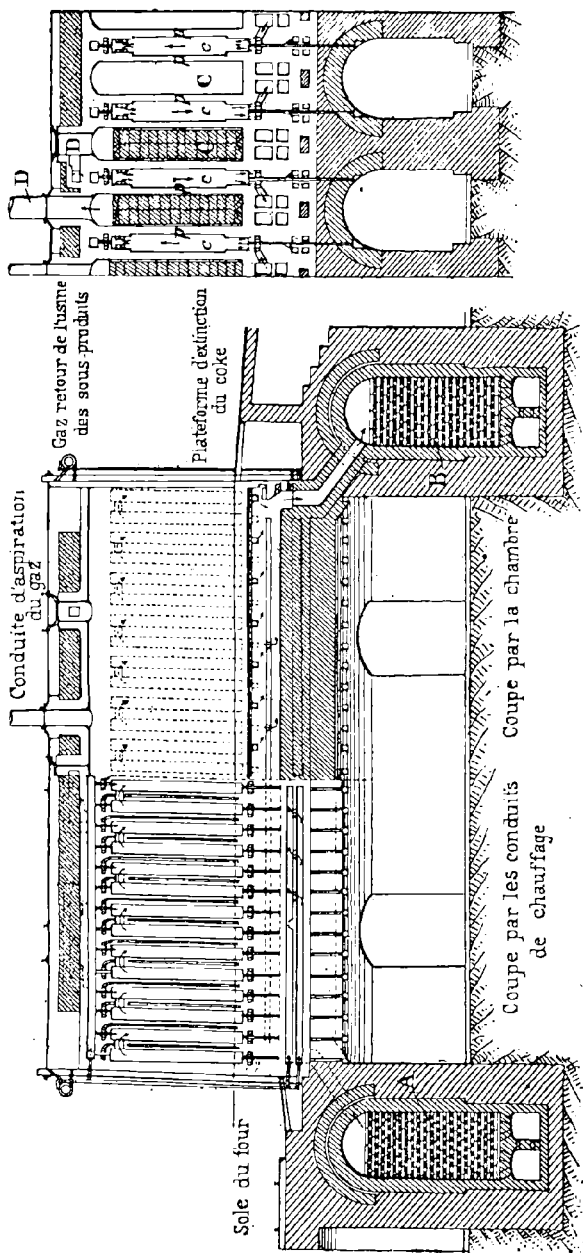


Fig. 76.

Coupe transversale.

Fig. 75.

Four de la Reinische-Chamotte. Coupes longitudinales.

même on évite la transformation de l'ammoniaque en cyanogène.

Le gaz, débarrassé des sous-produits, aboutit finalement à des conduits ménagés dans les parois des chambres de carbonisation, au-dessus et au-dessous des chambres de combustion. De ces dernières partent des tubulures verticales aboutissant aux brûleurs formés chacun d'un orifice central pour le gaz, entouré de plusieurs orifices par où arrive l'air chaud venant des récupérateurs. Les orifices de sortie des gaz et de l'air sont disposés de manière à amener un mélange parfait des gaz et à rendre impossible la formation des dards de chalumeau.

Les chambres de combustion forment deux à deux des groupes : les deux chambres de chaque groupe communiquent par un conduit horizontal supérieur et sont munies de brûleurs à leurs deux extrémités inférieure et supérieure de manière à permettre la circulation des gaz chauds alternativement dans les deux sens.

La hauteur de ces deux chambres, dont les parois ne sont pas affaiblies par des prises de gaz, peut être portée à 2,50 m. ; la chambre de distillation a 40 mètres de longueur, ce qui permet de calciner 6 tonnes de houille par vingt-quatre heures.

En marche normale on admet à la fois l'air et le gaz à la partie inférieure de la première chambre de combustion de chaque groupe et à la partie supérieure de la seconde. On règle cette admission par un dispositif commandant à la fois trois ou quatre paires de chambres, de façon à assurer une température constante sur toute la hauteur des parois latérales du four.

Ce four ne consomme pour son chauffage propre que la moitié environ du gaz qu'il produit. Le restant du gaz possède une puissance calorifique et un pouvoir éclairant élevé.

FOURS A COMPRESSION. — La compression préalable de la houille avant la distillation présente de nombreux avantages : tout d'abord elle permet de varier beaucoup plus les espèces de charbons traités : les houilles trop maigres ou trop grasses pour donner un coke de bonne qualité dans les conditions ordinaires peuvent être distillées avec succès si on les a fortement comprimées. Le procédé s'explique très bien dans le cas des houilles trop maigres : il rapproche suffisamment les uns des autres les fragments de houille pour leur permettre de se coller en un seul bloc, malgré leur faible pouvoir agglomérant ; avec les houilles grasses, la compression, en diminuant le volume des espaces nuisibles et en augmentant la masse de charbon introduite dans le four, diminue la porosité du bloc de

coke. L'emploi de la compression augmente en effet de 15 à 20 p. 100 la charge traitée dans le four.

Cette compression peut être réalisée de trois manières différentes :

a) Compression préalable de la houille en un bloc que l'on introduit dans le four ;

b) Compression de la houille dans le four même pendant le chargement ;

c) Compression progressive de la houille pendant la distillation.

Compression préalable. — Elle s'effectue sur toute la charge à introduire dans le four, que l'on place dans une caisse prismatique en tôle dont les dimensions sont légèrement inférieures aux dimensions inférieures du four et dont les parois latérales sont mobiles. On remplit cette caisse à l'aide de couches successives de charbon pulvérisé que l'on comprime à mesure. Puis on enlève les parois latérales, il reste un gâteau de houille reposant sur une plaque de tôle que l'on pousse dans le four en la faisant glisser sur des rouleaux. Une fois qu'elle est introduite, on ferme les portes du four et l'on retire le fond de tôle, tandis que le gâteau comprimé est retenu dans le four par la porte d'avant.

Dans les essais primitifs la compression se faisait à bras d'hommes. Actuellement elle est effectuée mécaniquement, ainsi que l'enfournement du bloc comprimé.

Compression dans le four pendant le chargement. — Ce système a été préconisé par M. Grand, directeur des usines d'Albi. La compression est effectuée par des pilons de 275 kilogrammes que l'on amène au-dessus du four, en face des orifices de chargement. Ces pilons sont portés par un pont roulant, et disposés de manière à pouvoir être inclinés obliquement, de manière à élargir beaucoup leur effet utile, et à pilonner à peu près uniformément la surface entière du charbon.

Compression durant la distillation. — Ce dispositif nécessite des fours spéciaux. Il conduit à un travail continu de la distillation.

Dans le *procédé Schwarz*, on pilonne le coke avant enfournement, mais de plus on introduit sur le dessus des plateaux en fonte moulée protégée par de la terre réfractaire, que l'on soulève à l'aide de chaînes et de treuils pendant l'enfournement et qu'on laisse ensuite reposer sur le charbon pendant la cuisson.

Ce procédé a été appliqué en août 1904 aux charbonnages de Wittcowitz, à Dombrau. La cohésion est augmentée par le poids des plateaux, de plus ceux-ci étant chauds cokéfient la partie supérieure de

haut en bas et donnent avec des charbons de mauvaise qualité un pourcentage de 70 p. 100 en coke utilisable au lieu de 45 p. 100. C'est ce qu'indiquent aussi les résistances par cm^2 :

	CHARBON PILONNÉ	PROCÉDÉ SCHWARZ
	kilogrammes.	kilogrammes.
Coke de la sole du four	130	180
— du milieu —	100	150
— du dessus —	65	100

La durée de la cuisson n'est pas modifiée¹.

Le *four Lürmann* est construit d'une manière entièrement différente de celle des fours précédents. Il comprend (fig. 77) deux chambres distinctes, une *chambre de carbonisation* où s'effectue la distillation de la houille, et une *chambre de refroidissement* destinée, comme son nom l'indique, à refroidir le coke avant son expulsion à l'air libre.

La chambre de carbonisation K va en s'évasant progressivement : elle mesure 1 mètre sur 0,50 m. à l'orifice d'enfournement o, et 1,50 m. sur 0,70 m. à l'autre extrémité. Elle est chauffée sur ses quatre côtés par des carneaux où circulent les gaz enflammés. La chambre de refroidissement est refroidie sous la sole par l'air circulant dans les carneaux q, air qui après s'être échauffé à ce contact servira à la combustion des gaz dans les carneaux de chauffage g, s. En face de l'ouverture o est un piston en fonte qui s'enfonce peu à peu dans le four en comprimant la masse. Toutes les demi-heures, on ramène le piston en arrière et l'on introduit par la trémie f une nouvelle charge de 25 kilogrammes de houille. Le coke est retiré par la porte T par fraction de 500 kilogrammes.

Ce four n'est pas jusqu'à maintenant entré dans la pratique.

Le *four Sheldon*, dont la description a été donnée récemment dans *The Iron Age*², diffère beaucoup moins des modèles connus : c'est un four horizontal à carneaux verticaux et à récupérateur de chaleur rappelant assez comme aspect extérieur le four primitif Otto. La partie originale consiste (fig. 78) en une chambre (*precoking chamber*) en fonte remplaçant la porte de chargement et où se produit

¹ *St. und. Eis.*, 25, 1058 ; 1905. — *Rev. Métal.*, 3 bis, 459 ; 1906.

² *Iron Age*, 81, 107 ; 1908. — *Rev. Métal.*, 5 bis, 484 ; 1908.

un échauffement préalable du charbon jusque vers 200°. Cet échauffement est obtenu au moyen des gaz qui pénètrent au-dessous de la chambre, remontent par les carneaux *a a* et s'échappent par le carneau *D* en échauffant la trémie d'introduction de la houille. Le piston *E* pousse la masse devant lui. Au bout d'une heure il a avancé du tiers de la largeur de la chambre ; on le ramène en arrière, on introduit une nouvelle quantité de charbon et ainsi de suite. Les fours sont groupés par dix à côté les uns des autres, et les dix pis-

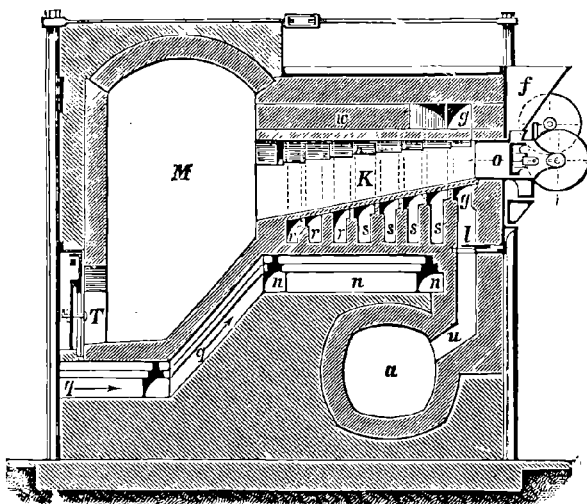


Fig. 77. — Four Lürmann.

tons avancent simultanément. A l'autre extrémité du four se trouve une chambre de déchargement en fonte munie d'une trappe à sa partie inférieure, pour recueillir le coke. On a pu ainsi préparer avec de la houille à 33 p. 100 de matières volatiles un coke dont la résistance à l'écrasement était de 77 kilogrammes par cm^2 . De plus, grâce à l'échauffement préalable du charbon dans la *precoking chamber*, l'utilisation des fours est bien meilleure et sensiblement le double de celle obtenue par les procédés ordinaires. Enfin la main-d'œuvre est très réduite. Le coke est éteint dans la chambre de déchargement et versé directement dans les wagons ; il donne ainsi moins de déchets.

Manœuvre des fours à coke. — Chargement. — Le chargement des fours s'effectue le plus souvent par le haut de la voûte, au moyen

d'orifices dans lesquels on verse la houille amenée par les wagonnets. Cependant quand on réalise la compression préalable en dehors du four, nous avons vu que le chargement s'effectuait latéralement. Indépendamment des avantages de la compression elle-même, ce mode de chargement évite la construction d'une voie au-dessus de la voûte des fours, qui doivent être dès lors construits très solidement, et procure un chargement beaucoup plus régulier. Aussi a-t-on pu

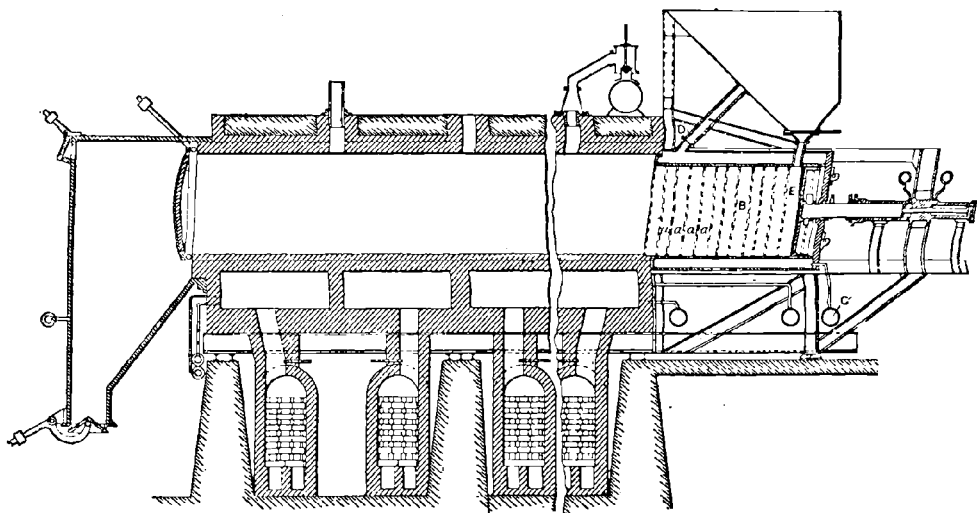


Fig. 78. — Four Sheldon.

le recommander même quand on n'effectue pas la compression. On emploie dans ce cas une boîte de chargement en tôle que l'on introduit tout entière dans le four en la faisant glisser sur des rouleaux, et l'on retire ensuite successivement, d'abord le dessus de la boîte, puis le fond mobile après avoir fermé la porte du four. L'appareil, inventé par Alfred Ernst, de Pittsburg, fonctionne en Allemagne et en France¹.

Le défournement et le chargement consécutifs d'un four refroidissent beaucoup sa température. Aussi a-t-on l'habitude, les fours étant toujours disposés en nombreuses séries parallèles, de ne charger qu'un four sur deux. Les deux fours mitoyens en pleine marche cèdent alors un peu de leur chaleur au four nouvellement garni,

¹ *Iron Age*. 80, 1682; 1907.

et l'on évite ainsi une trop longue interruption dans la distillation. Rappelons que le four Smet-Solvay est construit de manière à éviter cet inconvénient.

Déchargement. — Les fours verticaux genre Appolt se déchargent très facilement, la charge de coke tombant sous son propre poids dans le wagonnet qu'on a amené sous la porte du four.

L'opération est un peu moins facile pour les fours horizontaux. On emploie dans ce cas une *défourneuse* (fig. 79), bouclier en fonte, poussé horizontalement par une crémaillère portée par un chariot

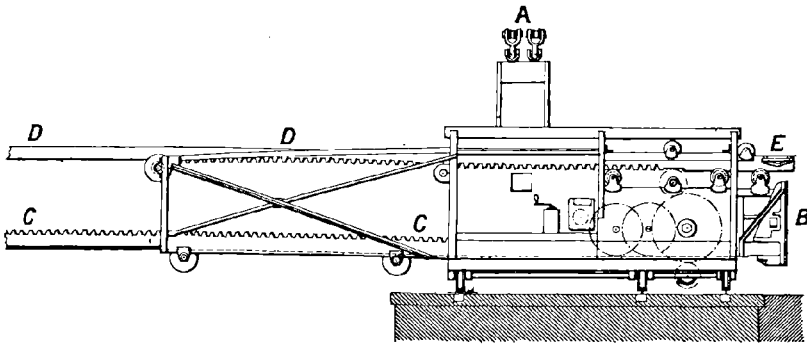


Fig. 79. — Défourneuse à moteur électrique des forges de Cette.

à vapeur ou électrique. Les deux portes du four étant ouvertes, on introduit le bouclier B qui pousse la masse de coke incandescente de manière à la faire sortir tout entière par le côté opposé, où elle vient tomber sur une aire de déchargement inclinée, pavée de briques réfractaires sur champ ou garnie de plaques de fonte. Le coke incandescent est éteint immédiatement en y projetant de l'eau froide.

RÉCUPÉRATION DES SOUS-PRODUITS

Les produits volatils dégagés dans la distillation de la houille sont extrêmement nombreux. Après refroidissement à la température ordinaire, ils se divisent en trois parties : une partie gazeuse, formée de gaz et de vapeurs légères, et deux couches liquides, l'une aqueuse constituant les eaux ammoniacales, l'autre huileuse qui est le goudron.

Les gaz contiennent surtout de l'hydrogène, du méthane et de l'oxyde de carbone, avec des quantités plus faibles d'acide carbonique, d'azote, d'ammoniaque, de produits cyanés et d'hydrogène sulfuré, et aussi de petites quantités de carbures éthyliques et

acétyléniques. En outre ces gaz contiennent à l'état de vapeurs saturées tous les constituants sensiblement volatils des goudrons, c'est-à-dire principalement des carbures aromatiques : benzène et homologues, naphthalène, styrolène, etc., et leurs dérivés.

Les eaux ammoniacales contiennent principalement du carbonate et du sulfure d'ammonium, ainsi que des composés cyanés.

Quant aux goudrons, leur composition est très complexe : ils renferment des carbures gras supérieurs, mais surtout des carbures aromatiques, carbures benzéniques, naphthaléniques, anthracéniques, acénaphthène, fluorène, rétène, chrysène, etc. ; des composés phénoliques ; des amines aromatiques et des bases pyridiques ; du pyrrol, du thiophène, etc.

Ces sous-produits sont d'ailleurs les mêmes que ceux du gaz d'éclairage, tout au moins comme nature sinon comme proportion, la distillation de la houille dans les cornues étant conduite un peu différemment de la carbonisation du coke métallurgique. Par suite les traitements à faire subir aux gaz seront analogues, à une seule différence près : avec le gaz d'éclairage on évite de condenser les vapeurs carburées qui s'y trouvent mélangées, car ce sont elles surtout qui donnent le pouvoir éclairant. Dans les gaz des fours à coke au contraire, on ne cherche pas, du moins en général, à conserver le pouvoir éclairant, on tâchera au contraire d'épuiser le mieux possible et de condenser les matières volatiles qui constitueront, sous le nom de *benzol*, un des bénéfices principaux de la récupération.

La composition des produits volatils varie d'ailleurs à la fois avec la période de la distillation et avec la manière dont s'effectue la distillation, c'est-à-dire avec le modèle du four.

Tout d'abord la composition des gaz varie avec la période de la distillation. On peut dire que la proportion relative de l'hydrogène augmente constamment du début à la fin de l'opération, tandis que celle des autres gaz, formène et hydrocarbures divers, diminue, sauf l'oxyde de carbone et l'acide carbonique qui conservent à peu près toujours les mêmes volumes relatifs.

Quant aux modèles de fours, ils ont la plus grande influence sur les sous-produits récupérés. Ainsi que nous l'avons expliqué plus haut, les fours qui réaliseront une température très élevée et provoqueront une distillation très rapide produiront une plus grande quantité de produits gazeux au préjudice des produits condensables, tandis que les fours opérant la distillation lentement et à basse tempéra-

ture, au moins au début, donneront un rendement élevé en sous-produits.

Enfin la qualité des charbons entraîne également, comme de juste, des différences considérables.

Marche de la récupération. — Les gaz qui se dégagent des fours à coke sont très chauds (600-700°). Ils sortent par un tuyau de tôle soudé, muni de clapets, et se rendent dans un condenseur ou *barillet*, tuyau de gros diamètre commun à toute une série de fours, où leur température descend jusque vers 200°. Dans ce barillet se dépose déjà une partie des goudrons qui est expulsée par un siphon de trop-plein. Mais une autre partie reste en suspension dans le gaz à l'état de fines gouttelettes ou vésicules dont la séparation est très difficile, et c'est à cette séparation, ainsi qu'au refroidissement complet du gaz, que seront consacrés les premiers appareils. On emploie d'abord des réfrigérants à air ou à eau. Quelquefois on fait circuler autour de ces réfrigérants l'air qui servira ultérieurement à alimenter les fours, de manière à utiliser la chaleur cédée par les gaz. D'autres fois on emploie une pluie d'eau, ou un barbotage. Une nouvelle quantité de goudrons se dépose dans ces appareils pendant le refroidissement complet. Pour terminer, on emploie le plus souvent le séparateur Pelouze et Audoin, dans lequel les gaz doivent passer à travers un certain nombre de tôles perforées parallèles et dont les trous sont disposés en chicanes, de manière à réaliser une route sinueuse. Enfin le gaz traverse les tours d'absorption dont une première série doit retenir l'ammoniacque : on réalise une circulation méthodique des gaz de l'eau, en cherchant à multiplier les surfaces de contact ; le plus souvent on emploie dans ce but de simples claies en bois superposées. Dans une deuxième série d'absorbants doit se faire la récupération du benzol. Le liquide de lavage est alors de l'huile lourde ou huile d'anthracène, dans laquelle le benzol est très soluble¹. Enfin le gaz, débarrassé de ses sous-produits, revient au four pour y être brûlé. Cette utilisation n'en absorbe d'ailleurs qu'une partie, de sorte qu'il en reste une assez forte proportion de disponible qui peut être brûlée par exemple sous des chaudières ou employée dans des moteurs à explosion.

Pour réaliser la circulation des gaz à travers cette longue série d'appareils, on emploie des aspirateurs ou exhausteurs de différents

¹ L'extraction et la purification du benzol seront étudiées avec plus de détails dans la suite (p. 386).

systèmes : soit des pompes rotatives (extracteur Beale), soit des ventilateurs, soit des pompes à piston à mouvement alternatif. L'extracteur se place en général entre les appareils réfrigérants et les appareils d'absorption, son fonctionnement doit être extrêmement régulier de manière à ne pas gêner la marche des fours.

On obtient en définitive, comme sous-produits récupérés, des eaux ammoniacales, des benzols et des goudrons. Les eaux ammoniacales sont traitées sur place, on les distille avec un lait de chaux dans une colonne à plateaux, de manière à séparer l'acide carbonique et à concentrer les vapeurs ammoniacales, qui sont reçues dans de l'acide sulfurique afin de les transformer en sulfate. Les benzols bruts sont également fractionnés dans des appareils à rectification. Quant aux goudrons ils sont en général vendus à des usines spéciales.

Absorption directe de l'ammoniaque. — La distillation des eaux ammoniacales, qui sont très étendues, nécessite une grande quantité de chaux et une dépense assez considérable de chaleur. On a cherché à éviter ce traitement en absorbant directement les vapeurs basiques contenues dans le gaz au moyen d'acide sulfurique concentré. Le problème, abordé à plusieurs reprises, n'a été résolu que dans ces dernières années : la difficulté à surmonter était la séparation préalable des goudrons sans lavage ; on y est arrivé de différentes manières, soit au moyen de ventilateurs spéciaux que nous retrouverons plus loin (p. 458), soit, comme dans le procédé Otto (brev. fr. 418.018, septembre 1910) au moyen d'une injection de goudron chaud pulvérisé, dont les gouttes agissent mécaniquement et par dissolution sur le brouillard.

La saturation directe doit d'ailleurs être faite à une température suffisante pour empêcher la condensation de la vapeur d'eau (80° environ) ; comme elle dégage une quantité considérable de chaleur (20 calories par molécule-gramme de AzH^3), la température se maintient en général d'elle-même à la valeur nécessaire. Le contact du gaz avec l'acide sulfurique doit être aussi intime que possible ; dans les appareils Otto, cette condition est réalisée par une pulvérisation de l'acide dans le gaz au moyen d'un injecteur analogue à celui qui sert au dégoudronnage. On obtient ainsi, non seulement une réduction considérable des frais de premier établissement et de main-d'œuvre, mais aussi un excellent rendement en ammoniaque, dont 90 p. 100 au moins sont effectivement récupérés¹.

¹ A. GREBEL, *Le Gaz*, 53, 48 ; 1911. — *St. u. Eis.*, 29, 1644 ; 1909.

Un perfectionnement d'un autre genre consiste à éviter l'emploi de l'acide sulfurique, dont la consommation est presque égale au poids de sulfate d'ammoniaque produit (théoriquement il faut pour 100 kilogrammes de sulfate 75 kilogrammes d'acide pur SO^2H^2 , soit 94 kilogrammes d'acide à 80 p. 100). Le procédé Burkheiser¹ combine directement à l'ammoniaque le soufre existant dans le gaz de houille à l'état d'hydrogène sulfuré. On transforme celui-ci en acide sulfureux, puis en sulfite d'ammoniaque qui possède comme engrais un pouvoir fertilisant supérieur de 10 p. 100 à celui du sulfate. Il suffit pour que la transformation soit possible que le charbon traité contienne plus de 1,5 p. 100 de soufre.

Le gaz sortant des fours subit d'abord les purifications habituelles : séparation du goudron, distillation des eaux ammoniacales avec un lait de chaux. Le gaz brut contenant H^2S et Az H^3 (et CAz) passe dans des épurateurs chimiques à oxyde de fer où se forment des sulfures et cyanures de fer ; quand ces appareils ont fonctionné assez longtemps, on y fait passer un courant d'air rapide en les maintenant à 250°. Il se produit de l'acide sulfureux que l'on dissout dans l'eau et l'oxyde de fer est régénéré. Pratiquement on a deux caisses d'épuration *a* et *b* conjuguées. Dans l'une on fait passer les gaz venant des fours à coke, qui y abandonnent leur soufre et leur cyanogène. Les gaz ammoniacaux sortant sont alors conduits dans des scrubbers où coulent des solutions acides de SO^2 , provenant du lavage des gaz issus de l'épurateur *b* où l'on est à la période d'oxydation. On procède à des inversions périodiques de *a* et *b*.

Étant donnée l'énorme quantité de coke préparée pour l'industrie métallurgique, on se rend compte de l'importance de la production des divers sous-produits de récupération, importance qui s'accroît chaque année à la fois parce que la production du fer augmente sans cesse et parce que l'on remplace de plus en plus par des fours à récupération les anciennes installations existantes. L'Allemagne en particulier, où l'industrie sidérurgique s'est développée d'une façon remarquable dans ces dernières années et où presque toutes les usines réalisent la récupération, produisait en 1909 285 000 tonnes d'ammoniaque, 625 000 tonnes de goudrons et 90 000 tonnes d'huiles légères². En 1910 le seul district de Dortmund produisait 200 000 tonnes de sulfate d'ammoniaque. Les gaz même des fours à coke ne sont

¹ *Glück.*, 47, 194; 1911; — *Rev. Métal.*, 8 bis, 749; 1911.

² *St. u. Eis.*, 29, 1644; 1909; *ibid.*, 31, 921; 1911; *Rev. Métal.*, 8 bis, 670; 1911.

pas utilisés entièrement pour le chauffage des fours. Il en reste une assez forte proportion disponible qui, étant donnée l'importance de la production totale, constitue une source d'énergie inattendue.

Dans le bassin de la Ruhr, les fabriques de coke produisent journellement 5 100 000 mètres cubes de gaz de houille, soit près de deux milliards de mètres cubes par an, ce qui correspond à une puissance motrice de deux milliards de kilowatts-heures, en admettant comme on le fait en général qu'un mètre cube de gaz représente un kilowatt-heure. Or, à l'heure actuelle cette énergie est à peu près inutilisée. Comme d'autre part le gaz des fours à coke est identique au gaz de houille fabriqué dans les usines d'éclairage, il en est résulté que beaucoup de celles-ci, situées à proximité des centres métallurgiques, viennent d'arrêter leur exploitation, et que les villes s'éclairent au gaz des fours à coke. On a créé ainsi de vastes réseaux de canalisations qui remplacent le transport à distance des charbons par un transport de gaz. La ville de Barmen a été la première à prendre cette décision, au printemps de 1910. Les villes d'Essen et de Mülheim ont suivi cet exemple. Barmen fait ainsi venir de Hamborn, non loin de Duisburg, à une distance de près de 50 kilomètres, les 17 millions de mètres cubes de gaz de houille qui lui sont nécessaires annuellement.

Il en est de même en Westphalie où plusieurs communes s'éclairent déjà exclusivement au gaz des cokeries, et où le mouvement s'annonce comme devant s'étendre rapidement, et les bassins houillers de Waldenberg et de la Saar se disposent à imiter cet exemple. On doit donc prévoir le moment où toutes les villes situées dans un certain rayon autour des usines métallurgiques s'éclaireront au gaz de fours à coke¹.

La coalite. — L'inventeur américain Thomas Parker a proposé d'opérer la distillation de la houille à basse température, de manière à obtenir, avec un rendement bien supérieur à celui du coke, un combustible brûlant facilement sur une grille, mais sans donner de flammes fuligineuses. La coalite — c'est le nom du nouveau combustible — se prépare, d'après les brevets américains, en conduisant la distillation à 425° jusqu'à cessation de tout dégagement gazeux : l'opération se fait dans des cornues de 2 mètres \times 1,50 \times 0,40, l'épaisseur du charbon ne dépassant pas 0,15. A la fin de l'opération

¹ *Rev. Univ.*, 1911, 123.

on fait passer un courant de vapeur d'eau dans la cornue, ce qui a pour effet d'éliminer la majeure partie du soufre et d'enlever les dernières traces de gaz. On laisse enfin tomber le combustible distillé dans des cylindres métalliques où il se refroidit ¹.

L'Engineering and Mining Journal a publié les résultats d'expériences faites à ce sujet sur des charbons de la vallée du Mississipi : on constate vers la température de 260° une transformation se traduisant par une élévation subite de température qui se maintient pendant quelques minutes. L'auteur l'attribue à une oxydation. Il y a en même temps, comme de juste, diminution du pouvoir calorifique par rapport à un même poids de combustible initial; mais le pouvoir calorifique spécifique augmente et passe par exemple de 5 800 à 6 500 calories. Voici les résultats de quelques expériences montrant les modifications éprouvées; on a rapporté les poids de combustibles à une même teneur en cendres :

	COMPOSITION initiale.	APRÈS CHAUFFAGE de 1 heure à 260° environ.		CHAUFFAGE CONTINUÉ 10 minutes jusqu'à 350° environ.	
		1 ^{re} expérience.	2 ^e expérience.		
	p. 100				
Eau	6,49	»	»	»	»
Cendres	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69
Matières volatiles . . .	33,27	5,43	12,69	»	»
Carbone	53,55	72,23	66,43	72,60	69,10
Augmentation en carbone.	»	34,90	24,00	35,50	29,10

Il est à noter que l'état de division du charbon exerce la plus grande influence sur la transformation. Les essais ci-dessus ont été effectués avec du charbon finement pulvérisé (passé au tamis de 100 mailles par pouce carré). Lorsque les fragments de charbon atteignent la grosseur d'un grain de blé, la transformation ne se produit plus; elle paraît de plus être très sensible aux influences catalytiques ².

La coalite n'a cependant pas donné les résultats escomptés par son inventeur : la société qui s'était fondée en Angleterre pour l'exploitation des brevets Parker a dû démolir ses fours. La cause principale de cet échec paraît être la trop grande friabilité du nouveau combustible, dont 30 p. 100 devenaient inutilisables ³.

¹ *Ir. Coal Tr. Rev.*, 75, 1384 ; 1907. — *Rev. Métal.*, 4 bis, 771 ; 1907.

² *Rev. Métal.*, 5 bis, 139 ; 1908.

³ *Le Gaz*, 55, 6 ; 1911.

CHAPITRE II

LES COMBUSTIBLES LIQUIDES

A. — LES COMBUSTIBLES NATURELS

§ 1. — LES PÉTROLES

On désigne sous le nom générique de pétroles des produits très divers, que l'on peut définir comme étant des mélanges liquides complexes de carbures d'hydrogène, renfermant en outre de petites quantités de produits sulfurés, azotés ou oxydés. Leurs principaux gisements se trouvent au Caucase, dans la région de Bakou, en Roumanie et dans l'Amérique du Nord.

Bien que connus depuis l'antiquité, les pétroles bruts ne commencèrent à être distillés et employés pour l'éclairage et le chauffage que dans la seconde moitié du XIX^e siècle. Quelques essais de distillation avaient été entrepris au Caucase vers 1825, mais ils n'eurent pas de suite, et ils ne furent repris qu'en 1863, où une usine fut établie à Bakou; encore cette industrie ne devint-elle florissante qu'à partir de 1873. L'industrie américaine prit naissance à peu près parallèlement : les premières raffineries furent installées en 1859.

En Roumanie, la première distillerie de pétrole brut fut installée en 1856, pour l'éclairage de la ville de Bucarest. Mais l'industrie pétrolière resta stagnante jusqu'en 1895. A partir de 1900, elle prit un essor considérable et depuis 1907 la production roumaine s'est placée au troisième rang, derrière les États-Unis et la Russie.

Composition. — Les pétroles, nous l'avons dit, sont des produits extrêmement complexes. Ils renferment des carbures appartenant à plusieurs séries, et dans chaque série de nombreux homologues depuis les termes gazeux à la température ordinaire jusqu'aux termes

solides. Suivant leur origine, telle ou telle série de carbure domine dans leur composition. Les pétroles américains contiennent surtout des carbures saturés C^nH^{2n+2} dits paraffines, c'est-à-dire des homologues du méthane; les pétroles russes, au contraire, sont formés en majeure partie de carbures cycliques ou naphènes de formules C^nH^{2n} , représentant des chaînes polyméthyléniques fermées $(CH^2)^n$, ou des homologues à chaînes latérales. En particulier les carbures hexaméthyléniques ne sont autre chose que les dérivés hexahydrogénés des carbures benzéniques. D'ailleurs les pétroles américains ou russes contiennent à la fois les deux séries; on rencontre également dans beaucoup de pétroles, principalement ceux de la Californie, des carbures aromatiques C^nH^{2n-6} , et dans ceux de l'Ohio et du Texas, des carbures C^nH^{2n-2} . On trouve enfin dans les pétroles des oléfines C^nH^{2n} homologues de l'éthylène, mais ces carbures se rencontrent surtout dans les huiles de schistes d'Écosse, ou dans les produits distillés au contact de parois surchauffées.

Les divers pétroles renferment toujours des combinaisons azotées: les huiles du Texas en particulier contiennent une forte proportion de bases pyridiques. Celles de l'Ohio sont particulièrement riches en combinaisons sulfurées du type des mercaptans.

Voici d'après R. Ehram¹ la liste des principaux carbures rencontrés dans les pétroles.

NOMS	FORMULES	POINTS d'ébullition.	DENSITÉS
Hydrocarbures saturés (Paraffines) C^nH^{2n+2}			
		degrés centigr.	
Méthane	CH^4		
Ethane	C^2H^6		
Propane	C^3H^8		
Butane	C^4H^{10}	4	0,600
Pentane	C^5H^{12}	38	0,628
Méthylbutane	»	30	—
Hexane	C^6H^{14}	70	0,668
Isohexane	»	61	—
Heptane	C^7H^{16}	98	0,699
Isoheptane	»	91	—
Octane	C^8H^{18}	125	0,703
Isooctane	»	118	—
Nonane	C^9H^{20}	148	0,741

¹ *Fabrication des huiles minérales et pyrogénées*, Paris 1907.

NOMS	FORMULES	POINTS d'ébullition.	DENSITÉS
Hydrocarbures saturés (Paraffines) C^nH^{2n+2} (Suite).			
		degrés centigr.	
Décane	$C^{10}H^{22}$	158	0,750
Undécane	$C^{11}H^{24}$	182	0,765
Duodécane	$C^{12}H^{26}$	202	0,776
Tridécane	$C^{13}H^{28}$	216	0,792
Tétradécane	$C^{14}H^{30}$	238	—
Pentadécane	$C^{15}H^{32}$	258	—
Hexadécane	$C^{16}H^{34}$	278	—
Heptadécane	$C^{17}H^{36}$	303	—
Octodécane	$C^{18}H^{38}$	317	—
Eicosane	$C^{20}H^{42}$	—	—
Tricosane	$C^{23}H^{48}$	—	—
Pentacosane	$C^{25}H^{52}$	—	—
Heptacosane	$C^{27}H^{56}$	—	—
(Paraffine)	$C^{30}H^{62}$	370	—
Hydrocarbures éthyléniques (Oléfines) C^nH^{2n}			
Ethène (Éthylène)	C^2H^4	—	—
Propène	C^3H^6	— 48	—
Butène	C^4H^8	+ 5	—
Pentène	C^5H^{10}	37	0,663
Hexène	C^6H^{12}	69	0,669
Heptène	C^7H^{14}	98	0,703
Octène	C^8H^{16}	124	0,722
Nonène	C^9H^{18}	140	—
Décène	$C^{10}H^{20}$	160	0,771
Undécène	$C^{11}H^{22}$	195	0,782
Duodécène	$C^{12}H^{24}$	216	—
Tridécène	$C^{13}H^{26}$	235	0,791
Pentadécène	$C^{15}H^{30}$	245	0,813
Cétène	$C^{16}H^{32}$	274	0,789
Tétradécène	$C^{20}H^{40}$	—	—
Cérotène	$C^{27}H^{54}$	—	—
Mélistène	$C^{30}H^{60}$	375	—
Hydrocarbures benzéniques C^nH^{2n-6}.			
Benzène	C^6H^6	81	0,877
Toluène	C^7H^8	111	0,872
Paraxylène	C^8H^{10}	137	—
Mésitylène	C^9H^{12}	163	0,869
Cumène	»	151	0,837
Pseudocumène	»	166	0,864
Durène	$C^{10}H^{14}$	191	—
Isodurène	»	197	—
Amylbenzène	$C^{11}H^{16}$	193	0,860

NOMS	FORMULES	POINTS d'ébullition.	DENSITÉS
Hydrocarbures naphténiques (Hexaméthylènes) CⁿH²ⁿ.			
		degrés centigr.	
Hexanaphtène.	C ⁶ H ¹²	69	0,760
Heptanaphtène.	C ⁷ H ¹⁴	97	0,772
Octonaphtène.	C ⁸ H ¹⁶	119	—
Isooctonaphtène.	»	122	—
Nonanaphtène.	C ⁹ H ¹⁸	135	—
Décánaphtène.	C ¹⁰ H ²⁰	161	0,795
Undécánaphtène.	C ¹¹ H ²²	182	0,849
Duodécánaphtène.	C ¹² H ²⁴	197	0,865
Tétradécánaphtène.	C ¹⁴ H ²⁸	240	0,839
Pentadécánaphtène.	C ¹⁵ H ³⁰	247	0,830

ORIGINE DES PÉTROLES

La question de l'origine des pétroles est encore plus obscure et plus controversée que celle de la formation de la houille : tandis que pour celle-ci on admet généralement une origine végétale, ou tout au moins organique, on a pu proposer pour les huiles minérales une formation, tantôt organique, tantôt minérale.

Hypothèse de la formation exclusivement minérale. — Mendelejeff supposait que le pétrole s'était formé par l'action de la vapeur d'eau sur le carbure de fer; il se serait produit différents carbures d'hydrogènes qui se seraient condensés et polymérisés sous l'action des hautes températures réalisées pendant les périodes de formation géologique. Berthelot soutenait une opinion analogue.

Lorsqu'Henri Moissan put réaliser, grâce à son four électrique, la préparation des différents carbures métalliques pour la plupart inconnus avant lui, et étudier leurs propriétés, il donna de sérieux arguments en faveur de la formation minérale des pétroles. Il montra que ces carbures étaient attaqués facilement par l'eau (sauf toutefois ceux de fer, de chrome, de tungstène et de molybdène), et que si la plupart donnaient dans ces conditions des gaz très purs, d'autres au contraire donnaient des mélanges gazeux complexes, en particulier les carbures des terres rares et surtout le carbure d'uranium : il put préparer, par action de l'eau sur ce dernier, non seulement des produits gazeux, mais aussi des produits liquides et même des pro-

duits solides condensés. L'hypothèse de Mendelejeff se trouvait ainsi appuyée de données expérimentales sérieuses.

Malheureusement l'uranium est extrêmement rare à la surface de la terre. On peut alors trouver peu vraisemblable la formation à partir de son carbure des énormes gisements de pétrole. Il est vrai qu'on peut répondre à cette objection en remarquant que nous ne connaissons que la composition d'une pellicule extrêmement mince à la surface de la terre, et que, puisque la densité moyenne de notre globe est de beaucoup supérieure à celle de l'écorce terrestre, on est précisément conduit à y admettre la présence d'une forte proportion de produits métalliques de densité élevée, dont ferait partie l'uranium.

HYPOTHÈSE DE MM. SABATIER ET SENDERENS. — Les belles expériences de MM. Sabatier et Senderens sur l'action hydrogénante des métaux divisés les ont conduits à une nouvelle théorie de la formation minérale des pétroles :

Si l'on fait passer sur du nickel réduit maintenu à la température de 300° un mélange d'acétylène et d'hydrogène, les deux gaz se combinent et l'on obtient un mélange extrêmement complexe de carbures, les uns liquides, d'autres solides qui se déposent à l'extrémité du tube sous forme de goudron épais. On a pu obtenir ainsi deux grammes d'un liquide noir, de densité 0,926, dont l'odeur forte rappelait celle des produits de décomposition des pétroles naturels, et dont on a pu séparer par distillation plusieurs portions passant de 150 à 270°, dont la densité variait de 0,825 à 0,865.

MM. Sabatier et Senderens supposent alors qu'il s'est formé de l'acétylène par l'action de l'eau sur le carbure de calcium, de l'hydrogène par l'action de l'eau sur divers métaux, et que ces gaz, au contact des métaux, se sont combinés et condensés pour donner des pétroles¹.

Théorie de la formation organique. — **HYPOTHÈSE D'ENGLER.** — D'après Engler et Höfer² le pétrole se serait formé par la décomposition, sous l'influence de températures élevées et à de très hautes

¹ Plusieurs auteurs, à la suite de Humboldt, ont attribué aux pétroles une origine volcanique sans expliquer d'ailleurs par quel mécanisme exact ces produits avaient pris naissance. Il est en tout cas assez remarquable de constater que les sources salées, les gisements de pétroles et les mines de soufre se trouvent le plus souvent réunies en des points très voisins du globe (voyez l'article : *Gaz d'éclairage* du dictionnaire de Wurtz, 2^e supplément, 4, p. 560).

² *Ber.*, 21, 1816; 1888; 22, 592; 1889; 26, 1440; 1893; 30, 2358; 1897.

pressions, des matières grasses de divers animaux marins (poissons, mollusques et surtout foraminifères). La décomposition, s'effectuant suivant un processus analogue à celui que nous avons décrit au sujet de la distillation pyrogénée du bois, aurait donné de l'eau, de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone d'une part, et de l'autre des carbures d'hydrogène, qui, avec le temps et sous l'influence de la pression et de la température, se seraient peu à peu condensés et polymérisés.

On peut se demander, au premier abord, s'il est possible que les énormes gisements de pétroles connus puissent provenir de la décomposition de produits animaux. Cependant, en réfléchissant à la durée certainement considérable des périodes préhistoriques et à l'intensité de la vie animale à ces époques, on doit reconnaître que cette idée ne présente rien d'inadmissible.

Des expériences récentes (1908) de Kungler et Schwedhelm ont établi que la distillation pyrogénée des oléates et des stéarates des métaux lourds peut donner des produits ayant l'apparence et l'odeur du pétrole brut.

D'autres auteurs préconisent l'origine végétale. Ainsi Kröemer et Spilker¹ ont trouvé dans les algues et les diatomées des marais tourbeux de Franzenbad de fortes proportions de matières cireuses qui, distillées sous pression, se décomposent en donnant des carbures liquides. Les pétroles proviendraient alors de la décomposition, sous des pressions considérables, des matières grasses de diatomées qui auraient primitivement couvert de vastes étendues. Cette hypothèse est en somme très analogue à celle d'Engler, en substituant simplement l'origine végétale des matières grasses à l'origine animale.

Importance du pouvoir rotatoire. — Entre ces deux théories de la formation minérale ou de l'origine organique des pétroles, il a été longtemps difficile de se prononcer, et l'on peut dire qu'à l'heure actuelle aucune n'est démontrée d'une manière satisfaisante; mais les observations de Tschugaeff² sur l'existence du pouvoir rotatoire chez ces liquides semblent bien donner un argument sérieux en faveur de la seconde, ou tout au moins renverser à peu près irrévocablement la première. On sait, en effet, que les composés carbonés formés

¹ Ber., 32, 2910; 1899; 35, 1212; 1902.

² Chem. Zeitg., 28, 503.

par voie de synthèse exclusivement minérale ne présentent pas le pouvoir rotatoire ; ce qui s'explique en remarquant que celui-ci suppose une dissymétrie de la molécule, et que lorsqu'on parvient par voie de synthèse à former une pareille molécule, on obtient par raison de symétrie les deux formes inverses en quantités équivalentes, c'est-à-dire en définitive des composés racémiques que l'on ne peut dédoubler qu'en faisant intervenir des êtres vivants ou des composés déjà doués du pouvoir rotatoire. Seuls, les organismes vivants, formés de molécules déjà orientées, peuvent réaliser la formation de nouvelles molécules orientées. On a bien essayé de faire intervenir dans les réactions de synthèse des agents physiques dissymétriques, par exemple, la lumière polarisée circulairement. On pouvait espérer dans ces conditions réaliser plus facilement la formation d'un des deux isomères ; il n'en a rien été jusqu'ici, et provisoirement tout au moins, l'intervention de la vie semble bien nécessaire à la formation d'un composé optiquement actif.

Il est donc très vraisemblable que les pétroles ont une origine organique. Encore serait-il nécessaire, pour admettre les hypothèses d'Engler ou de Krømer et Spilker, de vérifier avant tout que les pétroles synthétiques formés dans leurs expériences sont doués du pouvoir rotatoire.

TRAITEMENT DES PÉTROLES BRUTS

Certains pétroles peuvent être employés à l'état brut pour le chauffage ; par exemple, l'huile du Texas. Mais dans l'immense majorité des cas, ils constituent des produits trop complexes ou trop impurs pour pouvoir être utilisés, et l'on doit au préalable les soumettre à la distillation, de manière à les diviser en fractions plus homogènes, bouillant entre des limites de températures plus restreintes.

Soumis à l'action d'une élévation progressive de température, les pétroles bruts dégagent tout d'abord des gaz combustibles non condensables, que l'on conduit sous les chaudières ; puis on condense des parties légères appelées d'abord *éther de pétrole*, puis *benzine brute* ou *naphte* ; viennent ensuite les *pétroles lampants*, les *huiles intermédiaires*, les *huiles de graissage* ou *huiles à paraffine*. Ces différentes portions sont enfin généralement rectifiées, les plus légères par fractionnement dans des colonnes à plateaux, les plus lourdes pour en retirer les parties solides à la température ordinaire et dénommées, suivant leur consistance, *vaseline* ou *paraffine*.

La distillation des pétroles bruts s'effectue le plus souvent d'une

manière intermittente dans de grandes chaudières en tôle horizontales à réaction circulaire ou elliptique et contenant de 500 à 1 000 hectolitres. En Amérique, on emploie surtout des chaudières rectangulaires à fond ondulé.

La distillation est terminée en injectant un courant de vapeur d'eau surchauffée pendant quelques heures de manière à chasser toutes les parties volatiles ; on doit ensuite laisser refroidir le résidu avant de le décanter dans les réservoirs, afin d'éviter son inflammation ; il faut enfin laisser la chaudière revenir à la température ordinaire avant d'y introduire une nouvelle charge d'huile brute, qui contient des portions volatiles très inflammables.

Certaines usines réalisent la distillation continue au moyen d'une série de chaudières cylindriques plus petites, contenant par exemple 100 hectolitres, placées les unes à côté des autres à des niveaux progressivement de plus en plus bas. Le pétrole brut est amené à la chaudière supérieure et s'écoule de cornue en cornue en distillant progressivement des parties de moins en moins volatiles. On réalise ainsi une économie importante de temps et de combustible ; mais ce procédé ne convient qu'aux grandes installations et nécessite d'énormes approvisionnements (Ehrsam).

Plusieurs procédés ont été proposés dans ces dernières années pour remplacer la distillation dans les grandes chaudières. On peut employer par exemple des appareils à distillation continue en forme de colonnes à plateaux (système Schuchow), ou produire la distillation du pétrole, déjà débarrassé dans une première cornue de ses parties les plus volatiles, par un double jet de vapeur d'eau surchauffée qui pulvérise la veine liquide : les vapeurs sont classées dans des déphlegmateurs et le résidu est séparé (système Rossmöessler).

Décomposition pyrogénée des pétroles. — Lorsqu'on soumet les vapeurs de pétrole à l'action d'une température élevée, on observe le même phénomène que nous avons déjà signalé à plusieurs reprises dans la distillation du bois ou de la houille : la décomposition de la molécule carburée en parties plus volatiles et en parties plus condensées. Ce phénomène se produit toutes les fois que l'on essaie de distiller à feu nu les résidus de pétrole après la distillation des pétroles lampants : le point d'ébullition élevé de la portion restante oblige à chauffer fortement les parois de la chaudière, qui peuvent être portées au rouge sombre ; il en résulte une surchauffe des vapeurs et leur dédoublement en fractions beaucoup plus volatiles. Cette décom-

position, observée pour la première fois accidentellement dans une usine américaine, a été désignée sous le nom de *cracking*. Suivant les produits que l'on se propose d'obtenir à la distillation, on cherche à la favoriser ou à l'éviter : on l'utilise quand on veut augmenter le rendement des huiles destinées à l'éclairage (bien que les produits obtenus lors du *cracking*, formées en majeure partie de carbures éthyléniques C^mH^{2n} , soient toujours inférieurs comme qualité aux huiles naturelles). On l'évite au contraire en opérant la distillation dans un courant de vapeur surchauffée toutes les fois que l'on veut conserver dans leur intégrité les produits lourds, pour la préparation des huiles de graissage.

La pression dans le vase distillatoire a naturellement une grande influence sur la décomposition : une augmentation de pression la favorise en élevant la température d'ébullition ; le procédé a été utilisé tout d'abord sur les huiles de schiste. Au contraire, l'emploi de la distillation dans le vide permet de l'éviter à peu près complètement.

La décomposition obtenue par un chauffage brutal à feu nu produit toujours la séparation de carbone libre qui constitue le résidu final du *cracking*-process et que l'on désigne sous le nom de *coke de pétrole*. M. Ragosin a trouvé qu'en produisant la distillation des huiles lourdes à l'aide de vapeur de benzine, au lieu de vapeur d'eau, dans un appareil spécial, on évitait la formation de carbone libre, et l'on obtenait seulement de la paraffine à partir de pétroles russes qui n'en contenaient pas primitivement.

En définitive, voici quels sont les procédés mis en œuvre dans le traitement des pétroles :

Une première distillation accomplie dans les grandes cornues donne des produits que l'on sépare en deux portions : la première, passant au-dessous de 160° , constitue l'essence ou benzine brute ; on la rectifiera ultérieurement dans des colonnes Savalle ; de 160° à 300° on recueille les pétroles lampants que l'on classe généralement en trois catégories successives suivant leurs densités : $0,730 - 0,770$; $0,770 - 0,800$ et $0,800 - 0,810$; enfin le résidu est transvasé après refroidissement pour être traité de deux manières différentes, suivant qu'on veut préparer des produits pour l'éclairage ou des huiles de graissage : dans le premier cas, on distille à feu nu pour obtenir le *cracking* ; il se dégage des gaz combustibles, des produits condensables, et il reste du coke. Dans le second cas, on distille dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, ou dans le vide : il reste comme résidu des huiles paraffineuses.

Les essences sont rectifiées une deuxième fois dans des colonnes, en utilisant pour le chauffage la chaleur de condensation des pétroles lampants : les produits rectifiés sont divisés suivant leurs points d'ébullition en :

<i>Ether de pétrole</i> bouillant de	35 à 70°	$d = 0,650$ à $0,660$;
<i>Gazoline</i>	— 70 à 80°	$0,660$ à $0,670$;
<i>Benzine légère</i>	— 80 à 100°	$0,670$ à $0,707$;
<i>Essence de pétrole</i> ou <i>ligroïne</i>	100 à 120°	$0,707$ à $0,722$;
<i>Huile à dégraisser</i>	— 120 à 150°	$0,722$ à $0,750$.

Les rendements en essence légère et en pétrole lampant varient énormément suivant l'origine des pétroles. D'une manière générale, ils sont beaucoup plus élevés avec les huiles américaines qu'avec les huiles russes. Les produits russes¹ sont préférés aux produits américains pour l'emploi dans les moteurs à explosion ; par contre, ils sont inférieurs pour l'éclairage, ce qui tient à leur proportion élevée en carbures cycliques : la flamme d'un pétrole est d'autant plus blanche qu'il est plus riche en carbures gras saturés.

Le résidu des pétroles russes dont on a distillé l'essence et l'huile lampante est désigné sous le nom de *mazout* (en Roumanie, *pacoura*) ; c'est un produit très intéressant pour le chauffage industriel².

Raffinage. — La distillation est, en général, suivie d'un traitement chimique destiné à éliminer des impuretés acides ou basiques, et souvent aussi à faire disparaître la couleur ou l'odeur des produits.

On emploie dans ce but un traitement à l'acide sulfurique concentré (5 p. 100 environ du poids du pétrole) qui se combine aux produits basiques et donne également avec une partie des carbures non saturés des dérivés sulfonés. On lave ensuite à l'eau, puis à la soude étendue à 5 p. 100, qui dissout les produits sulfonés. On fait ensuite un dernier lavage à l'eau, et l'on sèche finalement les produits décantés sur du carbonate de potasse ou simplement par filtration sur de la sciure de bois. L'acide sulfurique ayant servi au raffinage est utilisé pour la préparation du sulfate d'ammoniaque.

Le traitement à l'acide sulfurique agit aussi comme décolorant ; dans les raffineries américaines on complète la décoloration par une exposition à la lumière dans des vases plats ; on peut aussi employer

¹ Les pétroles russes produisent d'ailleurs très peu d'essence légère telle qu'en demande l'industrie automobile. On s'adresse pour cet usage aux pétroles d'Amérique ou de Roumanie.

² Voyez plus loin page 382.

le permanganate de potasse en solution aqueuse sulfurique ; ce réactif agit de plus comme désodorisant. Enfin on utilise encore la filtration sur terre argileuse ou sur noir animal.

Propriétés des pétroles. — **DENSITÉ.** — La densité des produits rectifiés augmente régulièrement en même temps que leur température d'ébullition moyenne. Elle varie de 0,650 pour l'éther de pétrole à 0,900 pour les huiles de graissage. Les mazouts atteignent 0,935.

COEFFICIENT DE DILATATION. — Le coefficient de dilatation des pétroles est très élevé. C'est un caractère dont il est extrêmement important de tenir compte, car les fûts ou les bidons trop complètement remplis risquent de se briser par une élévation ultérieure de température. Voici les coefficients de dilatation de quelques huiles brutes d'après Holde¹.

PROVENANCE	DENSITÉ	K
Canada.	0,828	0,000843
Schwabweiler	0,829	0,000843
—	0,861	0,000858
Galicie Occidentale.	0,885	0,000775
Valachie	0,901	0,000748
Wietze	0,955	0,000647

On remarque que la dilatation diminue quand la densité augmente. En prenant comme valeur par excès 0,000.900, on voit que si l'on prévoit une augmentation de température possible de 50° il faut laisser un espace libre égal à 5 p. 100 du volume du liquide.

VOLATILITÉ. — La volatilité des différents produits retirés du pétrole est extrêmement variable. On cherche autant que possible à avoir des produits rectifiés passant à la distillation entre des limites restreintes de température. Cette homogénéité est surtout importante pour les essences destinées à alimenter d'air carburé les moteurs à explosion, la proportion de vapeur inflammable dans le mélange explosif diminuant progressivement à mesure que diminue la volatilité du liquide.

INFLAMMABILITÉ. — Suivant leurs compositions, les pétroles possèdent à une température donnée une tension de vapeur plus ou moins

¹ Holde, *Traité d'analyse des huiles minérales*, traduit par L. Gautier, Paris, 1909.

grande. Quand cette tension est suffisante pour que l'air saturé forme un mélange détonnant, le pétrole devient inflammable à distance à l'aide d'une flamme. Si la température s'élève, la tension de vapeur augmente et le danger d'inflammation s'accroît. On appelle degré d'inflammabilité d'un pétrole la température à partir de laquelle sa vapeur forme avec l'air un mélange détonnant.

Les pétroles dont le degré d'inflammabilité est inférieur à la température ordinaire ne doivent pas être maniés au voisinage d'une flamme. Voici les degrés d'inflammabilité des essences de pétrole :

Points d'ébullition.	50-60°	60-78°	70-88°	80-100°	80-115°	100-115°
Degré d'inflammabilité.	— 58°	— 39°	— 45°	— 22°	— 21°	— 10°

Le point d'inflammabilité varie naturellement pour un même pétrole, avec la pression atmosphérique ; il dépend aussi dans une certaine mesure du modèle d'appareil qui a servi à faire la détermination.

Le point d'inflammabilité minimum admis en France pour les pétroles lampants est de 35°. Pour obtenir ce degré on doit éliminer complètement les carbures légers volatils. On y parvient en faisant circuler le pétrole de haut en bas dans des colonnes à plateaux traversées par un courant de vapeur sèche qui entraîne les essences. C'est ce que l'on appelle « donner de l'inflammabilité ».

Les résidus de distillation des pétroles ou mazouts ont un point d'inflammabilité très élevé, variant de 110 à 150°.

POUVOIR CALORIFIQUE. — Le pouvoir calorifique des pétroles est en moyenne de 11 000 calories. Il varie peu suivant la provenance et suivant la volatilité, ce qui doit être puisque le rapport du nombre des atomes de carbone aux atomes d'hydrogène est toujours sensiblement de 1/2. Cependant on peut dire qu'en général les pétroles américains sont un peu supérieurs sous ce rapport aux pétroles russes.

Le pouvoir calorifique déterminé expérimentalement avec la bombe Mahler est toujours inférieur au chiffre théorique que l'on pourrait calculer d'après l'analyse quantitative en faisant la somme des pouvoirs calorifiques du carbone et de l'hydrogène, la différence correspondante à la chaleur de formation des carbures.

M. P. Lemoult a donné une méthode de calcul des chaleurs de combustions des composés organiques qui pourrait s'appliquer immédiatement au pétrole : il a trouvé¹ que la chaleur de combus-

¹ P. Lemoult, *Bull. Soc. Chim.*, (3), **31**, 224 ; 1904.

tion (moléculaire) d'un carbure quelconque, saturé, benzénique ou naphtéinique, de formule C^xH^y , était représentée très exactement par la formule :

$$C = 102 x + \frac{55}{2} y.$$

On en déduit immédiatement la chaleur de combustion d'un pétrole dont on représenterait par C^xH^y la composition globale. On trouve ainsi pour un carbure exclusivement naphtéinique ($\frac{y}{x} = 2$) : $C = 11.214$ par kilogramme. Si le pétrole contient des carbures saturés, $\frac{y}{x}$ est supérieur à 2, et la valeur de C devient plus forte.

Utilisation du pétrole. — En laissant de côté les applications à l'éclairage et aux huiles de graissage, les emplois du pétrole comme combustible industriel sont intéressants à deux points de vue :

Les pétroles légers servent à préparer l'air carburé pour l'alimentation des moteurs à explosion. Cet emploi correspond à une consommation considérable : elle était déjà en 1908 de plus de 500 mètres cubes d'essence par jour pour l'industrie automobile.

Les pétroles lourds peuvent être brûlés directement sous les chaudières et remplacer la houille. On utilise à cet effet principalement les résidus de pétrole, les mazouts dont le prix est peu élevé comparativement, et dont le point d'inflammabilité très élevé rend le maniement très sûr. Cette application prend de jour en jour plus d'importance car elle entraîne de nombreux avantages.

A cause de son pouvoir calorifique élevé et de la bonne utilisation qu'on peut en faire, le pétrole dégage dans un foyer, à poids égal, sensiblement plus de chaleur que la houille : le rapport est d'après M. H. Le Chatelier de $\frac{3}{2}$. On peut compter qu'un kilogramme de mazout fournit 12,5 kg. de vapeur.

L'allumage des foyers à pétrole, que nous étudierons plus loin en détail (p. 485) est très rapide, et leur réglage très facile. On peut donc mettre une chaudière très rapidement en pression, augmenter ou modérer à volonté la production de chaleur, et quand cela est nécessaire, éteindre le feu immédiatement.

La conduite et la surveillance des brûleurs à pétrole est très simple, un homme suffit pour une batterie de 8 à 10 chaudières. Comme on n'est pas obligé d'ouvrir les portes des foyers pour introduire le combustible, la température des chaufferies est beaucoup

moins élevée ; en même temps on évite la déperdition de chaleur correspondante.

La combustion se produit sans fumée, sans suie, sans poussières, sans escarbilles ou étincelles.

Enfin il n'y a pas de place perdue pour le magasinage, et le remplissage des réservoirs se fait avec une extrême rapidité.

Ces avantages rendent le pétrole encore plus précieux pour le chauffage des locomotives et des bateaux à vapeur que pour celui des chaudières fixes. En Russie et en Amérique, la traction sur de nombreuses voies ferrées se fait avec chauffage au pétrole. Cependant les progrès de la traction électrique ne permettent pas de penser que cette application soit appelée à un grand développement, tout au moins dans les pays éloignés des gisements comme la France ¹.

Il n'en est pas de même à bord des navires : la facilité et la rapidité de l'approvisionnement, la puissance sous un volume donnée, l'élasticité du chauffage permettant des coups de feu rapides, l'absence de fumée rendent le pétrole particulièrement précieux à bord des bâtiments de guerre, sinon pour remplacer totalement la houille, au moins pour s'y substituer à certains moments ou y superposer son action. On peut craindre cependant que la température extrêmement élevée obtenue dans ces conditions ne détermine une altération rapide des chaudières, tout au moins de celles qui ne sont pas spécialement disposées pour l'usage exclusif du pétrole, et où l'on veut utiliser le chauffage mixte.

En revanche, le pétrole conserve tous ses avantages pour l'alimentation des fours métallurgiques ; il est déjà très apprécié à ce point de vue en Amérique et en Russie, et il est vraisemblable que cette application se développera et se généralisera de plus en plus.

Il est du reste permis de se demander si l'utilisation du pétrole au chauffage des chaudières se développera beaucoup : déjà apparaît une solution beaucoup plus élégante et théoriquement au moins bien plus économique avec le moteur Diesel : il semble bien que le perfectionnement et le développement des moteurs à explosion à huile lourde soit la solution de l'avenir ; mais quel que soit son mode d'emploi le pétrole n'en deviendrait d'ailleurs que plus nécessaire ².

¹ Le prix du mazout à Bakou est de 3 francs la tonne ; pour le produit rendu en France, il s'élève à 185 francs, dont près de la moitié d'ailleurs (90 francs) représente le droit de douane.

² Il faut remarquer cependant que le goudron de houille, dont les usines à gaz et les cokeries produisent d'énormes quantités, paraît devoir remplacer avantageusement le mazout, soit pour le chauffage des chaudières ou des fours, soit avec les moteurs Diesel. Voir p. 492.

B. — LES COMBUSTIBLES ARTIFICIELS

§ 1. — LES HUILES DE SCHISTES

La première usine de distillation des schistes bitumineux fut installée en France, à Autun, en 1837, par le physicien suisse Selligues; quelques années plus tard, James Young installa en Écosse des distilleries analogues, mais le boghead qu'il exploitait augmentant rapidement de valeur en raison du développement de l'industrie du gaz, on s'aperçut qu'on pouvait le remplacer par des schistes maigres qui abondaient dans le pays; dès lors, l'industrie se développa rapidement et devint florissante, bien qu'elle ait eu à lutter dans ces dernières années contre la concurrence des pétroles.

Les huiles de schistes, soumises au raffinage, donnent des parties légères utilisées comme huiles d'éclairage ou comme combustibles, surtout dans les moteurs à explosion. Cependant l'intérêt principal des exploitations de schistes étant la production de la paraffine, nous ne ferons qu'indiquer très brièvement les caractéristiques de cette industrie¹.

Le carbone et l'hydrogène qui existent dans les schistes maigres n'y sont pas combinés sous forme de carbures, car les dissolvants habituels de ces corps ne peuvent rien leur enlever; les carbures ne se forment donc que dans la distillation pyrogénée. D'autre part, celle-ci ne doit pas être conduite trop brutalement, de manière à éviter l'influence décomposante d'une température trop élevée sur les vapeurs que l'on se propose de recueillir.

Les schistes maigres, renfermant de l'azote, donnent à la distillation de l'ammoniaque, mais il ne s'en dégage qu'une très faible proportion avec les vapeurs carburées: la plus grande partie de l'azote reste dans le résidu, qu'il suffit de chauffer au rouge pour obtenir un rendement à peu près intégral en ammoniaque. On s'arrange donc pour conduire la distillation assez doucement au début, afin

¹ Voir G. Chesneau, *Ann. Min.*, (9), 3, 617; 1893. — Ehrsam, *Fabrication des huiles minérales et pyrogénées*, Paris, 1907.

d'éviter la décomposition des vapeurs hydrocarbonées, et l'on termine au rouge blanc pour récupérer la totalité de l'ammoniaque.

On emploie à cet effet, actuellement, les cornues W. Young et Beilby. Elles sont placées verticalement au nombre de huit dans un four alimenté par des gazogènes à récupération d'ammoniaque. Chaque cornue se compose de trois parties : la partie inférieure est un cylindre vertical en terre réfractaire chauffé au rouge blanc dans le foyer ; sur ce cylindre s'emboîte une deuxième pièce en fonte, chauffée au rouge sombre. Enfin un caisson de même métal termine à la fois 4 cornues voisines. Le chargement s'effectue par la partie supérieure du caisson ; les fragments de schistes pénètrent dans la partie moyenne, où ils dégagent les produits volatils carbonés ; le résidu tombe dans la partie inférieure où, sous l'influence de la température élevée à laquelle il se trouve portée, il abandonne le restant de son azote à l'état d'ammoniaque. Les vapeurs qui sortent de l'appareil sont conduites dans des condenseurs horizontaux refroidis par une circulation d'air ; elles s'y condensent en partie en donnant des goudrons ou huile brute et des eaux ammoniacales, tandis qu'il se dégage des gaz non condensables entraînant des vapeurs de carbures volatils. Ces gaz sont conduits dans deux tours remplies de coke où l'on fait couler de l'huile lourde qui dissout les produits volatils, que l'on récupérera par distillation.

Le goudron de schistes doit être fractionné et purifié. Cette purification est assez pénible, elle exige des lavages acides et alcalins alternés avec des distillations. On commence par fractionner le goudron par distillation sur de la soude caustique, dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, et l'on termine en faisant progressivement le vide. On obtient successivement de la *benzine*, des *huiles légères* et des *huiles lourdes*. A la fin de la distillation, qui s'opère généralement dans une cornue plus petite, il passe des *huiles rouges* contenant du chrysène.

Les produits fractionnés sont traités par l'acide sulfurique concentré, qui se combine aux produits basiques et aux oléfines en donnant des produits goudronneux qui se déposent peu à peu. On attend quelques heures pour que la précipitation soit complète, puis on fait un traitement à la lessive de soude à 36° B. et l'on attend de nouveau plusieurs heures, il se produit une seconde séparation de goudron. Les huiles ainsi traitées sont redistillées dans un courant de vapeur d'eau, puis on recommence sur elles les traitements successifs à l'acide sulfurique et à la soude, enfin on les distille une

dernière fois. On obtient ainsi des *huiles légères* et des *huiles lampantes* employées pour l'éclairage ou les moteurs, des *huiles intermédiaires*, et dans les résidus des *huiles de paraffine* d'où ce carbure cristallise par repos.

Les schistes bitumineux, tels qu'il en existe aux environs d'Autun, sont traités d'une manière à peu près identique. Cependant on doit remarquer qu'ici les carbures liquides proviennent de la décomposition du bitume qui existe tout formé dans le minéral, et peut en être extrait au moyen de dissolvants convenables. Il n'est donc pas nécessaire d'élever beaucoup la température (400-450°) pour obtenir une abondante distillation. Néanmoins quand le bitume est totalement décomposé, il reste un résidu d'où une nouvelle élévation de température fait encore distiller des huiles légères.

On obtient ainsi, comme avec les schistes d'Écosse, un goudron semi-liquide, noir brun, composé principalement de carbures saturés et de carbures éthyléniques, mais renfermant d'autres carbures et surtout des produits phénoliques dont la proportion peut atteindre 20 p. 100 ; il contient également des combinaisons sulfurées.

On distille ce goudron dans des chaudières en fonte, dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, et en s'aidant du vide pour terminer l'opération. Les différentes fractions sont traitées à l'acide sulfurique concentré et à la soude, en recommençant alternativement plusieurs fois les distillations et les traitements chimiques.

Les produits obtenus sont désignés suivant leurs densités sous les noms de *benzine*, *huile solaire*, *huiles rouges*, *huiles de créosote*, *huiles de paraffine*. Les deux premiers seuls sont employés comme combustibles.

§ 2. — LE BENZOL

On désigne sous le nom de *benzol* la portion légère des liquides neutres qui se forment par distillation de la houille. Ce liquide est composé de benzène et de ses premiers homologues : toluène et xylènes, ainsi que de produits basiques et phénoliques dont on le débarrasse par des lavages successifs à l'acide sulfurique et à la soude.

On caractérise la pureté d'un benzol par la proportion du produit qui passe à la distillation avant 100°. Le benzol est dit à 90 p. 100 par exemple si les 9/10 passent avant 100°.

Quand les gaz de la houille, au sortir des appareils distillatoires, se refroidissent jusqu'à la température ordinaire, la partie la moins

volatile des vapeurs qu'ils contenaient se condense à l'état de goudron. Mais une autre partie reste mélangée au gaz de telle manière que celui-ci soit en équilibre avec le goudron condensé, c'est-à-dire saturé de ses vapeurs. Comme le benzol représente la portion la plus volatile des produits formés, ce sera lui qui formera la majorité des vapeurs entraînées ; et comme d'ailleurs le volume du gaz de houille est considérable par rapport à celui du goudron, on conçoit que la proportion du benzol en vapeurs, par rapport à celle qui s'est condensée, soit très forte, de 15 à 20 fois plus considérable en pratique.

Pendant longtemps le benzol commercial provenait exclusivement des usines à gaz, qui l'obtenaient en distillant les goudrons ; sa production était donc limitée, et son prix trop élevé pour qu'on puisse l'utiliser comme combustible ; on ne pouvait songer d'autre part à le retirer du gaz d'éclairage, puisque c'est précisément au benzol que celui-ci doit la plus grande partie de son pouvoir éclairant.

La question a changé complètement quand on a imaginé les fours à coke à récupération de sous-produits ; non seulement ces fours produisaient des quantités énormes de goudrons, mais comme le gaz n'était pas employé à l'éclairage, on pouvait sans inconvénient lui retirer son benzol. Ce gaz en renferme environ 7 p. 100 de son poids ; on peut en extraire la presque totalité, et arriver à un rendement de 4 à 5 kilogrammes par tonne de houille distillée.

Pour réaliser cette extraction, on met à profit la grande solubilité de benzol dans les huiles lourdes de goudron de houille passant entre 200 et 300°. Ces huiles sont formées elles-mêmes de carbures aromatiques homologues du benzène ou de séries voisines, mais leur tension de vapeur est sensiblement nulle à la température ordinaire.

Voici sommairement (fig. 80, p. 389) quelle est l'installation des cokeries allemandes, d'après une étude de M. Simmersbach¹ analysée par M. A. Grebel dans le *Génie Civil*².

Le gaz est lavé méthodiquement dans trois colonnes dans lesquelles circule en sens inverse l'huile lourde, qui ruisselle sur des claies en bois du système Zschöke, composées de lames rangées parallèlement en forme de claires-voies, et superposées alternativement suivant deux directions rectangulaires. Ce dispositif multiplie la surface du liquide et assure un contact intime avec le gaz à laver, sans causer de perte de charge. L'huile fraîche est versée à la partie supérieure de la troisième colonne, d'où sort le gaz épuré, au moyen d'un dispositif spé-

¹ *Z. Deut. Ing.*, 6 janvier 1910.

² *Gén. civ.*, 56, 381 ; 1910.

cial assurant une distribution régulière et facilement réglable ; une pompe la recueille au bas de cette colonne et la remonte sur la deuxième d'où elle passe sur la première pour se trouver en contact avec le gaz frais. Elle pénètre ensuite dans des échangeurs de température, qui la portent à 75-80° aux dépens de la chaleur abandonnée par l'huile débenzolée sortant de la colonne distillatoire ; puis elle passe dans un réchauffeur à vapeur d'où elle sort à la température de 123° pour pénétrer dans une colonne à distillation continue, où elle se dépouille du benzol et de la vapeur d'eau dont elle s'était chargée ; elle passe enfin en sens inverse dans l'échangeur de température, où elle se refroidit à 60° environ, et dans un réfrigérant à eau qui la ramène à la température ordinaire ; elle est alors renvoyée aux laveurs à claies pour recommencer le même cycle.

Les vapeurs sortant de la colonne à distiller se divisent après condensation en deux couches, l'une aqueuse, l'autre qui est du benzol à 50 p. 100. Celui-ci est fractionné dans une deuxième colonne, qui le transforme en benzol à 90 p. 100. Il ne reste plus qu'à le soumettre à l'épuration chimique par lavage à l'acide sulfurique concentré, puis à la lessive de soude, et à le rectifier une dernière fois pour la livrer à la consommation.

En France, la société Lorraine de carbonisation a installé à Aubry (Nord), sous la direction de M. Mallet, une usine comportant à peu près la même suite d'opérations : le gaz est lavé dans des colonnes à plateaux du système Mallet, qui donnent d'excellents résultats mais provoquent une perte de charge sensible ; on emploie d'ailleurs aussi les laveurs Zschöke. On a trouvé que pour obtenir un bon épuisement il ne fallait pas que l'huile se charge de plus de 2 p. 100 de benzol.

La distillation de l'huile benzolée et la rectification du benzol se font méthodiquement sans condensation intermédiaire, de la manière suivante : l'huile sortant des laveurs pénètre, après s'être réchauffée dans un échangeur, à la partie supérieure d'une colonne à 10 plateaux, de 1,60 m. de diamètre ; les vapeurs produites sont conduites dans l'échangeur où elles se refroidissent en partie aux dépens de l'huile benzolée, et sont ramenées à 98°. Elles passent ensuite à tour de rôle dans 3 colonnes d'analyses, où elles se dépouillent progressivement de la vapeur d'eau et des hydrocarbures lourds, et d'où elles sortent aux températures respectives de 92°, 85° et 79°. Au sommet de la troisième colonne on recueille du benzol léger à 98 p. 100, tandis que les produits de tête plus volatils, formés principalement de sulfure de carbone, sont aspirés par une cheminée. Les benzols

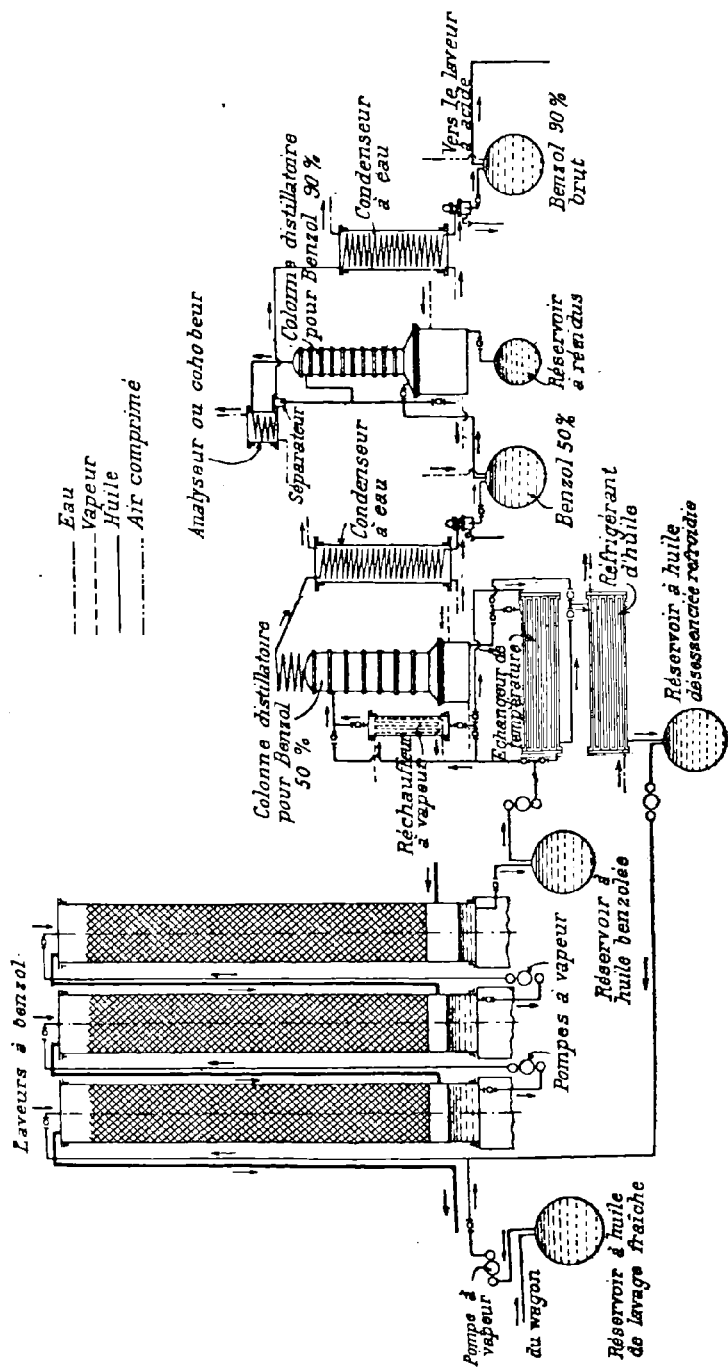


Fig. 80. — Dispositif d'extraction et de rectification du benzol.

sont finalement lavés à l'acide sulfurique et à la soude. On obtient ainsi les 9/10 du produit total sous forme de benzol à 98 p. 100, et un dixième sous forme de benzol lourd à 90 p. 100 à 150°.

Propriétés du benzol. — Le benzol à 98 p. 100 lavé est du benzène presque pur, avec quelques centièmes de toluène ; le benzol à 90 p. 100, le plus employé pour les moteurs à explosion, contient : benzène, 84 ; toluène, 15 ; xylène 1 partie. Il passe à la distillation de 81° à 120°. Le benzol à 50 p. 100 est ordinairement brut, c'est-à-dire souillé de produits basiques et phénoliques ; il renferme de 60 à 65 p. 100 de benzène.

Le pouvoir calorifique (en supposant l'eau condensée) du benzol à 90 p. 100 est de 10 033 calories au kilogramme ou de 8 879 calories au litre. L'essence de pétrole légère a un pouvoir calorifique

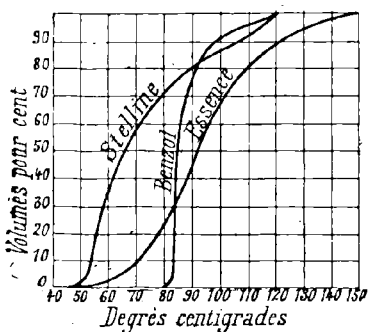


Fig. 81. — Distillation fractionnée des essences de pétrole et du benzol à 90 p. 100.

supérieur (11 464 calories au kilogramme) mais comme sa densité est notablement moins élevée, 0,700 au lieu de 0,885, il s'ensuit que son pouvoir calorifique rapporté au litre tombe à 8 025 calories, il est donc plus faible que celui du benzol. Enfin le benzol constitue, au point de vue de la distillation fractionnée, un liquide beaucoup plus homogène que les essences de pétrole rectifiées, comme on peut s'en rendre compte par le graphique

ci-joint (fig. 81) qui indique la proportion en volumes du liquide passant à la distillation à une température déterminée. Cette homogénéité est précieuse pour le bon fonctionnement des carburateurs.

Aussi le benzol s'est-il révélé comme un combustible fort intéressant pour l'industrie automobile ; la consommation d'essence de pétrole, qui s'accroît sans cesse, amène l'encombrement du marché en produits lourds dont on ne sait que faire ; par suite les prix tendent à monter, au lieu que la production de benzol, par suite du développement toujours plus grand des cokeries et de la substitution des fours à récupération aux anciens fours à coke, augmente de jour en jour. Elle était en 1907 de 8 000 tonnes en France, 60 000 en Allemagne, 15 000 en Angleterre et 6 000 en Belgique. Si

On pratiquait partout la récupération, ces chiffres deviendraient respectivement 18 000, 200 000, 180 000 et 25 000 tonnes. On voit quel pourrait être l'intérêt de ce combustible. Son seul défaut, en ce qui concerne la carburation de l'air pour l'usage des moteurs à explosion, est la température de solidification élevée (-6 à -8°). On en triomphe facilement, soit en réchauffant le carburateur par les gaz brûlés, soit en additionnant le benzol d'une faible proportion d'essence de pétrole : il suffit de 10 à 15 p. 100 pour abaisser la solidification à -10° ou -15 ; une proportion de 15 à 20 p. 100 de toluène produit le même effet¹. Il faut également, quand on remplace l'essence par le benzol dans un carburateur, diminuer l'orifice de giclage d'environ 10 p. 100.

§ 3. — L'ALCOOL

Nous ne parlerons pas ici de la préparation de l'alcool, qui sera traitée avec tous les développements désirables dans un autre volume de cette encyclopédie, et nous ne dirons que quelques mots de l'emploi de l'alcool comme combustible, surtout pour comparer aux autres produits que nous venons d'étudier.

ALCOOLS	DENSITÉ A 15°	PROPORTION DE DÉNATURANT AJOUTÉ PAR HECTOLITRE D'ALCOOL A 90°				
		Méthylène brut.	Pyridine et bases pyridiques.	Acétone.	Benzol.	Benzine impure.
Français	0,832	7,5	»	2,5	»	0,5
Dénaturé allemand.	0,819	1,5	0,5	0,5	»	»
Moteur —	0,825	0,75	0,25	0,25	2	»
Dénaturé autrichien.	0,835	3,75	0,5	1,25	»	»
Moteur —	0,826	0,5	traces.	traces.	2,5	»
Russe.	0,836	10	0,5	5	»	»
Moteur italien.	0,835	6,5	0,65	2	1	»
Suisse.	0,837	5	0,32	2,2	»	»

L'alcool ne peut être utilisé économiquement qu'après avoir subi la dénaturation, c'est-à-dire après avoir été additionné de matières qui le rendent impropre à la consommation. Les procédés de dénaturation varient suivant les pays : ils ont pour but, non seule-

¹ *Gén. civ.*, 53, 115 : 1908. — *Le Gaz*, 53, 195 ; 1910.

ment d'en empêcher l'utilisation immédiate comme boisson, mais aussi de rendre impossible ou tout au moins trop coûteuse la régénération d'un alcool comestible par distillation ou traitement chimique.

Les propriétés de l'alcool dénaturé varient évidemment suivant le mode de dénaturation ; voici à ce sujet les procédés adoptés par les différentes nations ¹.

La puissance calorifique de l'alcool dénaturé français est de 5 954 calories au kilogramme, ou de 4 971 calories au litre, c'est-à-dire seulement environ la moitié du pétrole ; l'alcool est donc un mauvais combustible.

On a cependant pu l'employer dans les moteurs à explosion, mais de tous les alcools dénaturés, c'est l'alcool français qui donne les moins bons résultats ainsi qu'il ressort des essais de M. Périssé ² sur un moteur Gobron Brillé qui a développé, à consommation égale, les puissances suivantes :

Alcool moteur allemand	11,7 chevaux.
— — autrichien	10,9 —
— russe	10,5 —
— moteur italien	10 —
— — suisse	9,8 —
— — français	9,75 —

Ces différences proviennent de la forte proportion de méthylène introduite dans les alcools français, qui en diminue le pouvoir calorifique, tandis que les alcools moteurs allemand et autrichien contiennent du benzol qui en élève notablement la puissance.

Aussi préfère-t-on mélanger à l'alcool dénaturé une forte proportion de benzol ; c'est ce que l'on appelle l'*alcool carburé*. On emploie ordinairement le mélange à parties égales, qui possède un pouvoir calorifique de 7 878 au kilogramme, soit 6 728 au litre. On retrouve ainsi une puissance du même ordre que celle obtenue avec l'essence ou le benzol.

¹ Périssé, *Bul. Soc. Ing. Civ.*, 1905, I, 300.

² *Ibid.*

CHAPITRE III

LES COMBUSTIBLES GAZEUX

Les gaz combustibles que l'on peut utiliser dans l'industrie proviennent de sources très diverses. En outre des gaz naturels qui se dégagent spontanément du sol dans certaines régions, on peut en produire artificiellement soit par distillation pyrogénée des combustibles solides ou liquides, soit par réaction de l'air ou de la vapeur d'eau sur le charbon dans les générateurs, soit par carburation de l'air au moyen de vapeurs combustibles, soit enfin par diverses réactions chimiques. C'est dans cet ordre que nous les passerons successivement en revue, en ne consacrant qu'un court exposé au gaz d'éclairage, en raison de ses applications limitées, et en insistant surtout sur les gaz de générateurs qui constituent la solution vraiment industrielle du chauffage au gaz.

A. — LE GAZ NATUREL

Des dégagements importants des gaz combustibles, riches en méthane, se produisent en plusieurs points du globe, le plus souvent au voisinage des terrains pétrolifères, ou aussi comme en Chine dans les sources d'eaux salées. Enfin un gaz analogue se dégage des mines de houille, où il est désigné sous le nom de *grisou*.

Dans ce dernier cas il est naturel d'admettre que le grisou s'est formé en même temps que la houille par la lente décomposition des végétaux préhistoriques, qu'il s'est accumulé et comprimé dans les fissures du charbon, et qu'il se dégage quand on broie le combustible. Mais les sources les plus importantes de gaz naturels se trouvent dans les bassins pétrolifères, principalement en Pensylvanie, et l'explication de leur origine revient à celle de la formation des pétroles, que nous avons précédemment étudiée (p. 373).

Ces dégagements de gaz naturels sont fréquemment utilisés soit pour l'éclairage (avec le manchon incandescent ou après carburation préalable) soit pour le chauffage. C'est ainsi qu'en Chine les gaz sortant des puits d'eau salée sont employés depuis fort longtemps pour la concentration des eaux et l'éclairage des ateliers ; de même dans la région de Bakou les fours à chaux sont chauffés au gaz naturel.

Mais c'est surtout dans les régions pétrolifères des États-Unis que ce combustible a donné lieu à des applications importantes : le gaz est capté et distribué au moyen de canalisations gigantesques jusqu'à des distances considérables. Un grand nombre de villes de Pensylvanie sont ainsi depuis de nombreuses années éclairées et chauffées au gaz naturel, qui sert également au chauffage des fours métallurgiques : c'est ainsi que s'est créée l'industrie de Pittsburg. Tout récemment des entreprises analogues se sont fondées en Louisiane : l'une d'elles devait, en moins de deux ans et demi à partir de 1909, relier les sources gazeuses de Caddo à la Nouvelle-Orléans, dont elle assurait l'éclairage au moyen d'une canalisation de plus de 650 kilomètres de longueur. Le prix du gaz dans cette ville devait

varier de 35 à 45 centimes les 1 000 pieds cubes ; on a même envisagé l'éclairage possible de Saint-Louis dans les mêmes conditions¹.

Certains dégagements de grisou dans nos régions se sont montrés assez réguliers pour pouvoir être utilisés au chauffage. C'est ainsi que le Bulletin de la société industrielle de l'Est² signalait récemment que dans le bassin de Sarrebrück, aux mines de Frankenholz, un sondage a donné lieu à un violent dégagement de grisou, que l'on s'est décidé, au bout de cinq à six mois, à utiliser au chauffage des chaudières. Le débit ayant diminué peu après par suite d'obstructions, on a creusé avec plein succès un second trou à 10 mètres du premier. Le dégagement s'est maintenu alors très constant pendant cinq mois, à raison de 12 mètres cubes par minute, permettant de volatiliser 100 mètres cubes d'eau en vingt-quatre heures.

¹ Voyez G. D. Harris, *Oil and Gas in Louisiana*, Washington, 1910.

² *Bul. Soc. Ind. Est*, **22** ; 1909.

B. — LES GAZ DE DISTILLATION

Les édifices compliqués qui représentent les molécules des composés organiques ne possèdent jamais une bien grande stabilité. Sous l'action d'une élévation de température, ils ne tardent pas à éprouver des modifications profondes aboutissant à un autre état d'équilibre, à un autre arrangement des atomes en présence. Ces modifications sont de natures diverses : Tantôt les molécules primitives se soudent les unes aux autres en donnant naissance à des polymères : c'est ce qui se passe — au moins pour une partie — dans l'action de la chaleur sur l'acétylène qui se transforme en benzène; tantôt au contraire la molécule se brise en donnant naissance à des combinaisons plus simples. Mais il semble bien que dans la plupart des cas, sinon dans tous, les deux processus se complètent et que l'on obtient simultanément des combinaisons gazeuses très simples : vapeur d'eau, acide carbonique, oxyde de carbone, méthane, acide acétique, etc., ou des éléments, hydrogène et azote, à côté de molécules très condensées et très riches en carbone, que l'on désigne sous le nom de charbons. Plus la température s'élève, plus les molécules gazeuses se simplifient, et plus la partie solide se rapproche du carbone pur. En somme, la distillation pyrogénée des matières organiques est une opération à deux fins. Nous nous en sommes déjà servis pour l'obtention du charbon de bois et du coke, c'est-à-dire en vue d'utiliser le résidu carbonisé solide; mais la partie gazeuse n'est pas moins intéressante, et parfois même c'est elle qui représente le but principal de l'opération.

On obtiendra donc en principe des gaz combustibles dans la distillation pyrogénée de toutes les matières carbonées, quelle que soit leur origine; le plus souvent ces gaz ne sont que les résidus d'une opération industrielle; nous en avons vu un exemple dans la carbonisation du bois en vase clos et dans la préparation du coke; on devra tâcher d'utiliser leur pouvoir calorifique soit en les brûlant dans un foyer approprié, soit en les employant dans un moteur à explosion. Nous n'envisagerons ici que les gaz préparés industriellement

pour eux-mêmes. Ce sont : le gaz d'éclairage, le gaz d'huile, et le gaz Riché.

La distillation pyrogénée ne s'effectue jamais au point de vue économique qu'avec de très mauvais rendements. Il est nécessaire en effet que le produit à distiller soit enfermé dans un récipient clos ou cornue, chauffé de l'extérieur, ce qui procure déjà des pertes à cause de la conductibilité imparfaite de la paroi; ce qui est plus grave, c'est que le résidu de la distillation, charbon ou coke, doit être expulsé de la cornue pour permettre une nouvelle introduction de combustible neuf. Il en résulte un refroidissement rapide de la cornue et une perte de calories importante par le coke incandescent dont il est pratiquement impossible de récupérer la chaleur¹. Aussi la fabrication d'un gaz combustible par distillation n'a-t-elle sa raison d'être que quand on recherche par-dessus tout sa qualité et son pouvoir éclairant, ce qui est le cas pour le gaz d'éclairage ou le gaz d'huile, ou quand on veut gazéifier des combustibles spéciaux, par exemple les déchets de bois dans les appareils Riché. Dans tous les autres cas il sera plus économique, quand on n'aura en vue que la production définitive de chaleur dans les meilleures conditions, d'employer la gazéification par l'air ou la vapeur d'eau, c'est-à-dire d'utiliser les gazogènes proprement dits dont nous parlerons un peu plus loin.

§ 1. — LE GAZ D'ÉCLAIRAGE

Les houilles employées pour la fabrication du gaz de l'éclairage sont les houilles grasses à longue flamme.

Distillation. — Jusqu'à ces dernières années la distillation s'est faite exclusivement dans des cornues horizontales en terre réfractaire. Ces cornues ont la forme de cylindres à section elliptique, groupées au nombre de 8 ou 9 dans un four chauffé directement ou mieux au gaz de générateur (voir fig. 26 et 26 bis, p. 170-171).

Pour les petites installations on emploie des cornues foncées de 3 mètres de longueur. L'extrémité ouverte est munie d'une tête de

¹ Du moins n'a-t-on pas réussi à le faire jusqu'à présent. Cependant il n'est pas inadmissible qu'on y parvienne un jour et dans ce cas la distillation serait très économique puisque nous avons vu que la décomposition pyrogénée des houilles n'absorbe qu'une quantité de chaleur insignifiante.

cornue en fonte portant une porte ou une plaque de fermeture, et latéralement une tubulure par où s'échappera le gaz produit. Dans les usines un peu plus importantes on préfère l'emploi de cornues de 6 mètres de longueur, ouvertes à leurs deux extrémités qui sortent de chaque côté du four. Cette disposition rend le chargement et le déchargement plus faciles. Le chargement s'effectue soit à la pelle, soit à la cuiller, c'est-à-dire au moyen d'un demi-cylindre de tôle de même longueur que la cornue que l'on introduit dans celle-ci après l'avoir rempli de charbon, que l'on retourne sens dessus dessous et que l'on retire alors laissant la cornue remplie. Le déchargement s'effectue au moyen de rateaux en tôle, ou pour les cornues de 6 mètres, au moyen d'un houclier que l'on enfonce dans la cornue de manière à chasser et à faire sortir par l'autre extrémité le coke incandescent. Dans les grandes usines le chargement et le déchargement sont effectués mécaniquement.

Nous avons indiqué à propos de la carbonisation de la houille que la manière dont on conduit la distillation influe profondément sur la proportion et sur la qualité des gaz produits. Dans la préparation du gaz d'éclairage, afin d'avoir un bon rendement et un pouvoir éclairant suffisant, on doit introduire la houille dans la cornue fortement chauffée, de manière à produire ce qu'on appelle la *distillation par explosion*. D'ailleurs la température ne doit pas non plus être trop élevée ; on doit la maintenir au voisinage de 1 400°. En chauffant trop fort, on décomposerait une partie notable des carbures d'hydrogène condensables qui contribuent principalement au pouvoir éclairant du gaz.

La durée de la distillation dans les cornues est d'environ 4 à 5 heures.

MODIFICATIONS APPORTÉES AUX APPAREILS DE DISTILLATION. — Nouveaux fours à cornues. — Le type classique des cornues horizontales que nous venons de décrire sommairement a été modifié de différentes façons. On a d'abord essayé de faire des *cornues inclinées*, disposition qui devait faciliter le chargement et le déchargement, ceux-ci s'effectuant d'eux-mêmes sous le simple poids du com-

¹ Cette décomposition des gaz carburés sous l'action d'une température trop élevée ne peut être complètement évitée dans la fabrication courante : elle se produit toujours au contact des parois de la cornue qui sont portées à l'incandescence, et a pour résultat de former sur ces parois un dépôt très dense et compact de *charbon de cornue*.

bustible. Ces fours ont été surtout employés en Allemagne. Il en existe cependant en France plusieurs installations.

On a essayé également des *cornues verticales*, soit continues, soit discontinues. Dans les premières (systèmes Woodall et Duckham, Verdier et Teulon, Young et Glover) les deux extrémités sont munies de robinets, l'un pour l'entrée du charbon, l'autre pour la sortie du coke, qu'il suffit théoriquement de manœuvrer à intervalles réguliers pour que l'opération puisse se continuer indéfiniment sans interruption. L'écueil provient des accrochages qui se produisent presque inévitablement par suite du gonflement du charbon gras. Cependant avec certains charbons anglais on peut les éviter, ce qui explique le succès de ces cornues en Angleterre. Les cornues verticales discontinues ont donné de bons résultats dans les fours Bueb, installés à Dessau. Ces fours se composent de 10 cornues verticales, à section rectangulaire, ayant une forme légèrement conique, évasée vers le bas, ce qui permet le défournement facile du coke ; leur hauteur est de 4 mètres. Le chargement s'effectue très facilement en versant la houille au moyen d'une trémie ; le déchargement s'opère au moyen d'une plaque basculante. La durée de la distillation est de dix à douze heures, soit sensiblement le double de la durée de distillation des cornues horizontales.

Fours à chambres. — Mais la solution qui paraît devoir être celle de l'avenir consiste à remplacer les cornues par des *fours à chambres* analogues aux fours servant à la préparation du coke métallurgique. On a imaginé des fours à chambres verticales, analogues aux fours Appolt, à chambres inclinées ou à chambres horizontales. Les fours des deux premiers types présentent l'avantage d'un déchargement rapide et automatique, quand toutefois il ne se produit pas d'accrochages ; les fours à chambres inclinées ont donné lieu à un assez grand nombre d'applications (systèmes Ries, Klönne, Koppers) ; on leur reproche leur prix d'établissement notablement plus élevé que celui des fours à chambres horizontales, qui semblent bien représenter la solution de l'avenir. Ils sont depuis trois ou quatre ans employés en Allemagne, et l'on vient d'en faire deux installations en France, l'une à Versailles, l'autre à Elbeuf.

Ces fours sont du système Koppers à récupérateurs. Comme on le voit, d'après les figures ci-jointes, ils sont tout à fait analogues aux fours à coke, avec cette seule différence évidente que puisqu'on ne peut pas les chauffer avec les gaz qu'ils produisent, on

leur a adjoint des gazogènes du type Siemens placés en avant, au-dessous de l'aire de défournement.

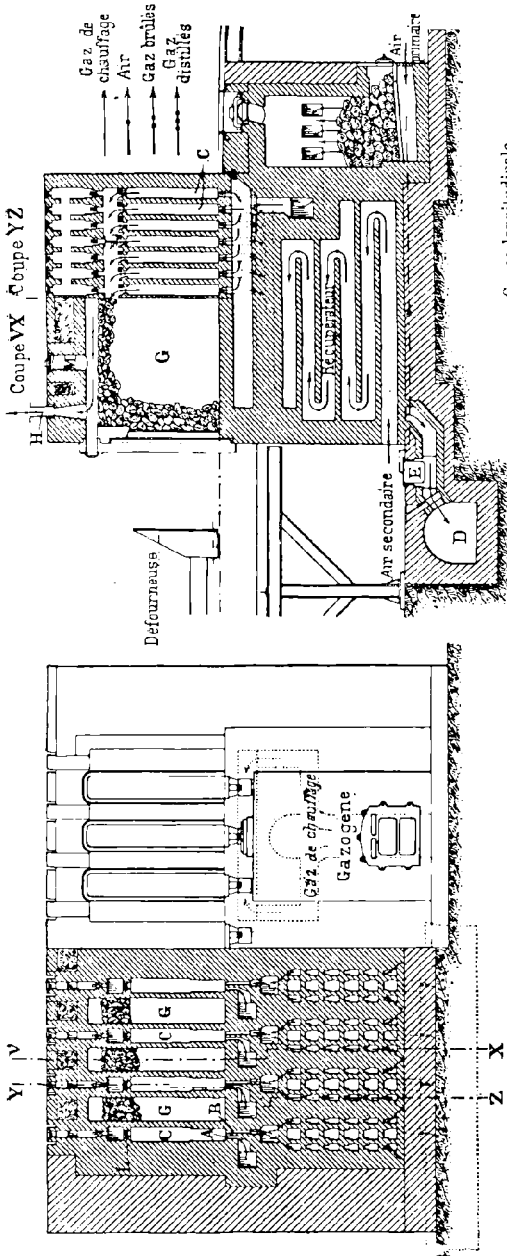


Fig. 82. — Fours Koppers à chambres horizontales pour la fabrication du gaz d'éclairage.

Au-dessous des fours eux-mêmes sont placés les récupérateurs destinés au chauffage de l'air secondaire, et constitués par des conduits horizontaux à l'intérieur desquels circulent en descendant les gaz brûlés, tandis que l'air à chauffer remonte le long des parois. La combustion se fait dans un brûleur à la base des carneaux verticaux C. A la partie supérieure de ces carneaux, les gaz se rendent dans un canal collecteur horizontal en traversant un petit registre que l'on peut manœuvrer de la plateforme du four. On peut ainsi régler individuellement le tirage dans chaque carneau, ce qui permet d'obtenir un chauffage d'une régularité parfaite. Les gaz brûlés redescendent ensuite dans les récupérateurs qu'ils parcourent de haut en bas et s'échappent finalement dans le carneau D qui les conduit à la cheminée, après être passés sous une petite chaudière E

servant à alimenter de vapeur d'eau le gazogène.

Les fours sont disposés par batteries de six chambres réunies deux par deux ; les dimensions des chambres sont les suivantes :

Longueur	5,50 m.
Largeur moyenne	0,475 —
Hauteur	2,80 —

Les portes des fours réalisent une fermeture étanche à l'aide d'un joint fer sur amiante refroidi par circulation d'eau.

La charge de chaque four est de 5,75 tonnes de charbon broyé, introduite à la partie supérieure par deux trémies de chargement telles que H. La durée de la distillation est de vingt-quatre heures. L'expulsion du coke se fait au moyen d'une défourneuse électrique, qui se déplace sur le devant des fours, comme nous l'avons vu pour les fours à coke. Les gazogènes sont chargés toutes les trois heures avec du coke.

En distillant du charbon anglais à 13,66 p. 100 de cendres, on obtient avec ces fours un rendement moyen de 296 mètres cubes de gaz par tonne de charbon. Il faut de plus compter 153 kilogrammes de coke sec ou 167 kilogrammes de coke humide pour le fonctionnement du gazogène. Le coke produit présente l'aspect du coke métallurgique, bien que moins dur.

Le principal avantage des fours à chambres réside dans l'économie de main-d'œuvre qu'il procure. A l'usine de Padoue, où l'on a installé depuis quelques années des fours horizontaux du système Klönne, 9 hommes seulement assurent le service de quatre fours à quatre chambres, produisant 20 000 mètres cubes par jour ; il en fallait 65 pour la même production sur l'ancienne installation.

Par contre on reproche à ces fours de donner un gaz de composition très variable, oscillant par exemple, pour l'usine de Padoue, de 15 p. 100 au-dessus à 40 p. 100 au-dessous de la composition normale, d'où la nécessité d'employer de très grands gazomètres. De plus la poussée de la défourneuse produirait dans les parois des chambres des fissures par où les gaz de la combustion viendraient se mélanger aux gaz distillés et réciproquement, obligeant à des réparations fréquentes¹.

ÉPURATION DU GAZ

Le gaz destiné à l'éclairage doit être épuré avec beaucoup plus de soin que les gaz destinés au chauffage, de manière à éviter les mau-

¹ A. Grebel, *Gén. Civ.*, 56, 469 et 501 ; 1910. — B. Krafft, *ibid.*, 59, 44 ; 1911. — 37^e Congrès de la Société Technique du gaz, *ibid.*, 57, 190 ; 1910. — *Le Gaz*, 54, 363 ; 1911.

vaises odeurs, les dégagements de produits sulfurés et les condensations de goudrons dans les conduites. Cette opération est assez délicate, car il faut bien se garder d'enlever au gaz la totalité de ses produits condensables : son pouvoir éclairant provient pour la majeure partie des vapeurs des produits volatils qu'il entraîne avec lui : benzène et homologues, naphthalène, etc. Au contraire on devra faire disparaître autant que possible les produits ammoniacaux, les produits sulfurés ou cyanés, enfin les goudrons, c'est-à-dire les parties les plus lourdes des produits liquides entraînés. Une partie de ces goudrons s'écoule d'elle-même avec les eaux ammoniacales dès qu'on refroidit le gaz à la sortie des cornues ou des fours dans le *barillet* et dans les *réfrigérants*. Mais une partie importante reste encore en suspension, non pas à l'état de vapeurs, mais sous forme de petites bulles ou vésicules extrêmement ténues dont il est pratiquement très difficile de priver le gaz.

On a longtemps employé à cet effet des *scrubbers* ou colonnes filtrantes où le gaz devait circuler à travers des morceaux de coke arrosés d'eau. Mais les pores et les intervalles les plus fins sont rapidement bouchés par le goudron déposé, de sorte qu'au bout de peu de temps le lavage du gaz se fait mal.

On s'est servi ensuite d'appareils fondés sur un principe un peu différent imaginé par Pelouze et Audoin : lorsqu'un courant gazeux, contenant en suspension des particules goudronneuses, vient frapper avec une certaine vitesse un obstacle fixe, les particules liquides se collent sur l'obstacle tandis que le gaz est dévié de sa direction.

L'*épurateur Pelouze et Audoin* se compose de plaques de tôles perforées, disposées parallèlement à 1 et demi ou 2 millimètres de distance, et de telle sorte que les parties pleines de l'une soient situées en regard des parties perforées de l'autre. Ces tôles forment les parois latérales d'une sorte de cage ou de cloche que doit traverser le gaz. Il y a en réalité, pour chaque paroi, deux séries de plaques perforées, à une distance l'une de l'autre de quelques centimètres, de manière à produire deux épurations successives.

Les *laveurs Standard* sont employés pour enlever au gaz les dernières traces de produits ammoniacaux solubles dans l'eau. Ils se composent d'un cylindre horizontal en fonte divisé par des cloisons verticales perpendiculaires à l'axe en une série de compartiments. Un arbre traversant le cylindre porte dans chaque compartiment une série de disques de tôles perforés, placés à une faible distance les uns des autres. Ces disques sont à moitié plongés dans l'eau, et un

mouvement de rotation de l'axe fait varier peu à peu les parties immergées. Le gaz est obligé de circuler entre les lames de tôles humectées d'eau, et l'on obtient ainsi un lavage parfait avec un minimum de place et de consommation d'eau.

Nouveaux appareils d'épuration. — On a imaginé dans ces dernières années une nouvelle méthode d'épuration, conduisant à des appareils beaucoup plus simples et moins encombrants, et qui paraît devoir se substituer rapidement aux procédés classiques : elle revient en définitive à se servir du goudron lui-même pour laver le gaz et le débarrasser des particules en suspension.

Dans les *appareils Otto*, le goudron chaud est conduit au moyen de pompes dans un injecteur qui le projette dans le gaz à épurer ; l'appareil est disposé un peu comme une trompe à eau, il assure ainsi un contact intime du gaz et du liquide, et élimine rapidement les brouillards de matières goudronneuses.

Le *condenseur Klönne* est encore plus simple : il est constitué par un immense réfrigérant vertical, de forme cylindrique, dont le diamètre atteint 3, 50 m. et la hauteur 30 mètres. Le gaz est introduit dans le bas de l'appareil, où il s'élève très lentement à cause de sa grande capacité, en se refroidissant progressivement au contact de l'air ambiant et abandonnant les goudrons et les hydrocarbures condensables, qui retombent en pluie dans le cylindre et assurent le lavage du gaz ascendant, en même temps qu'ils subissent à son contact une véritable distillation fractionnée. Arrivé à la partie supérieure, le gaz épuré redescend par un tuyau au milieu du cylindre pour ressortir vers le bas à côté de l'ouverture d'entrée. Quelques diaphragmes en toiles métalliques assurent une meilleure division du courant ascendant. Le goudron condensé, étant recueilli vers le bas, se trouve porté sensiblement à la température d'entrée du gaz, soit vers 60°, de sorte qu'il ne reste presque pas de benzol en solution ; par contre, la naphthaline, si gênante pour l'entretien des canalisations, est complètement retenue. A l'usine à gaz de La Haye, où ce système est installé, on a constaté que tous les autres condenseurs de goudrons pouvaient être supprimés après le condenseur Klönne⁴.

Ces nouveaux procédés d'épuration paraissent devoir entraîner parallèlement l'absorption directe de l'ammoniaque par l'acide sulfurique concentré, déjà installés dans un grand nombre de cokeries (voir

⁴ *Le Gaz*, 54, 207, 1914 ; voyez aussi *Compte Rendu du 27^e Congrès de la Société technique du gaz, Gén. Civ.*, 57, 190 ; 1910.

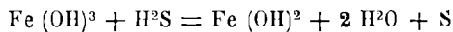
plus haut p. 366) qui réaliserait une économie considérable de main-d'œuvre et d'installation dans les usines à gaz. En somme, actuellement, et suivant la remarque de Hilgenstock, ces usines mettent à profit les procédés adoptés par les cokeries, après leur avoir servi de modèles pendant quarante ans.

Extracteurs. — On appelle *extracteurs* ou *exhausteurs* des appareils destinés à faciliter la circulation du gaz à travers les appareils d'épuration ; ceux-ci créent toujours une certaine pression, qui doit être aussi faible que possible afin de diminuer les fuites possibles dans les cornues de distillation.

Les extracteurs se placent entre les condenseurs et les épurateurs physiques proprement dits. Ils sont réalisés soit par de véritables pompes aspirantes et foulantes, soit par des injecteurs à vapeur fonctionnant d'après le principe des trompes à eau ou des injecteurs Giffard : extracteurs Körtling ou Bourdon.

Épuration chimique. — L'épuration chimique a pour but d'absorber l'hydrogène sulfuré et les produits cyanés. Elle s'effectue au moyen d'un mélange pulvérulent dont on remplit de vastes caisses peu profondes en tôle, à fermeture hydraulique, que le gaz doit traverser.

La matière employée, ou *masse de Laming*, est un mélange de sesquioxyde de fer hydraté et de sulfate de chaux, obtenu en précipitant du sulfate ferreux par de la chaux éteinte et exposant le produit à l'air. Il agit comme oxydant sur l'hydrogène sulfuré qu'il transforme en soufre :



L'hydrate ferrique est simplement transformé en hydrate ferreux, de sorte que quand la masse est épuisée, il suffit de l'exposer à l'air de manière à peroxyder l'hydrate ferreux pour lui faire recouvrer son pouvoir épurant.

Cependant les impuretés cyanées du gaz d'éclairage réagissent de leur côté sur l'oxyde ferrique en donnant des combinaisons complexes, ferrocyanures et ferricyanures, d'où l'oxyde ferrique ne peut plus être régénéré par l'action de l'air. Aussi doit-on au bout de quelque temps renouveler la masse épuisée, que l'on peut traiter alors comme source de soufre et de cyanures.

Composition. — La composition moyenne du gaz de la ville de Paris est la suivante :

Hydrogène	50
Méthane	33
Autres hydrocarbures	4
Oxyde de carbone	8
Acide carbonique	2
Azote	3
	100

La densité de ce gaz est d'environ 0,4; son pouvoir calorifique moyen est d'environ 5 250 calories par mètre cube à 15° et 760 mm.⁴ Il exige pour sa combustion complète 5,25 fois son volume d'air, soit environ 13 fois son poids.

Le pouvoir éclairant du gaz de houille provient pour la plus grande part, ainsi que nous l'avons dit, des vapeurs d'hydrocarbures liquides ou benzols. On peut l'augmenter artificiellement quand il devient inférieur à la limite fixée par les contrats⁵, en introduisant une proportion plus forte de ces vapeurs, au moyen d'un barbotage convenable. D'ailleurs ce pouvoir éclairant ne présente plus beaucoup d'intérêt à l'heure actuelle, où l'on emploie presque exclusivement les becs à incandescence : il serait plus rationnel d'exiger un pouvoir calorifique déterminé.

§ 2. — LE GAZ D'HUILE

Le gaz d'huile se prépare en distillant à haute température, dans des cornues en fonte portées au rouge, des huiles lourdes minérales, huiles de schiste, de lignite, de pétrole ou de goudron. On peut également employer des huiles d'origine végétale ou animale.

Le gaz d'huile a été employé exclusivement pour l'éclairage des wagons, à cause de son pouvoir éclairant très élevé, et qui de plus n'est pas altéré par la compression, car il est dû à des carbures éthyléniques légers, non condensables, tandis que celui du gaz de houille provient surtout des vapeurs de benzine qui se condensent quand on comprime le gaz pour l'emmagasiner dans les réservoirs ; ces avantages ne subsistent plus aujourd'hui où l'on a substitué partout aux anciens becs les manchons incandescents.

⁴ Voir plus haut d'autres analyses de gaz de houille, p. 274.

⁵ Cette limite correspond le plus souvent en France à 105 litres par carcel-heure, le gaz était brûlé dans un bec Bengel du modèle décrit par Dumas et Regnault.

Le gaz d'huile est aussi employé pour la carburation du gaz à l'eau, afin de le rendre propre à l'éclairage; mais dans ce cas il n'est pas préparé séparément; on le mélange avec le gaz à l'eau au moment même de sa production (voir p. 426).

Voici la composition moyenne d'un gaz d'huile :

Hydrogène.	41
Carbures forméniques	44
— éthyléniques	35
Oxyde de carbone	3
Acide carbonique	4
Azote.	traces.
Hydrogène sulfuré	traces.
Divers.	3
	<hr/>
	100

§ 3. — LE GAZ RICHÉ

Le gaz Riché est un gaz combustible destiné au chauffage et préparé par la distillation du bois suivant un procédé spécial dit de la *distillation renversée*. Nous avons vu à propos de la fabrication du charbon de bois que le rendement en charbon est d'autant plus faible et le rendement en gaz plus considérable que la distillation a été effectuée à une température plus élevée, ces variations s'expliquant par la décomposition à haute température des produits volatils condensables par le charbon.

L'originalité du procédé de M. Riché réside précisément dans l'utilisation de ces phénomènes à la préparation d'un gaz riche ne contenant aucun produit condensable et ne nécessitant par suite aucune épuration physique ou chimique.

La préparation du gaz Riché s'effectue dans des cornues spéciales en fonte, formées de deux parties (fig. 83) : la cornue proprement dite ou tête de cornue, AB, placée verticalement, et reposant par son propre poids dans une gorge du pied de cornue C, garnie d'un mastic de silicate de soude et d'amiante.

Les gaz chauds issus d'un foyer F, et traversant les ouvertures E, circulent autour de la base de la cornue, qui se trouve portée au rouge, et s'échappent à la partie supérieure en H vers le carneau J. La partie A est portée normalement au rouge cerise : un regard R, muni d'une plaque de mica, permet de surveiller son aspect et de régler sa température. Cette partie A est remplie de charbon provenant d'une opération antérieure. Le bois à distiller est introduit dans le haut de la cornue en B; il se trouve donc chauffé peu à

peu par les parois de la cornue qui atteignent à peine le rouge sombre : les produits volatils distillent lentement et sont forcés pour s'échapper de venir passer sur le charbon incandescent en A. C'est dans cette zone que s'accomplit la transformation : la vapeur d'eau est transformée en gaz à l'eau, et les produits condensables carbonés, acide acétique et goudrons, en hydrogène, oxyde de carbone et méthane. Les gaz produits s'échappent à travers le tube recourbé L, et barbotent dans l'eau du barillet K, qui isole la cornue et empêche toute rentrée d'air dans les conduites quand on ouvre le couvercle pour introduire une nouvelle charge de bois ou la porte M pour retirer le charbon en trop grande quantité.

On réunit autour du foyer F un certain nombre de cornues, de manière à mieux utiliser la chaleur.

Voici la composition moyenne du gaz produit, en volumes :

Acide carbonique.	18
Oxyde de carbone.	22
Méthane.	15
Hydrogène.	45
	<hr/>
	100

Le pouvoir calorifique par mètre cube est de 3000 calories. Il en résulte qu'un mètre cube de gaz Riché produit le même effet calorifique que 600 litres de gaz de houille en moyenne.

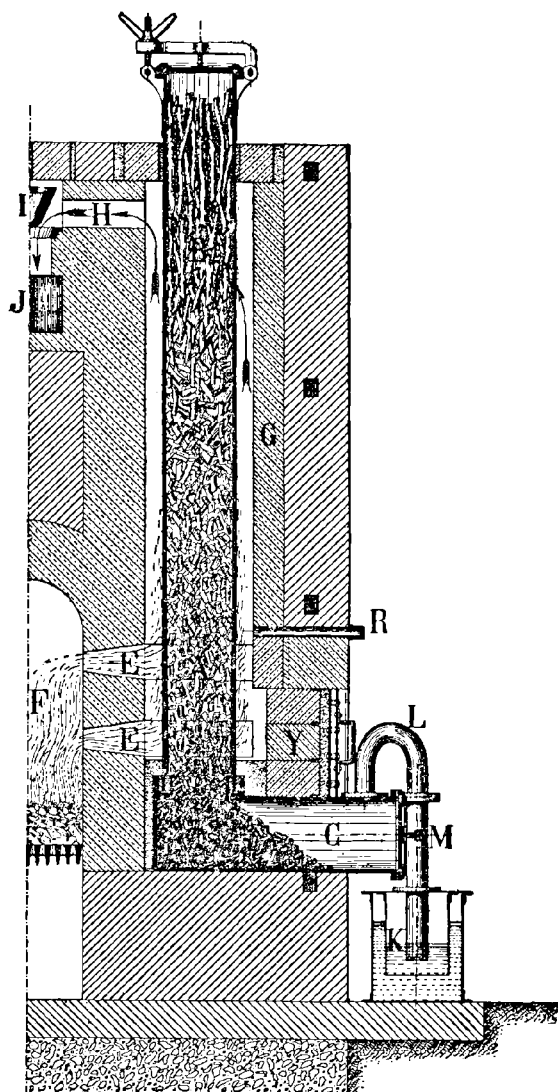
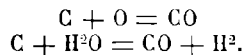


Fig. 83. — Coupe d'une cornue Riché.

Chaque cornue Riché fournit par heure de 7 à 9 mètres cubes de gaz. On peut compter sur un rendement de 700 à 800 litres de gaz par kilogramme de bois distillé, avec un résidu d'environ 200 grammes de charbon ; il faut dépenser en même temps pour le chauffage du four 400 grammes de houille ou 1 kilogramme de bois. On utilise de préférence pour cette opération les menus déchets ou la sciure, en réservant les morceaux plus importants pour la distillation. La tourbe de qualité moyenne, surtout quand elle ne renferme pas sensiblement de soufre, donne également un gaz de qualité excellente.

C. — LES GAZ DE GÉNÉRATEURS

On désigne sous le nom de générateurs ou gazogènes les appareils permettant de transformer un combustible solide, houille ou coke, éventuellement tourbe, lignite ou même bois, en un combustible gazeux, non par distillation pyrogénée, mais par l'action de l'air ou de la vapeur d'eau, en utilisant l'une des deux réactions schématiques :



On sera donc conduit à classer les gazogènes en trois catégories suivant qu'ils produisent le *gaz à l'air*, ou le *gaz à l'eau*, ou le *gaz mixte* c'est-à-dire provenant de l'action simultanée de l'air et de l'eau sur le carbone.

En fait les réactions qui se passent dans les gazogènes sont plus compliquées, l'oxyde de carbone pouvant se dédoubler partiellement en charbon et acide carbonique, et celui-ci réagir à son tour sur l'hydrogène, de sorte qu'il s'établira des équilibres entre les différents constituants, équilibres qui ont été déjà étudiés en détail dans la première partie de cet ouvrage (voir p. 54), et sur lesquels nous ne reviendrons pas ici. De plus les charbons traités, même quand il s'agit de coke, n'étant jamais totalement exempts de matières volatiles, le gaz de générateur se trouvera toujours mélangé d'une certaine proportion de gaz de distillation, qui pourra même être assez grande avec les combustibles gras ou bitumineux, et devenir gênante à cause des goudrons formés en même temps, à tel point que ces combustibles ont été considérés pendant longtemps comme impropres à la gazéification, et ne peuvent être utilisés aujourd'hui que dans des appareils spécialement construits.

Enfin les charbons et l'air nécessaire à la combustion étant toujours plus ou moins humides, le gaz à l'air renferme toujours un peu d'hydrogène, de même que les appareils destinés à produire le gaz à l'eau laissent toujours entrer en même temps des quantités plus ou moins grandes d'air. Néanmoins les trois divisions que nous avons adoptées répondent à des types d'appareils différents, bien que les transitions existent ; nous les conserverons donc et nous étudierons successivement :

- Les gazogènes pour gaz à l'air ;
- Les gazogènes pour gaz à l'eau ;
- Les gazogènes à gaz mixte.

Les gazogènes les plus anciennement construits appartiennent au premier type. Le premier appareil de ce genre fut imaginé par Bischoff en 1839 pour gazéifier la tourbe en vue du chauffage d'un four à souder. En 1842, le lignite fut à son tour employé en Styrie ; ce n'est qu'en 1860 que l'on utilisa la houille, pour le chauffage des premiers fours à régénération de chaleur que venaient d'imaginer les frères Siemens. Entre temps Bischoff avait reconnu, en 1845, l'avantage que l'on avait à mélanger à l'air d'alimentation une certaine quantité de vapeur d'eau.

Les premiers essais d'utilisation du gaz de gazogène dans les moteurs à explosion datent de 1862, avec le professeur Arbos de Barcelone, mais ce ne fut qu'en 1878 que ce procédé devint réellement pratique, grâce aux gazogènes Dowson employant les combustibles anthraciteux.

Plus tard Bénier eut l'idée d'alimenter directement les moteurs sur les gazogènes, supprimant le gazomètre et créant les gazogènes par aspiration¹.

De nos jours les principaux perfectionnements apportés aux gazogènes ont eu pour but de permettre l'emploi des combustibles gras ou bitumineux, ou encore de ceux de qualités inférieures, contenant beaucoup de cendres.

Enfin nous devons mentionner comme un gazogène spécial le haut fourneau, qui produit une énorme quantité de gaz inflammables, depuis longtemps déjà employés au chauffage de l'air soufflé, et dont on utilise maintenant l'excès d'énergie disponible dans de puissants moteurs à explosion.

¹ Letombe, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, **61**, 51 ; 1908.

§ 1. — GAZOGÈNES POUR GAZ A L'AIR

Dans ces gazogènes, la formation de l'oxyde de carbone se fait en réalité en deux temps : au voisinage de la grille, au contact de l'air en excès, il se produit de l'anhydride carbonique, et ce n'est qu'ultérieurement que celui-ci est réduit en oxyde de carbone, en passant sur le charbon incandescent. La réaction $\text{CO}^2 + \text{C} = 2\text{CO}$ n'étant pas instantanée, il faudra, pour que l'équilibre soit atteint, une épaisseur suffisante de la couche de charbon, de 0,60 à 2 mètres en moyenne ; en outre on sait que cette réaction est endothermique et que l'équilibre final obtenu sera par suite d'autant plus riche en oxyde de carbone que la température sera plus élevée, en vertu du principe de M. Le Chatelier (voir p. 64). On devra donc faire marcher le gazogène à une allure très chaude afin d'avoir un gaz riche ; en pratique, on ne devra jamais descendre au-dessous de 900°.

Quand on emploie des houilles dans ces gazogènes (les houilles riches à longue flamme conviennent le mieux), le gaz contient une certaine quantité d'hydrocarbures formés par la distillation des parties volatiles. Voici quelques exemples de composition du gaz obtenu (d'après Babu).

	COMPOSITION DU GAZ EN VOLUMES	
	Allure froide.	Allure chaude.
Oxyde de carbone.	23,3	27,7
Hydrogène	6,3	7,8
Hydrocarbures	2,2	2,2
Anhydride carbonique.	5,1	2,1
Azote	63,1	60,2

Les gaz qui sortent du gazogène sont mélangés d'une assez forte proportion de goudrons, qui concourent à élever leur effet calorifique ; si ces gaz sont refroidis avant d'être introduits dans les fours, les goudrons se condensent, et le pouvoir calorifique baisse de ce chef de 1600 à 1300 calories. D'ailleurs on n'aura jamais intérêt à refroidir les gaz, car on perdrait de la sorte la chaleur latente que ces gaz emportent avec eux, indépendamment de la perte en goudrons. Et c'est là un inconvénient de tous les gazogènes à gaz d'air, qui tient à ce que la réaction de gazéification est exothermique : ils

fournissent des gaz très chauds, et ne sont économiques que si l'on utilise ces gaz sans refroidissement préalable c'est-à-dire si le gazogène fait partie intégrante du four. On ne peut songer d'autre part à utiliser la chaleur latente des gaz, au sortir du four, pour chauffer l'air primaire : cela ne reviendrait qu'à élever encore la température des gaz produits.

Gazogènes Siemens. — Le gazogène Siemens, sous sa forme primitive (voir fig. 23, p. 163), est constitué par un foyer à grille inclinée C, de surface relativement faible, et sur laquelle on fait tomber une couche épaisse de combustible au moyen de la boîte de chargement A, de manière à réaliser la combustion incomplète en oxyde de carbone. Les gaz produits s'échappent par l'ouverture H au sommet de la voûte et pénètrent dans le *siphon*, destiné à produire l'aspiration. Celui-ci comprend une partie ascendante H en maçonnerie, suivie d'une partie horizontale et d'une branche descendante en tôle.

L'emploi de ce siphon paraissait au début nécessaire pour provoquer l'aspiration de l'air à travers la couche de combustible. Mais il présentait d'autre part le grave inconvénient de refroidir rapidement les gaz. Il en résultait d'une part la condensation des goudrons qui s'accumulaient au bas du siphon et appauvrirent le gaz comme nous l'avons expliqué ; d'autre part une diminution correspondante de l'énergie latente emportée par ce gaz ; le tout au préjudice du rendement de l'appareil.

On a supprimé aujourd'hui le siphon, soit en employant l'air soufflé comme dans les appareils que nous verrons tout à l'heure, soit même en conservant le tirage naturel : il suffit de placer le gazogène en contre-bas du four, de façon que la colonne ascendante de gaz chaud fasse cheminée. De cette manière on peut éviter dans une large mesure le refroidissement et ses fâcheuses conséquences¹.

On obtient une meilleure solution en accolant les gazogènes deux par deux, de façon à avoir une paroi verticale commune ; ou mieux encore, on supprime toute séparation entre les deux cuves et l'on construit un gazogène à deux grilles inclinées en sens

¹ On a vu d'ailleurs plus haut dans la première partie (p. 175) que cette perte d'énergie était pratiquement moins importante qu'on serait tenté de le croire au premier abord, car la récupération permet de réchauffer le gaz aux dépens de la chaleur emportée par les fumées ; on doit remarquer cependant que si le refroidissement dû au siphon était trop considérable, la récupération intégrale serait impossible, car il faut laisser aux fumées assez de chaleur sensible pour assurer le tirage.

inverse ; enfin on peut grouper ces appareils en série les uns à côté des autres. Mais il reste toujours une cause importante de perte de chaleur, c'est la grille par où le rayonnement se fait librement, et ce refroidissement de la grille est d'ailleurs nécessaire pour l'empêcher de brûler. En général même on la refroidit volontairement en jetant de l'eau sur les cendres, ce qui produit déjà un peu de gaz à l'eau.

Le gazogène Siemens présente cependant, en dépit de sa construction en apparence primitive, un avantage considérable qui le fait employer encore fréquemment aujourd'hui : c'est la possibilité de brûler des charbons gras, même ceux qui gonflent et se collent. En effet, par la façon dont le combustible pénètre graduellement dans

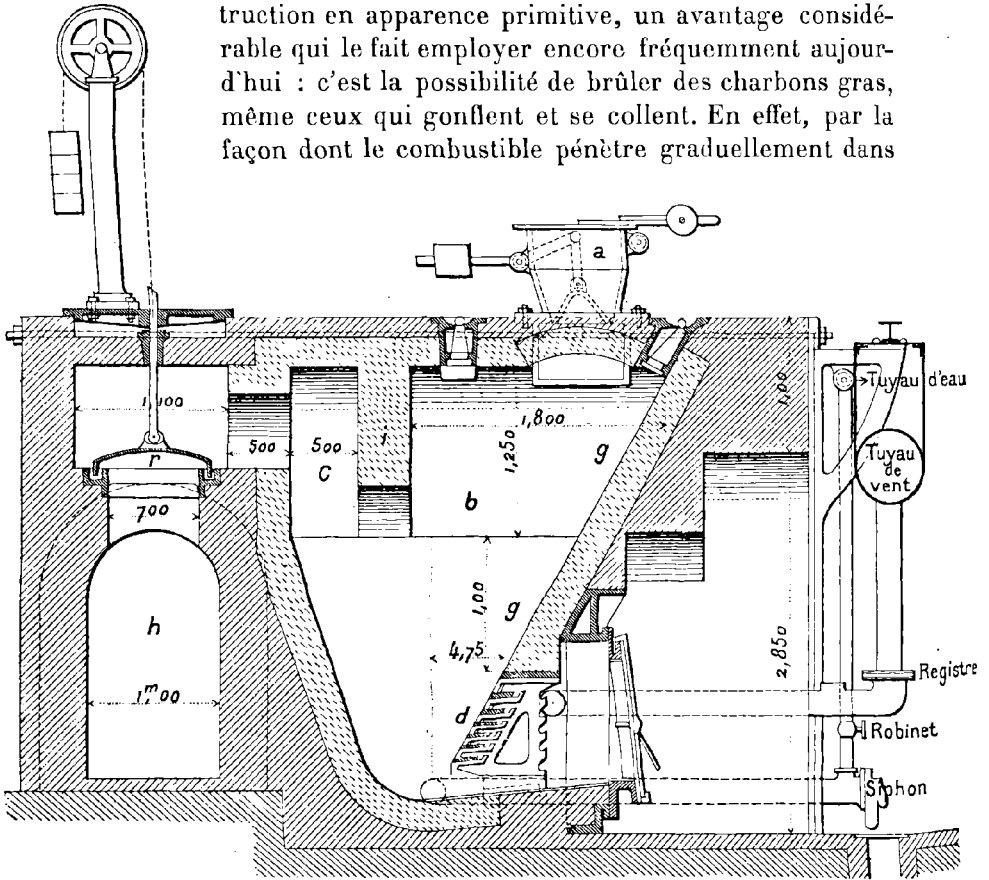


Fig. 84. — Gazogène à barrage.

les parties chaudes en s'écoulant progressivement sur la grille, la distillation des matières volatiles se produit dès le début, et quand le charbon arrive dans la zone de combustion, il est déjà complètement transformé en coke, et se laisse facilement traverser par l'air. S'il se forme des amas de coke, on les brise à l'aide de ringards

introduits à travers les barreaux de la grille. Si la houille s'agglomère à la partie supérieure, on fait passer les ringards dans des trous ménagés à cet effet sous la voûte. On peut même employer des charbons tout venant et des fines, qui donneront du coke aggloméré avant d'arriver à la grille.

Dans les modèles récents de gazogènes Siemens, on remplace en général la grille inclinée du type primitif par une grille horizontale ; cette disposition est figurée dans le four Biedermann et Harey décrit p. 196.

L'emploi des houilles grasses dans ces appareils présente néanmoins un inconvénient : la formation de suie dans les conduites, par suite de la condensation tout au moins partielle des matières goudronneuses, et du dédoublement de ces matières, sous l'action des températures élevées, en gaz plus riches en hydrogène et en noir de fumée.

On a cherché à faire disparaître ce défaut. La solution a été donnée par M. Lencauchez avec le *gazogène à barrage* reproduit ci-contre (fig. 84).

Dans ce dispositif, les gaz qui se forment à la partie supérieure par suite de la distillation du combustible sont ramenés, par un barrage vertical I, dans la zone de haute température, au contact du coke incandescent ; là ils subissent une dissociation en produits volatils et en carbone qui reste dans le coke. On évite de cette manière les dépôts de suie dans les conduites, que l'on n'a plus besoin de nettoyer qu'une fois par an, tandis qu'avec le type de Siemens il était nécessaire de brûler la suie condensée tous les huit jours.

Le gazogène figuré ici comporte d'ailleurs deux perfectionnements :

D'abord le tirage naturel est remplacé par de l'air soufflé, ce qui permet de supprimer tout appareil de tirage, siphon ou cheminée, et de ne plus s'inquiéter des différences de niveau à donner au générateur par rapport aux fours.

En second lieu, on aperçoit une porte en fonte placée devant la grille et s'opposant aux pertes de chaleur par rayonnement ; mais pour éviter que dans ces conditions la grille ne soit brûlée, on inonde le bas du cendrier avec de l'eau amenée d'une façon continue et dont le trop-plein est enlevé par un siphon (Babu).

Gazogènes à cuve, à air soufflé. — Les gazogènes à air soufflé sont plus généralement aujourd'hui construits en forme de fours à cuve, à grille circulaire. La figure ci-contre (fig. 85) indique, d'après

Babu, la disposition d'un appareil installé à l'usine du Phénix ; le défaut général des gazogènes à cuve verticale est que les vides sont plus considérables entre le charbon et la paroi qu'à l'intérieur des morceaux de charbon, et que par suite l'air injecté dans le gazogène tend à suivre la paroi ; il en résulte un mauvais fonctionnement de l'appareil et un excès d'acide carbonique dans le gaz. C'est là un

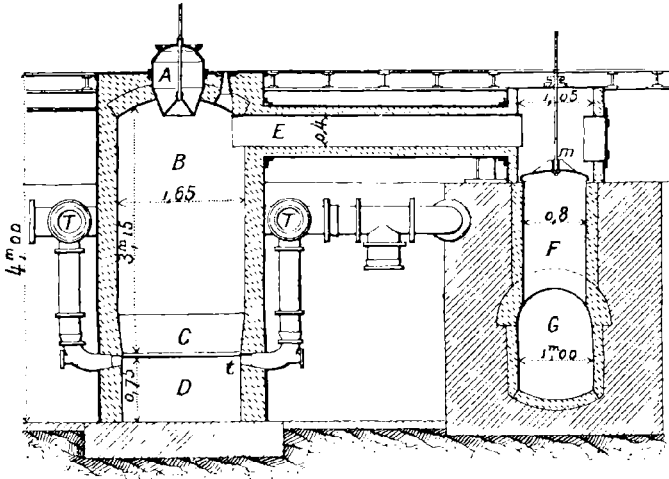


Fig. 85. — Gazogène à air soufflé du Phénix.

défaut qui ne se présentait pas dans le type primitif de Siemens ; on a essayé, comme c'est le cas ici, d'y pallier en rétrécissant un peu la cuve au niveau de la grille ; une meilleure solution serait l'introduction de l'air soufflé au sein même du combustible comme nous le verrons tout à l'heure dans les gazogènes Dowson.

Gazogènes à vent soufflé sans grille. — Déjà Ebelmenn, dans des essais faits aux usines d'Audincourt, avait eu l'idée de construire des gazogènes en forme de hauts fourneaux, alimentés par des tuyères, et brûlant du charbon de bois mélangé de scories de hauts fourneaux et d'argiles ferrugineuses, de manière à avoir un laitier possible. Cette idée d'avoir un gazomètre marchant à une allure assez chaude pour amener la fusion des cendres a été reprise plus tard et réalisée par le *cubilot de Saillers* (fig. 86).

Cet appareil possède des dimensions assez considérables : sa hauteur atteint 5 mètres ; son diamètre augmente graduellement vers le bas, ce qui facilite la descente du combustible. L'air est amené, sous

une pression de 10 à 20 centimètres d'eau, par deux tuyères *b, b* à double enveloppe, avec réfrigération par un courant d'eau; des caisses à circulation d'eau *cc* ont également été ménagées dans les parois, de manière à les refroidir un peu et à éviter leur attaque par les matières fondues. Celles-ci sont expulsées de temps en temps par les trous de coulée *H*.

Le gazogène Saillers fonctionne avec les houilles grasses collantes; par suite de la grande hauteur de la courbe de charbon et de l'allure très chaude (les gaz sortent de l'appareil vers 800-900°), la teneur en acide carbonique ne dépasse par 2 p. 100.

En ajoutant à la houille une certaine quantité de chaux de manière à réaliser des scories basiques, on fait passer la plus grande partie du soufre dans les laitiers, de sorte que le gaz est très pauvre en ce métalloïde, ce qui est particulièrement important pour les opérations sidérurgiques.

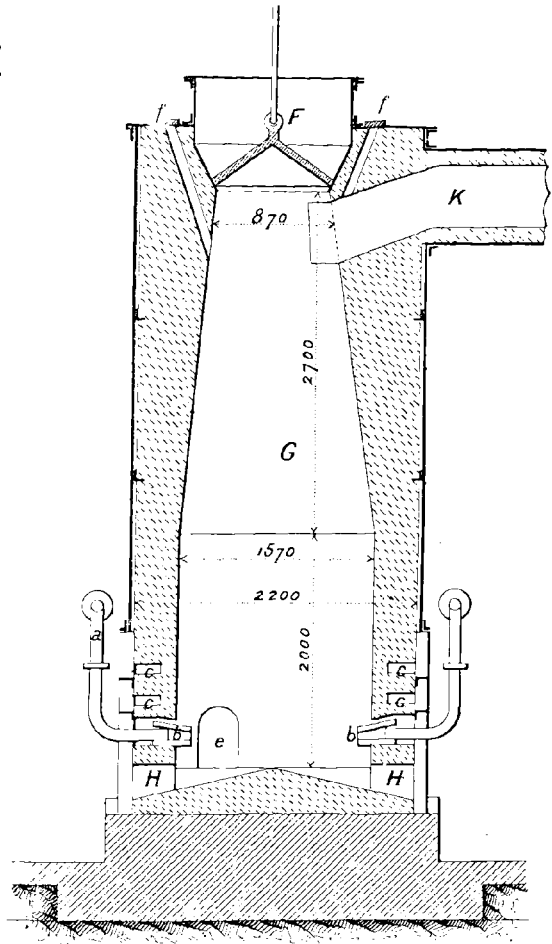


Fig. 86. — Gazogène Saillers.

Gazogène S. F. H. —

Le gazogène Sépulchre, construit par MM. Fichet et Heurtey et désigné sous le nom de gazogène S. F. H., représente le dispositif le plus récent de gazogène à fusion de cendres. Sa forme générale (fig. 87) rappelle beaucoup celle des petits hauts fourneaux à charbon de bois utilisés au commencement du siècle dernier. Il comporte à sa partie inférieure un creuset muni de

tuyères refroidies par une circulation d'eau; un ouvrage dans lequel on peut, éventuellement, souffler de l'air humide sous pression; une cuve avec ou sans étalages; un départ de gaz latéral; une trémie centrale permettant à la fois le réglage de l'épaisseur du combustible et l'échauffement progressif de celui-ci; enfin un appareil de chargement à double fermeture permettant l'introduction de combus-

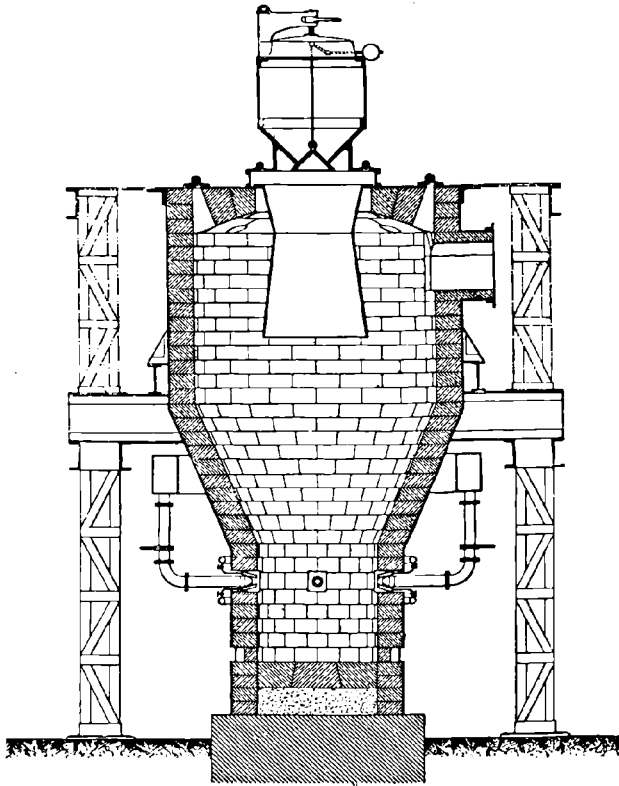


Fig. 87. — Gazogène Sépulchre.

tible frais sans déperdition de gaz. Le couvercle est muni sur son pourtour de trous de piquage.

On peut brûler dans ce gazogène les combustibles les plus divers : charbons maigres ou gras, lignites; la seule condition est que le coke produit par distillation puisse être brisé facilement avec une barre de piquage. Le vent doit être soufflé sous une forte pression. On obtient alors une température extrêmement élevée au foyer, ame-

nant la fusion complète des cendres, surtout si l'on a eu la précaution de mélanger au combustible une certaine proportion d'un fondant approprié, calcaire, sable ou laitier de haut fourneau ; on peut ainsi brûler des charbons tenant 25 et même 30 p. 100 de cendres. La combustion est très active et atteint en allure normale 900 à 1100 kilogrammes par heure et par mètre carré.

Après une ou deux heures de marche, suivant la nature du combustible, on doit procéder à la coulée du bain de laitier qui remplit le creuset, en débouchant le tampon d'argile obturant le trou de coulée.

Le profil et les dimensions intérieures de l'appareil sont établis d'après la nature et la grosseur du combustible à gazéifier. La hauteur est calculée de telle sorte que la distillation soit complète avant l'arrivée aux tuyères.

Le gazogène est complètement revêtu d'une enveloppe étanche en tôle ; la partie supérieure de l'enveloppe est portée par des colonnes et la partie inférieure est construite en panneaux démontables de manière à pouvoir réparer le creuset sans toucher au reste de l'appareil.

Voici quelques analyses de gaz provenant de différents combustibles traités dans l'appareil :

	CHARBON gras.	CHARBON demi-gras.	LIGNITE de Gironcourt.	LIGNITE des Bouches-du-Rhône.	COKE
SO ² + CO ²	1,10	0,60	2,09	1,40	0,60
CO	31,50	30,20	28,69	28,30	31,90
H	5,30	9,00	8,60	7,70	néant.
CH ⁴	2,60	—	2,88	7,50	4,70
Az	59,50	60,20	57,74	55,10	62,80
Gaz combustibles.	39,40	39,20	40,17	43,50	36,60

On remarquera la proportion extrêmement faible d'acide carbonique, due à l'allure très chaude des appareils ; et aussi la forte teneur en méthane des gaz produits par certaines variétés de lignite.

Gazogènes à joint hydraulique. — Nous venons de voir qu'un des défauts du gazogène Siemens consistait dans la perte de chaleur par rayonnement de la grille, et nous avons montré comment on avait cherché à diminuer cette perte, soit en arrosant d'eau les

condres, soit en combinant ce moyen avec la fermeture d'une porte en fonte devant la grille. On peut faire mieux et construire des gazogènes à cuve terminés à leur partie inférieure par une cuvette pleine d'eau. Dans ces conditions le rayonnement du four est employé à distiller de l'eau qui traverse ensuite le charbon sous forme de vapeur et dont on retrouve par suite l'énergie apportée, et les chaleurs perdues par les condres, tombant du gazogène à haute tempé-

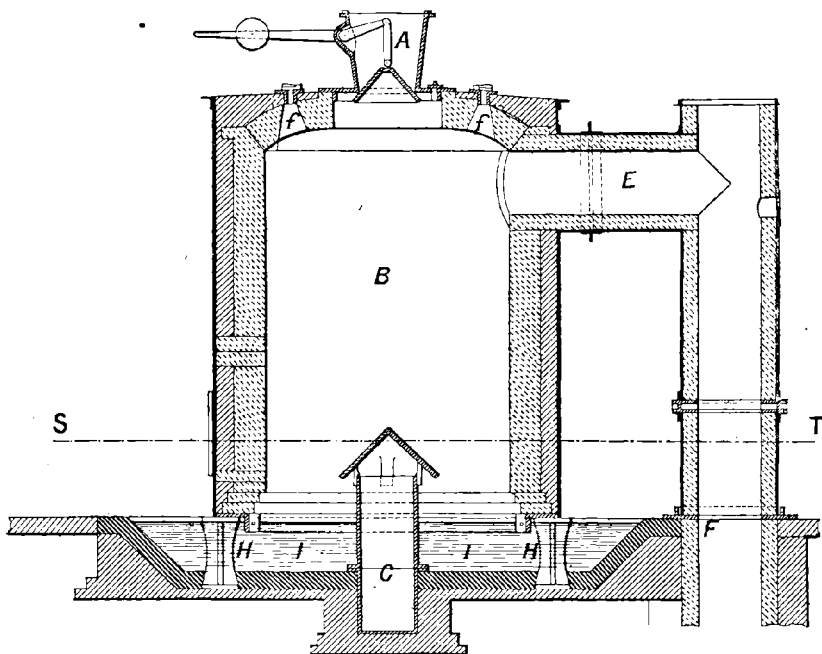


Fig. 88. — Gazogène Dowson.

rature, sont également retrouvées sous forme de vapeur d'eau formée. On voit que l'on arrive ainsi, par des transitions insensibles, aux appareils à gaz à l'eau ou tout au moins à gaz mixte. Cependant dans les modèles que nous étudierons ici la vapeur d'eau n'est introduite qu'en proportion relativement faible, et seulement de manière à abaisser la température au voisinage de la grille et à utiliser les chaleurs emportées par les condres ; mais l'allure de l'appareil reste toujours très chaude et les gaz produits sont toujours constitués en majeure partie par l'oxyde de carbone.

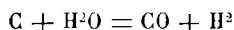
Dans les gazogènes du type *Dowson*, figuré ici (fig. 88), la grille a été supprimée ; la cuve, en tôle garnie de briques réfractaires, repose

par l'intermédiaire de supports en fonte H sur une cuvette I remplie d'eau. L'air soufflé arrive au centre du combustible par un tube vertical C, recouvert d'un cône de tôle destiné à empêcher l'introduction du charbon dans la conduite. Les gaz s'échappent par la conduite E F, tandis que le chargement s'effectue par la trémie A. Des ouvertures placées à la partie supérieure de l'appareil, en f, ou vers le bas, et fermées d'habitude par des tampons en matière réfractaire, servent à introduire des ringards de manière à briser les agglomérations de morceaux de houille qui peuvent se produire et à faire descendre régulièrement le combustible.

Dans les gazogènes Dowson, la pression de l'air nécessaire au soufflage est produite au moyen d'un injecteur à vapeur. Dans les gazogènes *Twaite*, qui leur ressemblent beaucoup comme dispositions générales, l'injecteur est remplacé par un ventilateur.

§ 2. — GAZOGÈNES POUR GAZ À L'EAU

La réaction fondamentale :



étant endothermique, le carbone ne pourra être gazéifié de lui-même sous l'influence de la vapeur d'eau : si l'on fait réagir celle-ci sur du charbon porté au rouge, la température s'abaissera rapidement jusqu'à ce que la réaction s'arrête. Il faudra donc, pour obtenir la quantité suffisante du gaz à l'eau, fournir un supplément de chaleur, ce que l'on pourra réaliser de deux manières différentes :

1° En chauffant d'une manière continue, à l'aide d'un foyer extérieur, du charbon enfermé dans une enceinte close et sur lequel on fera passer d'une façon également continue un courant de vapeur d'eau.

2° Ou bien on marchera de façon discontinue : dans une première période, on fera passer un courant d'air sur le charbon allumé, ce qui élèvera rapidement sa température, la combustion du charbon dans l'air étant exothermique ; puis viendra la période de formation de gaz à l'eau, obtenu en remplaçant le courant d'air par un courant de vapeur, et durant laquelle la température retombera jusqu'à ce qu'on arrête la vapeur et que l'on relève de nouveau la température par une nouvelle introduction d'air, et ainsi de suite en alternant. C'est suivant ce principe que fonctionnent la plupart des gazogènes pour gaz à l'eau ; mais on peut encore conduire la période de combustion par l'air de deux façons diffé-

rentes : On peut n'introduire l'air qu'en quantité limitée, de manière à produire presque uniquement de l'oxyde de carbone ; la réaction n'est pas très fortement exothermique, de sorte qu'il faudra faire passer un volume d'air relativement assez considérable pour retrouver la température primitive ; mais en revanche le gaz produit sera combustible et pourra être utilisé au même titre que le gaz à l'eau formé dans la seconde période. — Ou bien, on peut introduire rapidement une grande quantité d'air, de manière à amener la production d'acide carbonique : il ne se forme plus de gaz combustible durant cette période, mais la température remonte beaucoup plus vite, puisque la combustion du charbon conduisant à l'acide carbonique est beaucoup plus fortement exothermique que la production d'oxyde de carbone.

1. — GAZOGÈNES CONTINUS A CHAUFFAGE EXTÉRIEUR

Gazogène Guénot. — Ce gazogène, dont nous empruntons la description à l'excellent ouvrage de M. Deschamps¹, réalise la production continue du gaz à l'eau, avec chauffage extérieur. Il se compose d'une cornue en fonte en deux pièces *a, b*, en forme d' U, que l'on remplit de charbon de bois au moyen de la trémie *c*. La cornue est chauffée par les gaz issus du foyer *j*. L'eau est introduite par un siphon *p*, et son écoulement réglé au moyen du robinet *o*. La vapeur produite circule dans la cornue en sens inverse des gaz du foyer, et le gaz à l'eau sort finalement en *h* par l'extrémité la plus chaude, pour aller se laver en *q* avant de pénétrer dans le gazomètre *n*. Celui-ci assure le réglage de l'appareil au moyen de deux tiges articulées dont l'une commande la fermeture du robinet *o* et dont l'autre gouverne la vanne de réglage *m* du tirage du foyer.

La cornue étant en fonte ne peut pas être portée à une température très élevée ; aussi, conformément au principe du déplacement de l'équilibre, le gaz produit est-il assez chargé en acide carbonique, ainsi que le montrent les chiffres suivants :

	EN POIDS	EN VOLUME
CO ²	69,8	25
CO	22,2	12
H ²	8,2	63

Cependant on voit que ce gaz contient encore, en volumes, plus de

¹ Deschamps, *les Gazogènes*, Paris, 1907.

63 p. 100 d'hydrogène, il est donc très léger et l'on a pu le proposer pour gonfler les aérostats.

Les gazogènes Guénot, comme tous les appareils comportant des cornues, ne donnent qu'un très mauvais rendement, mais ils ont l'avantage de la simplicité et du faible encombrement, aussi peuvent-ils malgré tout être avantageux pour les petites productions, par

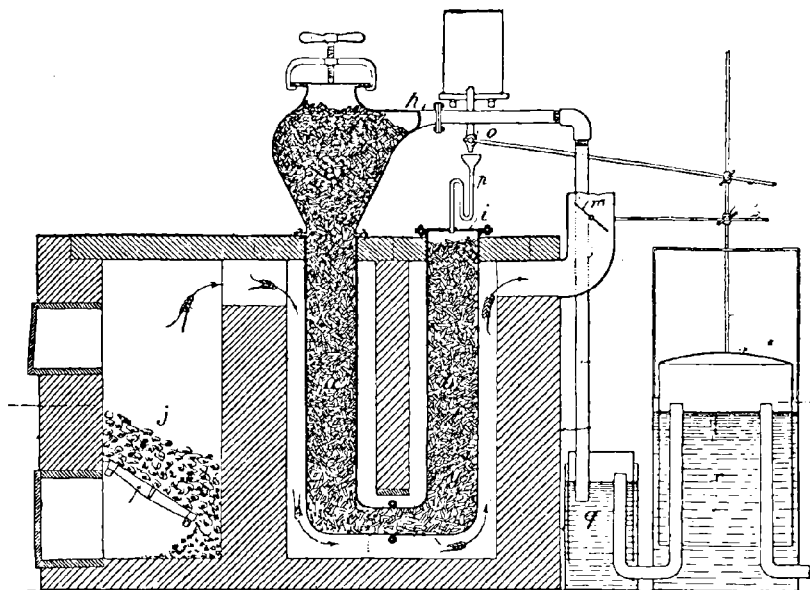


Fig. 89. — Gazogène Guénot.

exemple si l'on veut utiliser le gaz pour la soudure autogène. En fait ils ne sont guère employés.

2. — GAZOGÈNES DISCONTINUS

Nous avons dit que dans ces gazogènes la période de soufflage, destinée à relever la température, pouvait être conduite de manière à produire du gaz à l'air ou du gaz carbonique.

Nous parlerons d'abord des appareils fonctionnant suivant la première manière. Dans ce cas la période de soufflage doit être notablement plus longue que la période de production du gaz à l'eau ; par exemple la première est maintenue pendant 10 à 12 minutes tandis que la seconde ne dure que 4 minutes. Le gaz à l'air sera récolté dans un gazomètre distinct de celui du gaz à l'eau. On combine en

général les valves d'introduction de l'air soufflé et de la vapeur d'eau et les registres de sortie du gaz produit de manière à diriger automatiquement le gaz sur l'un ou sur l'autre gazomètre en même temps qu'on remplace l'air par la vapeur et vice versa.

Cette sujétion d'avoir deux gazomètres et deux gaz différents ne pouvant pas être employés aux mêmes usages et que l'on ne doit pas mélanger (sinon il serait bien plus simple et plus avantageux d'utiliser les gazogènes à gaz mixte que nous étudierons plus loin) est un inconvénient de la méthode dont on a cherché à se débarrasser. La solution est évidente : au lieu de recueillir le gaz à l'air, on le brûle au fur et à mesure de sa production, et l'on utilise la chaleur ainsi produite à surchauffer la vapeur d'eau qui servira dans la période suivante à préparer le gaz à l'eau. En d'autres termes on transforme l'énergie chimique du gaz à l'air en énergie calorifique qui permettra de prolonger d'autant la formation endothermique du gaz à l'eau. C'est là le principe des appareils Strong.

Gazogènes Strong. — Dans ces appareils, dont nous donnons ci-

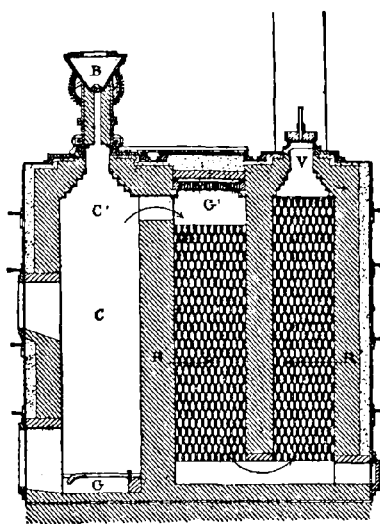


Fig. 90. — Gazogène Strong.

contre la figure empruntée à l'ouvrage de M. Deschamps, le gazogène proprement dit, CC', est adossé à un double régénérateur de chaleur RR'. L'air introduit sous la grille G produit du gaz Siemens qui sort à la partie supérieure C' et qu'on enflamme au contact d'une rentrée d'air supplémentaire en G' au-dessus du premier régénérateur; les gaz enflammés parcourent ce régénérateur de haut en bas, puis remontent par le régénérateur R' pour s'échapper en V. — Dans la période suivante, la vapeur d'eau est introduite en V; elle parcourt en sens inverse les régénérateurs qui la surchauffent, et

pénètre en C' dans le gazogène dont elle traverse de haut en bas la couche de charbon incandescent pour sortir en G. Grâce à la température élevée de la vapeur d'eau ainsi surchauffée, le refroidissement du charbon est moins rapide, et l'on peut ainsi prolonger la

durée de production du gaz à l'eau par rapport à celle de la période de gaz à l'air.

De même que l'on utilise ainsi sous forme d'énergie calorifique l'énergie chimique emportée par les gaz de la période de soufflage, de même on pourrait économiquement récupérer l'énergie thermique emportée par le gaz à l'eau lui-même quand il quitte le gazogène à une température de 900 à 1 000°. On a construit des gazogènes réalisant cette conception. Dans ces appareils (gazogènes Goodyear) il existe de part et d'autre du gazogène deux groupes de récupérateurs que nous appellerons A et B. L'air soufflé pénètre dans le régénérateur A, où il se réchauffe, et traverse le gazogène en produisant du gaz à l'air, qui est enflammé à sa sortie par une introduction d'air secondaire et vient brûler dans le régénérateur B. Dans la période suivante, la vapeur d'eau entre par le régénérateur B, et se surchauffe avant de pénétrer dans le gazogène. Le gaz à l'eau produit traverse le régénérateur A et lui cède sa chaleur. Dans une troisième période, on recommence l'introduction de l'air soufflé, mais cette fois en B, et l'on brûle le gaz produit dans le régénérateur A. Enfin dans une quatrième période, la vapeur d'eau est introduite en A, et le gaz à l'eau qu'elle produit en traversant ensuite le gazogène est dirigé à travers le régénérateur B; après quoi le cycle recommence.

Malgré sa construction théoriquement parfaite le gazogène Goodyear n'a pas été employé pratiquement.

Gazogène Dellwick-Fleicher. — Cet appareil, un des plus employés à l'heure actuelle pour la préparation du gaz à l'eau, est conçu de manière à produire durant la période de soufflage de l'acide carbonique au lieu d'oxyde de carbone. Il se compose (fig. 90) d'une cuve en tôle de faible hauteur, doublée de briques réfractaires, et portant à sa partie supérieure une trémie centrale surmontée d'une cheminée. Le chargement s'effectue au moyen de coke en gros morceaux, versé par la trémie. Une soufflerie permet d'envoyer un courant d'air rapide à la partie inférieure, et comme la couche de combustible n'est pas très épaisse et que les gros morceaux laissent entre eux des vides importants, on arrive à brûler presque complètement le carbone à l'état de CO^2 ; il ne se produit pas plus de 2 p. 100 d'oxyde de carbone. Les gaz s'échappent par la trémie et la cheminée qui la surmonte.

Dans ces conditions la température du charbon s'élève très rapi-

dement. On ferme alors l'arrivée de l'air, au moyen d'une vanne commandée par un levier placé sur le plancher supérieur, on ferme la trémie de chargement et l'on envoie le courant de vapeur d'eau, à volonté à la partie supérieure ou inférieure de l'appareil ; on ouvre en même temps l'orifice de sortie de gaz à l'eau : il y a deux orifices,

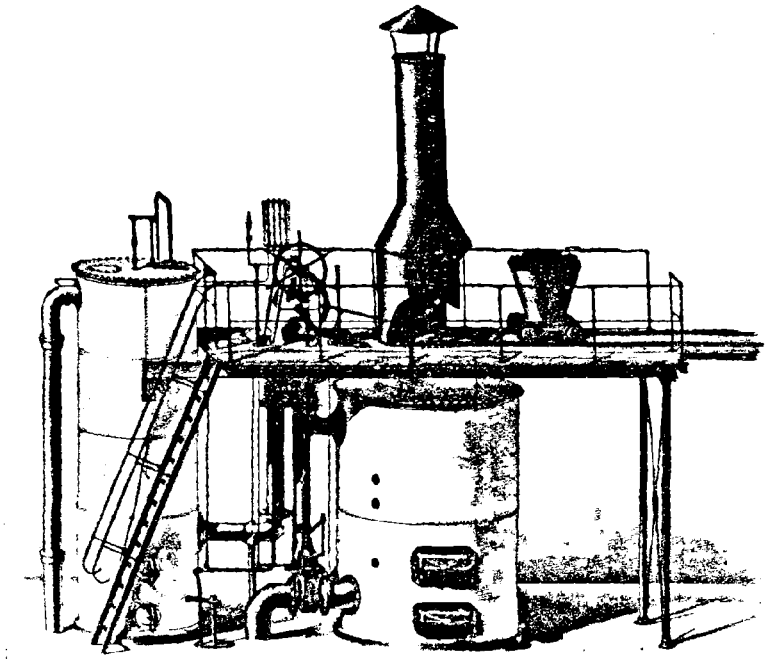


Fig. 91. — Gazogène Dellwick-Fleicher.

l'un en bas, l'autre en haut de la cuve, aboutissant à deux conduites qui se réunissent à une certaine distance pour amener le gaz au bas d'un scrubber rempli de coke humide où il se filtre et se purifie des poussières entraînées. On fait ainsi circuler la vapeur d'eau tantôt de haut en bas, tantôt, à la période suivante, de bas en haut à travers le charbon incandescent, ce qui égalise la température et prévient toute chance d'usure du revêtement. Les cendres traversent la grille et se rassemblent dans le cendrier d'où elles sont facilement retirées.

L'introduction de l'air dure de 1 minute 1/2 à 2 minutes seulement, et la période consécutive de production de gaz à l'eau dure au minimum 8 minutes.

La composition moyenne du gaz obtenu est la suivante (en volumes) :

Hydrogène.	49 p. 100
Oxyde de carbone.	39 —
Acide carbonique.	5 —
Méthane.	0,7 —
Azote	6,3 —

En se servant d'un bon coke sec en morceaux de la grosseur du poing et ne contenant pas plus de 20 p. 100 de cendres, on peut obtenir 2,3 m³ de gaz à l'eau par kilogramme de carbone, ce qui en comptant le pouvoir calorifique du gaz comme étant de 2550 calories au mètre cube, et celui du charbon de 8080 calories, correspond à un rendement de 72,7 p. 100; il faudrait en outre tenir compte de la chaleur employée pour vaporiser l'eau et de l'énergie nécessaire pour la compression de l'air. Le volume d'air théorique pour brûler complètement 1 kilogramme de carbone est de 11,5 m³; mais en pratique il faut une quantité d'air bien plus considérable. Quant à la dépense de vapeur (généralement fournie à la pression de 6 kilogrammes), on peut compter sur 0,8 à 1 kilogramme par mètre cube de gaz à l'eau produit, en comptant aussi celle qui est nécessaire pour actionner le ventilateur.

On doit remarquer que le procédé Dellwick-Fleicher revient au fond au procédé Strong: Dans les deux cas on utilise finalement toute la chaleur dégagée par le carbone pour passer à l'état d'anhydride carbonique. Mais dans le procédé Strong on produit la réaction en deux phases, il en résulte une grosse perte de calories par rayonnement, surtout dans le régénérateur. Le procédé Dellwick-Fleicher apparaît donc comme plus économique, et en même temps les appareils qui permettent de le réaliser sont d'une construction bien plus simple.

Usages du gaz à l'eau. — Le gaz à l'eau peut être employé comme moyen de chauffage dans les différents fours. Cependant on lui préfère généralement pour cet usage soit le gaz de générateur, soit plutôt le gaz mixte. Il est surtout avantageux quand on veut effectuer une opération en atmosphère nettement réductrice, par exemple pour la soudure autogène. Mais la plus importante application du gaz à l'eau est son emploi comme gaz d'éclairage, soit mélangé au gaz de houille dans la proportion de 20 à 30 p. 100, soit même employé seul. Comme nous n'envisageons ici que le problème du chauffage, et non celui de l'éclairage, nous ne nous étendrons pas

sur cette application. Nous mentionnerons cependant la nécessité, dans ce dernier cas, de carburer le gaz à l'eau, c'est-à-dire de le charger de vapeur d'hydrocarbures afin de le rendre éclairant ; la carburation peut être faite soit à froid au moyen de carbures volatils (benzols), soit à chaud au moyen d'huiles lourdes de pétroles. Dans ce dernier cas les gazogènes sont généralement disposés de manière à réaliser directement la carburation : il en est ainsi par exemple des appareils *Lowe*, *Strache* et *Humphrey et Glasgow*. Dans ces appareils les huiles sont généralement introduites dans les gaz à la sortie du gazogène, où elles se volatilisent ; mais pour éviter leur condensation ultérieure on doit faire passer le gaz dans une enceinte chauffée à haute température, de manière à décomposer les vapeurs carburées avec production de produits plus volatils et non condensables. Cette enceinte est chauffée durant la période de soufflage par la combustion du gaz à l'air formé dans le gazogène.

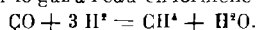
L'usage du gaz à l'eau comme gaz d'éclairage ne s'est du reste pas répandu en France où l'on redoute les dangers résultant de sa forte teneur en oxyde de carbone. Mais il est très employé au contraire en Allemagne et en Amérique ¹.

§ 3. — LES GAZOGÈNES A GAZ MIXTE

Les gazogènes à gaz mixte sont certainement ceux sur lesquels l'imagination des constructeurs s'est le plus exercée, et dont on a produit le plus de types différents. Cela tient à ce qu'ils constituent, dans la majeure partie des cas, la méthode la plus commode et la plus pratique de gazéification des combustibles, et qu'ils se plient sans difficulté, comme nous le montrerons par la suite, à des emplois très différents, permettant aussi bien de très fortes consommations que des productions très réduites.

Les gazogènes du type Siemens produisent comme nous l'avons vu un gaz très chaud, dont l'emploi n'est réellement économique que s'il est brûlé dans les fours immédiatement à sa sortie de l'appareil, ou du moins avant d'avoir pu se refroidir notablement. Dans tous les autres cas où le gaz devra être employé froid, par exemple

¹ On a proposé de transformer le gaz à l'eau en formène suivant l'équation :



La réaction se produit facilement au contact du nickel réduit (*gaz méthane*, procédé Sabatier et Senderens). Le gaz ainsi transformé a perdu tout pouvoir toxique et peut être mélangé au gaz d'éclairage en toutes proportions. Ce procédé sera étudié plus complètement dans un autre volume de l'Encyclopédie.

si l'on doit le distribuer à des fours disséminés à des distances assez grandes du générateur, ou encore si l'on veut l'employer dans des moteurs à explosion, on perdra inutilement la chaleur qu'il emportait avec lui.

L'emploi du gaz mixte permet de réduire cette perte d'énergie, en abaissant notablement la température de régime, qui peut descendre aux environs de 600°. On récupère donc, sous forme d'énergie chimique, l'énergie thermique correspondant à la différence des températures de régime, différence qui peut dépasser 600° (voir première partie, page 180).

L'emploi du gaz à l'eau, dans des appareils perfectionnés où l'on récupérerait les chaleurs emportées par les gaz correspondant à la période d'air soufflé, donnerait les mêmes résultats économiques. Mais, par suite de sa marche discontinue, qui doit être renversée à des intervalles de temps très courts, la surveillance et la manipulation d'un tel gazogène sont beaucoup plus compliquées que celles des appareils à gaz mixte. Aussi le gaz à l'eau proprement dit n'est-il guère employé que dans les cas où l'on cherche un combustible très riche.

Une des applications les plus intéressantes du gaz mixte, en dehors du chauffage, est la marche des moteurs à explosion. Dans ce cas il semble, au premier abord, que l'on aurait grand avantage à prendre du gaz à l'eau, formé presque exclusivement de gaz combustibles tandis que le gaz mixte, appelé aussi pour cette raison et par opposition *gaz pauvre*, renferme au moins la moitié de son volume d'azote.

En réalité cet avantage est bien moins considérable qu'il ne paraît au premier abord, parce que, plus le gaz est riche, plus grand doit être le volume d'air nécessaire pour sa combustion, et cet air apporte avec lui les $\frac{4}{3}$ de son volume d'azote, c'est-à-dire le dilue d'autant. Il en résulte que les mélanges tonnants formés d'air et de deux gaz combustibles différents, l'un riche et l'autre pauvre, représentent des énergies beaucoup plus voisines que le rapport des puissances calorifiques de ces deux gaz. C'est ainsi par exemple que si l'on compare les pouvoirs calorifiques de l'oxyde de carbone pur et de ce même gaz dilué de son volume d'azote, ces pouvoirs calorifiques seront évidemment dans le rapport de 1 à 2, tandis que les pouvoirs des mélanges tonnants correspondants, évalués toujours pour des volumes égaux, seront entre eux comme 8,6 et 10 (Deschamps).

On comprend ainsi que l'avantage pratique reste au gaz pauvre.

Dans ce qui va suivre nous étudierons les types les plus remarquables de gazogènes à gaz pauvre, en insistant particulièrement à la fin sur les appareils permettant l'utilisation des combustibles bitumineux ou de qualité inférieure : c'est en effet de ce côté que se porte actuellement l'ingéniosité des inventeurs, et l'on est arrivé à pouvoir gazéifier sans difficultés ces combustibles, c'est-à-dire à réaliser la production du gaz mixte dans des conditions très économiques, tandis que les premiers appareils utilisés exigeaient l'emploi d'anhracite ou de houilles maigres d'excellente qualité.

Au point de vue du fonctionnement, les gazogènes à gaz mixte peuvent se diviser en deux classes : les gazogènes soufflés et les gazogènes par aspiration.

Dans les premiers, les plus anciennement connus, le mélange d'air et de vapeur était introduit sous pression, au moyen d'un injecteur à vapeur d'eau ou d'un ventilateur, et le gaz produit était recueilli dans un gazomètre.

Les seconds, destinés à l'alimentation des moteurs à explosions, fonctionnent *en dépression*, sous l'influence de l'aspiration produite par le moteur lui-même. On est donc conduit à supprimer le gazomètre, ce qui représente une économie considérable d'installation et une réduction de l'encombrement.

GAZOGÈNES SOUFFLÉS

Gazogène Wilson. — Ce gazogène (Babu, *Métallurgie générale*) est spécialement construit pour le chauffage des fours ; il est tout en maçonnerie, formé de deux revêtements successifs, l'un intérieur réfractaire C, l'autre extérieur en briques ordinaires B entouré d'une chemise en tôle A qui assure la parfaite étanchéité de l'ensemble.

La cuve (fig. 92) présente une forme légèrement conique, évasée vers le bas, ce qui évite la formation des voûtes qui s'effondrent d'elles-mêmes sous l'influence de la section croissante, et permet l'emploi des houilles légèrement collantes. Il n'y a pas de grille : le combustible repose directement sur la sole du four, où plutôt ce sont les cendres et les scories qui sont en contact direct avec cette sole ; on les enlève de temps à autre au moyen de ringards introduits par deux larges portes latérales. L'air, soufflé par les injecteurs de vapeur K et L, pénètre dans le gazogène par une conduite ménagée dans une sorte de pont en briques réfractaires traversant le gazogène au-dessus de la sole ; il débouche dans la cuve par des ouvertures H ménagées latéralement dans ce pont et protégées par une

voûte en briques qui les empêche d'être obstruées par les fragments de charbon ou les cendres. Les gaz produits sortent en traversant une chambre annulaire DD qui entoure complètement la partie supérieure CC du gazogène où se trouve le combustible récemment chargé. Il en résulte que celui-ci, chauffé par les gaz qui circulent

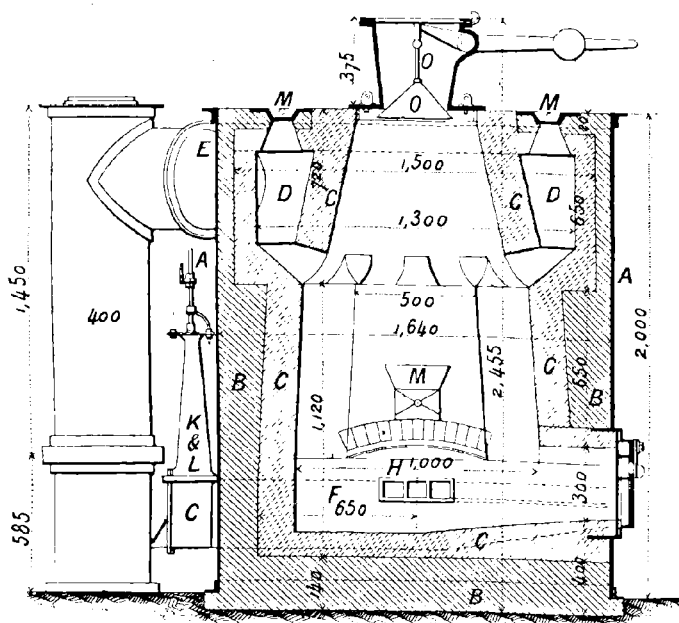


Fig. 92. — Gazogène Wilson.

tout autour, distille peu à peu, et arrive plus tard à l'état de coke dans la partie inférieure de la cuve.

Enfin les gaz s'échappent dans le four par la conduite E. L'alimentation du combustible se fait par la trémie O.

Gazogène Taylor. — Ce gazogène construit en France par MM. Fichet et Heurtet, est muni d'une grille à la partie inférieure, mais cette grille n'est pas en contact direct avec le charbon incandescent : l'appareil est disposé (fig. 93) de manière que la zone de combustion soit reportée notablement plus haut, et que le charbon repose sur la grille par l'intermédiaire des cendres et des scories qui l'empêchent de s'altérer rapidement.

A cet effet le mélange d'air et de vapeur d'eau, soufflé par l'injec-

teur J, pénètre dans le gazomètre à travers le tuyau vertical K qui traverse la couche de cendres, et débouche au milieu du combustible par un chapeau en forme de champignon de manière à produire en L

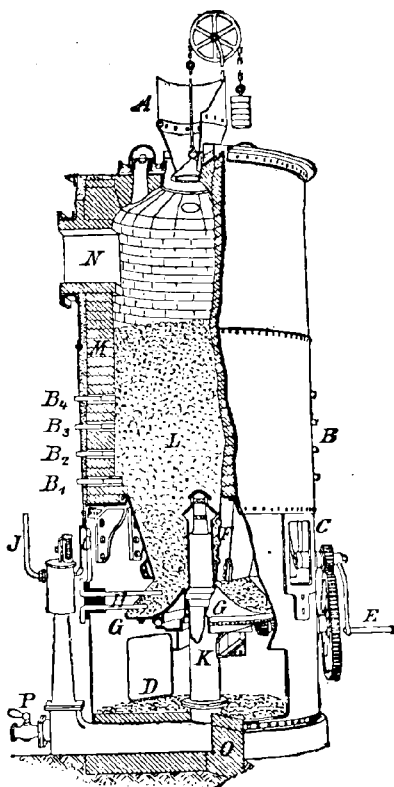


Fig. 93. — Gazogène Taylor.

la zone de combustion. Un entonnoir en tôle F reçoit les scories qui viennent s'ébouler sur le plateau G auquel on peut de l'extérieur transmettre un mouvement de rotation à l'aide de la manivelle E. Sous l'influence de cette rotation, le talus d'éboulement des scories vient rencontrer les barres fixes de décrassage H, qui les rejettent dans le cendrier. On réalise ainsi un décrassage continu et automatique. Au cas cependant où des obstructions viendraient à se produire dans l'entonnoir F on peut facilement le dégager en y faisant pénétrer, au travers des nombreux trous dont il est percé, un ringard introduit par la porte C. Les ouvertures B₁ B₂ B₃ B₄, normalement bouchées par des tampons en terre réfractaire, servent à observer la zone chaude L du gazogène. Cette zone doit être située immédiatement au-dessus de l'arrivée de l'air ; si elle

vient à s'élever notablement dans la cuve, on active le décrassage en faisant tourner le plateau au moyen de la roue dentée. Les gaz produits s'échappent par une ouverture latérale N.

Gazogène Pierson. — Les gazogènes que nous avons décrits jusqu'à présent sont employés surtout pour les applications au chauffage. Les modèles que nous allons passer maintenant en revue sont destinés plus spécialement aux moteurs à explosion.

Le gazogène Pierson est formé d'une cuve cylindrique C en maçonnerie, terminée à sa base par une large grille horizontale E. Il est entouré entièrement par un double revêtement en tôle A B fai-

sant corps avec le cendrier, et dans lequel circulent l'air et la vapeur d'eau avant de passer sous la grille. On réchauffe ainsi les produits d'alimentation aux dépens des chaleurs qui seraient perdues par rayonnement, tandis que ce matelas de vapeur forme autour de l'appareil une enveloppe isolante. Ce revêtement se prolonge même sur une certaine longueur en K autour de la conduite de départ des gaz H. Deux portes placées à la partie inférieure sur le cendrier per-

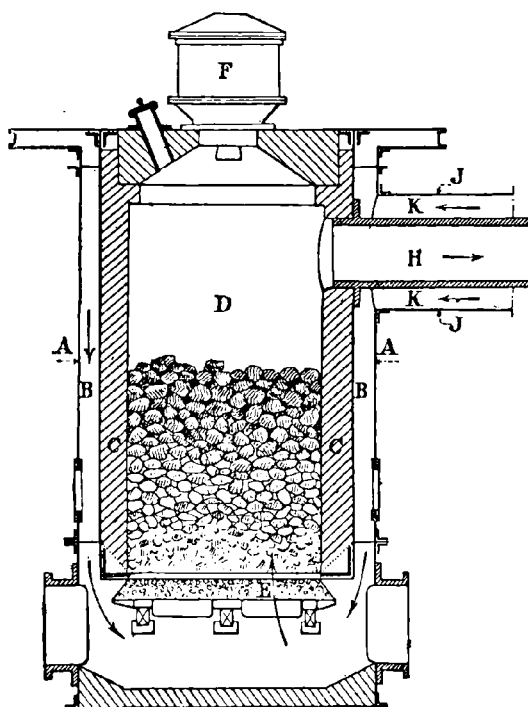


Fig. 94. — Gazogène Pierson.

mettent de dégrasser la grille. Un regard est également ménagé au sommet de l'appareil, à côté de la trémie de chargement F, de manière à pouvoir briser au moyen d'un ringard les voûtes qui viendraient à se former.

Il existe aussi des gazogènes Pierson fonctionnant par aspiration pour les moteurs de faible puissance. Nous en parlerons un peu plus loin.

Gazogènes producteurs de vapeur. — Dans les appareils que nous

avons passés en revue jusqu'à maintenant, la vapeur d'eau doit être fournie par une chaudière auxiliaire. Ce n'est pas un inconvénient sérieux dans les grandes usines, où l'on dispose toujours de vapeur d'eau ; mais il n'en est pas de même pour les petites installations, surtout quand on emploie le gazogène pour alimenter un moteur à gaz, puisqu'on cherche précisément dans ce cas à se passer de chaudières. Aussi était-il intéressant de pouvoir produire la vapeur

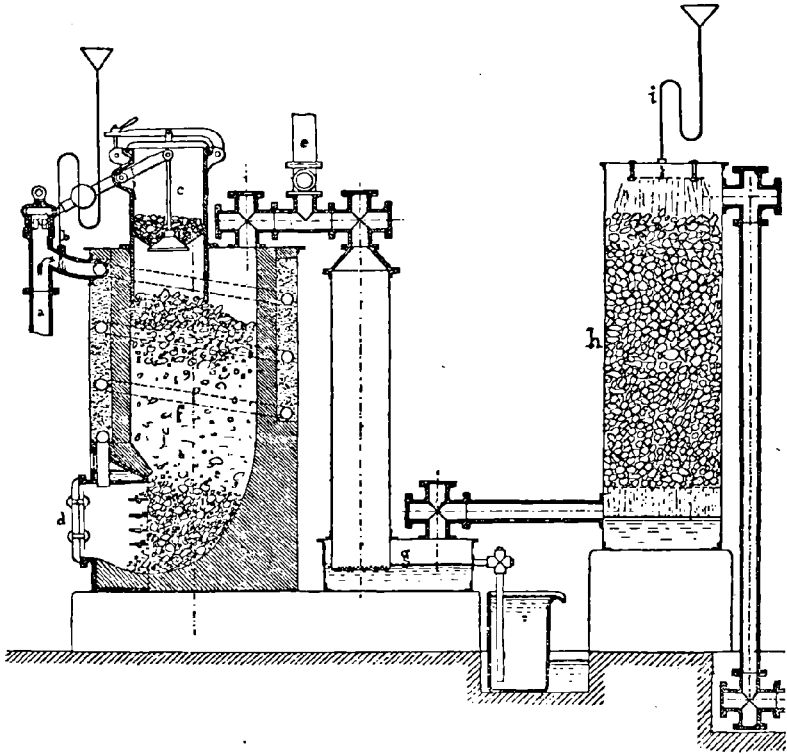


Fig. 95. — Gazogène Letombe.

nécessaire à l'aide du gazogène lui-même ; on y est parvenu de différentes manières :

1° On emploie une chaudière à basse pression, placée soit à la partie supérieure du gazogène, soit au niveau du foyer, soit sur le parcours des gaz produits.

2° On fait couler l'eau, goutte à goutte, dans des tubes chauffés par les chaleurs perdues du gazogène, où elle se volatilise au fur et à mesure. Ces tubes peuvent être placés dans l'épaisseur de

la paroi de la cuve, ou faire partie de la grille dont ils constituent des barreaux creux.

3° L'eau est pulvérisée mécaniquement sur le parcours de l'air d'alimentation devant la grille.

Nous verrons ces différents dispositifs appliqués dans la suite.

Gazogène Letombe. — Ce gazogène (fig. 95) comporte une grille verticale, disposition qui facilite beaucoup le décrassage. La porte *d* est placée à une certaine distance, de manière à ne pas être chauffée trop fortement.

L'eau est introduite goutte à goutte, au moyen du siphon *b*, dans un tube qui s'enroule en spirale autour de la cuve et dans lequel on insuffle l'air d'alimentation. Le mélange d'air et d'eau vaporisée vient déboucher devant la grille.

La cuve est cylindrique, mais la partie inférieure est inclinée vers l'avant de manière à pousser les mâchefers vers la grille.

Les gaz à leur sortie de l'appareil traversent un joint hydraulique et passent ensuite dans un scrubber *h* avant d'aboutir au gazomètre (Deschamps, *les Gazogènes*).

Gazogène Lencauchez. — Ce modèle, construit par la Société des Gaz Industriels, comprend une cuve verticale en briques réfractaires *K*, entourée d'une enveloppe en tôle *L*, l'espace entre cette enveloppe et les briques étant rempli de sable de manière à avoir un bon isolement thermique. La grille est formée

de deux parties, l'une à barreaux très légèrement inclinés *C*, l'autre constituée par des gradins formant presque une grille verticale. Le barreau le plus élevé est creux ; il reçoit un mince filet d'eau, qui se vaporise en partie en le traversant et dont l'excès tombe dans le cendrier, d'où le trop-plein peut s'écouler au dehors par le siphon *J*. L'air soufflé par un ventilateur arrive en *H* sous la grille ; mais généralement on l'a fait passer auparavant dans un *saturateur* où il

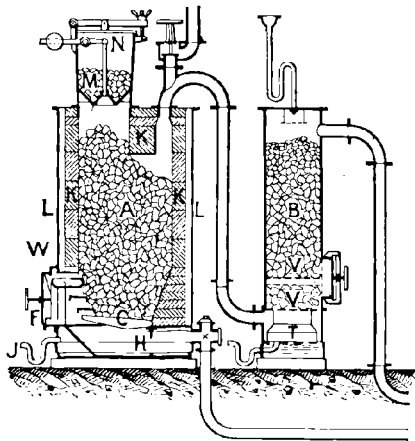


Fig. 96. — Gazogène Lencauchez.

s'est chargé de vapeur d'eau. Ce saturateur est simplement constitué par une colonne à coke que l'on arrose avec de l'eau bouillante, laquelle provient d'une colonne analogue placée par-dessus la première et parcourue par les gaz chauds sortant du gazogène. On réalise ainsi une récupération partielle des chaleurs entraînées. Le chargement s'effectue par la trémie à double fermeture MN.

Le débit de l'air est commandé par le gazomètre : quand celui-ci est plein, il agit sur une vanne placée sur la conduite du ventilateur, de telle sorte que l'air s'échappe dans l'atmosphère et que la marche du gazogène s'arrête ou se ralentit proportionnellement à la levée du gazomètre.

GAZOGÈNES PAR ASPIRATION

L'idée de supprimer le gazomètre et de faire aspirer directement les gaz du gazogène par le fonctionnement du moteur à explosion est due à Bénier. Mais le gazogène qu'il imagina dans ce but était assez compliqué et ne fonctionnait qu'avec des charbons de choix ; de plus, le moteur à deux temps dont l'inventeur s'était fait le champion marchait irrégulièrement, et l'insuccès du moteur entraîna celui du gazogène.

L'idée était bonne cependant. Elle fut reprise par Dowson et par

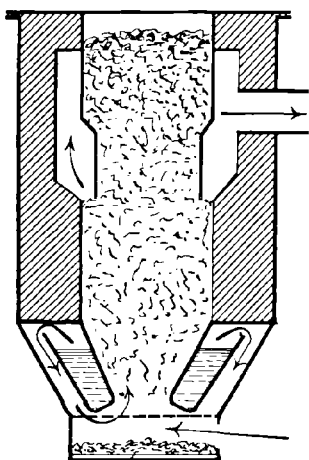
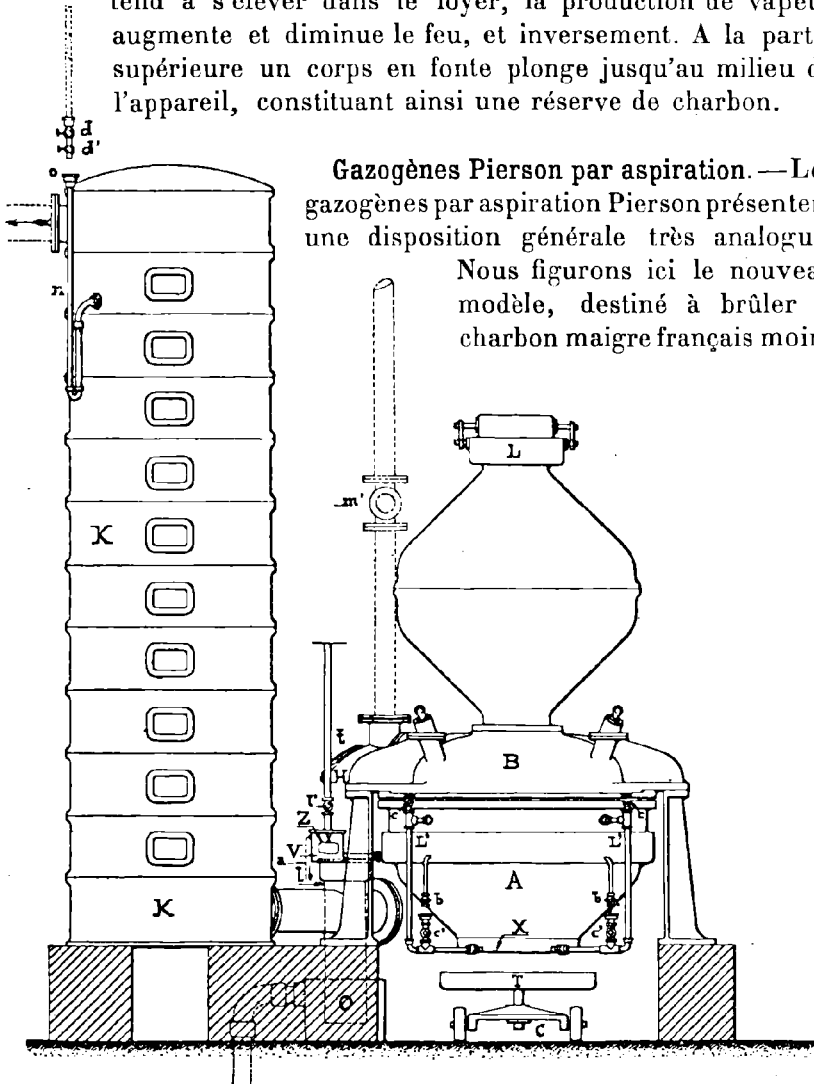


Fig. 97. — Gazogène Dowson par aspiration.

Taylor et C^{ie}, et le succès des nouveaux appareils pour les installations de faible puissance amena la création de nombreux modèles, tous construits à peu près sur le même type, et dont nous ne présenterons qu'un petit nombre. Tous demandent, pour la mise en marche, l'emploi d'air soufflé par un ventilateur auxiliaire mû à la main, qui refoule les gaz dans une cheminée. Quand l'allumage est opéré on arrête le ventilateur, on interrompt la communication avec la cheminée, et l'on met le moteur en marche.

Gazogènes Dowson. — Nous figurons ci-contre (fig. 97) le schéma des gazogènes par aspiration Dowson. La chaudière ou évaporateur est placée à la base de l'appareil, au-dessus de la grille. Elle est exposée directement au contact du foyer, ce

qui assure une évaporation immédiate dès l'allumage et entraîne également une grande stabilité de marche : dès que la température tend à s'élever dans le foyer, la production de vapeur augmente et diminue le feu, et inversement. A la partie supérieure un corps en fonte plonge jusqu'au milieu de l'appareil, constituant ainsi une réserve de charbon.



Gazogènes Pierson par aspiration. — Les gazogènes par aspiration Pierson présentent une disposition générale très analogue.

Nous figurons ici le nouveau modèle, destiné à brûler le charbon maigre français moins

Fig. 98. — Gazogène Pierson par aspiration.

pur que l'antracite anglais. La chaudière A est toujours fixée à la partie inférieure de l'appareil, sans garniture réfractaire. L'alimentation en est assurée par un petit réservoir V, placé contre

un des pieds de l'appareil, alimenté par un robinet à flotteur Z. La vapeur sortant de la chaudière par les tubes L' pénètre dans une pièce de fonte X ou distributeur de vapeur, assurant l'introduction méthodique de la vapeur dans le foyer incandescent. Le gazogène est complètement ouvert par le bas, ce qui permet facilement de piquer le feu et de retirer les cendres entre la pièce X et la sole T.

La partie supérieure de l'appareil forme réservoir à charbon. Sa capacité est calculée pour assurer l'alimentation pendant 12 heures, c'est-à-dire le plus souvent pendant toute la marche journalière du moteur. Il n'y a donc pas lieu d'introduire du combustible durant la marche, ce qui permet d'obturer complètement l'appareil par une fermeture hydraulique L. On n'a de cette manière aucune introduction d'air à redouter dans les conduites, donc pas de danger d'explosion ou tout au moins d'arrêt du moteur. Quand celui-ci doit fonctionner jour et nuit sans interruption, on remplace la fermeture L par une trémie de chargement à double fermeture.

Le gaz sortant par le tuyau H traverse le condensateur-laveur à étages K, dans lequel il est mis en contact intime avec l'eau de lavage ; il est conduit ensuite dans une caisse étanche à fermeture hydraulique, destinée à parfaire l'épuration du gaz, et contenant une masse épurante à base d'oxyde ferrique, qui absorbe l'hydrogène sulfuré. Il est en effet nécessaire de laver et de purifier soigneusement les gaz avant de les admettre dans le moteur. Aussi tous les gazogènes à aspiration sont-ils montés d'une manière analogue, avec colonne à coke ou scrubber destiné à laver le gaz, et épurateur chimique à oxyde de fer.

Gazogènes système Winterthur. — Ces gazogènes sont construits en France par la maison Charon. Nous en décrirons le modèle le plus récent, destiné à gazéifier les combustibles maigres ou le coke de gaz.

Dans ces appareils (fig. 99), la chaudière de forme annulaire V est située à la partie supérieure, autour du magasin d'alimentation P. L'air nécessaire à la combustion se réchauffe d'abord en circulant dans une enveloppe en tôle e entourant le haut du gazogène, puis il pénètre dans la chaudière V et descend ensuite, chargé de vapeur, par le tuyau b jusqu'à la grille R. L'alimentation de la chaudière est assurée par la conduite q ; un trop-plein non figuré sur le dessin maintient un niveau constant. Pour la mise en marche, on peut faire arriver directement une petite quantité d'eau sur la grille.

Les gaz sortent par le tube *a* pour se rendre au scrubber *M*, en traversant une conduite *i* à doubles parois remplie d'eau au même niveau que la chaudière *V*. Cette disposition entraîne la formation d'une nouvelle quantité de vapeur qui s'ajoute à la précédente.

Le bas du gazogène se termine par un manchon vertical plongeant dans une cuve pleine d'eau où vont tomber les cendres.

On aperçoit en *G* le ventilateur d'allumage. Un registre *K* permet

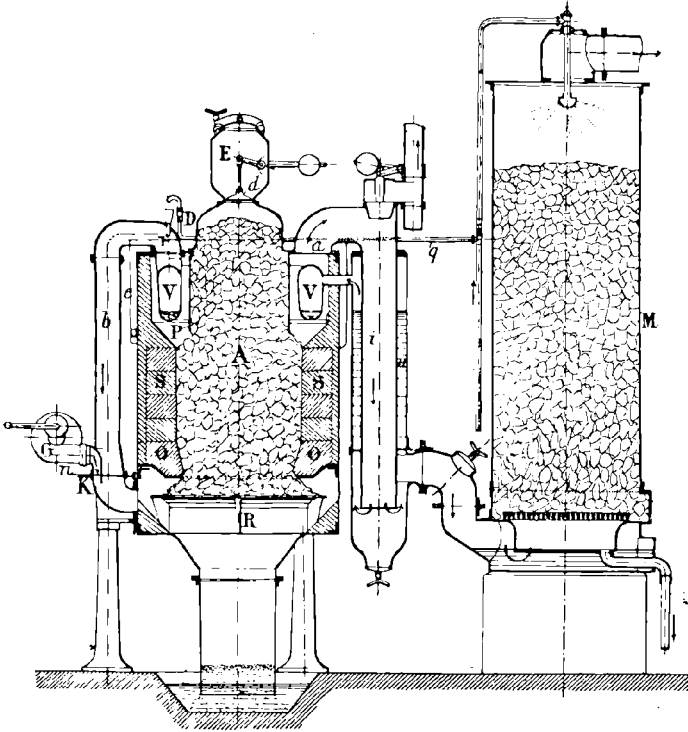


Fig. 99. — Gazogène Winterthur.

d'isoler de l'appareil la conduite *n* du ventilateur ou celle *b* communiquant avec la chaudière.

Le combustible est introduit au moyen de la trémie à double fermeture *E*, d'où il tombe dans le réservoir *P* à une assez grande distance de la zone chauffée pour ne pas produire de refroidissement brusque pouvant affecter le fonctionnement du gazogène.

GAZOGÈNES SPÉCIAUX POUR COMBUSTIBLES BITUMINEUX

Les gazogènes à gaz pauvre destinés à alimenter des moteurs à

explosion ne peuvent fonctionner qu'avec certaines catégories de combustibles : les plus élastiques emploient les houilles maigres, certains, en particulier les petits gazogènes par aspiration, exigent l'emploi à peu près exclusif de l'anhracite. Il est en effet très malaisé de brûler dans un gazogène des charbons gras. D'abord ils se collent et forment des voûtes et des accrochages qui arrêtent la descente régulière du combustible ou provoquent la formation de *cheminées* par où l'air et la vapeur d'eau s'élèvent sans gazéifier le charbon : de toutes façon le fonctionnement de l'appareil devient défectueux et le moteur s'arrête. En second lieu, et c'est là l'inconvénient le plus grave, les charbons gras, en distillant, produisent des goudrons, qui se condensent en partie dans les conduites, et pénètrent partiellement jusque dans les moteurs qu'ils encrassent rapidement. Si l'on veut purifier les gaz par des procédés mécaniques ou chimiques, on est conduit à une installation extrêmement compliquée et onéreuse, qui enlève au gaz de gazogène son principal mérite de combustible économique et facilement maniable. Aussi s'en est-on tenu tout d'abord aux anhracites et aux houilles maigres pour alimenter ces appareils ; mais les efforts des chercheurs sont arrivés dans ces dernières années à trouver des procédés pratiques pour dépouiller le gaz des produits goudronneux. Les différents procédés employés se ramènent toujours au fond à la même méthode : faire passer les gaz à épurer, seuls ou mélangés d'une certaine proportion d'air, sur une colonne de coke incandescent. Dans ces conditions, les carbures ou les combinaisons à poids moléculaire élevé qui constituent les goudrons sont décomposés sous l'influence de la haute température où ils se trouvent portés, et remplacés par les produits de toute distillation pyrogénée à haute température : carbone libre et hydrogène ou carbures légers. Ceux qui se trouvent brûlés sous l'influence de l'air introduit en même temps donnent de l'acide carbonique, qui est ultérieurement réduit par le charbon incandescent et passe à l'état d'oxyde de carbone. Mais si la méthode est unique, sa réalisation pratique comporte plusieurs solutions, permettant de classer les différents appareils utilisés en quatre catégories dont la figure 100 indique immédiatement le fonctionnement schématique :

- a) Les gazogènes à deux cuves.
- b) Les gazogènes à injection de matières volatiles sous la grille.
- c) Les gazogènes à combustion renversée.
- a) Les gazogènes à deux zones de combustion.

Les gazogènes du premier type (schéma I) comprennent deux

cuves distinctes, la première A où le combustible bitumineux est gazéifié suivant les procédés ordinaires, la seconde B remplie d'un charbon déjà distillé, coke ou charbon de bois, qui servira à détruire les goudrons. Afin de maintenir l'incandescence dans cette seconde cuve, on introduit généralement une prise d'air entre A et B, de manière à produire un jet de flammes à l'entrée de la colonne de coke.

Dans les autres types de gazogènes, on n'a plus qu'une cuve unique : La colonne de charbon incandescente est fournie par le combustible lui-même dans la zone de combustion. Dans le schéma II on ramène au voisinage de la grille, au moyen d'une conduite spé-

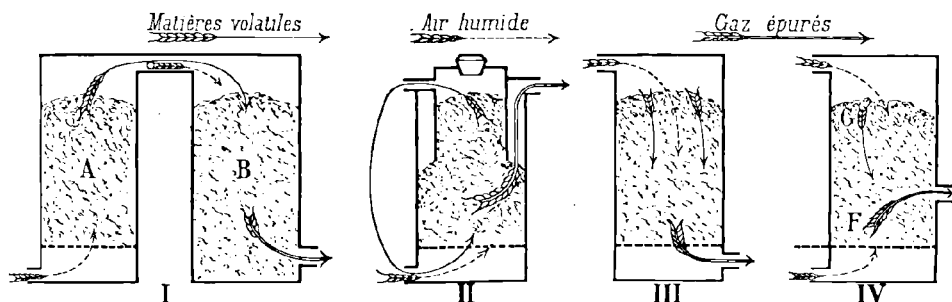


Fig. 100. — Gazogènes destructeurs de goudrons.

ciale, les gaz produits par la distillation du combustible à son entrée dans le gazogène.

La *combustion renversée* fournit une autre solution (schéma III). Dans les gazogènes ordinaires, la zone de combustion est à la partie inférieure, sur la grille ; les gaz produits s'élèvent à travers le combustible, tandis que celui-ci descend progressivement de la partie supérieure où s'effectue le chargement. Il se trouve donc amené peu à peu à des températures croissantes, et perd ses produits volatils qui sont entraînés par les gaz de la combustion, avec lesquels ils se mélangent pour se condenser en partie dans la suite. Un simple changement dans le sens de la combustion va tout modifier : supposons qu'au lieu de se faire de bas en haut, le tirage se produise de haut en bas, de manière que les gaz s'échappent à la partie inférieure à travers la grille, l'air et la vapeur d'eau pénétrant à la partie supérieure. Le combustible distillera encore en s'enfonçant dans la cuve, mais cette fois les produits volatils, au lieu de s'élever, descendront avec l'air primaire, et viendront au contact de la zone

incandescente où se fait la combustion : là ils seront décomposés totalement, brûlés, et les produits de la combustion seront réduits dans la zone de coke qui doit nécessairement se trouver au-dessous.

Les gazogènes à deux zones (schéma IV) sont de création plus récente : ils sont construits de manière à réaliser deux zones de combustion distinctes F et G, la zone G étant située près de la partie supérieure où l'on charge le charbon frais ; on provoque ainsi la distillation du charbon dans cette zone, et les produits volatils formés doivent pour sortir de l'appareil traverser la zone principale F, où ils se détruisent complètement.

A. Le gazogène à deux cuves avait été déjà imaginé par Ebelmen

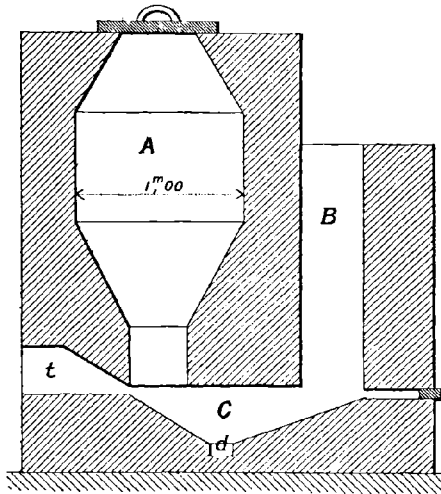


Fig. 101. — Gazogène à deux cuves d'Ebelmen.

qui, dans ses essais, semble avoir prévu tous les aspects intéressants de cette question si complexe. L'appareil qu'il avait combiné pour gazéifier le bois comprenait en effet une première cuve A où l'on plaçait les buches et dont on fermait la partie supérieure. Le feu était entretenu à la partie inférieure par de l'air insufflé par la tuyère *t*. Les gaz produits, chargés de matières goudroneuses, s'échappaient par le carneau C et remontaient à travers la seconde cuve B, de plus petites dimensions, remplie de charbon de bois. Au contact de cette colonne, les goudrons étaient complètement dissociés, et les gaz

qui s'échappaient de l'appareil ne contenaient sensiblement plus de matières condensables.

Les gazogènes à deux cuves actuellement construits dérivent directement du gazogène d'Ebelmen.

Le gazogène autoréducteur à double combustion de Riché, cons-

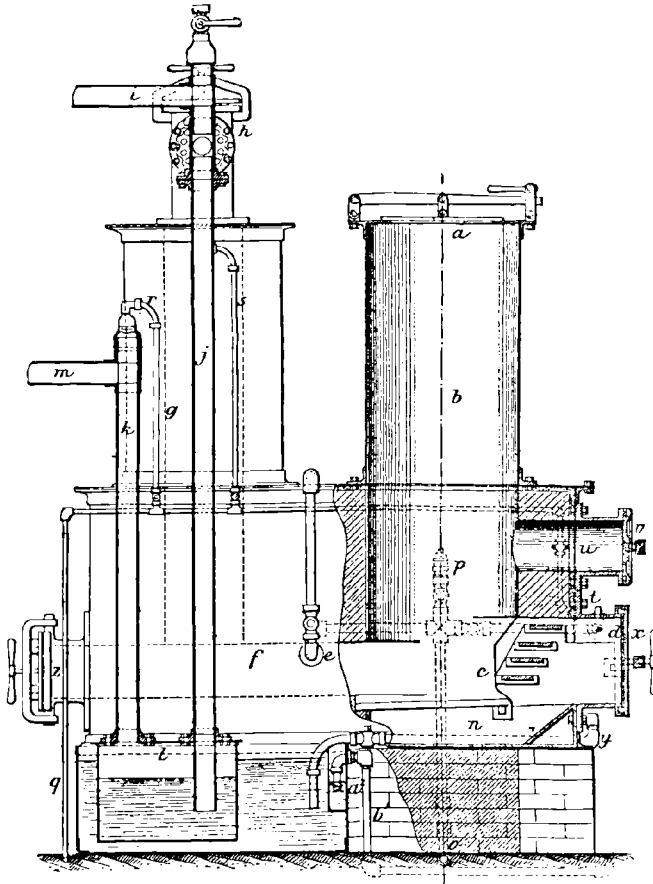


Fig. 102. — Gazogène auto-réducteur à double combustion de Riché.

truit pour gazéifier indistinctement le bois, la houille, les lignites ou le coke, en reproduit presque exactement la disposition :

Il se compose essentiellement (fig. 102) de deux cuves cylindriques *b* et *g*, réunies à leur partie inférieure par un carneau rectangulaire horizontal *f*. Les parois des deux cuves et du carneau sont consti-

tuées par des matériaux réfractaires avec chemise extérieure en tôle. A la partie inférieure de la cuve *b*, dite de combustion, se trouve le foyer proprement dit, le combustible brûlant sur la grille *c* grâce à l'air soufflé arrivant par la tuyère *d*.

Les produits de la combustion se rendent par le carneau *f* au-dessous de la colonne *g*, garnie de coke ou de charbon de bois, suivant les facilités avec lesquelles on peut se procurer l'un ou l'autre de ces combustibles, le charbon de bois pouvant être d'ailleurs retiré du foyer du gazogène en quantité suffisante pour l'alimentation de la colonne de réduction, quand le gazogène est alimenté avec du bois.

Une seconde entrée d'air *e* placée dans la partie médiane du carneau horizontal *f* assure la combustion partielle des produits de distillation que donnent, par rayonnement du foyer, les combustibles garnissant la colonne de combustion *b*. La haute température obtenue par cette combustion assure la dissociation d'une partie des produits de la distillation non brûlés et maintient à une température convenable la colonne de coke ou de charbon de bois, sur laquelle viennent se décomposer, par réduction au contact du charbon incandescent, ceux des produits condensables qui n'ont été ni brûlés, ni dissociés.

Avec le bois, qui renferme toujours une assez grande proportion d'eau, il est inutile d'en ajouter dans le cendrier. Si au contraire on brûle de la houille ou du coke, on fait arriver un filet d'eau sur les barreaux de la grille du foyer en forme de cuillier; cette eau s'oppose à une élévation trop grande de la température de l'appareil et produit une certaine proportion de gaz à l'eau.

Pour la mise en marche, on laisse échapper les gaz par *i* dans une cheminée d'allumage pendant un quart d'heure ou vingt minutes si le gazogène est complètement froid, six ou sept minutes s'il est arrêté depuis douze heures. Une fois l'appareil allumé, on fait passer les gaz par le tube *j* à travers le barillet *l* qui communique avec les conduites de distribution.

Quel que soit le combustible employé, la combustion effectuée horizontalement et sur une faible épaisseur évite la formation de mâchefers de dimensions sérieuses, et permet un décrassage rapide et facile de la grille.

Gazogènes Twaite. — Les gazogènes Twaite à deux cuves sont de deux modèles différents, selon qu'ils fonctionnent en marche réversible ou non.

Le *gazogène réversible* se compose de deux cuves verticales semblables, de 5 à 6 mètres de hauteur, réunies par le haut au moyen d'un carneau horizontal. L'air entre au bas de l'une des cuves, par une grille, traverse le charbon incandescent, et les gaz produits redescendent dans la seconde cuve pour ressortir un peu au-dessus de la grille. Au bout d'un certain temps, le charbon contenu dans la première cuve est porté à une température élevée, tandis que celui de la seconde s'est refroidi ; on renverse alors la marche, l'air rentre sous la grille de la seconde cuve et ressort au bas de la première, Ainsi les gaz produits dans l'une des cuves, et mélangés des matières volatiles distillées, passent au bas de la seconde sur du coke incandescent qui les purifie complètement.

Le défaut de ce gazogène est de nécessiter des changements de marche périodiques, et par suite de produire des variations correspondantes dans la composition du gaz, nécessitant l'emploi d'appareils de grandes dimensions de manière à obtenir un gaz de composition moyenne constante.

L'inventeur a imaginé une commande hydraulique ingénieuse du changement de marche : les vannes qui assurent l'ouverture ou la fermeture des conduites d'air et de gaz sont commandées par des chaînes passant sur des poulies solidaires de bennes en tôle dans lesquelles s'écoule continuellement un filet d'eau. Quand la benne est suffisamment pleine, elle bascule en faisant tourner la poulie, qui commande un changement de marche. Une seconde benne placée symétriquement commandera le renversement suivant et ainsi de suite.

Le *gazogène non réversible* ressemble beaucoup au gazogène Riché : l'une des cuves est destinée à contenir le combustible, la seconde contient du charbon de bois ou du coke ; elles sont toujours réunies par un carneau horizontal à leur partie supérieure et une rentrée d'air ménagée dans ce carneau produit la combustion d'une partie du gaz, assurant ainsi l'incandescence de la seconde colonne et la destruction complète des goudrons.

Cette destruction est si parfaite au dire de l'inventeur que l'on a pu introduire dans la première cuve, par la trémie de chargement, des matières liquides telles que brais, huiles lourdes ; ces liquides sont presque immédiatement volatilisés et les gaz formés vont se réduire sur la seconde colonne (Deschamps).

B. Gazogène Pintsch. — Ce gazogène (fig. 103) se compose d'une

cuve verticale cylindrique en terre réfractaire B, portant à sa partie supérieure un cylindre plus étroit en fonte A, par où s'écoule peu à peu le combustible introduit par la trémie E. Les gaz produits par la combustion sortent de l'appareil par l'ouverture F après avoir tourné le cylindre A, de sorte que la houille qui descend dans ce

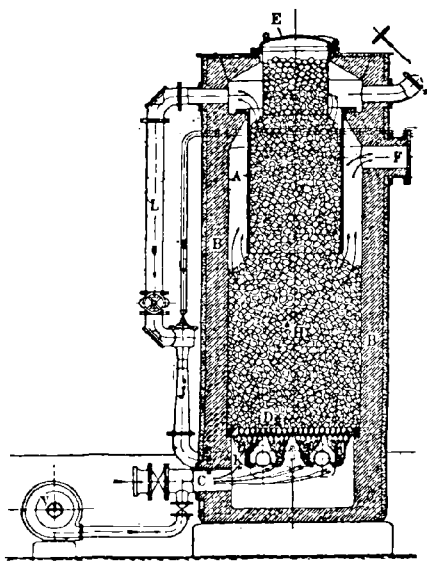


Fig. 103. — Gazogène Pintsch.

cylindre se trouve portée à une température élevée et perd progressivement ses matières volatiles. Les gaz résultants s'échappent à la partie supérieure du cylindre A et redescendent par le tuyau L, où ils sont aspirés par l'injecteur *j* et conduits sous la grille en K. Là ils se mélangent à l'air soufflé par le ventilateur V à travers la tuyère C, et traversent la grille D pour pénétrer dans la zone de charbon incandescent où ils se trouvent dissociés en carbone et carbures légers non condensables¹.

Ce gazomètre fonctionne avec des mélanges de coke et de houille ou avec de la houille de Silésie seule.

Gazogènes à briquettes de lignite de la Gasmotorenfabrick de Deutz. — Ce gazogène, du type aspirant, est destiné à brûler les briquettes de lignites qui contiennent beaucoup de matières volatiles et principalement d'humidité. Il est de forme rectangulaire, et la prise de gaz est ménagée dans la première moitié de la hauteur. La partie supérieure de la cuve forme ainsi chambre de distillation ; la vapeur d'eau et les gaz dégagés sont ramenés dans le cendrier sous la grille, de sorte que cet appareil ne comporte pas de chaudière.

C. Gazogène Loomis Pettibone. — Ce gazogène est construit en maçonnerie réfractaire. La grille a la forme d'une voûte maçonnerie ;

¹ *Rev. Mét.*, 5 bis, 505 ; 1908.

deux portes latérales, l'une au-dessus, l'autre au-dessous de cette voûte permettent le décrassage.

L'air servant à la combustion se réchauffe d'abord dans le réchauffeur *b* en circulant entre des tubes verticaux que traverse de bas en haut puis de haut en bas le gaz venant du gazogène. En outre,

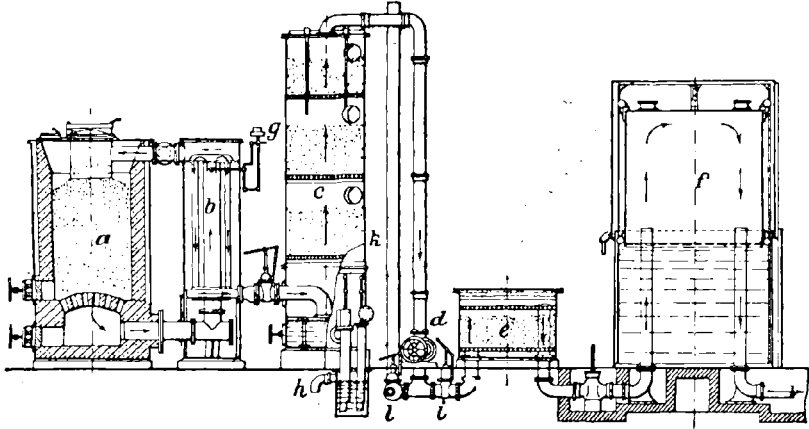


Fig. 104. — Gazogène Loomis Pettibone.

dans le tube central de ce même réchauffeur, débouche une conduite d'eau *g* qui en arrose la surface intérieure et produit ainsi la vapeur d'eau nécessaire pour la marche de l'appareil.

Le gaz sortant du réchauffeur traverse ensuite un scrubber *c* à plusieurs compartiments, contenant d'abord du coke arrosé d'eau, puis de la fibre de bois qui arrête l'humidité entraînée; l'épuration se termine à sec dans la boîte *e* et le gaz s'emmagasine dans le gazomètre *f*¹.

Entre le scrubber et l'épurateur *e* se trouve un ventilateur *d* qui produit l'aspiration nécessaire et refoule les gaz, soit dans la cheminée *k* au moment de la mise en marche, soit dans le gazomètre *f*.

Le gazogène système *Faugé*, qui a été essayé avec succès à l'usine de Saint-Gobain pour brûler le bois ou la houille en combustion renversée, présentait une disposition presque identique de régénérateur échauffant l'air primaire aux dépens des gaz chauds sortant du gazogène.

Gazogènes Letombe à combustion partielle préalable. — M. Le-

¹ *Gén. civ.*, 58, 483; 1911.

tombe a imaginé plusieurs modèles de gazogènes destinés à la combustion des charbons gras, dans lesquels la combustion renversée est associée avec la combustion partielle préalable des gaz de la distillation, au moyen d'une prise d'air supplémentaire. Nous figurons ici (fig. 105) le modèle le plus connu : Le combustible est déversé sur une grille à gradins A traversée par une quantité insuffisante d'air ; il

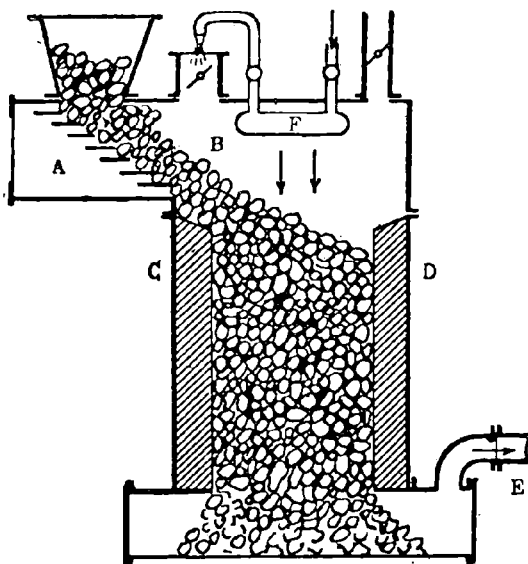


Fig. 105. — Gazogène Letombe à combustion partielle préalable.

en résulte une combustion réduite et surtout une distillation, dont les produits sont brûlés immédiatement dans le courant d'air principal d'insufflation, introduit au-dessus de la grille, avant de pénétrer dans la cuve du gazogène où se trouve en CD la zone de combustion proprement dite. On voit en F une petite chaudière traversée par l'air soufflé qu'elle sature de vapeur d'eau.

Dans un autre modèle du même inventeur l'air nécessaire à la combustion pénètre par une large conduite verticale qui plonge jusqu'au premier tiers environ de la cuve. Au sommet de celle-ci est une prise de gaz, munie d'un ventilateur, qui aspire les gaz de distillation et les refoule dans la conduite où ils se mélangent à l'air ; il résulte d'ailleurs de cette aspiration une dérivation vers le haut de la cuve de l'air insufflé, qui assure la combustion préalable des produits volatils.

D. Gazogène Kœrting. — Ce gazogène (fig. 106) a été construit pour brûler spécialement la tourbe ou les briquettes de lignite. La sortie des gaz B se trouve placée vers le tiers inférieur de la cuve. La zone principale de combustion se trouve à la partie inférieure au-dessus de la grille, et la chaleur dégagée maintient le charbon incandescent jusqu'au-dessus de cet orifice. C'est sur ce charbon que doivent passer les gaz goudronneux qui distillent de la partie supérieure, où une deuxième zone de combustion se trouve créée grâce à l'air secondaire introduit. On obtient un gaz suffisamment épuré pour pouvoir être employé dans les moteurs après simple lavage et filtration¹.

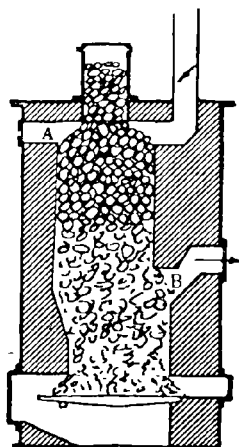


Fig. 106. — Gazogène Kœrting.

Gazogène Letombe. — Nous figurons ici (fig. 107) un dispositif

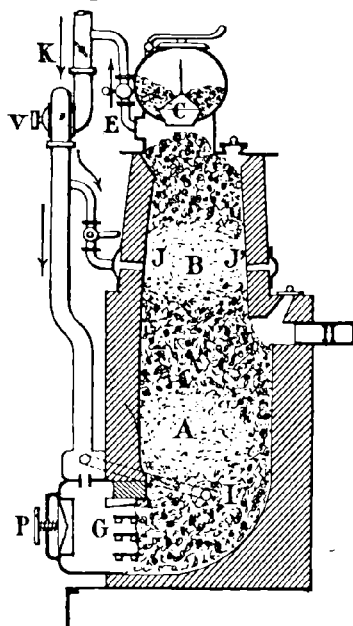


Fig. 107. — Gazogène Letombe.

imaginé par M. Letombe qui réalise à la fois le gazogène à deux zones et l'aspiration mécanique des produits volatils pour les envoyer sur le charbon incandescent. Il se compose de deux cuves superposées en briques réfractaires, l'orifice H de départ des gaz étant situé au sommet de la cuve inférieure. Une conduite E, branchée sur le tuyau d'aspiration du ventilateur V, crée dans le gazogène une dépression qui a pour effet de dériver vers le haut une partie des gaz produits dans la cuve inférieure. Ces gaz, en remontant, rencontrent l'air soufflé par le même ventilateur à travers les orifices J, J'; il en résulte à ce niveau une deuxième zone de combustion qui provoque la distillation des matières volatiles du charbon neuf. Celles-ci commencent donc à brûler dès leur apparition, ce qui évite le

¹ *Rev. Mét.*, 5 bis, 506 ; 1908.

boursoufflement de la masse et facilite la descente régulière du combustible.

Le mélange d'air et de produits volatils incomplètement brûlés est envoyé par le ventilateur en partie en JJ', et surtout dans la cuve inférieure, où il achève de se décomposer; avec les charbons ne contenant pas une forte proportion de matières volatiles, on doit charger l'air d'alimentation d'humidité au moyen d'une pulvérisation d'eau. Pour régler la production des gaz, un régulateur à cloche équilibré vient lorsqu'il monte en haut de sa course agir par des tringles sur des papillons qui obturent l'aspiration d'air et l'aspiration des produits volatils¹.

Gazogène de la Westinghouse Machine Company. — C'est encore un gazogène à deux cuves superposées, avec orifice de dégagement des gaz au sommet de la cuve supérieure dont le diamètre est notablement inférieur à celui de la cuve inférieure; sur l'épaulement qui en résulte on a placé une chaudière annulaire qui servira à saturer l'air d'alimentation. Celui-ci se réchauffe d'abord en parcourant une couronne creuse en fonte qui ferme le haut de l'appareil; puis il passe dans le saturateur, et il se divise pour aller alimenter simultanément la zone supérieure et la zone inférieure. Dans celle-ci l'air pénètre par une tuyère centrale et les cendres tombent dans une cuvette remplie d'eau, suivant un dispositif rappelant les gazogènes Dowson.

Dans ces conditions le charbon de la zone supérieure distille et se transforme en coke qui vient alimenter la cuve inférieure, tandis que les produits volatils viennent se décomposer sur la zone incandescente.

Le gaz produit dans cet appareil avec les lignites ou les charbons bitumineux peut être employé dans les moteurs après un simple lavage; il contient normalement de 1 à 1,6 mgr. de matières solides par mètre cube, mais pas de goudrons. Un pareil gazogène a pu fonctionner pendant un an sans interruption et sans réparations².

GAZOGÈNES POUR COMBUSTIBLES TRÈS CENDREUX

L'emploi dans les gazogènes de combustibles renfermant une forte proportion de cendres demande des dispositifs spéciaux. Tous utilisent

¹ *Bull. Soc. Ing. Civ.*, 59, 51; 1908.

² *Ir. Age*, 84, 1916; 1909. — *Rev. Mét.*, 7 bis, 300; 1910.

l'air soufflé. Nous citerons en particulier les gazogènes Kerpely que leur construction particulière rend précieux dans ces circonstances.

Gazogène Kerpely. — Ce gazogène, d'origine autrichienne, est

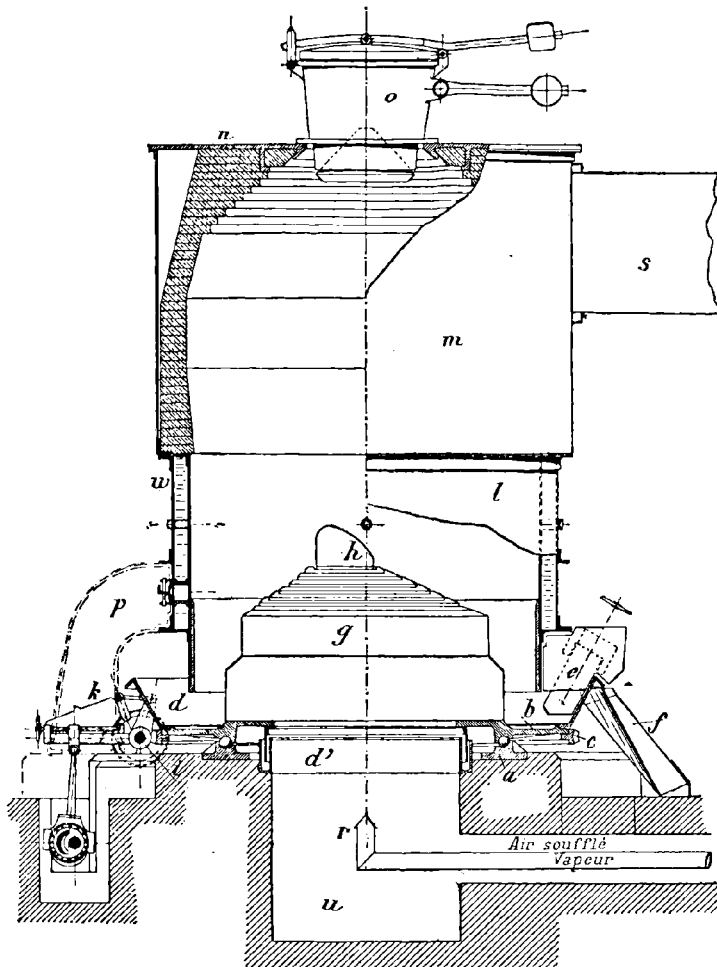


Fig. 108. — Gazogène Kerpely.

fabriqué en France par la maison Bouchayer et Viallet. Il se compose d'une cuve en tôle d'acier garnie à sa partie supérieure *m* de matériaux réfractaires et refroidie à sa partie inférieure par un water-jacket *w*; cette cuve est supportée par trois pieds cintrés en fonte *p*

laissant le dessous complètement libre, de sorte qu'elle se suspende au-dessus de la grille. Celle-ci a une forme tout particulière: elle comporte une partie conique surélevée *g*, f de plateaux épais superposés, laissant passer dans leurs valles l'air et la vapeur d'eau injectés au-dessous dans la chambre et terminée par une calotte excentrée *h*. Les gaz comburant ainsi répartis dans tout le foyer.

La grille fait corps avec une cuvette en fonte *bd*, dans laquelle plonge la partie inférieure de la cuve, et qui, remplie d'eau, a une fermeture hydraulique de l'appareil. Cette cuvette n'est pas fixe elle tourne d'un mouvement lent mais continu autour de son support au moyen d'un roulement à billes, sur l'anneau de fondation support *a*. Une deuxième fermeture hydraulique *d'* oblige l'air et la vapeur à passer au travers de la grille *g*.

La rotation de la cuvette est assurée par une roue dentée *c* sur son pourtour, et actionnée par une vis sans fin *i* commandant un mécanisme *k* permettant de faire varier entre certaines limites la vitesse de rotation, qui est en moyenne de un demi-tour à l'heure.

Cette disposition assure un brassage continu du combustible dans la zone de combustion, lequel, joint au refroidissement des parois empêche les mâchefers de se coller entre eux et assure une descente régulière des cendres dans la cuvette. Là une palette d'arrêt *e*, j dans une position inclinée, et fixe par rapport à l'appareil, arrête et soulève les cendres comme le ferait un versoir de charrue, et les fait retomber sur le plan incliné *f* d'où elles tombent automatiquement dans un wagonnet. Le décrassage est donc assuré d'une manière continue, et il suffit d'enfoncer plus ou moins la palette *e* pour enlever plus ou moins de cendres et par suite pour régler la descente du combustible, c'est-à-dire en définitive la vitesse de combustion.

Par sa construction même, le gazogène Kerpely assure une combustion régulière et automatique permettant une marche ininterrompue, les cendres étant complètement exemptes d'escarbilles. Il permet de brûler des combustibles de qualité inférieure, tourbes, lignites et surtout charbon cendreux. On a obtenu d'excellents résultats avec des déchets d'anhracite de La Mure, dits « barrés », dont la composition était la suivante :

Carbone fixe.	71,76 à 63,45
Matières volatiles.	1,58 4,50
Humidité	3,31 3,60
Cendres.	23,35 28,45

A cause de l'allure parfaitement régulière de l'appareil, ne nécessitant à aucun moment l'ouverture de portes ou l'arrêt de l'air soufflé pour le décrassage, la composition des gaz produits est remarquablement constante et correspond à une proportion très faible d'acide carbonique.

Gazogène Letombe. — Cet appareil¹ se compose (fig. 109) d'une

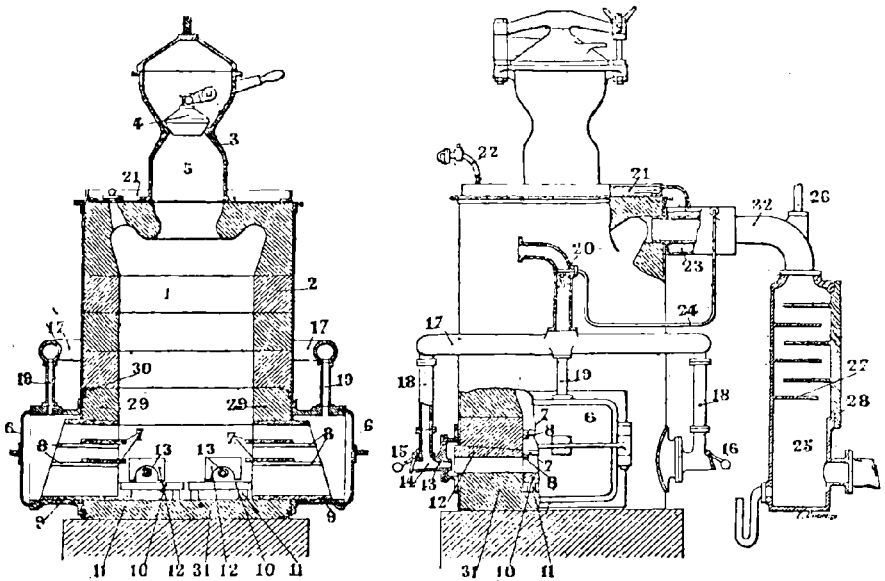


Fig. 109. — Gazogène Letombe pour combustibles très condreux.

cuve cylindrique en briques réfractaires (2) avec enveloppe en tôle et trémie de chargement à double fermeture. Le foyer n'a pas à proprement parler de grille. En face de 2 ouvertures opposées fermées par des portes (6) se trouvent une série de barreaux plats (7) placés les uns au-dessus des autres et complètement amovibles sur supports. Ces barreaux forment simplement barrage pour éviter l'éboulement du combustible. Le fond du foyer est constitué par une fausse sole formée de plaques réfractaires (10) supportées par des tasseaux de même matière (11).

Au niveau de la fausse sole débouchent 4 tuyères (13) disposées deux par deux dans un sens perpendiculaire aux portes, et par les-

¹ Bull. Soc. Ing. Civ., 59, 51, 1908.

quelles arrive la plus grande partie du vent soufflé distribué par un tuyau circulaire entourant le gazogène. Le dessus des portes du foyer ne reçoit qu'une faible dérivation d'air (19) de façon à éviter des remous de gaz chauds dans les capacités vides comprises entre les portes et les barreaux.

L'air soufflé est humidifié en proportion convenable par une pulvérisation d'eau chaude dans la conduite ; cette eau chaude provient d'une double enveloppe (23) du tuyau de sortie du gazogène dans laquelle on entretient un niveau constant.

Dans le cas où les orifices des tuyères tendraient à se boucher, on peut enlever les scories en passant un ringard après avoir soulevé un clapet battant simplement maintenu en place par un contrepoids.

Pour les décrassages du foyer, on doit arrêter le vent, ouvrir la cheminée et fermer la vanne de la tuyauterie de gaz, puis on ouvre une des portes. On détache avec un ringard les scories accumulées sur la fausse sole, en enlevant au besoin les barreaux de grille qui pourraient gêner ; on détache également les scories sur le pourtour du foyer, on remet les barreaux en place et ferme la porte ; on répète les mêmes opérations devant la seconde ouverture du foyer et on remet le gazogène en marche.

On a pu employer dans ce type de gazogène des déchets de fours à coke menus et très humides, contenant à l'état sec 22,3 p. 100 de cendres. Il fallait procéder au décrassage toutes les 40 minutes.

LES GAZOGÈNES A RÉCUPÉRATION D'AMMONIAQUE

Gazogène Mond. — Le gazogène Mond est un gazogène à gaz mixte qui a été construit spécialement pour recueillir sous forme d'ammoniaque l'azote des houilles bitumineuses anglaises. Le gaz qu'il donne n'est plus alors qu'un sous-produit, que l'on utilise comme on se sert du gaz de hauts fourneaux, pour chauffer des fours ou pour faire fonctionner des moteurs à explosion.

Pour avoir un rendement élevé en ammoniaque, il est nécessaire de produire la gazéification de la houille à une température très basse. Les gazogènes ordinaires fonctionnent à une température trop élevée, et la plus grande partie de l'ammoniaque est décomposée et se retrouve sous forme d'azote libre.

L'idée originale de Mond consiste à faire traverser le gazogène par un très grand excès de vapeur d'eau : deux fois et demie le poids du charbon, soit cinq fois la quantité théorique ; dans ces conditions

une partie seulement est décomposée, les deux tiers servent simplement de diluant et se retrouvent dans le gaz produit, dont la température, à la sortie de l'appareil, n'est plus que de 450° à 500°.

On voit que la production du gaz Mond nécessite la consommation d'une énorme quantité de vapeur. Celle-ci se trouvait fournie gratuitement, à l'usine de Northwich où fut créée l'installation qui nous occupe, par l'échappement des machines à vapeur de l'usine, fonctionnant sans condensation.

Le gazogène Mond présente les dispositions générales des gazogènes à gaz mixte : il comprend une cuve circulaire D de grandes dimensions, 7 mètres de hauteur sur 6 mètres de diamètre, terminée à sa partie inférieure par des étalages E en maçonnerie qui se prolongent par une grille tronconique F. Le mélange d'air et de vapeur qui doit alimenter le gazogène, circule d'abord dans une double enveloppe en tôle qui entoure l'appareil et où sa température se trouve portée à environ 250°; puis il arrive dans un cône H en tôle pleine qui enveloppe la grille et dont le bas plonge dans une cuve pleine d'eau G, réalisant de la sorte une fermeture hydraulique. Les gaz sortent latéralement, après avoir circulé autour d'un manchon en tôle C par lequel le combustible pénètre dans la cuve. L'introduction du combustible s'effectue à l'aide d'un immense entonnoir A en tôle, placé directement au-dessus de la trémie de chargement B à double fermeture.

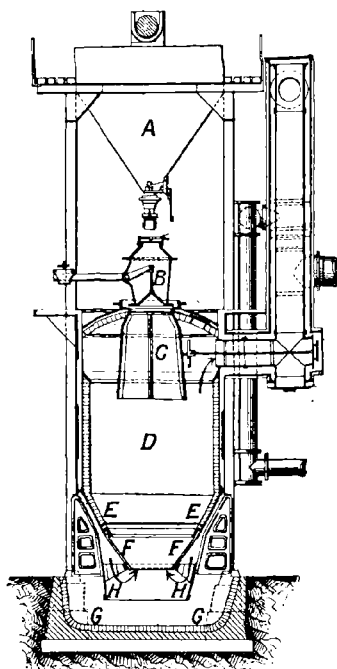


Fig. 110. — Gazogène Mond pour la récupération de l'ammoniaque.

Au sortir de l'appareil, les gaz chauds, contenant environ 0,13 p. 100 d'ammoniaque, traversent d'abord une sorte de récupérateur formé de tuyaux d'orgues en tôle autour desquels circule l'air qui servira à alimenter le gazogène. Là commence leur refroidissement, qui se poursuit dans une grande caisse où ils se trouvent en contact avec de l'eau constamment remuée et pulvérisée par des roues à aubes ; leur température est ainsi ramenée à environ 90° ; ils pénètrent

ensuite dans une tour d'absorption garnie de briques que l'on arrose avec une solution d'acide sulfurique, ou plutôt de sulfate d'ammoniaque acide contenant 47 p. 100 d'acide libre, qui absorbe mieux l'ammoniaque. Les gaz traversent la tour de bas en haut et se dépouillent presque complètement de leurs produits basiques ; ils sont ensuite lavés dans une seconde tour au moyen d'eau froide, que l'on recueille au bas à une température d'environ 80°. Cette eau sera envoyée dans une troisième tour où l'on fera circuler au moyen d'un ventilateur l'air froid destiné à l'alimentation des appareils, et qui s'y chargera de vapeur d'eau en même temps qu'il commencera à s'échauffer avant de pénétrer dans le récupérateur de chaleur. On voit que l'on régénère ainsi le mieux possible les chaleurs perdues.

Les chiffres publiés au sujet de la première installation des gazogènes à l'usine de Northwich ne permettaient pas de prévoir une économie sérieuse: Les houilles traitées contenaient en moyenne 2 p. 100 d'azote; on recueillait sous forme de sulfate d'ammoniaque environ 50 kilogrammes par tonne. Mais il faut tenir compte, pour calculer le rendement économique, de la vapeur d'eau dépensée. A raison de 2,5 kg. de vapeur par kilogramme de houille, et en comptant que les récupérateurs permettent d'en retrouver 1 kilogramme, il reste comme consommation 1,5 kg. de vapeur consommant pour leur production 15 p. 100 de houille, soit un déficit de 22 p. 100 du poids de charbon traité. L'exploitation qui était économique aux usines Mond, grâce à l'abondance de la vapeur d'échappement, pouvait donc cesser de l'être dans d'autres usines où l'on n'aurait pas disposé d'une source gratuite de vapeur.

D'autre part, si l'on essaie de réduire la quantité de vapeur envoyée dans le gazogène, on diminue énormément le rendement en ammoniaque. C'est ainsi qu'en ne consommant que 1,8 kg. de vapeur par kilogramme de houille au lieu de 2,5 kg., on ne retrouve plus par tonne de houille que 30 à 35 kilogrammes de sulfate d'ammoniaque au lieu de 50.

Cependant les installations de ce genre se sont beaucoup développées dans ces dernières années en Angleterre, ce qui prouve qu'elles réalisent une économie notable malgré la dépense plus grande de vapeur. On crée maintenant des installations considérables, de manière à avoir la force motrice à bas prix pour les centrales électriques.

La maison Crossley, qui s'est beaucoup occupée de la récupération

de l'ammoniaque dans les gaz de gazogènes, est arrivée à modifier et à simplifier considérablement les appareils de lavage précédemment décrits, et à supprimer deux des tours d'absorption, ce qui réduit sensiblement les frais de premier établissement et d'exploitation¹ ; les gaz, en sortant du gazogène, traversent toujours le récupérateur à jeu d'orgues, et l'absorption de l'ammoniaque se produit ensuite en entier dans une caisse avec roues à aubes projetant la solution sulfurique. Cette solution s'échauffe en même temps qu'elle refroidit le gaz ; le liquide chaud est envoyé au sommet d'une tour, dans laquelle on fait circuler de bas en haut l'air qui servira à alimenter le gazogène. On réalise ainsi en même temps l'échauffement préalable et la saturation de cet air, et le refroidissement de la solution sulfurique, qui du bas de la tour est ramenée à la caisse d'absorption, et ainsi de suite.

On cherche de plus en plus à utiliser des charbons de qualité inférieure. Le gazogène Mond se prête très bien à l'emploi des poussières ; pour les combustibles très cendreaux, on se sert du *gazogène Trump*, de la Compagnie américaine Solvay Process Company, qui est un gazogène Mond muni d'un dispositif mécanique de dégrassage et d'enlèvement des cendres.

On a trouvé que l'on pouvait sans inconvénient remplacer le plomb par l'acier doux pour le doublage des tours à absorption d'ammoniaque : l'acier n'est pas attaqué par l'acide sulfurique à 2 p. 100 ainsi qu'en témoignent des installations en service depuis deux ans.

On a pu obtenir lors des essais des rendements de 3 900 mètres cubes de gaz et 27,5 kg. d'ammoniaque par tonne de houille².

ÉPURATION DES GAZ DE GAZOGÈNES

Les gaz produits dans les gazogènes ne sont en général pas épurés quand on doit les employer au chauffage proprement dit. Il n'en est pas de même si l'on veut les utiliser dans les moteurs à explosion : toute installation de gazogènes devra dans ce cas être complétée par des appareils d'épuration.

Les impuretés dont on doit se débarrasser sont de deux sortes : les matières en suspension et les impuretés gazeuses. Les premières sont constituées par les poussières et les vésicules de goudrons.

¹ *Rev. Métal.*, 489, 5 bis, 1908.

² Weil, *Monit. Sc.*, (3), 1, II, 467 ; 1911.

Malgré les différents perfectionnements que nous venons de signaler plus haut et qui ont pour but de détruire les matières goudroneuses, on n'arrive en effet presque jamais à une élimination complète¹ : celle-ci ne deviendra définitive qu'après une *épuration physique* convenable ; quant aux gaz, le seul qui soit gênant est l'hydrogène sulfuré, dont la combustion donne de l'acide sulfureux et aussi un peu d'acide sulfurique, lequel attaquerait rapidement les parois métalliques. On devra donc l'éliminer par une *épuration chimique*.

Il est d'abord nécessaire de refroidir le gaz qui sort du gazogène à une température élevée ; dans un certain nombre d'appareils on utilise cette chaleur dans des régénérateurs de manière à produire la vapeur d'eau nécessaire au fonctionnement du gazogène. On emploie aussi assez fréquemment des tuyaux d'orgues analogues à ceux en usage dans les usines à gaz d'éclairage. Pour les gazogènes à aspiration, où l'on cherche à diminuer le plus possible l'encombrement de l'installation, on produit à la fois le refroidissement et le lavage du gaz dans un scrubber, c'est-à-dire dans une colonne en tôle garnie de coke que l'on arrose au moyen d'un courant d'eau froide. On divise fréquemment les scrubbers en plusieurs étages, que l'on garnit avec des matières filtrantes de plus en plus fines ; on peut ne faire l'introduction de l'eau que dans les compartiments inférieurs, et remplir les compartiments du haut de matières pulvérulentes qui dessèchent le gaz : on emploie par exemple à cet effet la sciure ou la fibre de bois. D'autres fois les filtres à sciure sont constitués par des appareils séparés.

On emploie encore pour éliminer les goudrons des séparateurs à choes obligeant les gaz à éprouver des changements brusques de direction, de telle sorte que les poussières ou huiles qu'ils entraînent viennent se coller sur les parois. Nous figurons par exemple ici un séparateur de ce genre employé par la Gasmotorenfabrick de Deutz. Il est constitué par une enveloppe cylindrique A, fermée par un obturateur latéral démontable B, et que le gaz traverse de haut en bas. On introduit dans cette enveloppe un cylindre C reposant par un rebord étanche sur sa paroi inférieure, puis dans ce cylindre, successivement, un disque annulaire D percé d'un orifice central à rebord cylindrique E sur lequel on pose un cylindre de diamètre plus grand F reposant sur D par des pattes d'écartement, laissant

¹ Signalons que de tous les combustibles, ce sont les grésillons de coke qui donnent es goudrons les plus gênants et les plus difficiles à détruire.

entre lui et le disque D un espace suffisant pour le passage des gaz et fermé par un fond G. Sur les pattes d'écartement supérieures de ce cylindre F on place un second disque évidé D, puis sur ce dernier un second cylindre F, enfin sur celui-ci un troisième groupe formé d'un disque D et d'un cylindre F.

Enfin toute cette garniture est assemblée et maintenue, sans jeu vertical, dans le cylindre C par des traverses à vis de calage H. Le gaz passe successivement par l'orifice central des disques D, E, et sous les cylindres fermés F, G, et subit par suite une série de chocs et de changements de direction qui assurent la séparation du goudron entraîné avec lui à l'état vésiculaire¹.

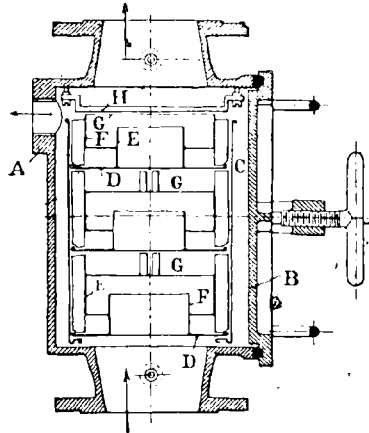


Fig. 144.

On peut également effectuer l'épuration physique à l'aide de laveurs rotatifs identiques à ceux qui sont employés pour les gaz de hauts fourneaux, et que nous étudions plus bas.

L'épuration chimique s'effectue au moyen de mélanges oxydants placés dans des caisses à cloisons horizontales à claire-voies. On emploie toujours comme oxydant l'oxyde de fer, soit l'oxyde naturel, mélangé à de la chaux éteinte, soit plutôt le mélange de Laming comme pour le gaz d'éclairage.

Épuration des gaz de hauts fourneaux. — L'épuration des gaz de hauts fourneaux est rendue plus difficile par l'énorme quantité de poussières dont ces gaz sont chargés (de 2 à 13 grammes par mètre cube). Quand on ne les emploie qu'au chauffage, on se borne à condenser les plus grosses poussières en faisant circuler les gaz lentement dans des conduites de gros diamètre ou dans des chambres à chicanes ; mais la purification pour les moteurs à explosion doit être poussée beaucoup plus loin. On emploie dans ce but des appareils statiques ou dynamiques, c'est-à-dire fonctionnant sans force motrice ou avec l'aide de la force motrice. Les premiers sont des laveurs ou des scrubbers à coke ou à sciure, ou encore des appareils à chocs,

¹ *Gén. civ.*, 57, 231 ; 1910.

semblables comme fonctionnement à ceux que nous avons mentionnés plus haut.

Les appareils du système dynamique sont constitués par des ventilateurs centrifuges dans lesquels on envoie à la fois de l'eau et les gaz à épurer. Leur emploi a été breveté en 1892 par Theisen, bien que la même idée ait été mentionnée dès 1883 par Windhausen. Le brevet de Theisen consiste « à maintenir une couche d'eau

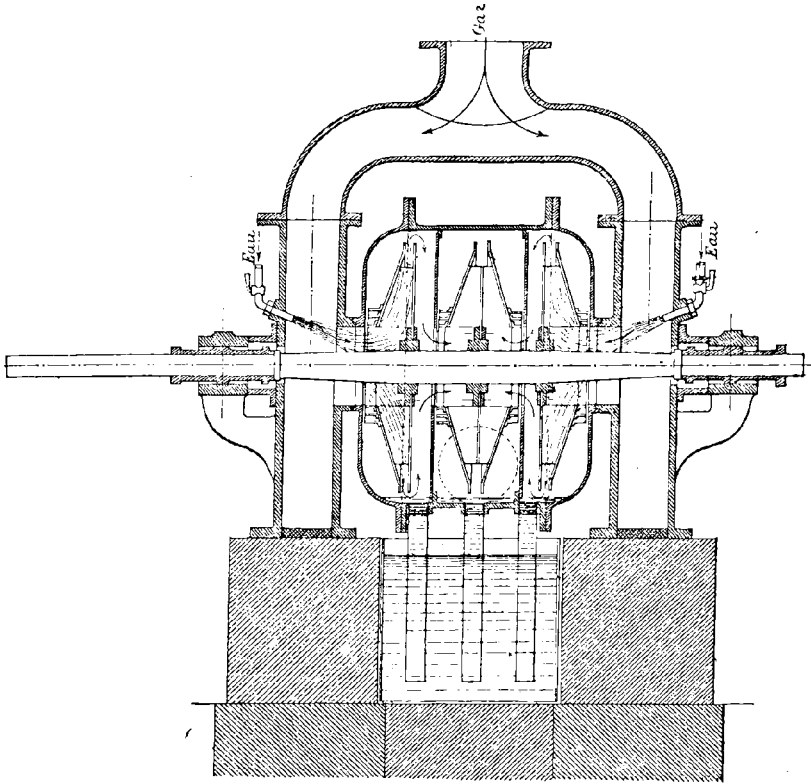


Fig. 112. — Ventilateur-épurateur Lencauchez.

animée d'un mouvement de rotation sur la paroi interne d'un cylindre fixe dans lequel tourne à grande vitesse un tambour à ailettes ; le gaz chargé de poussières est aspiré et comprimé sur la couche d'eau mobile ; la chaleur apportée par le gaz transforme dans la première partie de l'appareil une certaine quantité de l'eau de lavage en vapeur et produit par là un mélange de gaz et de vapeur qui humidifie les particules les plus fines des poussières. Par suite

de la condensation ultérieure de ce mélange de gaz et de poussières dans les autres parties de l'appareil, au moyen d'eau, les particules solides sont précipitées et séparées. »

L'appareil primitif de Theisen a été modifié de diverses façons et remplacé par des ventilateurs de construction courante ; c'est ce que l'on a fait en particulier aux usines de Differdange et de Micheville. M. Lencachez a imaginé pour le lavage des gaz de hauts fourneaux plusieurs dispositifs de ventilateurs : celui que nous figurons ici (fig. 112) se compose de deux demi-ventilateurs extérieurs montés sur le même axe qu'un ventilateur central placé entre eux. Le gaz et l'eau sont aspirés des deux côtés et projetés par les demi-ventilateurs dans le ventilateur central qui complète l'épuration.

On emploie également en Allemagne les épurateurs centrifuges du système Savary qui sont des ventilateurs à tambour se rapprochant du type de Theisen.

L'avantage des appareils dynamiques est d'occuper très peu de place, tandis que les laveurs statiques sont très encombrants ; par contre les ventilateurs consomment de la force motrice, et dépensent également beaucoup plus d'eau. Généralement on commence le dégrossissage dans des tours de lavage et on le termine dans les ventilateurs. Au sortir de ces appareils, il est bon de filtrer le gaz sur de la sciure de bois ou sur des toiles pour le débarrasser de l'eau entraînée.

Épurateurs électrostatiques. — Nous devons mentionner, bien qu'il ne paraisse pas être entré dans la pratique, un mode original d'épuration indiqué par M. Twaite. C'est le *séparateur électrostatique* : cet appareil se compose d'une chaîne barbelée, animée de secousses périodiques, et suspendue suivant l'axe d'un cylindre vertical dont elle est isolée et dans lequel circulent les gaz chauds venant du haut fourneau ; la chaîne est reliée à un circuit à haute tension. L'action de la différence de potentiel électrifie les poussières, d'après M. Twaite, et les colle les unes aux autres. Il est évident que les phénomènes d'ionisation qui doivent se produire dans ces conditions au sein du gaz ne sont pas étrangers au fonctionnement du système. Il est avantageux d'employer les gaz aussi chauds que possible. L'appareil ne laisserait pas plus de 0^{sr},55 de poussières par mètre cube ; il constituerait donc un excellent dégrossisseur à placer avant les filtres à sciure par exemple.

D. — L'AIR CARBURÉ

On sait que l'air forme avec les vapeurs inflammables des mélanges détonnants, mais qu'il existe pour chaque mélange deux limites de composition, l'une inférieure, l'autre supérieure, en dehors desquelles l'explosion ne peut plus se produire. Avec les liquides très volatils, tels que l'essence de pétrole, la composition qui correspond à la saturation de l'air à la température ordinaire est bien au delà de la limite supérieure, de sorte que l'air ainsi saturé de vapeur inflammable ne peut plus détonner, mais est susceptible de brûler au contact d'un excès d'air pur ou de constituer avec cet excès d'air un mélange détonnant ; il est ainsi devenu un combustible gazeux spécial que l'on appelle *air carburé*.

La carburation de l'air peut se faire au moyen de liquides quelconques, pourvu qu'ils soient inflammables et suffisamment volatils. C'est le pétrole léger qui est le plus employé. On utilise également le benzol, l'alcool, les huiles légères de schistes, et parfois l'éther, l'acétone.

Carburation à l'essence de pétrole. — Nous avons vu que les pétroles sont des mélanges très complexes de carbures homologues. L'essence de pétrole d'origine américaine renferme principalement les carbures saturés compris entre le pentane (bouillant à 38°) et l'octane (bouillant à 124°).

Voyons quelle serait la composition d'un air saturé à 15° des vapeurs de chacun de ces constituants purs :

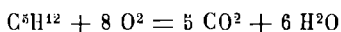
La tension de vapeur du pentane (isopentane) à 15° est, d'après Sorel, de 475 millimètres de mercure. La composition de l'air saturé de ces vapeurs sous la pression de 760 correspondra donc à 475 volumes de pentane pour $760 - 475 = 285$ volumes d'air, soit, en gros, un peu moins de 1/2 volume d'air pour 1 volume de vapeur.

D'autre part la limite supérieure d'inflammabilité des mélanges d'air et de vapeur de pentane correspond, d'après Eitner¹, à une

¹ *Journ. Gasb.*, 1902, p. 1.

proportion de 4,9 p. 100 de vapeurs, c'est-à-dire que l'air carburé au pentane cesse d'être explosible dès qu'il renferme, pour 1 volume de vapeur, moins de 19,41 volumes d'air. On voit que l'air saturé de pentane est très en dehors de cette limite.

L'équation de combustion



montre que la combustion complète correspond à un mélange de 1 volume de vapeur de pentane et de 8 volumes d'oxygène, ou encore de 40 volumes d'air, en comptant pour simplifier que l'air renferme le $\frac{1}{5}$ de son volume d'oxygène. Si donc nous voulons, par une addition convenable d'air pur, amener de l'air saturé de pentane à la composition du mélange détonnant théorique, nous devons, à 1 volume $\frac{1}{2}$ de cet air saturé, contenant 1 volume de vapeur de pentane, ajouter $40 - 0,5 = 39,5$ volumes d'air pur, c'est-à-dire le diluer de $\frac{39,5}{1,5} = 26$ fois son volume d'air.

Avec l'hexane, dont la vapeur ne possède plus à 15° qu'une tension de 95 millimètres, l'air carburé contiendra 95 volumes d'hexane pour $760 - 95 = 665$ volumes d'air pur, soit à peu près 1 volume d'hexane pour 7 volumes d'air pur ; on est encore en dehors de la limite d'inflammabilité.

Avec l'heptane on s'en rapprocherait davantage, car la tension de vapeur de ce carbure est encore plus faible. Il sera donc indiqué, pour avoir un gaz fortement carburé, d'effectuer la carburation avec des essences très légères. De plus la composition de ces essences variera rapidement par suite de leur distillation partielle ; on devra donc employer des produits fractionnés avec soin de manière à passer entièrement à la distillation dans des limites de température aussi rapprochées que possible.

L'évaporation du liquide carburant, en abaissant la température, tend à modifier la composition du gaz produit. Les variations de la température ambiante produisent le même effet. On obtient de meilleurs résultats en produisant la carburation à chaud. Dans ce cas on doit éviter la saturation complète de l'air à cette température, sans quoi l'excès de carburant se condenserait ultérieurement dans les conduites froides. On y parvient en ne laissant au contact de l'air qu'une quantité limitée et calculée de liquide.

Les appareils destinés à produire l'air carburé peuvent se diviser, comme les gazogènes, en appareils à aspiration et appareils à pression. Les premiers sont destinés à assurer l'alimentation des moteurs

NOM DU CARBURANT	DENSITÉ	TENSION de vapeur à 20°.	POINT d'ébullition commençante.	POINT de solidification.	PUISSANCE spécifique.		QUANTITÉ DE CARBURANT à ajouter à 1 litre d'air à 0°,760 mm. pour la combustion complète.
					par kilog.	par litre.	
Essence légère	0,700	296	50	α — 100	41 46½	8 025	grammes. 0,0843½
Benzol 90 p. 100	0,883	422	81	α — 6 ou — 8	10 033	8 879	centim. cubes. 0,1086
Alcool dénaturé	0,835	51	78,½	α — 100	5 934	4 971	0,16829
Alcool carburé	0,854	406	67	De — 11 à — 20	7 878	6 728	0,12168

à explosion. La plupart fonctionnent par injection d'une quantité dosée d'essence dans l'air à carburer, au moyen d'un *gicleur*. Nous ne nous en occuperons pas dans cet ouvrage.

Les carburateurs à pression fournissent un gaz que l'on peut distribuer par une canalisation comme du gaz d'éclairage. A ce titre ils sont intéressants pour remplacer ce dernier dans les petites installations d'éclairage ou de chauffage situées loin des agglomérations urbaines et dont le peu d'importance ne justifie pas l'installation d'un gazogène.

La plupart de ces appareils se composent d'un ventilateur ou compteur à gaz renversé, mû par un mouvement d'horlogerie ou par un petit moteur à air chaud, et qui fait passer l'air dans le carburateur. Celui-ci peut fonctionner à froid ou avec réchauffement; par injection d'essence comme les carburateurs d'automobiles ou par barbottage de l'air dans un excès d'essence; ce dernier procédé, le plus ordinairement employé, est d'ailleurs le moins bon, l'évaporation progressive du carburant l'appauvrissant de plus en plus en éléments volatils et amenant une diminution progressive de la richesse du gaz.

Le mouvement du ventilateur est ordinairement réglé par un frein commandé par un petit gazomètre, de telle sorte que l'envoi de l'air s'arrête quand le gazomètre est rempli, et ne reprenne que quand la consommation du gaz recommence.

Au lieu d'essence de pétrole, on peut employer, comme carburant, un liquide volatil combustible quelconque; par

exemple le benzol, ou l'alcool (dénaturé ou carburé). Nous donnons dans le tableau ci-contre (p. 462) quelques propriétés caractéristiques de ces différents liquides.

On voit qu'à 20°, 1 litre d'air saturé de vapeurs d'alcool n'en contient que $\frac{51}{760} = 67$ centimètres cubes. Le rapport des volumes de la vapeur saturée et de l'alcool est $\frac{51}{709} = \frac{1}{13,9}$.

Or cette composition est précisément comprise entre les deux limites d'inflammabilités, qui sont d'après Eitner de 6,33 et 24,3 volumes d'air pour un volume de vapeur; elle correspond très sensiblement à la formule de combustion complète, qui exige 13 volumes d'air.

On peut donc se servir de l'air carburé à l'alcool dans un moteur à explosion, ou dans un chalumeau, mais on ne peut l'utiliser comme gaz combustible proprement dit, pouvant brûler sans danger au contact d'un excès d'air, à moins d'opérer la carburation à une température notablement plus élevée.

L'air carburé au benzol seul a un pouvoir calorifique généralement considéré comme trop faible (1 650 calories pour une température de 5°); on préfère employer un mélange de benzol et d'essence de pétrole, qui relève notablement le pouvoir calorifique et permet d'atteindre facilement 3 000 calories.

Enfin on a parfois proposé de se servir d'autres liquides carburants: par exemple l'éther sulfurique (oxyde d'éthyle), qui possède une très grande tension de vapeur à la température ordinaire, et dont le pouvoir calorifique est de 8 700 calories par kilogramme. Cet éther, placé dans des bidons garnis d'un absorbant (bois exotique très poreux) permettrait de préparer très facilement un air carburé très riche (alcoolène)¹. On ne se sert guère en pratique de l'éther que pour alimenter les lampes à chalumeaux pour les appareils à projections; on emploie dans le même but, avec moins de danger, l'essence de pétrole ou l'acétone.

¹ G. ARACHEQUESNE, *Congrès des applications de l'alcool dénaturé*, 1902; p. 249.

E. — LES GAZ POUR CHALUMEAUX

Nous dirons quelques mots ici sur la préparation des gaz destinés à l'alimentation des chalumeaux, dont l'emploi prend de jour en jour plus d'importance dans les différentes industries.

§ 1. — L'HYDROGÈNE

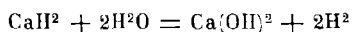
L'hydrogène employé comme combustible dans les chalumeaux oxyhydriques est presque toujours préparé par voie électrolytique ; nous n'étudierons pas ici cette préparation, qui sera traitée à fond dans le volume de cette collection consacré à l'électrochimie.

L'inconvénient de ce mode de production est la nécessité où l'on se trouve, pour transporter le gaz hors de l'usine, de l'emmagasiner sous pression dans des tubes d'acier, d'où un transport très onéreux à cause du poids de ces appareils.

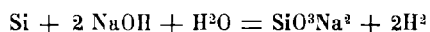
Cet inconvénient est encore bien plus grave quand on emploie l'hydrogène pour le gonflement des aérostats, et c'est en vue de cette dernière application que l'on a été conduit à rechercher des méthodes permettant de le préparer sur place, dans des conditions pas trop onéreuses, et à l'aide d'appareils peu encombrants et facilement transportables. Ces méthodes peuvent devenir à leur tour intéressantes pour la préparation de l'hydrogène destiné à la soudure autogène dans les endroits éloignés des usines électrolytiques. C'est à ce titre que nous en dirons quelques mots ici. La plupart des détails qui suivent sont empruntés à la conférence très documentée de M. G. Jaubert faite à la Société des Ingénieurs Civils de France le 7 juillet 1911 et publiée dans la *Revue Générale de Chimie* du 17 décembre.

Les procédés actuellement employés utilisent l'une des deux réactions suivantes :

1° Décomposition par l'eau de l'hydrure de calcium :



2° Action du silicium (ou d'un alliage métallique fortement silicié) sur la soude :



I. — L'emploi de l'hydrure de calcium a été proposé par M. G. Jaubert (Br. fr. n° 327 878 ; 31 décembre 1902) qui a donné au nouveau produit le nom d'*hydrolithe*. Cet hydrure se prépare en faisant circuler un courant d'hydrogène pur dans des cornues horizontales fortement chauffées et contenant du calcium métallique, préparé lui-même par électrolyse du chlorure de calcium fondu.

L'hydrolithe industrielle est en fragments irréguliers d'un gris d'ardoise, de densité 1,7, titrant environ 95 p. 100 de produit pur, le reste étant formé en majeure partie d'oxyde et d'azoture. Elle dégage 1 050 litres d'hydrogène pur par kilogramme, sous la simple action de l'eau. Son seul inconvénient est actuellement son prix élevé, voisin de 4,75 fr. le kilogramme.

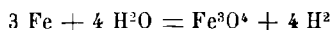
II. — Le procédé au silicium a pris naissance en Allemagne (Brev. fr. n° 406 930 ; 11 septembre 1909) ; il consistait, d'après ce brevet, à faire réagir à chaud, dans un récipient en fer, un mélange de silicium à 95 p. 100 et de chaux éteinte sur une solution de soude.

Le procédé au *silicol* de M. G. Jaubert remplace le silicium par des ferro ou mangano-siliciums ou des silicospiegels que l'on attaque simplement par une lessive concentrée de soude (à 35-40 p. 100 NaOH).

Le procédé à l'*hydrogénite*, du même inventeur, emploie encore la réaction de la soude sur les alliages siliciés, mais cette fois en l'absence d'eau : le mélange de soude caustique en poudre et de ferro-silicium pulvérisé entre en effet de lui-même en réaction dès qu'on porte un de ses points à une température suffisante, comme dans l'aluminothermie. L'hydrogénite est livrée en cartouches métalliques que l'on place dans un appareil très simple destiné à réaliser le lavage et le séchage du gaz produit et l'extinction de la matière incandescente. La réaction s'amorce à l'aide d'une allumette-tison. Le prix de revient du mètre cube d'hydrogène ressort actuellement à 1 franc avec le silicol, et à 1,60 fr. avec l'hydrogénite.

Mentionnons d'ailleurs que d'autres procédés que l'électrolyse peuvent permettre la préparation économique de l'hydrogène et sont actuellement employés industriellement ou à l'étude.

Les uns utilisent l'action de la vapeur d'eau sur le fer, c'est-à-dire le procédé primitif de Lavoisier :

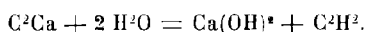


Le fer est régénéré de son oxyde par l'action d'un gaz réducteur, par exemple du gaz à l'eau.

D'autres cherchent à extraire l'hydrogène du gaz d'éclairage ou du gaz à l'eau. Tel est par exemple le procédé Linde-Franck-Caro dans lequel le gaz à l'eau est successivement débarrassé de son acide carbonique par la chaux, puis de l'oxyde de carbone par réfrigération au moyen d'air liquide, enfin purifié des dernières traces d'impuretés par passage sur du carbure de calcium chauffé au rouge, qui absorbe à la fois l'azote sous forme de cyanamide, et l'oxyde de carbone et l'acide carbonique sous forme de carbonate.

§ 2. — L'ACÉTYLÈNE

L'acétylène se prépare exclusivement par l'action de l'eau sur le carbure de calcium :



C'est un gaz dont tout le monde connaît l'odeur désagréable, due d'ailleurs aux impuretés qui l'accompagnent : l'acétylène rigoureusement pur possède une odeur éthérée. Il est légèrement soluble dans l'eau (1 volume), davantage dans la benzine et l'alcool absolu (4 et 6 volumes), mais surtout dans l'acétone qui en dissout 31 fois son volume. Il se liquéfie à 0° sous la pression de 26 atmosphères, ou à 20° sous 42 atmosphères 1/2.

L'intérêt de l'acétylène résulte de la température élevée produite par sa combustion : composé endothermique, dont la formation à partir des éléments correspond à une absorption de chaleur de 55 calories, il fournira de nouveau au moment de sa combustion cette énergie mise en réserve, de sorte que la chaleur dégagée s'élèvera à 318,1 Cal. (Berthelot). Aussi la flamme de l'acétylène est-elle la plus chaude que l'on connaisse, sa température dépasse 3 000°.

C'est par l'emploi du chalumeau oxyacétylénique que l'on réalisera les plus hautes températures que l'on puisse obtenir par voie chimique.

Mais l'usage de l'acétylène exige quelques précautions nécessitées par sa nature endothermique et aussi par la facilité avec laquelle il forme avec l'air des mélanges détonnants.

L'acétylène gazeux, sous la pression atmosphérique, n'est pas explosif, mais il le devient dès que sa pression dépasse 2 atmosphères ; l'acétylène liquéfié est un explosif puissant, comparable au coton-poudre.

Les limites d'explosivité des mélanges d'acétylène et d'air sont très larges : de 2,9 p. 100 à 65 p. 100 d'acétylène (Le Chatelier), et les vitesses initiales de propagation de la flamme sont très grandes :

Proportion d'acétylène p. 100.	2,9	5	7	9	15	22	40	60	64
Vitesse en mètres par seconde.	0,12	2	4	6	3	0,4	0,22	0,07	0,05

Si le mélange est contenu dans un tube étroit, les limites d'explosivité se resserrent :

De 4 à 40 p. 100 d'acétylène dans un tube de 6 millimètres de diamètre.					
De 5 à 15 — — — — —			2		

L'explosion ne se propage plus dans un tube de 1/2 millimètre de diamètre.

Quand on emploie l'oxygène pur, la vitesse initiale de propagation est beaucoup plus grande : elle atteint 200 mètres si les proportions du mélange correspondent à la combustion complète. Aussi doit-on munir l'extrémité des chalumeaux d'orifices très fins et se servir de pressions d'écoulement très fortes, d'environ 1/2 atmosphère.

Générateurs à acétylène. — Les générateurs à acétylène utilisés pour la production de ce gaz peuvent tous se ramener à deux types distincts : les appareils à chute automatique de carbure dans l'eau, et les appareils à chute d'eau sur le carbure.

Le premier mode de fonctionnement, bien que conduisant en général à des appareils plus compliqués que le second, est certainement préférable, car l'emploi d'un grand excès d'eau au moment de la production du gaz évite les échauffements et donne par suite un gaz plus pur, l'acétylène s'altérant assez facilement ou se polymérisant partiellement sous l'action de la chaleur. Le carbure de calcium est généralement contenu dans de petits réservoirs ou boîtes fermées, que l'on a remplis à l'avance, et qui s'ouvrent automatiquement à tour de rôle et projettent le carbure dans l'eau quand le gazomètre où est accumulée la réserve de gaz vient à baisser. Dans le générateur Javal, par exemple, les récipients sont placés sur une couronne mobile entourant le gazomètre et tournant sur des galets. La descente de la cloche du gazomètre a pour effet de faire tourner la couronne sur ses galets de roulements, et finalement d'amener l'ouverture d'un des récipients et la chute du carbure dans un entonnoir incliné conduisant à un réservoir étanche ou générateur contenant de l'eau. En même temps, un mécanisme projette dans l'entonnoir une

certaine quantité d'eau, de manière à entraîner le carbure. Le gaz produit se rend dans le gazomètre.

Acétylène dissous. — On a vu que l'acétylène était très soluble dans l'acétone. Cette propriété a été mise à profit par MM. Claude et Hess pour l'accumuler en grandes quantités dans des récipients, sans offrir les chances d'explosion que comporte l'emploi de l'acétylène liquéfié.

Il résulte en effet des expériences de MM. Berthelot et Vieille que sous une pression inférieure à 10 atmosphères la solution acétonique d'acétylène est inexplosible. Le seul danger que présenterait la manipulation d'un semblable liquide provient de la partie gazeuse existant forcément au-dessus du liquide dans des récipients qu'il est impossible de remplir complètement. Pour éviter cette difficulté, M. H. Le Chatelier a indiqué de faire absorber l'acétone par une matière poreuse remplissant totalement le récipient. Il n'y a plus cette fois d'espace nuisible, et, d'autre part, l'explosion ne se propage pas à travers la matière poreuse, de sorte que l'on pourrait employer une pression bien supérieure à 10 atmosphères.

Cependant celle-ci ne doit pas être dépassée d'après les règlements actuellement en vigueur. De plus, à cause du volume occupé par la matière poreuse elle-même, on ne peut compter dissoudre plus de 10 litres d'acétylène par litre de récipient. Sous la pression de 10 atmosphères, cela représente 100 litres à la pression atmosphérique. Les appareils présentent une sécurité absolue¹.

¹ Si nous ne parlons pas ici de l'oxygène, ce n'est pas qu'on ne puisse le considérer comme un combustible: il n'en est pas un, il est vrai, aux termes de la définition *pratique* que nous avons posée au début de cette seconde partie; c'est ce que l'on appelle au contraire un *gaz comburant*. Mais il est bien évident que ces expressions de combustible et de comburant n'ont qu'une valeur toute relative, que nous avons été amenés à les créer par suite des conditions pratiques dans lesquelles nous vivons au sein d'une atmosphère oxygénée, et que pour un chalumeau oxyhydrique par exemple, qui peut fonctionner dans une atmosphère inerte, l'hydrogène et l'oxygène qui l'alimentent jouent exactement l'un par rapport à l'autre le même rôle.

Cependant les préparations industrielles de l'oxygène seront étudiées naturellement dans d'autres volumes de cette collection: l'une d'elles utilise l'électrolyse des solutions alcalines, elle sera étudiée avec les procédés électrochimiques; l'autre sépare par l'action du froid les constituants de l'air atmosphérique, il en sera parlé en même temps que de la liquéfaction des gaz. Quant au *procédé Brin*, par lequel on extrayait l'oxygène de l'air en s'aidant de la décomposition réversible du bioxyde de baryum



il a perdu aujourd'hui son intérêt industriel devant les deux précédents.

Mentionnons seulement ici la possibilité de préparer très facilement de l'oxygène très

pur, pour une petite installation, au moyen de l'*oxylithe* (G. Jaubert), mélange aggloméré de peroxydes alcalins avec un sel de cuivre comme catalyseur. La décomposition des bioxydes alcalins par l'eau donne de l'eau oxygénée, qui se décompose instantanément sous l'influence du catalyseur en dégageant de l'oxygène. L'action de l'eau sur l'*oxylithe* est immédiate, et cesse également tout d'un coup dès qu'on éloigne le liquide, de sorte qu'un appareil extrêmement simple, dans le genre des appareils Deville à hydrogène ou des générateurs à acétylène les plus rudimentaires, suffit pour obtenir un dégagement automatique et parfaitement régulier.

CHAPITRE IV

LES FOYERS

§ 1. — FOYERS POUR COMBUSTIBLES SOLIDES

Nous étudierons tout d'abord les foyers à houille ou à coke qui sont les plus répandus. Destinés autrefois au chauffage dans toutes les opérations industrielles, ils ont été remplacés presque complètement par les fours à gaz, avec ou sans récupération ; ils ne sont plus guère utilisés actuellement que pour les applications de peu d'importance, ou surtout pour les chaudières à vapeur.

Tout foyer se compose de trois parties : le *foyer proprement dit* ou *chambre de chauffe*, où se produit la combustion ; la *grille*, servant à supporter le combustible en laissant passer l'air nécessaire à la combustion ; et le *cedrier* destiné à recevoir les cendres et les mâchefers.

Foyer ordinaire à grille plane. — Le foyer ordinaire à grille plane réalise le type le plus répandu, destiné à brûler les charbons gros ou moyens, et autant que possible de grosseur uniforme, car les charbons tout venant donnent des rendements bien inférieurs. La grille se compose de barreaux parallèles en fonte ou en fer forgé, dont la forme est calculée de manière à offrir autant que possible une égale résistance en leurs divers points : à cet effet, l'épaisseur croît progressivement des extrémités au centre ; elle est beaucoup plus considérable que la largeur des barreaux, et atteint au milieu de la longueur 10 ou 12 et même dans certains cas 20 centimètres. La section transversale a la forme d'un trapèze isocèle dont la grande base est tournée vers le haut, de manière à éviter autant que possible l'encrassement par les cendres ou les escarbilles des espaces vides entre les barreaux consécutifs. L'écartement entre les barreaux est assuré par des talons aux deux extrémités ; quand leur longueur devient assez grande, on place également un talon au milieu de manière à éviter les déformations. Les barreaux reposent librement à leurs deux extrémités sur des sommiers en fer, encastrés dans la maçonnerie,

et disposés de manière à laisser un jeu de 3 à 5 millimètres à l'avant pour permettre la dilatation ; l'arrière du barreau est accroché au sommier par un talon recourbé. La grille est en général horizontale, ou légèrement inclinée de $1/10$ par exemple vers l'arrière, de manière à agrandir la chambre de chauffe sans diminuer l'ouverture du cendrier en avant. La distance entre deux barreaux et la largeur de ces barreaux varient avec la grosseur de la houille : pour les charbons en gros fragments on prend des barreaux de 25 à 30 millimètres, espacés entre eux de 10 à 12 millimètres ; avec les charbons plus fins, il faut réduire les intervalles, et par suite aussi la largeur des barreaux de manière à conserver le même rapport entre la surface de la grille et la surface libre par où l'air pénètre dans le foyer. Ce rapport dépend de la nature des houilles traitées ; pour les charbons moyens, il est de 3 environ ; il sera réduit pour les houilles sèches et augmenté pour les charbons anthraciteux contenant peu de substances volatiles. La largeur d'une grille ne peut guère dépasser 1 mètre, ou 1,50 m. si l'on met deux portes de chargement ; la surface totale sera en général inférieure à 2 mètres carrés ; pour l'augmenter, il vaudra mieux construire plusieurs foyers séparés.

Le poids de charbon brûlé par heure et par mètre carré de grille varie suivant le combustible employé, suivant la surface libre et suivant la vitesse d'introduction de l'air, ou tirage. Les foyers ordinaires de chaudières à bouilleurs brûlent de 50 à 100 kilogs ; les foyers de fours à puddler ou à souder le fer consomment jusqu'à 150 ou 200 kilogs, et les foyers de locomotives arrivent à brûler 400 à 500 kilogs. Il faut pour obtenir ces combustions rapides un tirage très énergique correspondant à une différence de pression qui peut atteindre 10 centimètres d'eau, et s'élever même à 20 ou à 30 dans les chaudières marines.

Le rendement des foyers ordinaires, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de chaleur utilisée et la quantité totale de chaleur produite, varie pour les chaudières de 0,40 à 0,80. Si l'on connaît à l'avance ce rendement r d'après des expériences comparatives effectuées dans des conditions analogues, si l'on se donne le poids P de houille à brûler par heure et par mètre carré de grille, enfin si l'on connaît la quantité de chaleur Q exigée par heure pour l'opération que l'on veut entreprendre et la chaleur de combustion du charbon C , on calculera immédiatement la surface S à donner à la grille d'après l'équation :

$$P \cdot C \cdot S \cdot r = Q.$$

Chargement et fonctionnement du foyer. — Le chargement s'effectue en projetant le charbon sur la grille, à la pelle, rapidement pour ne pas trop refroidir le foyer par l'introduction d'air froid, et le plus régulièrement possible de manière à obtenir une couche de combustible d'épaisseur uniforme, ne contenant surtout pas de trous par où passerait un excès d'air. L'introduction du combustible froid sur le lit incandescent a pour effet d'amener la distillation des éléments volatils en même temps que se produit une baisse brusque de température ; celle-ci peut être suffisante pour que

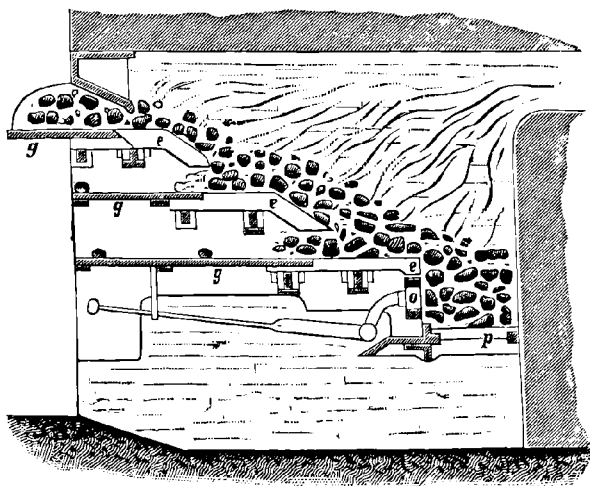


Fig. 113. — Grille à étages.

les vapeurs dégagées ne s'enflamment pas, ou qu'elles ne brûlent qu'incomplètement avec mise en liberté du charbon divisé : il se produit donc des *fumées* d'autant plus abondantes que le charbon traité est plus riche en matières volatiles. Puis, la température remontant peu à peu, les gaz s'enflamment et le charbon brûle régulièrement, jusqu'au moment où par suite de l'usure du combustible, l'air aspiré se trouve en excès par rapport au charbon incandescent, et le foyer tend à se refroidir de nouveau ; on fera alors un nouveau chargement, et ainsi de suite, de sorte que l'on ne réalise que pendant un temps limité et assez court les meilleures conditions de marche. On sera donc amené à charger le plus souvent possible pour éviter de trop grands changements dans l'allure du foyer, et à maintenir le combustible en couche assez mince sur la grille, une couche trop

épaisse amenant la production d'oxyde de carbone, c'est-à-dire produisant beaucoup moins de chaleur.

On voit que le principal inconvénient des foyers à grille ordinaire réside dans leur mode de chargement. On a imaginé différents dispositifs permettant un chargement plus rationnel :

La *grille à étages* imaginée par Langen se compose (fig. 113) d'une série de plateaux *g* superposés terminés vers le foyer par des grilles *e* à barreaux recourbés, de manière à réaliser une surface inclinée à 28°. Le charbon est chargé à l'avance sur les plaques *g* où il s'échauffe

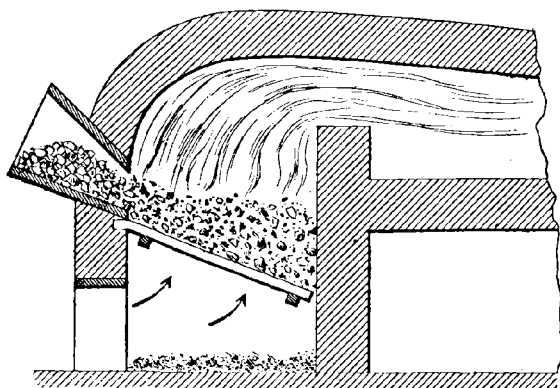


Fig. 114. — Foyer à grille inclinée.

peu à peu, puis il est poussé sous le charbon allumé, qui le carbonise. Les gaz dégagés, aspirés avec l'air, traversent la couche incandescente et brûlent complètement sans produire de fumées, tandis que le charbon poussé par les portions nouvellement introduites descend peu à peu jusque sur une grille horizontale *p* où il finit de se consumer.

La *grille inclinée* (fig. 114) conduit par un dispositif différent à un résultat à peu près identique : la grille est à barreaux droits ordinaires, mais elle présente une inclinaison assez prononcée, allant de 20 à 35 et même à 50 p. 100. La porte du foyer est remplacée par une ouverture munie d'une trémie également inclinée que l'on remplit de charbon. Celui-ci s'échauffe progressivement en avançant vers la grille ; il distille bientôt, et les gaz de la distillation, mélangés à l'air aspiré en même temps par la trémie, viennent brûler au contact du combustible incandescent. L'air introduit par la trémie joue en même temps le rôle d'air secondaire pour brûler l'oxyde de carbone qui

pourrait se former sur la grille quand l'épaisseur du combustible est trop forte.

On peut même supprimer complètement l'accès de l'air sous la grille et entretenir la combustion uniquement avec l'air pénétrant à travers le charbon par l'ouverture de chargement. On obtient alors le *foyer à flamme renversée*. Le cendrier dans ce cas doit être hermétiquement clos.

On a également imaginé, pour éviter les irrégularités du chargement intermittent à la pelle, des foyers à *alimentation continue* dans lesquels un dispositif mécanique introduit progressivement la houille au fur et à mesure de sa consommation. Dans plusieurs dispositifs, la grille est remplacée par une large chaîne sans fin ou plutôt par une série de chaînes animées, par l'intermédiaire de pignons dentés, d'un mouvement continu, de manière à introduire dans le foyer et à pousser progressivement vers la zone la plus chaude le charbon qu'une trémie dépose à l'entrée. Tels sont par exemple le *chargeur Coxe* et le *chargeur Babcock et Wilcox* ; dans d'autres cas, on emploie une vis sans fin ; d'autres fois les barreaux sont inclinés et animés d'un mouvement de va-et-vient ou de secousses périodiques : par exemple le chargeur *Wilkinson*, la grille *Frouvé*, le chargeur *Vicar*. Ces appareils procurent en général une économie de charbon et de main-d'œuvre assez considérable, bien qu'étant d'un établissement et d'un entretien assez coûteux.

Foyer Fulton. — Ce foyer ou économiseur de combustible, destiné à en permettre la distillation progressive et la combustion complète, comprend un chargeur et une grille spéciale.

La grille rappelle tout à fait comme forme la grille à gradins, employée pour les charbons menus (voir plus bas), mais les barreaux en sont alternativement fixes et mobiles : les barreaux mobiles sont portés par des pièces en forme de montants d'escaliers, pivotant à leur extrémité inférieure autour d'un axe et mues par un excentrique à leur partie supérieure. Le mouvement qui en résulte fait avancer progressivement sur la grille le combustible, qui distille d'abord, puis brûle et vient tomber à l'état de cendre au bas de la grille.

Le chargeur, placé à la partie supérieure, se compose d'une trémie au fond de laquelle se trouve un rouleau portant des doigts en saillie et tournant en face d'une surface cannelée, de manière à écraser au fur et à mesure le charbon.

Enfin la combustion complète des fumées est assurée par une

introduction, au fond du foyer, d'air secondaire préalablement chauffé par sa circulation au travers de tuyaux placés dans la maçonnerie.

FOYERS POUR COMBUSTIBLES MENUS

Les grilles ordinaires se prêtent mal à la combustion des combustibles menus, qui passent à travers les interstices des barreaux et les bouchent. On peut employer avec avantage, pour les menus de houilles non collants, un foyer avec grille à gradins.

Grille à gradins. — Cette grille se compose d'une série de plate-

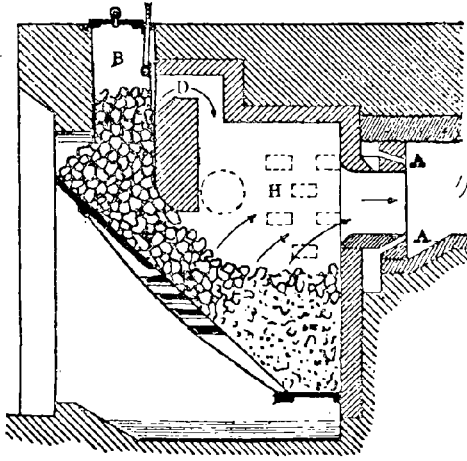


Fig. 115. — Foyer à demi-gaz.

formes horizontales, régulièrement espacées en escalier, avec une pente d'environ 40 à 50 p. 100. Au bas du foyer se trouve une grille ordinaire de petite dimension. Le charbon est chargé à la partie supérieure par une trémie, d'où il descend de gradins en gradins, poussé par le chauffeur, en se cokéfiant d'abord peu à peu, puis en brûlant sur la grille inférieure; celle-ci est maintenue normalement recouverte d'une couche d'escarbilles qui l'empêchent de se boucher et que l'on fait tomber de temps à autre en enlevant un ou deux barreaux. Cette grille réalise une combustion très régulière, sans à-coups et sans rentrée d'air; elle convient très bien pour les menus d'antracite et de charbons maigres.

Cependant l'emploi des menus présente l'inconvénient de ne laisser à l'air qu'un passage insuffisant, de sorte que la combustion est

¹ *Iron Age*, 76, 1290; 1905; *Rev. Métal.*, 3 bis, 108; 1906.

souvent incomplète et se fait en partie avec production d'oxyde de carbone. Pour tourner la difficulté, on a imaginé (fig. 115) d'introduire de l'air secondaire dans le foyer, au-devant de la grille, de manière à brûler l'oxyde de carbone produit. L'air pénètre dans des carneaux H ménagés dans la maçonnerie, où il s'échauffe, et il entre dans le foyer par les ouvertures A où il rencontre les fumées à oxyde de carbone et aussi les gaz combustibles produits par la distillation de la houille dans la trémie de chargement B, et qui arrivent dans le foyer par le conduit D. L'ensemble fonctionne donc à la façon d'un gazogène de Siemens, d'où le nom de *foyer à demi-gaz* donné à cette disposition d'ailleurs antérieure au gazogène.

FOYERS SOUFFLÉS

L'emploi de foyers soufflés permet également de brûler les combustibles menus ou riches en cendres qui ne pourraient être utilisés dans les foyers ordinaires. Les foyers à air soufflé doivent cependant être construits avec soin, de manière à éviter la formation de flammes de chalumeau qui mettent promptement hors d'usage les garnitures et les tôles de chaudières. On les divise en foyers à injection d'air et foyers à injection de vapeur.

Foyers à injection d'air. — **FOYER A ÉTAGES DE MICHEL PERRET.** — Ce foyer se compose de 4 ou 5 dalles superposées, en terre réfractaire, sur lesquelles on peut étaler le combustible et le faire tomber d'une dalle sur la dalle inférieure au moyen d'ouvertures percées alternativement en avant ou en arrière. L'air pénètre à l'étage inférieur et lèche successivement, aux différents étages, le charbon qui est introduit sur la dalle supérieure et poussé d'étage en étage au moyen d'un ringard.

GRILLE IMMERGÉE MICHEL PERRET. — C'est une grille dont les barreaux étroits et très rapprochés ont une très grande hauteur et plongent à leur partie inférieure dans une bêche remplie d'eau. On évite ainsi de les brûler. L'air est injecté latéralement au moyen d'un ventilateur puissant. On obtient de la sorte une température très élevée.

Foyers à injection de vapeur. — On a vu dans la première partie de cet ouvrage que l'injection de vapeur d'eau dans un foyer ne peut pas augmenter la quantité de chaleur produite. Tout au plus peut-

elle refroidir les grilles en déplaçant la zone de chaleur maxima. Dans les foyers où l'on utilise l'injection de vapeur, celle-ci n'a pour but que d'entraîner un courant d'air, en sorte que l'on retombe au fond sur les foyers à air soufflé. La vapeur s'échappant par un orifice central entraîne l'air par un orifice annulaire.

GRILLE POILLON. — Dans cette grille, les barreaux, au lieu d'être disposés longitudinalement comme d'habitude, sont placés transversalement. De plus, leur section est calculée de façon que les jours qu'ils laissent entre eux soient inclinés environ à 45°, de manière à étaler les flammes suivant des directions inclinées et qui se croisent comme l'indique la figure (fig. 116). Cette disposition évite de brûler les tôles des chaudières comme auraient pu le faire les flammes verticales produites par les grilles ordinaires ; en même temps, les gaz du foyer sont brassés énergiquement et la combustion est complète, sans fumée, et sans usure de la grille qui se trouve refroidie par la vapeur d'eau injectée.

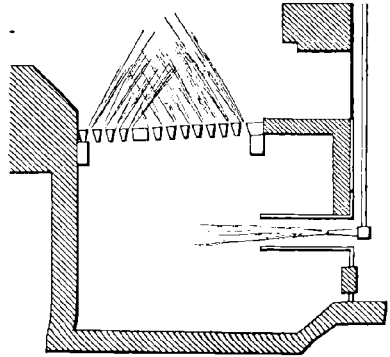


Fig. 116. — Grille Poillon.

FOYER MELDRUM. — Ce foyer emploie une grille de forme ordinaire, dont les barreaux ne sont écartés que de 3 millimètres. La forme et l'emplacement des tuyères sont minutieusement étudiés de manière à produire le meilleur effet utile. Le cendrier doit être tenu normalement fermé.

On peut brûler dans ces foyers des poussières de coke ou des schistes contenant jusqu'à 60 p. 100 de cendres ; il n'y a pas de fumée sensible.

FOYER KUDLICZ. — Ce foyer est également établi pour brûler les menus de houille, ou même les déchets, escarbilles, sciure de bois, tannée, jusqu'aux résidus de boîtes à fumée de locomotives.

La grille Kudlicz est formée d'une plaque de tôle épaisse percée de trous coniques dont la petite ouverture est tournée vers le haut et qui sont disposés régulièrement en quinconce au nombre de 1 200

par mètre carré (fig. 117). Cette grille forme le dessus d'un caisson en tôle dans lequel on envoie, par l'intermédiaire d'une tuyère à vapeur, de

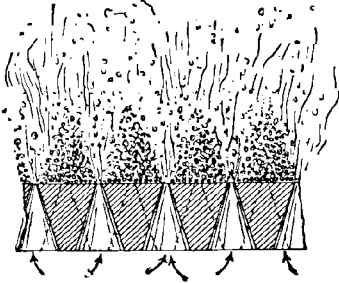


Fig. 117. — Grille Kudlicz.

l'air qui passe à travers les trous coniques et soulève la poussière de charbon en produisant des gerbes de flammes, mais pas de jets de chalumeau. Quant aux cendres, qui ne peuvent traverser la grille d'après sa disposition même, elles sont entraînées par le courant d'air et vont se déposer dans une fosse derrière l'autel. Il faut nettoyer fréquemment les carneaux, qui devront être assez larges.

Foyers sans grilles pour poussier de charbon. — On sait que les poussières combustibles, et en particulier les poussières de houille, forment avec l'air des mélanges détonnants. Si donc on produit, au moyen d'un appareil convenable, un jet de poussier de charbon en présence d'un excès d'air, on pourra enflammer ce poussier qui se comportera comme un combustible gazeux. En projetant le jet dans

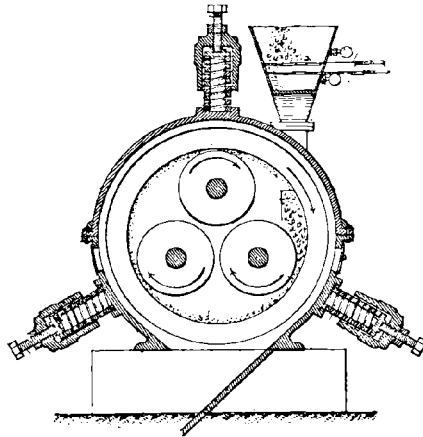


Fig. 118. — Moulin Kent.

une chambre chauffée à température suffisante, il s'enflammera de lui-même, et se maintiendra indéfiniment en combustion. Il ne sera donc plus besoin de grille, et si les proportions d'air et de combustible sont exactement calculées, la combustion sera parfaite et se produira sans fumées.

Les poussières de houilles destinées à être brûlées doivent être finement pulvérisées après une dessiccation préalable dont nous avons déjà parlé page 315. La pulvérisation définitive s'effectue dans des moulins à boulets ou des moulins centrifuges à meules tels que le moulin Kent (fig. 118) dans lequel trois meules sont maintenues énergiquement par trois ressorts contre un anneau mobile enveloppant ¹. Plus la poussière sera fine, plus la combustion sera facile et complète. On devra prendre le degré de finesse qui correspond à un tamis de 7 mailles par millimètre carré.

Le charbon en poudre fine s'altère rapidement à l'air ; aussi ne devra-t-on pas en préparer de trop grandes provisions à l'avance. On a également proposé de le conserver sous l'eau et même de le transporter à de grandes distances, au moyen de tuyaux, en suspension dans ce liquide ¹.

La nécessité d'opérer la combustion dans un foyer à température élevée oblige, si l'on emploie des chaudières à foyer intérieur, à revêtir ce foyer de briques réfractaires afin de s'opposer à un trop grand refroidissement par les parois de la chaudière, pouvant amener l'extinction de la flamme. On évite en même temps la destruction de la paroi métallique par la flamme directe.

L'appareil le plus connu pour réaliser la combustion du poussier de charbon, et celui qui a donné les premiers résultats vraiment pratiques, est l'*appareil Schwarzkopf*. Il se compose essentiellement (fig. 119) d'une trémie *a* et d'une roue distributrice *f* munie de brosses en fil d'acier, tournant à raison de 250 tours par minute. La trémie est fermée à sa partie inférieure par deux plaques d'acier *c* et *d*, la première pouvant être plus ou moins tendue par la vis *b*, la seconde munie à son extrémité d'un cran *h* que vient soulever à chaque distribution un marteau *g* porté par la roue *f*. La plaque *e* supporte le poids du charbon dans la trémie et allège d'autant la plaque *c*.

On voit qu'à chaque révolution de la roue *f*, une quantité déterminée du charbon sort de la trémie et est entraînée dans la chaudière à la fois par la vitesse de rotation et par l'air aspiré par la cheminée et qui pénètre par les chemins *l*, *m* et *n*. Un registre *o* sert à régler l'admission de cet air.

Pour la mise en marche, il faut chauffer préalablement la chambre de chauffe à une température suffisante, au moyen d'un feu de bois par exemple. Au bout de cinq minutes, on peut faire marcher l'ap-

¹ *Rev. Métal.*, 5 bis, 732 ; 1908.

pareil. On peut arrêter son fonctionnement pendant quelques heures et le reprendre ensuite, les parois de la chambre étant encore suffisamment chaudes pour assurer l'inflammation.

Dans une autre disposition du chargeur Schwarzkopf, le marteau *g*

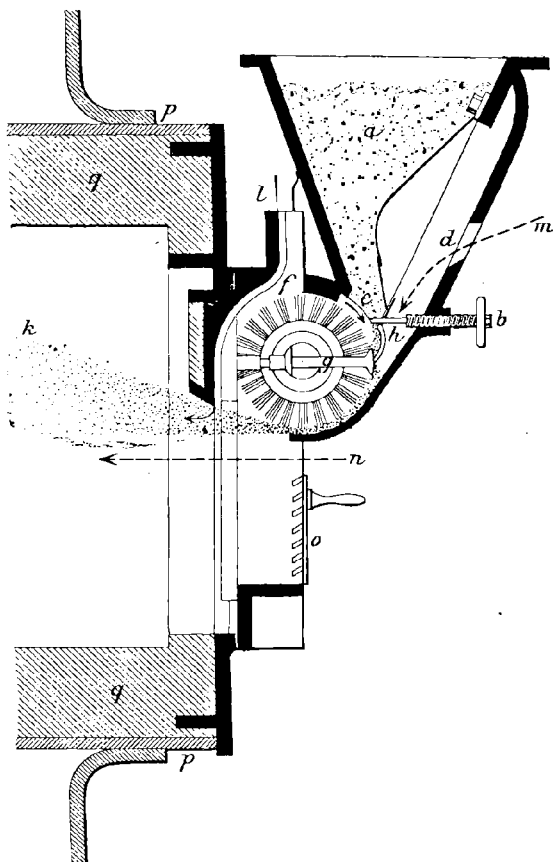


Fig. 119. — Appareil Schwarzkopf.

n'est pas solidaire de la roue *f*, mais commandé par un engrenage.

Il existe un grand nombre d'appareils analogues, différant entre eux principalement par la manière dont se trouve réglé l'écoulement du charbon tombant de la trémie. Au lieu d'une brosse circulaire, on peut employer un transporteur à vis (*appareil Rühl*, appareil de l'*American Iron and Steel Manufacturing C°*) ou un ou plusieurs tambours à dents (*appareil Westlake*, chargeur *Welles*) ou un broyeur (*appareil de l'Ideal Fuel Feeder C°*) ou un système de rouleaux

(*foyer Pinther*). Dans plusieurs de ces appareils, la distribution du charbon et de l'air est commandée par les variations de pression de la chaudière, de sorte que le foyer ne fonctionne que quand la pression tombe au-dessous d'une certaine limite, et s'arrête automatiquement dès que la pression est remontée¹. Le vent est soufflé par des

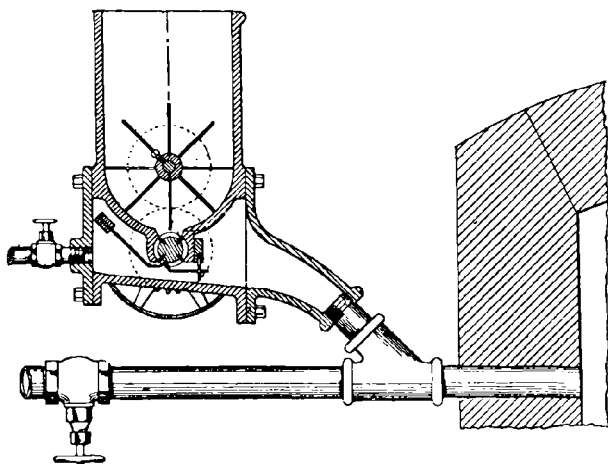


Fig. 120. — Chargeur Welles.

ventilateurs annexés à chaque appareil, ou provient d'une canalisation d'air comprimé. Dans le *chargeur Welles* que nous figurons ci-contre (fig. 120), il y a une double canalisation d'air : l'une à haute pression pénètre directement dans la chambre d'alimentation, l'autre à basse pression entre par la branche en Y du tuyau de décharge.

La combustion du charbon pulvérisé produit des températures très élevées qui ne doivent pas être mises au contact direct des parois de chaudières. On peut éviter en grande partie l'action pernicieuse de ces flammes en en produisant deux dans deux directions différentes de manière à les écraser l'une contre l'autre.

Il ne se produit aucune fumée dès que les briques du foyer sont chaudes, et il n'y a sensiblement pas de combustible perdu dans les cendres, 1 p. 100 tout au plus ; ces cendres peuvent causer des désagréments quand elles sont très fusibles, car elles se collent aux parois en formant une croûte extrêmement dure, difficile à détacher. Au contraire, les cendres peu fusibles donnent un dépôt gris pulvé-

¹ Dans l'appareil Friedeberg, qui a donné lieu à quelques applications en Allemagne, le charbon s'écoule de la trémie sous la seule action de l'air arrivant par des tuyères spéciales.

ruent très facile à enlever et que l'on a même essayé d'employer comme sable de fonderie.

Tous les charbons ne conviennent pas pour être brûlés sous forme de poussières : ceux qui contiennent moins de 20 p. 100 de matières volatiles s'enflamment difficilement ; les meilleurs sont ceux à 30-35 p. 100. Voici quelques analyses de charbons utilisés dans ces conditions en Amérique, citées par M. W. Dennis dans une étude dont nous avons extrait une partie des renseignements donnés ici ¹ :

EMPLOIS	MATIÈRES VOLATILES	CARBONE FIXE	CENDRES	SOUFRE
Fours à ciments	30-33	50-58	9,13	6
Chaudières.	35,13	54,70	9,35	0,99
—	34,47	57,40	7,50	1,74
—	35,50	53,70	8,40	»
Fours métallurgiques .	31,97	58,49	9,02	1,34

Ces charbons provenaient de résidus de charbonnage, mais cet emploi n'est pas toujours le plus économique car ces résidus sont

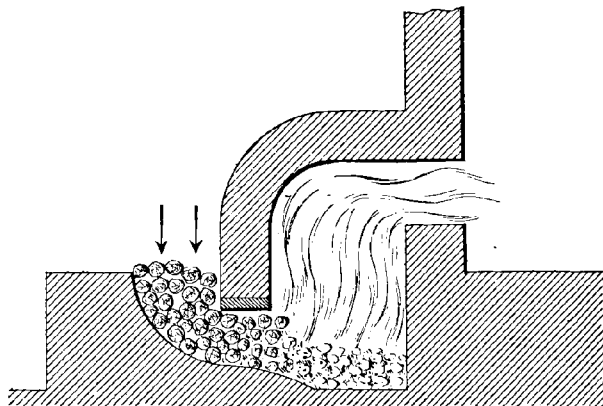


Fig. 121. — Foyer à alandiers.

généralement très humides, surtout en hiver, et leur broyage ultérieur est dans ce cas plus onéreux.

Au point de vue de l'économie procurée par l'emploi du charbon pulvérisé, M. Dennis cite le cas d'un four à profilés où 425 barres pesant 6 tonnes étaient chauffées en dix heures à l'aide de 450 kilogs

¹ *Rev. Métal.*, 5 bis, 745 et 749; 1908; *Eng. Mag.*, 33, 577; 1907, et 34, 463; 1908.

de charbon revenant à 9 francs la tonne après pulvérisation, tandis que le même four marchant au coke mettait vingt heures pour chauffer 350 barres avec une dépense de 680 kilogs de charbon à 13,50 fr. la tonne.

L'usage du charbon pulvérisé dans les chaudières n'est pas à beaucoup près aussi économique ; mais il procure une meilleure utilisation du combustible, et est d'un maniement beaucoup plus commode, lui permettant de lutter avec le gaz et le pétrole, qui sont plus coûteux.

FOYERS POUR COMBUSTIBLES SOLIDES AUTRES QUE LA HOUILLE

Foyers à bois. — Le bois peut s'employer dans les foyers ordinaires à houille sans modification, on pourra seulement diminuer l'écartement des barreaux, le rapport de la surface libre à la surface totale de grille pouvant être de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{7}$.

On employait dans les anciens fours à porcelaine marchant au bois le système du *foyer à alandiers* réalisant la combustion renversée du bois, et fonctionnant d'une manière analogue aux foyers à houille à combustion renversée. La figure ci-contre (fig. 121), extraite du traité de métallurgie de Babu, en fait comprendre la disposition.

Foyers à tourbe. — La tourbe en briquettes se brûle dans les foyers ordinaires à houille. La tourbe naturelle se brûle avantageusement sur les grilles à étages, en employant un tirage très énergique ; on peut aussi employer les foyers spéciaux à sciure de bois que nous décrirons tout à l'heure. Enfin on a construit pour le chauffage des chaudières au moyen de ce combustible un four spécial, le foyer Hoyt. Ce foyer comprend une grille ordinaire à barreaux rapprochés (surface libre = $\frac{1}{5}$ surface totale). Le chargement s'effectue par des trous percés dans la voûte du foyer au-dessus de la grille et que l'on tient fermés en temps ordinaire au moyen de briques. Avec de la tourbe séchée à l'air, contenant 25 p. 100 d'eau et 45 p. 100 de carbone, on a ainsi obtenu une vaporisation de 3,36 kg. d'eau par kilogramme de tourbe.

Foyers pour sciure de bois et déchets de scieries. — La sciure de bois se brûle bien dans un foyer en maçonnerie que l'on charge au

moyen d'une trémie placée au-dessus de la voûte et communiquant avec un certain nombre de trous percés dans cette voûte. La grille placée au-dessous comporte des barreaux de 24 millimètres d'épaisseur séparés de 44 millimètres. Le chauffeur se borne à égaliser la sciure sur la grille au fur et à mesure de sa chute, et à veiller qu'elle n'arrive pas à toucher la voûte. On peut aussi employer avec avantage une grille à gradins.

Foyers pour bagasse. — La bagasse, ou résidu de canne à sucre, est un combustible intéressant dans les colonies. On le brûle de préférence sur une grille à étages, en employant un foyer très spacieux en briques réfractaires. L'introduction se fait en général par une trémie. On obtient avec un bon foyer une vaporisation de 3 litres et demi d'eau par kilogramme de bagasse.

Foyers à paille. — Les foyers destinés à brûler de la paille ou des tiges de plantes sont ordinairement munis d'une large trémie pour le chargement et de tôles rabattant les flammes vers le bas et empêchant les tiges non brûlées d'être entraînées par le tirage. Avec les chaudières à tubes d'eau, il est nécessaire d'augmenter la distance entre la grille et les tubes et de mettre des arrivées d'air complémentaires pour obtenir une combustion complète.

Foyers à tannée. — La tannée, ou tan épuisé sortant des fosses à jus, contient encore la plus grande partie de ses fibres ligneuses et peut servir de combustible, bien qu'elle retienne une énorme quantité d'eau (60-70 p. 100 environ). En général, on la comprime dans des moules pour en faire des mottes que l'on sèche à l'air. Ces mottes brûlent presque sans flamme et produisent beaucoup de cendres. Leur pouvoir calorifique à l'état sec serait de 4 000 calories ; mais on ne peut guère compter sur beaucoup plus de la moitié à cause de l'humidité qu'elles contiennent encore, soit une vaporisation de 2 kilogrammes d'eau par kilogramme.

Le **foyer Godillot** a été construit pour brûler la tannée telle qu'elle sort des fosses, sans compression préalable : il comprend un distributeur à hélice, prenant la tannée dans une trémie et la poussant sur une grille spéciale (grille pavillon) en forme de demi-cône reposant sur une grille horizontale en fer à cheval. La tannée descend peu à peu en se desséchant sur la partie inclinée, et vient brûler à la partie inférieure. L'air nécessaire à la combustion est chauffé

préalablement par son passage dans des carneaux circulant autour du foyer. Ce dispositif permet de brûler également la sciure de bois, les copeaux, etc. Quand on emploie la tannée, on lui mélange en général 10 p. 100 de charbon de manière à relever un peu son pouvoir évaporatoire.

Mentionnons d'ailleurs que la tannée, la bagasse et tous les combustibles humides se brûlent dans d'excellentes conditions à l'aide du gazogène autoréducteur de Riché (voir p. 406).

§ 2. — FOYERS POUR COMBUSTIBLES LIQUIDES

L'idée de se servir des combustibles liquides pour le chauffage des foyers industriels est naturellement fort ancienne et s'est présentée dans tous les pays producteurs de pétrole : mais la solution vraiment pratique et économique du problème exige des appareils spéciaux et n'a pu être réalisée pleinement qu'après de multiples tâtonnements.

Les premiers dispositifs essayés revenaient à brûler le combustible répandu sur une grille de forme spéciale. Dans le *foyer Nobel* par exemple, le pétrole s'écoulait d'une manière continue à travers une série de cuvettes plates en fonte placées les unes au-dessus des autres à l'entrée du foyer. Le pétrole était enflammé directement et l'air qui passait entre chaque cuvette poussait les flammes dans une chambre à maçonnerie où la combustion s'achevait sous l'influence d'une nouvelle arrivée d'air chauffé. Ce foyer était principalement employé à la fusion de l'acier.

Dans le *four Kroupski* le pétrole est gazéifié en le faisant tomber sur les briques chauffées d'un régénérateur de chaleur du genre Siemens, et s'enflamme au contact de l'air chaud qui remonte à travers ces briques. La combustion se poursuit dans le four proprement dit, et les gaz vont ensuite réchauffer un second système de régénérateur, que l'on permutera tout à l'heure avec le premier et qui servira alors de gazéificateur pour le pétrole. L'inconvénient de ce procédé consiste dans la formation d'un coke très dur et peu combustible aux dépens d'une partie du pétrole tombant sur les briques incandescentes.

Nous devons rappeler que dès 1868 Henri Sainte-Claire Deville avait préconisé l'emploi des huiles lourdes de pétrole pour le chauffage, et imaginé une grille spéciale, à barreaux plats en fonte placés verticalement, et creusés dans leur épaisseur d'une rainure où l'on

faisait s'écouler le pétrole qui s'y trouvait immédiatement volatilisé et brûlait comme sur une mèche de lampe ; l'air pénétrait dans le foyer par les intervalles entre les barreaux, déterminant la formation d'une flamme très vive et très courte de 23 centimètres de longueur. On pouvait augmenter la surface d'évaporation de l'huile en inclinant plus ou moins la paroi postérieure de la grille.

Cet appareil non seulement fut employé pour le chauffage de fours de laboratoire, mais fut expérimenté avec succès sur deux locomotives du chemin de fer de l'Est, ainsi que sur le yacht « La Puebla » muni d'une chaudière de 60 chevaux¹. Ces essais montrèrent dès cette époque tout l'intérêt que présentait le chauffage au pétrole. La Société des Forges et Chantiers de la Méditerranée a construit il y a quelques années un appareil qui n'est qu'un perfectionnement de celui de Deville, caractérisé par l'emploi de l'air soufflé et de déflecteurs creux, pénétrant entre les barreaux de la grille, et servant à échauffer et à mieux diriger l'air qui circule en partie entre eux et les barreaux de la grille, en partie à leur intérieur pour ressortir dans le foyer par de petits trous percés à leurs extrémités.

Le foyer dit à *glissières* de M. Bachy fonctionne d'une manière un peu analogue, il comporte une plaque horizontale munie de rainures, sur laquelle s'écoule le pétrole, et qui est recouverte d'une bande d'un tissu feutré qui s'imbibe de l'huile combustible et joue le rôle de mèche ; on règle la flamme en recouvrant plus ou moins la surface du feutre au moyen d'une glissière à rouleaux.

On a renoncé à peu près complètement aujourd'hui, même pour les fours métallurgiques, à ces types d'appareils ; on les a remplacés par des brûleurs pulvérisateurs transformant le combustible liquide en un brouillard très fin que l'on enflamme et permettant une combustion parfaite et facile à régler, rappelant le mode d'utilisation des poussières de houille que nous venons d'étudier plus haut.

Ces brûleurs peuvent se diviser en trois catégories suivant la manière dont on produit la pulvérisation : les brûleurs à vapeur, les brûleurs à air soufflé et les brûleurs à pression.

I. Dans les appareils de la première classe, un jet de vapeur sortant d'une tuyère de forme convenable rencontre le jet de liquide et le réduit en poussière. Le plus souvent, les tuyères sont disposées de manière à obtenir deux jets annulaires concentriques.

¹ Voyez C. R., 68, 349, 485 et 686 et 69, 933.

Appareil Vétillard-Scherding. — Cet appareil, installé sur les locomotives express Compound de la compagnie de l'Est en vue de venir en aide au chauffage au charbon dans les cas où l'on a besoin d'une surproduction de vapeur (fig. 122), comprend deux éjecteurs superposés : le premier fonctionne au moyen de la vapeur qui arrive par le conduit A et, s'échappant par l'orifice annulaire entourant la tuyère B, aspire le pétrole qui pénètre par celle-ci. Le mélange de

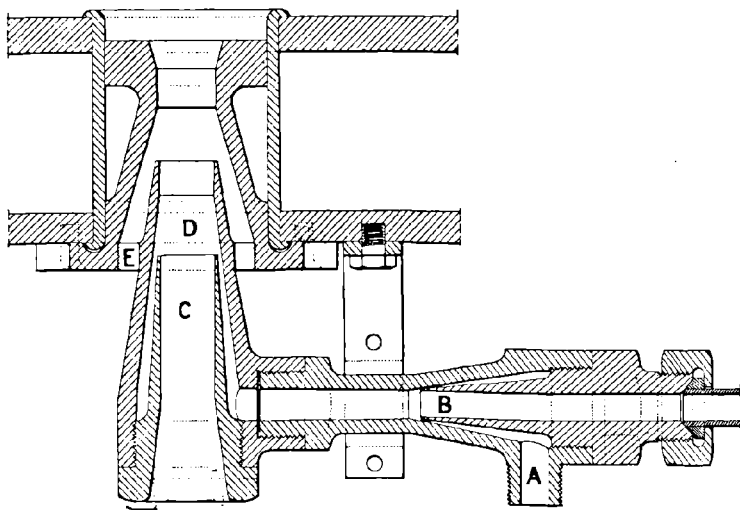


Fig. 122. — Appareil Vétillard-Scherding.

vapeur et de pétrole pulvérisé pénètre alors dans le second éjecteur D, aspirant par la tuyère C l'air qui servira à la combustion. Enfin une dernière pièce E entoure encore l'orifice D, de manière à aspirer une nouvelle quantité d'air par l'espace annulaire, de telle sorte que le pétrole pulvérisé pénètre dans le foyer complètement mélangé avec l'air nécessaire à sa combustion.

Appareil Urqhardt. — Cet appareil est employé sur les locomotives des chemins de fer Russes. Il fonctionne d'une manière très analogue au précédent, mais le pétrole pénètre par l'orifice annulaire du premier éjecteur (fig. 123), tandis que la vapeur arrive au centre par la tuyère à aiguille B. Celle-ci est d'ailleurs mobile dans le sens de son axe, de manière à régler le débit du jet. Le mélange pénètre dans le manchon L, aspirant latéralement l'air nécessaire à la combustion, et sort en passant sur une plaque M qui donne au jet la forme d'une nappe horizontale.

Les locomotives alimentées par ce brûleur étant chauffées exclusivement au pétrole, on a dû modifier la forme du foyer; le jet de flamme ne touche pas directement les parois de la chaudière; il pénètre au-dessous d'une voûte en briques réfractaires qu'il échauffe au rouge et qui sert de régulateur de chaleur, et son extrémité vient lécher la base d'un carneau réfractaire, par lequel l'air pénètre dans le foyer et se mélange aux gaz de la combustion; c'est ce

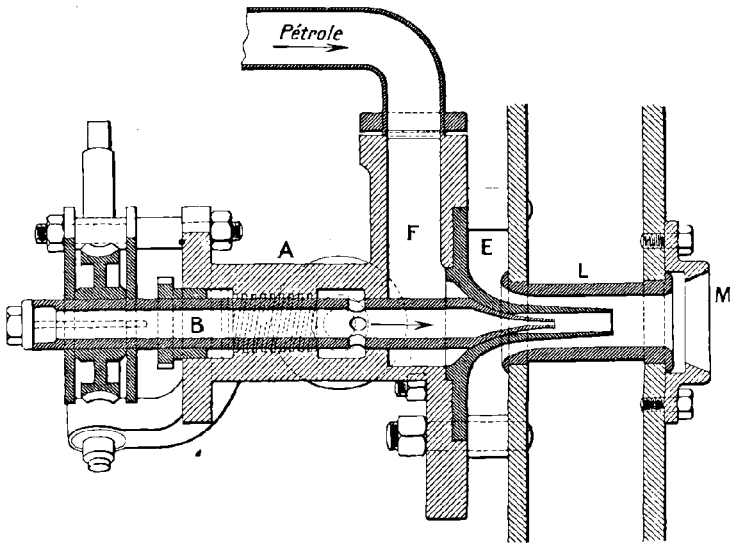


Fig. 123. — Brûleur Urqhardt.

mélange chaud qui circule à travers les tubes de fumée; des manchons en fonte traversant le carneau permettent à une partie des flammes de venir frapper directement le bas de la plaque tubulaire.

Le brûleur *Holden* se rapproche beaucoup du modèle précédent, sauf que la disposition en est renversée; c'est-à-dire que le jet de vapeur est extérieur et aspire un jet d'air intérieur à travers un jet intermédiaire d'huile pulvérisée. Ce brûleur est très employé pour le chauffage mixte des locomotives sur les compagnies anglaises, ainsi que sur les locomotives américaines du Great Eastern Railway, qui brûlent du goudron de bois avec un plein succès.

Brûleur d'Allest. — Ce brûleur (fig. 124) se compose d'une buse conique A dans laquelle le pétrole arrive par une tubulure inférieure B; cette buse est entourée d'une boîte M, venue de fonte avec

elle, et munie d'un orifice N servant à l'arrivée de la vapeur. La boîte M se termine par une tuyère P, fixée au moyen d'un filetage O, et faisant corps avec un pavillon R.

La vapeur s'échappant par l'orifice annulaire O pulvérise le pétrole qui sort de la tuyère centrale A et dont on règle l'écoulement au moyen du pointeau E que l'on peut faire avancer ou reculer à l'aide de la vis F commandée par un volant G. Le jet de vapeur peut également se régler en enfonçant plus ou moins la tuyère à vis P. Le jet pulvérisé traverse le pavillon R et aspire à son passage l'air qui servira à le brûler.

Pour l'allumage, il suffit d'ouvrir d'abord légèrement le robinet de vapeur, puis de présenter devant l'appareil un tampon imprégné de pétrole enflammé, et de tourner alors progressivement le volant G d'admission du pétrole. Le jet s'enflamme aussitôt, et l'on en gradue progressivement l'intensité en ouvrant de plus en plus les ouvertures de la vapeur et du pétrole, jusqu'au moment où les gaz sortant par la cheminée commencent à se colorer en noir. Normalement la zone

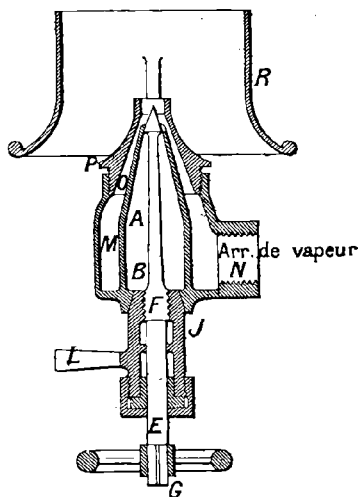


Fig. 124. — Brûleur d'Allest.

annulaire de la tuyère à pétrole présente une largeur de 1 à 2 millimètres. Chaque appareil brûle de 70 à 80 kilogrammes de pétrole par heure, ce qui, en admettant un pouvoir évaporatoire de 13 litres d'eau par kilogramme, conduit à 1 000 litres environ d'eau vaporisée. On peut placer plusieurs appareils côte à côte dans le même foyer en les réunissant par un tuyau commun de distribution de pétrole ; enfin quand on désire une puissance de chauffe encore plus énergique, par exemple pour les torpilleurs, on peut employer le modèle à *double lame de vapeur* dans lequel le jet de pétrole sort entre un jet central de vapeur et un jet annulaire, les deux jets se coupant de manière à amener une pulvérisation parfaite et un appel d'air énergique. Ce modèle peut brûler jusqu'à 400 kilogrammes par heure (Colomer et Lordier).

Brûleur Guyot. — Ce brûleur, qui est employé sur plusieurs

navires de la flotte française, est représenté par la figure 123. La vapeur, sous une pression de 2 à 3 atmosphères, pénètre par la tubulure H dans la tuyère B, et pulvérise le pétrole sortant de la buse A. Le réglage de la vapeur se fait au moyen de la vis E, agissant sur l'étrier F de façon à rapprocher ou à éloigner la tuyère B de la pièce A ; quant à l'écoulement du pétrole, on le règle au moyen d'un pointeau placé latéralement.

Dans d'autres modèles de brûleurs, les jets de vapeur et de

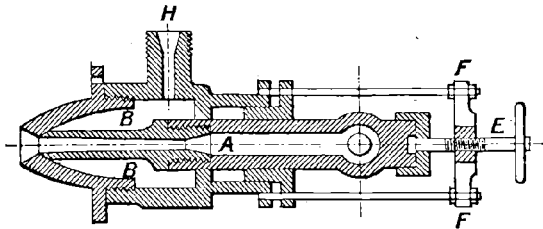


Fig. 123. — Brûleur Guyot.

liquide n'ont plus la forme annulaire. Dans le brûleur *Karapetof*, par exemple, employé sur les chemins de fer russes, le pétrole sort sous forme d'une lame liquide dont on peut modifier l'épaisseur à l'aide d'un tiroir, et la pulvérisation est effectuée par un jet de vapeur également aplati, rencontrant le premier sous une incidence d'environ 60°. L'air pénètre par aspiration entre les deux lames de pétrole et de vapeur.

Un dispositif analogue est employé dans le modèle américain *Best*, où le pétrole arrive sans pression à l'extrémité d'un siphon au-dessus duquel le jet de vapeur, soufflé par une fente horizontale, balaye et pulvérise complètement l'huile. Ce modèle présente l'avantage de ne pas s'encrasser et de ne presque jamais s'obstruer.

II. Dans une seconde catégorie de brûleurs, le jet de vapeur est remplacé par un jet d'air comprimé à 2/3 ou 1 atmosphère. L'avantage de cette substitution est d'abord une économie de vapeur qui dans certains cas est extrêmement importante, par exemple pour les chaudières marines : car avec les appareils à jet de vapeur la dépense atteint environ le 1/10 de la production totale (Colomer et Lordier). De plus, la température de la flamme obtenue avec les brûleurs à air soufflé est beaucoup plus élevée : aussi sont-ils les seuls employés dans les fours métallurgiques pour la fusion de l'acier,

par exemple. Leur pouvoir évaporatoire est aussi plus considérable et peut aller jusqu'à 16 kilogrammes, tandis qu'on ne peut dépasser 13 kilogrammes en employant la vapeur¹. L'air comprimé doit être réchauffé avant d'être envoyé dans les brûleurs : à cet effet il traverse un faisceau tubulaire parcouru par les gaz chauds du foyer.

On peut citer, parmi les différents modèles utilisés, l'*appareil Kermode*, dans lequel le mélange de l'air et du pétrole vaporisé est assuré par une hélice placée dans le tube central livrant passage au combustible liquide. Les brûleurs d'Allest précédemment décrits peuvent également fonctionner par de l'air comprimé à la pression de 2 à 3 kilogrammes ; mais il existe aussi pour cet usage un brûleur spécialement étudié, dans lequel tout l'air nécessaire à la combustion concourt à la pulvérisation, ce qui rend celle-ci meilleure et produit un mélange plus intime. Dans ce modèle, la lame de pétrole est divisée en quatre parties, afin d'augmenter son épaisseur ; et elle est comprise entre deux lames d'air, l'une extérieure, l'autre intérieure, comme dans le modèle à double lame de vapeur.

III. Enfin on peut produire la pulvérisation du pétrole sans agent auxiliaire, vapeur ou air comprimé : il suffit qu'il soit amené sous

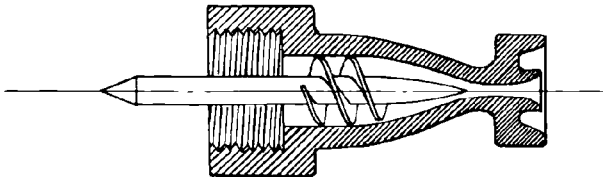


Fig. 126. — Brûleur Kœrting.

une pression suffisante (6 à 8 atmosphères) dans un ajutage de forme convenable qui lui imprime un rapide mouvement de rotation. Le jet obtenu se brise alors de lui-même au sortir de l'appareil sous l'action de la force centrifuge, et se réduit en gouttelettes très fines. Tel est le principe du *brûleur Kœrting* dont la figure ci-contre explique suffisamment le fonctionnement. L'avantage de ces appareils est de ne pas exiger de compresseur à air comme les précédents ; par contre, ils nécessitent un filtrage très soigné des huiles employées, car les orifices très réduits de la buse s'obstruent facilement. On a cherché à éviter cet inconvénient en disposant le brûleur de telle

¹ E. Butler, *Eng. Rev.*, 243 ; 1911.

sorte que la section de l'orifice d'échappement soit augmentée automatiquement en cas d'obstruction. C'est ainsi que fonctionne le brûleur américain *Automatic* figuré ci-contre. L'aiguille qui commande l'ouverture de l'appareil est reliée au pointeau de réglage *g* par l'intermédiaire d'un ressort à boudin *s*; si une obstruction vient à se produire dans l'orifice *z*, la pression de l'huile augmente et agit sur la partie *r* de la tige formant piston plongeur pour la rame-

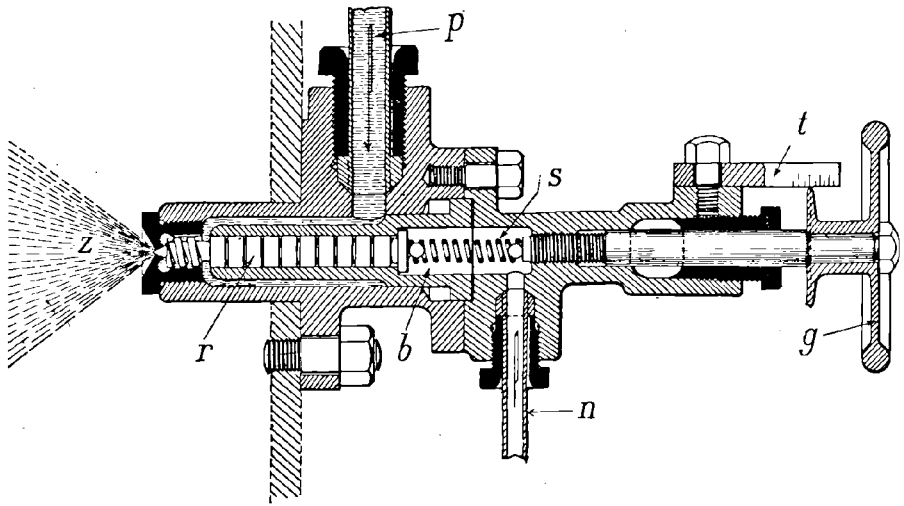


Fig. 127. — Brûleur « Automatic ».

ner en arrière et dégager l'orifice; après quoi l'appareil reprend grâce au ressort *s* sa position primitive.

Dans les appareils à pression, l'huile doit être au préalable chauffée à une température suffisante pour rendre son inflammation plus facile (vers 100° ou 125° environ). La pression est obtenue à l'aide d'une pompe dont le débit est réglé de manière à surpasser légèrement la consommation du brûleur; l'excès d'huile s'écoule par un pointeau de trop-plein et retourne au réservoir.

Avantages des combustibles liquides. — Créés au début spécialement pour le chauffage des chaudières, les pulvérisateurs à combustibles liquides sont maintenant employés dans toutes sortes de fours métallurgiques (fours à fusion de l'acier, fours à réchauffer, etc.¹). Nous avons déjà mentionné plus haut, à propos du pétrole (voyez

¹ Voyez *Rev. Métal.*, 7 bis, 694; 1910 et 8 bis, 882; 1911.

p. 382) les nombreux avantages des combustibles liquides. L'inconvénient que présentait le pétrole, le seul de ces combustibles dont on se servit jusqu'à ces dernières années, était la difficulté pour les pays éloignés des centres de production, tels que la France, l'Allemagne, l'Angleterre, de se le procurer dans des conditions suffisamment économiques pour l'industrie, et c'est ce qui explique qu'il ne fût employé en grand qu'en Russie ou en Amérique. Mais le goudron de houille, produit en quantité de plus en plus considérable grâce au développement des installations de fours à coke avec récupération, et dont le pouvoir calorifique est voisin de 9000 calories, se présente dès maintenant comme un combustible très intéressant, pouvant remplacer avantageusement le pétrole comme moyen de chauffage. Déjà en 1910 l'industrie allemande en consommait 300.000 tonnes, soit le $\frac{1}{3}$ à peu près de sa production¹ et il est à présumer que cette application se développera rapidement dans l'avenir.

LES BRULEURS A GAZ ET LES CHALUMEAUX

Les principes sur lesquels repose la construction des fours à gaz de grandes dimensions ayant été exposés dans la première partie de cet ouvrage, nous n'y reviendrons pas ici et nous nous bornerons à dire quelques mots des appareils destinés à produire dans un espace très petit une température très élevée : c'est-à-dire des brûleurs ou des chalumeaux.

Dans ces appareils, on cherche moins à produire une grande quantité de chaleur qu'une température très élevée en un point. On devra donc rechercher les conditions qui permettent d'obtenir le maximum de température, c'est-à-dire assurer le mélange intime du comburant et des combustibles avant l'inflammation.

Mais un pareil mélange gazeux constitue un mélange détonnant, dans lequel la combustion se propage avec une vitesse déterminée et souvent très grande. La difficulté consistera donc à empêcher les retours de flamme, c'est-à-dire la rentrée de la flamme dans les orifices d'introduction du mélange. Les conditions de la marche rationnelle des brûleurs découlent donc de l'étude de la propagation de la combustion dans les mélanges gazeux.

Cette étude est due principalement à MM. Mallard et Le Chatelier. Nous en rappellerons les conclusions principales :

¹ Voir *Le Gaz*, 53, 84; 1909; — Teichmann et W. Bross, *St. u. Eis.*, 31, 843, 1911; *Rev. Métal.*, 8 bis, 783; 1911.

La combustion ne peut se propager que si la composition du mélange gazeux est comprise entre deux limites dites limites d'inflammabilité.

La vitesse initiale de propagation de la flamme est bien déterminée ; elle croît d'abord à partir de la limite inférieure d'inflammabilité, passe par un maximum et décroît ensuite pour s'annuler à la limite supérieure : la vitesse maxima ne correspond pas exactement à la température maxima, c'est-à-dire à la composition assurant la combustion complète ; elle est déplacée un peu par rapport à celle-ci, du côté de celui des deux gaz qui possède la meilleure conductibilité pour la chaleur.

Ainsi pour les mélanges de formène et d'air, la vitesse maxima d'inflammation se produit pour le mélange à 12 p. 100 de formène, tandis que la combustion complète correspond à 9,1 p. 100 seulement du même gaz.

Voici quelques chiffres relatifs aux mélanges des principaux gaz combustibles avec l'air :

Hydrogène p. 100 en volume.	10	20	30	40	50	60	70
Vitesses en mètres-seconde.	0,6	1,95	3,30	4,37	3,45	2,30	1,10
Méthane p. 100	6	8	9	10	12	14	16
V	0,03	0,23	0,33	0,42	0,61	0,36	0,10
Acétylène p. 100.	2,9	5	7	9	15	22	40
V	0,1	2	4	6	3	0,4	0,22
Gaz d'éclairage	8	10	12	14	15	17	20
V	0,30	0,50	0,72	0,93	1,05	1,27	0,80

Les chiffres gras sont ceux qui se rapprochent le plus de la formule de combustion complète.

Quand on remplace l'air par l'oxygène pur on trouve des chiffres beaucoup plus élevés : 20 mètres par seconde pour le mélange oxyhydrique et 200 pour le mélange oxyacétylénique.

La vitesse de propagation de la flamme, pour un mélange donné enfermé dans un tube de diamètre donné, ne reste d'ailleurs constante que pendant quelques instants. Bientôt en général elle augmente progressivement, et dans certains cas elle peut acquérir une nouvelle valeur constante mais très élevée, résultant de la propagation de l'*onde explosive* dont les effets destructifs sont à redouter.

Enfin la vitesse initiale de propagation dépend du diamètre du tube. Pour un diamètre suffisamment faible, la flamme ne se propage plus ; la vitesse augmente ensuite avec le diamètre jusqu'à ce que

celui-ci ait pris environ cinq fois sa valeur minima : voici quelques chiffres relatifs au mélange d'hydrogène et d'air à 30 p. 100.

Diamètre du tube en millimètres	0,25	0,9	3,0	6,0	10,0
Vitesse de propagation en mètres par seconde.	0,0	1,72	2,50	3,25	3,50

Appliquons ces résultats à la construction des brûleurs :

Pour que la flamme se produise régulièrement à l'extrémité du brûleur, sans revenir en arrière, il faut que la vitesse de sortie du mélange gazeux soit supérieure à la vitesse de propagation de la flamme à l'intérieur du tube.

On peut donc empêcher les retours de flamme :

En augmentant la vitesse d'écoulement du mélange ;

En diminuant le diamètre de l'orifice ;

En diminuant la proportion de l'air dans le mélange. Cette solution est d'ailleurs la plus mauvaise puisqu'elle abaisse la température.

Le prototype des brûleurs à gaz est le brûleur Bunsen, trop connu pour qu'il soit nécessaire de le décrire. Le gaz, s'échappant par une tuyère centrale, aspire l'air par deux ouvertures latérales. Le mélange s'effectue dans un tube métallique vertical ou coudé, et est allumé à l'extrémité.

Appelons V la vitesse d'écoulement du gaz au sortir de l'ajutage central, v la vitesse du mélange avec l'air. Si nous appelons m et M les masses de gaz et d'air qui s'écoulent dans l'unité de temps, le théorème des quantités de mouvement donne immédiatement :

$$mV = (M + m) v.$$

Si l'on cherche à effectuer le mélange correspondant à la combustion complète, on doit prendre comme rapport des volumes de gaz et d'air $\frac{1}{5,25}$, soit comme rapport des masses environ $\frac{1}{13}$; et l'on a par suite :

$$\frac{v}{V} = \frac{m}{M + m} = \frac{1}{14}$$

Si l'on suppose la pression du gaz de 4 centimètres d'eau, on trouve, la densité du gaz d'éclairage étant les 4 dixièmes de celle de l'air, soit 0,00052 fois celle de l'eau :

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 981 \times \frac{4}{0,00052}} = 39 \text{ mètres.}$$

La vitesse de sortie du mélange à l'extrémité du bec serait donc de $\frac{39}{14} = 2,80$ m. environ, c'est-à-dire notablement supérieure à la vitesse maxima de propagation de la flamme, qui ne dépasse pas 1,20 m. La flamme ne devrait donc jamais rentrer dans le brûleur, contrairement à ce que l'on observe. Mais il faut tenir compte de ce que la vitesse calculée est celle des gaz chauds à l'extrémité du brûleur, dont le volume est environ 5 fois celui du mélange froid contenu dans le tube ; la vitesse de ce mélange ne sera donc que de $0^m,56$; c'est-à-dire que les retours de flamme se produiront fatalement¹.

Pour empêcher le bec de « brûler en dedans », on diminue l'accès de l'air à l'aide de la bague de réglage, de manière à diminuer la vitesse de propagation de la flamme, tout en augmentant la vitesse de sortie du mélange combustible.

Cette condition nécessaire du fonctionnement du brûleur Bunsen est évidemment défectueuse. De plus, le mélange d'air et de gaz n'est jamais parfait.

Au lieu de diminuer la proportion d'air, nous avons vu qu'on peut diminuer le diamètre du tube de sortie ; on y arrive en coiffant le brûleur d'une toile métallique qui agit comme une série de petits tubes rangés parallèlement. On peut ainsi augmenter sensiblement la teneur en air, et par suite la température. Cette solution avait été adoptée pour les brûleurs Auer.

On obtient un meilleur résultat en remplaçant la toile métallique par une double série de lames de nickel formant un quadrillage d'environ 2 millimètres de côté (*brûleurs Méker*). Ce dispositif assure un refroidissement très efficace. Aussi permet-il d'utiliser des mélanges correspondant à la composition théorique, et d'une homogénéité parfaite.

On augmente la température produite par les brûleurs en augmentant la quantité de gaz brûlé par seconde, pour un orifice donné. Il suffit pour cela d'augmenter la vitesse d'écoulement du mélange, et comme on ne peut pas commodément augmenter la vitesse d'écoulement de sortie du gaz, on introduit l'air sous pression. On réalise ainsi les brûleurs à air soufflé qui permettent d'atteindre la température de fusion du platine².

¹ Voir Mallard et Le Chatelier, *Ann. Min.*, (8), 4, 372 ; 1883.

² Dans certains cas cependant on préfère comprimer le gaz au préalable et employer l'air à la pression ordinaire : on évite de la sorte une double canalisation, ce qui est par-

Les brûleurs du type Bunsen ou analogues ne sont ordinairement utilisés que pour le chauffage des appareils de laboratoire. Cependant on a pu les employer avantageusement dans certains cas particuliers pour chauffer des enceintes d'assez grandes dimensions. C'est ainsi que la Société Méker construit des brûleurs à grand débit (fig. 128), spécialement destinés au chauffage des fours de boulangers, et qui ne diffèrent des brûleurs ordinaires que par leurs plus grandes dimen-

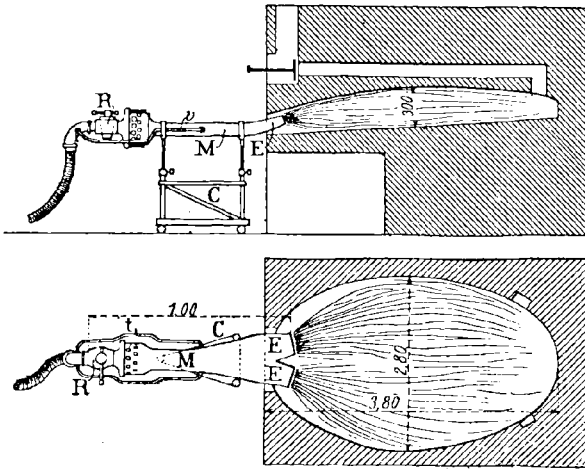


Fig. 128. — Brûleur Méker pour fours de boulangers.

sions. L'extrémité est divisée en deux orifices E, obturés chacun par un cloisonnage en nickel de 200×95 millimètres. Deux petits tubes latéraux servent à entretenir deux veilleuses destinées à assurer l'allumage sans explosion. L'appareil consomme de 20 à 28 mètres cubes de gaz à l'heure¹.

Chalumeaux. — Les chalumeaux destinés à la soudure autogène ne sont en somme que des brûleurs où l'air soufflé est remplacé par l'oxygène. Comme la vitesse d'inflammation des mélanges employés devient beaucoup plus élevée qu'avec l'air, on doit rechercher tout spécialement à éviter les retours de flamme qui pour-

ticulièrement avantageux pour l'éclairage. C'est ainsi par exemple que fonctionnent les brûleurs destinés à l'éclairage à l'incandescence du boulevard Raspail (lampe Grätzin au gaz surpressé). [Voyez *Gén. Civ.*, 58, 409; 1911].

¹ *Gén. Civ.*, 57, 197; 1910. — *Le Gaz*, 54, 111; 1910.

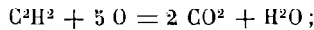
raient, surtout avec le mélange oxy-acétylénique, causer des accidents graves.

Dans beaucoup de modèles, on se contente d'amener les gaz par des tubes séparés, et de les mélanger très près de la sortie, de sorte que le volume occupé par le mélange explosif est insignifiant et l'explosion due au retour de flamme sans danger ; si cet accident se produit, on ferme le robinet d'oxygène.

Dans d'autres modèles, on s'oppose au retour de flamme en intercalant des toiles métalliques : ce dispositif peut convenir pour le mélange oxhydrique, mais il est insuffisant avec l'acétylène. Dans ce cas, on remplace la toile métallique par un diaphragme en terre poreuse.

Un autre dispositif consiste à intercaler sur le trajet du mélange une soupape hydraulique.

Réglage de la flamme. — Pour que les chalumeaux produisent leur maximum d'effet, il faudrait que le mélange gazeux corresponde aussi exactement que possible à la combustion complète ; mais pour les applications à la soudure autogène, on diminue notablement la proportion théorique d'oxygène, afin d'avoir autour de la flamme une atmosphère réductrice. Avec le chalumeau oxyacétylénique par exemple, on brûle le carbone sous forme d'oxyde de carbone et non d'acide carbonique comme le voudrait l'équation :



de même avec le gaz d'éclairage. On se guide pour effectuer le réglage nécessaire sur l'aspect de la flamme. On introduit d'abord le gaz combustible seul, ce qui produit une flamme éclairante ; on ouvre alors progressivement le robinet d'oxygène jusqu'à ce que la flamme devienne pâle, avec un dard central bleu, dont la longueur doit être de 8-10 millimètres avec le gaz d'éclairage et un peu plus faible avec l'acétylène. Le réglage de la flamme oxhydrique, qui est presque invisible, est beaucoup plus difficile : on se guide généralement sur les débits comparés des deux gaz, à l'aide de tableaux préparés à l'avance, de manière à introduire un excès convenable d'hydrogène.

Nous décrirons rapidement, en nous guidant sur l'ouvrage de M. Châtelain¹, quelques types de chalumeaux parmi les plus usités :

CHALUMEAUX EMPLOYANT L'HYDROGÈNE. — *Chalumeau « L'oxyhy-*

¹ Châtelain, *Sa soudure autogène* ; Paris, 1909.

drique ». — Ce chalumeau réalise le mélange préalable des deux gaz à l'aide d'un *mélangeur de sécurité*, caisse étanche à peu près complètement remplie d'eau froide. Les deux gaz sont introduits par deux tubes qui pénètrent dans l'eau, ils vont se réunir et se mélanger dans le petit espace ménagé à la partie supérieure, et de là se rendent par un tube unique au chalumeau. Le retour de flamme, s'il se produit, s'arrête au mélangeur.

La température obtenue peut être évaluée à 1 800-2 200°.

CHALUMEAUX A ACÉTYLÈNE. — *Chalumeau B R C.* — Les deux gaz arrivent par deux tubulures différentes et sont mélangés près de la sortie. En outre, l'acétylène doit traverser un cylindre rempli de terre poreuse empêchant les retours de flamme.

Le même chalumeau peut être également alimenté par de l'acéty-

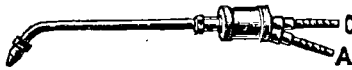


Fig. 129. — Chalumeau B R C.

lène sans pression, mais dans ce cas on le munit d'un injecteur à oxygène produisant l'appel du gaz combustible.

La température obtenue pratiquement à l'aide des chalumeaux oxyacétyléniques est d'environ 3 000°.

CHALUMEAUX A GAZ D'ÉCLAIRAGE. — Le gaz d'éclairage ne permet pas d'atteindre des températures aussi élevées que l'hydrogène ni surtout que l'acétylène; il ne donne guère plus de 1 650°, ce qui est insuffisant pour la soudure autogène du fer.

M. G. Claude a imaginé un dispositif très intéressant permettant avec le même mélange d'atteindre une température de 2 200-2 400°, c'est-à-dire supérieure à celle du chalumeau oxyhydrique. On arrive à ce résultat tout simplement en chauffant préalablement le mélange gazeux à l'aide d'une flamme auxiliaire.

Le *chalumeau chauffeur* de G. Claude comporte une poignée creuse dans laquelle s'effectue le mélange gazeux, l'oxygène arrivant par un tube placé suivant l'axe et terminé par une tuyère, l'hydrogène circulant autour de ce tube et se trouvant aspiré par le jet d'oxygène. Le mélange se complète dans une petite chambre cylindrique placée à la suite de la poignée, puis se rend à l'extrémité du chalumeau par un tube enroulé en serpentif, à 5 ou 6 spires. Un très

petit trou percé à la partie supérieure de la chambre de mélange livre passage à un mince jet de gaz que l'on enflamme et qui porte le serpent, et par suite les gaz qui y circulent, à une température d'environ 600°.

CHALUMEAU ODAM A COMBUSTIBLE LIQUIDE. — Les chalumeaux à acétylène ou à hydrogène exigent la préparation préalable du gaz, ou le transport d'un réservoir en plus de celui qui doit contenir l'oxygène. Le chalumeau Odam ne nécessite que ce dernier gaz, et emploie comme combustible un liquide carburé quelconque, essence, benzol ou alcool que l'on peut se procurer partout.

Ce liquide est placé dans un récipient clos dans lequel on comprime de l'air à 1 kilogramme ou 1 kilogramme 1/2 au moyen d'une petite pompe à main, de manière à l'envoyer dans le chalumeau par

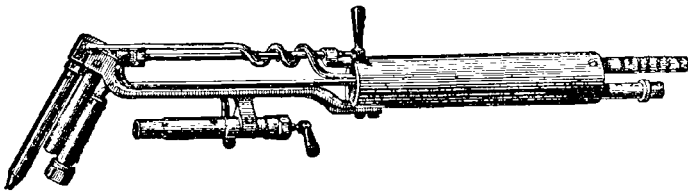


Fig. 130. — Chalumeau Odam à combustible liquide.

l'intermédiaire d'un tube souple. Il est ainsi conduit successivement dans un tube vaporisateur, dans une chambre de vapeur annulaire, enfin dans une chambre de mélange où il est entraîné par un jet d'oxygène débouchant d'un orifice étroit, dans un orifice formant Giffard qui conduit le mélange gazeux jusqu'à la sortie.

Le chauffage du tube vaporisateur est assuré par une prise de gaz faite dans la chambre de vapeur, et alimentant un brûleur où l'air sert de comburant. Un robinet règle l'arrivée du liquide dans le chalumeau et dans le brûleur.

Chalumeaux à couper. — On sait que le fer brûle dans l'oxygène pur en se transformant en oxyde magnétique fusible à cette température.

On a fondé sur cette propriété un intéressant procédé de coupage des tôles et pièces de fer. Les premiers essais ont été faits en chauffant un point de la tôle au rouge blanc avec le chalumeau oxyhydrique, puis fermant le robinet d'hydrogène et augmentant le débit de l'oxygène. Mais si le réglage n'était pas très bien fait, la température tom-

bait et l'opération s'arrêtait ; on a alors imaginé le dispositif actuel qui comprend deux chalumeaux : un chalumeau ordinaire servant à chauffer la pièce, et un jet d'oxygène pur qui vient frapper le point chauffé et produit la coupure. L'appareil peut être déplacé à la main ou au moyen d'un support articulé. La coupure produite est aussi nette qu'à la scie. La largeur de voie n'est que de 2 millimètres pour une tôle de 15 millimètres, et de 3 millimètres pour une tôle de 100 millimètres.

La vitesse de coupe dans le premier cas est de 20 centimètres par minute, avec une dépense de 540 litres d'hydrogène et 450 litres d'oxygène par mètre courant.

Nous donnons ci-contre le dessin d'un chalumeau coupeur, le

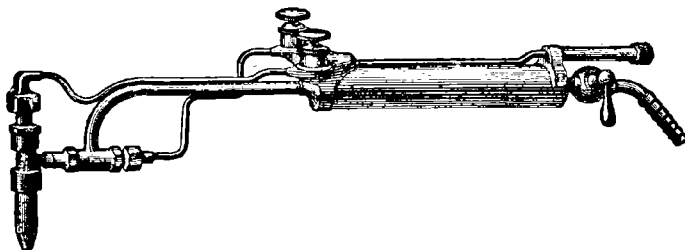


Fig. 131. — Chalumeau coupeur Pyrocopt.

Pyrocopt de M. A. Le Chatelier, dans lequel le jet chauffant sort par un espace annulaire, ayant pour centre le jet coupant.

Le *chalumeau oxydestructor* à essence est analogue au chalumeau ordinaire Odam ; il n'en diffère que par une seconde arrivée d'oxygène pour le coupage.

ÉVREUX, IMPRIMERIE CH. HÉRISSEY, PAUL HÉRISSEY, SUCC^r
